

**DISEÑO, SELECCIÓN Y MONTAJE DEL CIRCUITO HIDRÁULICO DE
INYECCIÓN DE SALMUERA PARA LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD
ABSOLUTA, BASADO EN LA NORMA API RP 40 PARA EL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL INSTITUTO
COLOMBIANO DEL PETRÓLEO**

JOSE LUIS SANDOVAL VILLAMIZAR

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2.009

**DISEÑO, SELECCIÓN Y MONTAJE DEL CIRCUITO HIDRÁULICO DE
INYECCIÓN DE SALMUERA PARA LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD
ABSOLUTA, BASADO EN LA NORMA API RP 40 PARA EL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL INSTITUTO
COLOMBIANO DEL PETRÓLEO**

JOSE LUIS SANDOVAL VILLAMIZAR

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director

Dr. Carlos Borrás Pinilla

Ing. Mecánico

Codirector

Jenny Mabel Carvajal Jiménez

Ingeniera de Petróleos

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
BUCARAMANGA**

2.009

A la memoria de mi gran amigo Henry Leandro Prada Suarez, con quien aprendí el valor de la amistad y el dolor de un adiós.

A mis padres Luis Isidro y Rosa, mis hermanas y mi hermano quienes me apoyaron incondicionalmente en el calor del hogar a lo largo de esta etapa de mi vida.

A la persona que a lo largo de una importante etapa de este tiempo llenó mi vida de luz, siendo la mano amiga, el abrazo sincero y el beso romántico que dejó una huella imborrable en mi alma y corazón.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO	4
1.1 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	4
1.1.1. Objetivos Generales.....	4
1.1.2. Objetivos Específicos	4
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.2.1. Identificación del Problema	5
1.2.2 Justificación Para Solucionar El Problema	7
2. MARCO TEORICO.....	8
2.1. POROSIDAD	8
2.2. LA PERMEABILIDAD	9
2.2.1. Permeabilidad Absoluta	9
2.2.2. Permeabilidad Efectiva.....	10
2.2.3. Permeabilidad Relativa	10
2.3. LEY DE DARCY`	11
2.4. UNIDADES DE MEDIDA	12
2.4.1. Unidades Tradicionales.....	13

2.4.2.	Sistema Internacional SI	13
2.5	CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA LEY DE DARCY	14
2.5.1.	Resistencia Inercial De Forchheimer.....	14
2.5.2.	Deslizamiento De Gas De Klinkenberg	14
2.5.3.	Esfuerzos De Confinamiento.....	15
2.5.4.	Condiciones para la Aplicación de la Ley de Darcy.....	16
2.6	ECUACIONES DE PERMEABILIDAD EN ESTADO ESTACIONARIO PARA LÍQUIDOS.....	17
2.6.1.	Flujo Horizontal.....	18
2.6.2.	Flujo Vertical	18
2.6.3.	Flujo Vertical Hacia Abajo:	19
2.6.4.	Flujo Vertical Hacia Arriba.....	20
2.7.	ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD.....	22
2.7.1.	Transmisor De Presión Diferencial.....	22
2.7.2	Bomba ISCO A 100 DM	24
2.7.3	Sistema de pruebas mecánicas para rocas y concretos (MTS)	26
2.7.4.	Válvulas Vindum Engineering CV (CV-210; CV-310).....	27
2.7.5.	ACCESORIOS SWAGELOK.....	30
3.	PRUEBA.....	31

3.1.	GENERALIDADES	31
3.2.	EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN NECESARIOS.....	32
3.3.	DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN PRESIÓN DE CONFINAMIENTO Y CARGA AXIAL	33
3.4.	PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LA PROBETA	35
3.5.	PROCEDIMIENTO TÉCNICO DEL ENSAYO.....	36
3.6.	PROCEDIMIENTO PARA CÁLCULOS.....	37
3.7.	REPORTE DE RESULTADOS	38
3.8.	MODELO FÍSICO DE LA PRUEBA	38
4.	DISEÑO Y SELECCIÓN.....	40
4.1.	ALTERNATIVAS DE DISEÑO HIDRAULICO	40
4.1.1.	Modelo Hidráulico I.....	41
4.1.2.	Modelo Hidráulico II.....	44
4.1.3.	Modelo Hidráulico III.....	46
4.1.4.	Modelo Hidráulico IV	47
4.2.	DISEÑO HIDRAULICO A IMPLEMENTAR.....	48
4.2.1.	Elementos Implementados En El Diseño Seleccionado.....	52
4.3.	DISEÑO ESTRUCTURAL.....	58
4.3.1.	Diseño Estructural I	58
4.3.2.	Diseño Estructural II	59
4.3.3.	Diseño Estructural III	60

4.3.4.	Diseño Seleccionado.....	61
4.3.5.	Montaje de las Válvulas	62
4.3.6.	Elementos Provisionales Diseñados y Construidos	63
4.4.	MONTAJE DE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA.....	67
4.4.1	Montaje de Válvulas Hidráulicas	67
4.4.2.	Montaje de Manifold Neumático	68
4.4.3.	Montaje de los Medidores de Presión Diferencial	70
4.4.4.	Interconexión válvulas sensores de presión diferencial	72
4.4.5.	Montaje de control electrónico	73
5.	PRUEBAS	79
5.1.	PRUEBAS HIDRÁULICAS.....	79
5.2.	PRUEBAS PRELIMINARES PARA MEDIR LA PRESION DIFERENCIAL	82
5.3.	PRUEBAS DE PERMEABILIDAD.....	85
5.3.1	Propiedades De La Muestra a Ensayar.....	85
5.3.2.	Análisis de resultados	87
	CONCLUSIONES	108
	BIBLIOGRAFÍA.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Flujo De Líquido Hacia Abajo Con Cabezal De Manejo.....	20
Figura 2 Flujo De Líquido Hacia Arriba Con Cabezal De Manejo.	20
Figura 3 Medición De Flujo De Líquido Hacia Arriba Con Diferencial De Presión Inducido.	21
Figura 4 Transmisor De Presión Diferencial SMAR LD – 301.....	22
Figura 5 Célula Capacitiva	23
Figura 6 Bomba ISCO 100 DM – DX	25
Figura 7 MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems	26
Figura 8 Válvulas Serie CV Vindum Engineering.....	28
Figura 9 Manifold Neumático	29
Figura 10 Grafica Teórica Permeabilidad Vs Volumen Poroso.....	31
Figura 11 Grafica Real Permeabilidad Vs Volumen Poroso	32
Figura 12 Modelo Físico De La Prueba De Permeabilidad Absoluta	39
Figura 13 Esquema Valvula De Cinco Vías	42
Figura 14 Esquema Válvula De Dos Vías.....	43
Figura 15 Válvula Con Actuator BuTech.....	43
Figura 16 Esquema Diseño I.....	44
Figura 17 Válvulas Vindum Engineering Con Actuadores Neumáticos.....	45
Figura 18 Esquema Diseño II.....	45

Figura 19 Esquema Diseño III.....	47
Figura 20 Esquema Diseño IV	48
Figura 21 Diseño Neumático De Control	51
Figura 22 Diseño Hidráulico.....	53
Figura 23 Diseño Hidráulico Conectado A Bomba ISCO 100 DM-DX .	54
Figura 24 Diseño Estructural I.....	58
Figura 25 Diseño Estructural II.....	59
Figura 26 Diseño Estructural III.....	60
Figura 27 Diseño Estructural Seleccionado	61
Figura 28 Montaje de las Válvulas	62
Figura 29 Detalles Estructura Provisional	63
Figura 30 Detalles Férulas Provisionales.....	65
Figura 31 Comportamiento Férulas Provisionales	66
Figura 32 Férula Provisional Deformada	66
Figura 33 Montaje de Válvulas Hidráulicas	68
Figura 34 Montaje de Manifold Neumático	69
Figura 35 Configuración de válvulas Vindum Engineering.....	69
Figura 36 Montaje De Los Medidores De Presión Diferencial	71
Figura 37 Detalles Montaje De Los Medidores De Presión Diferencial.....	71
Figura 38 Detalles Accesorios Implementados	72

Figura 39 Conexión Tubing - Válvulas	73
Figura 40 Fuente de Poder	74
Figura 41 Controlador Programable.....	74
Figura 42 Modulo Digital De Salida.....	75
Figura 43 Modulo Análogo De Entrada	76
Figura 44 Modulo De Montaje Electrónico	76
Figura 45 Esquema De Montaje Sistema De Control Electrónico.....	77
Figura 46 Montaje Real Sistema De Control OPTO 22.....	78
Figura 47 Válvulas De Entrada De Presión Al Banco De Permeabilidad	81
Figura 48 Válvula Reguladora De Presión Para Pruebas	82
Figura 49 Comportamiento De La Presión Diferencial Vs Vol. Porosos	90
Figura 50 Comportamiento De La Permeabilidad Vs Volúmenes Porosos	92
Figura 51 Desplazamiento De Salmuera Vs Tiempo De Ensayo.....	94
Figura 52 Permeabilidad Absoluta con Caudal $Q = 17,5$ ml/min.....	96
Figura 53 Permeabilidad Absoluta con Caudal $Q = 15$ ml/min.....	98
Figura 54 Permeabilidad Absoluta con Caudal $Q = 12,5$ ml/min.....	100
Figura 55 Permeabilidad Absoluta con Caudal $Q = 10$ ml/min.....	102
Figura 56 Permeabilidad Absoluta con Caudal $Q = 7,5$ ml/min.....	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Rangos de Presión de Trabajo	23
Tabla 2 Elementos Principales Diseño I	42
Tabla 3 Elementos Principales Diseño II	45
Tabla 4 Comparación Diseños Propuestos.....	50
Tabla 5 Secuencia de Funcionamiento.....	56
Tabla 6 Presiones De Prueba Hidrostática	80
Tabla 7 Propiedades Petrofísicas Básicas De La Muestra	85
Tabla 8 Descripción De Datos Por Grupo.....	87
Tabla 9 Datos Obtenidos Del Equipo de Medicion de Presion Diferencial....	87
Tabla 10 Registro de Datos organizados por grupo.....	88
Tabla 11 Estado de Esfuerzos in Situ	106
Tabla 12 Valores de Permeabilidad	106

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DE EQUIPO PARA LA MEDICION DE LA PRESION DIFERENCIAL.....	112
ANEXO B. PROCEDIMIENTO TECNICO DE OPERACIÓN, BANCO DE MEDICIÓN DE PRESIÓN DIFERENCIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA.	165
ANEXO C. PLANOS	191

CONTENIDO ANEXO A

	Pág.
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	113
1.1. ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD.....	114
1.1.1. Transmisor De Presión Diferencial.....	114
1.1.2. Bomba ISCO A 100 DM	118
1.1.3. Válvulas Vindum Enginnering CV (CV-210; CV-310).....	126
1.1.3. ACCESORIOS SWAGELOK.....	129
1.1.4. Sistema de pruebas mecánicas para rocas y concretos (MTS) 130	
1.1.5. Elementos Implementados En El Diseño Seleccionado.....	135
1.2. MONTAJE DE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA.....	141
1.2.1. Diseño Seleccionado.....	141
1.2.2. Montaje de las Válvulas	142
1.2.3. Elementos Provisionales Diseñados y Construidos	142
1.3. MONTAJE DE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA.....	147
1.3.1. Montaje de Válvulas Hidráulicas	147
1.3.2. Montaje de Manifold Neumático	148

1.3.3.	Montaje de los Medidores de Presión Diferencial	150
1.3.4.	Interconexión válvulas sensores de presión diferencial	151
1.3.5.	Montaje de control electrónico	153
1.	MANTENIMIENTO DE DEL BANCO DE MEDICION DE PRESION DIFERENCIAL	158
2.1.	CLASES DE MANTENIMIENTO.....	158
2.1.1.	Mantenimiento Preventivo.....	158
2.1.2.	Mantenimiento Correctivo	159
2.1.3.	Mantenimiento Predictivo	159
2.2.	ACTIVIDADES EN EL MANTENIMIENTO.....	159
2.2.1.	Inspección	159
2.2.2.	Limpieza.....	160
2.2.3.	Calibración	160
2.3.	PROTOCOLO DE INSPECCION Y MANTENIMIENTO PREVENTIVO	160
	BIBLIOGRAFÍA.....	164

LISTA DE FIGURAS ANEXO A

Figura 1 Banco de medición de presión diferencial	113
Figura 2 Transmisor De Presión Diferencial SMAR LD – 301.....	115
Figura 3 Célula Capacitiva	116
Figura 4 diagrama de bloques de funcionamiento del transmisor SMAR ..	118
Figura 5 Bomba ISCO 100 DM – DX	119
Figura 6 Panel Trasero Del Controlador	122
Figura 7 Especificaciones Panel Trasero Del Controlador.....	122
Figura 8 panel frontal bomba ISCO	124
Figura 9 Panel Trasero Bomba ISCO	125
Figura 10 Válvulas Serie CV Vindum Engineering.....	126
Figura 11 Manifold Neumático	128
Figura 12 Accesorios Swagelok.....	129
Figura 13 MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems	130
Figura 14 Módulo De Ensayos Del Equipo MTS 815.....	131
Figura 15 Vista Frontal Del Sistema De Medición De Presión Diferencial .	132
Figura 21 Diseño Neumático De Control	133
Figura 16 DISEÑO NEUMÁTICO.....	133
Figura 18 Diseño Hidráulico.....	136
Figura 19 Diseño Hidráulico Conectado A Bomba ISCO 100 DM-DX	137

Figura 20	Diseño Estructural Seleccionado	141
Figura 21	Montaje de las Válvulas	142
Figura 22	Detalles Estructura Provisional	143
Figura 23	Detalles Férulas Provisionales.....	144
Figura 24	Comportamiento Férulas Provisionales	145
Figura 25	Férula Provisional Deformada	145
Figura 26	Montaje de Válvulas Hidráulicas	147
Figura 27	Montaje de Manifold Neumático	148
Figura 28	Configuración de válvulas Vindum Engineering.....	149
Figura 29	Montaje De Los Medidores De Presión Diferencial	150
Figura 30	Detalles Montaje De Los Medidores De Presión Diferencial.....	151
Figura 31	Detalles Accesorios Implementados	152
Figura 32	Conexión Tubing - Válvulas	153
Figura 33	Fuente de Poder	153
Figura 34	Controlador Programable.....	154
Figura 35	Modulo Digital De Salida.....	154
Figura 36	Modulo Análogo De Entrada	155
Figura 37	Modulo De Montaje Electrónico	156
Figura 38	Esquema De Montaje Sistema De Control Electrónico.....	156
Figura 39	Montaje Real Sistema De Control OPTO 22.....	157

LISTA DE TABLAS ANEXO A

Tabla 1 Rangos de Presión de Trabajo	115
Tabla 2 especificaciones técnicas bomba ISCO	119
Tabla 3 Panel Frontal Controlador De Bomba	121
Tabla 4 Especificaciones Panel Frontal Controlador	121
Tabla 5 Especificaciones Panel Frontal Bomba.....	124
Tabla 6 Especificaciones Panel Trasero Bomba ISCO.....	125
Tabla 7 Secuencia de Funcionamiento	139

RESUMEN

TITULO: DISEÑO, SELECCIÓN Y MONTAJE DEL CIRCUITO HIDRÁULICO DE INYECCIÓN DE SALMUERA PARA LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA, BASADO EN LA NORMA API RP 40 PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS DEL INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETRÓLEO

AUTOR:

JOSE LUIS SANDOVAL VILLAMIZAR

PALABRAS CLAVE:

Permeabilidad, ensayo, Darcy, diseño

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto surge por la necesidad de diseñar y poner en marcha un sistema automático para la realización de los ensayos de permeabilidad absoluta en el Laboratorio de Mecánica de rocas del Instituto Colombiano del Petróleo, por medio de elementos especiales para el registro de los diferenciales de presión y al control secuencial de estos sensores acorde al rango que cada uno de ellos maneja.

El banco de medición de la presión diferencial cuenta con válvulas de dos etapas que funcionan a volumen constante de la empresa Vindum Engineering encargadas de la conmutación de los transmisores de presión, la primera etapa controla un sistema neumático accionado por válvulas solenoides y la segunda etapa es la encargada de la conmutación de los transmisores de presión diferencial la programación de la secuencia la realiza el software Opto-22 que también registra los datos de manera grafica en tiempo real y da como resultado final un archivo .dat para el posterior análisis, el sistema cuenta con capacidad de registrar 3600 psi de presión diferencial, 6500 psi manométricos en la carcasa de los transmisores y 10000 psi manométricos como máxima presión de inyección de salmuera con 2200 ppt a un caudal máximo de 25 ml/min.

Para establecer la permeabilidad se analizan diferentes puntos definidos por el caudal presente hasta la estabilización del valor promedio de la permeabilidad al pasar una cantidad de volumen especifica, para el buen manejo y estandarización de los procesos se implementa un manual de operación de equipo y un procedimiento técnico de operación que establece paso a paso el desarrollo de la prueba de permeabilidad absoluta basada en la norma API RP 40.

* Tesis de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica

. Dr. Carlos Borrás Pinilla

ABSTRACT

TITLE: DESIGN, SELECTION AND INSTALLATION OF HYDRAULIC CIRCUIT OF INJECTION OF BRINE FOR PROOF OF ABSOLUTE PERMEABILITY, BASED ON STANDARD API RP 40 FOR THE LABORATORY FOR THE MECHANICS OF ROCK OF COLOMBIAN INSTITUTE OF PETROLEUM*

AUTHOR:

JOSE LUIS SANDOVAL VILLAMIZAR**

KEY WORDS:

Permeability test, Darcy, design

DESCRIPTION

This research has started for the needs to design and develop an automatic System for the application of absolute Permeability test in the Rock Mechanics Lab at Colombian Institute of petroleum, through specific tools for the measure of the differential pressure and sequential control of these **sensors** according to the range each one can measure.

The equipment for the differential pressure measurement has valves in to stage whose work at Constant Volume created by Vindum Engineering Company in charge of the exchange of the differential pressure transmitters, the first stage controls a pneumatic system which is started with solenoids valves and the second stage is in charge of exchanging differential pressure transmitter process. The computer process is realized with Opto 22 Software and it calculates the dates at real time, giving as final result a file .dat for the next analysis, the system has the capacity to achieve a maximum differential pressure of 3600 psi, 6500 manometric psi in the transmitter casing and 10000 manometric psi as maximum pressure pump of brine with 2200 ppm and a maximum rate of 25 ml/min.

To establish the permeability, we analyze different points defined by this flow to stabilize the value of the permeability to spend a specified amount of volume for good management and standardization of processes is implemented by a manual operation of equipment and a technical process of operation that provides step by step development of the proof of absolute permeability based on the standard API RP 40.

* Undergraduated thesis

** Faculty of Physiomechanical Engineerings , School of Mechanical Engineering . Dr. Carlos Borrás Pinilla

INTRODUCCIÓN

En la investigación de aplicaciones para yacimientos petroleros la caracterización físico-mecánica del terreno tiene una gran importancia debido a que con esta información se determina la viabilidad para la explotación del pozo. Una de estas propiedades físico mecánicas es la permeabilidad absoluta, la cual podemos establecer por medio del conocimiento de las características del flujo que atraviesa la roca longitudinalmente sin alterar su estructura interna.

Para determinar esta propiedad, el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano Del Petróleo realiza ensayos no destructivos acorde a la norma API RP 40, usando equipos especializados de alta precisión que registran diferentes niveles de presión, estos medidores no están acoplados para realizar un registro continuo durante el transcurso de la prueba, por esta razón se hacen necesarias interrupciones continuas para realizar el cambio de medidor de forma manual, causando problemas técnicos y riesgos para los operarios debido a los valores de presión con los que se trabajan durante el procedimiento técnico.

Estableciendo, Una vez terminada la etapa de registro de presión la necesidad de tabular los resultados. Este proceso se realiza manualmente por medio del personal del Laboratorio de Mecánica de Rocas, quienes presentan el resultado final mediante una grafica de permeabilidad (k) contra volumen poroso.

Por la naturaleza de la prueba, la cantidad de datos obtenidos es numerosa lo que conlleva a un incremento en el tiempo de análisis y puede afectar la precisión por la manipulación de los datos.

Sintetizando los problemas fundamentales a atacar por medio de este proyecto podemos concluir que son:

- ✓ Manipulación de los transmisores de presión durante el transcurso de la prueba.
- ✓ Presentación de picos de presión debido al cambio de transmisor de presión diferencial.
- ✓ Reducir el tiempo de análisis de los datos obtenidos por los transmisores de presión, presentando graficas de permeabilidad contra Volumen poroso en tiempo real.

El objetivo principal del proyecto es diseñar y poner en marcha un sistema automático para la realización de los ensayos de permeabilidad en el Laboratorio de Mecánica de rocas del Instituto Colombiano del Petróleo, por medio de elementos especiales para el registro de los diferenciales de presión y al control secuencial de estos sensores acorde al rango que cada uno de ellos maneja. Se propondrá una solución para hacer esta prueba más eficiente al momento de obtener y analizar los datos.

La implementación de este proyecto garantizará el desarrollo continuo de la prueba durante el tiempo y la cantidad de puntos de registro que se necesiten conocer, estableciendo cada punto con la variación del caudal de salmuera inyectado en la probeta. Sistematizando y avalando los resultados, reduciendo los costos de operación, la exposición de los operarios y el tiempo de análisis de los datos obtenidos, consolidando al Instituto Colombiano del Petróleo y a la Universidad Industrial de Santander como fuentes de mejoramiento en tecnologías y conocimientos aplicados, fortaleciendo las relaciones universidad-industria ratificando de esta manera la misión institucional de ambas entidades y a la interdisciplinariedad del estudiante UIS, dado a que el proyecto se realiza en conjunto con un estudiante de Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander.

Este documento se encuentra dividido en cinco capítulos, como se muestra a continuación:

El primer capítulo enmarca el proyecto, se identifica el problema y se justifica su solución planteando los objetivos y la metodología para la realización del diseño y construcción del equipo.

El segundo capítulo, presenta el marco teórico que enmarca el estudio de la norma API RP 40 y la aplicación de dicha norma.

El tercer capítulo presenta como realizar y analizar la prueba de permeabilidad absoluta dando a conocer los elementos utilizados y el principio de funcionamiento de cada uno.

El cuarto capítulo contiene el proceso evolutivo del diseño y detalles del montaje realizado.

El quinto y último capítulo, describe las pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos.

Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones por parte del autor, una vez finalizado el proyecto se entrega al laboratorio de mecánica de rocas un manual de operación de equipo y un procedimiento técnico de operación con el cual se estandarizan los procesos que involucran el desarrollo de una prueba de permeabilidad absoluta.

1. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.1.1. Objetivos Generales

Continuar con la misión de la Universidad de aplicar y adaptar conocimientos dando soluciones a la industria mediante el diseño, selección y montaje del circuito hidráulico de inyección de salmuera para la prueba de permeabilidad absoluta, que realiza el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo con base en la norma API RP 40.

1.1.2. Objetivos Específicos

- ✓ Estudiar e implementar la norma API RP 40 en el ensayo de permeabilidad absoluta que realiza el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo.
- ✓ Diseñar un circuito hidráulico de inyección de salmuera para la medición de la presión diferencial con la cual se determina la permeabilidad absoluta en probetas extraídas de corazones de perforación.
- ✓ Seleccionar, adquirir y montar los componentes del sistema de control direccional y de presión hidráulica para la realización la prueba de permeabilidad absoluta.
- ✓ Entregar al laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo un banco de pruebas para la determinación de la permeabilidad absoluta hidráulicamente funcional, cumpliendo con las normas técnicas establecidas donde la automatización de este proyecto

es un proyecto paralelo realizado por un estudiante de la escuela de Ingeniería Electrónica.

- ✓ Realizar pruebas preliminares de acuerdo a la norma API RP 40 para validar los resultados y el funcionamiento del banco de pruebas las cuales son:
 - Pruebas hidrostáticas
 - Pruebas hidrodinámicas
- ✓ Analizar los datos obtenidos y elaborar graficas que permitan determinar el comportamiento de la permeabilidad como función de la presión diferencial contra el volumen poroso de la probeta ensayada.
- ✓ Elaborar un manual de procedimientos para garantizar y normalizar las actividades a realizar para el desarrollo del ensayo.
- ✓ Elaborar e implementar un protocolo de mantenimiento, para garantizar la confiabilidad y funcionalidad del banco en las pruebas realizadas.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Identificación del Problema

En la investigación de aplicaciones para yacimientos petroleros la caracterización físico-mecánica del terreno tiene una gran importancia debido a que con esta información se determina la viabilidad para la explotación del pozo. Una de estas propiedades físico mecánicas es la permeabilidad, la cual podemos establecer por medio del conocimiento de las características del flujo que atraviesa la roca longitudinalmente sin alterar su estructura interna.

Para determinar esta propiedad, el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano del Petróleo realiza ensayos no destructivos acorde a la norma API RP 40, usando equipos especializados de alta precisión que registran diferentes niveles de presión, estos medidores no están acoplados para realizar un registro continuo durante el transcurso de la prueba, por esta razón se hacen necesarias interrupciones continuas, para realizar el cambio de medidor de forma manual, causando problemas técnicos y riesgos para los operarios debido a los valores de presión con los que se trabajan durante el procedimiento técnico.

Estableciendo, una vez terminada la etapa de registro de presión la necesidad de tabular los resultados. Este proceso se realiza manualmente por medio del personal del laboratorio de mecánica de rocas, quienes presentan el resultado final mediante una grafica de permeabilidad (k) contra volumen poroso.

Por la naturaleza de la prueba, la cantidad de datos obtenidos es numerosa lo que conlleva a un incremento en el tiempo de análisis y puede afectar la precisión por la manipulación de los datos.

Sintetizando los problemas fundamentales a atacar por medio de este proyecto podemos concluir que son:

- Manipulación de los transmisores de presión durante el transcurso de la prueba
- Reducir el tiempo de análisis de los datos obtenidos por los transmisores de presión, presentando graficas de permeabilidad contra Volumen poroso en tiempo real.

1.2.2 Justificación Para Solucionar El Problema

Con la implementación de este proyecto se diseñará y se pondrá en marcha un sistema automático para la realización de los ensayos de permeabilidad en el Laboratorio De Mecánica De rocas del Instituto Colombiano del Petróleo, por medio de elementos especiales para el registro de los diferenciales de presión y al control secuencial de estos sensores acorde al rango que cada uno de ellos maneja. Se propondrá una solución para hacer esta prueba más eficiente al momento de obtener y analizar los datos.

El proyecto garantizará el desarrollo continuo de la prueba durante el tiempo y la cantidad de puntos de registro que se necesiten conocer, estableciendo cada punto con la variación del caudal de salmuera inyectado en la probeta. Sistematizando y avalando los resultados, reduciendo los costos de operación, la exposición de los operarios y el tiempo de análisis de los datos obtenidos, consolidando al Instituto Colombiano del Petróleo y a la Universidad Industrial de Santander como fuentes de mejoramiento en tecnologías y conocimientos aplicados, fortaleciendo las relaciones universidad-industria ratificando de esta manera la misión institucional de ambas entidades y a la interdisciplinariedad del estudiante UIS, dado a que el proyecto se realiza en conjunto con un estudiante de Ingeniería Electrónica de la Universidad Industrial de Santander.

2. MARCO TEORICO

Para la determinación de propiedades en rocas extraídas de corazones de pozos petroleros se hace necesario implementar ensayos que podemos agrupar en ensayos destructivos y no destructivos, este último grupo consta de una serie de pruebas en las que podemos ubicar el ensayo para determinar la permeabilidad por medio de correlaciones de variables medibles como lo son las medidas geométricas de la probeta, viscosidad del líquido que atraviesa la muestra, y presión diferencial.

La presión diferencial es la única variable a medir en el transcurso de la prueba dado a que las otras variables toman valores constantes una vez establecidas las características geométricas de la probeta y el fluido que la recorrerá longitudinalmente.

La permeabilidad y la porosidad son los parámetros litológicos más importantes al momento de definir la posibilidad de extraer fluidos de un medio poroso.

2.1. POROSIDAD

Es el volumen de espacios vacíos presentes en la roca, y define la posibilidad de ésta de almacenar más o menos cantidad de fluido. Se expresa por el porcentaje de volumen de poros respecto al volumen total de la roca (porosidad total o bruta).

Además de esta porosidad total, se define como porosidad útil la correspondiente a huecos interconectados, es decir, el volumen de huecos susceptibles de ser ocupados por fluidos. Este concepto de porosidad útil

está directamente relacionado con el de permeabilidad. La diferencia entre porosidad total y porosidad útil expresa el agua (o fluido en general) inmobilizado dentro de la roca, y recibe la denominación de "agua irreductible" de la roca.

La porosidad útil es, en general, inferior en un 20-50% a la total, dependiendo, sobre todo, del tamaño de grano de la roca de manera que cuanto menor sea este tamaño de grano más baja será la porosidad útil respecto a la total, la porosidad también es afectada por la forma de los granos haciendo que se amplíen o reduzcan los espacios intergranulares.

2.2. LA PERMEABILIDAD

Representa la facilidad con la que un medio poroso en este caso una roca extraída de una formación permite a un fluido de viscosidad dada atravesarla sin afectar su estructura interna.

La norma API RP – 40 establece diferentes tipos de permeabilidad de la siguiente manera

2.2.1. Permeabilidad Absoluta

Es la permeabilidad que se obtiene cuando el fluido usado en el ensayo es homogéneo y no produce ninguna acción importante sobre la roca, pero si en la roca existen varios fluidos, como es el caso de un yacimiento petrolífero, en el que podemos tener petróleo, agua y gas, se producen interferencias entre ellos que dan origen a permeabilidades efectivas para cada uno de los fluidos diferentes de sus permeabilidades absolutas. El valor de la permeabilidad absoluta normalmente es independiente del tipo de fluido, ya que la permeabilidad no cambia mucho para cada tipo de líquido, pero

cuando se realizan pruebas con gas, es necesario implementar la corrección de deslizamiento de Klinkenberg para obtener permeabilidades independientes al gas usado en el ensayo, debido a que si no se implementa ésta ecuación, cada gas va a tener una reacción diferente sobre el medio poroso, obteniendo diversas permeabilidades para cada gas.

2.2.2. Permeabilidad Efectiva

Se define como la expresión de la propiedad de una roca o formación de ser atravesada por ese fluido en presencia de uno o varios otros fluidos. Depende por un lado de las características de la roca, y por otro, de las proporciones o porcentajes respectivos de los distintos fluidos presentes.

2.2.3. Permeabilidad Relativa

Corresponde a la relación entre permeabilidad absoluta y efectiva. Para un fluido dado, varía en función directa con la saturación de ese fluido en la roca, y se expresa en tanto por uno de movilidad de un fluido respecto a otro.

En un sistema agua-crudo, la permeabilidad relativa del crudo es máxima, y muy próxima a 1, cuando la saturación del crudo es máxima (100 a 70-80%), y es mínima, mientras que la del agua se hace máxima, para baja saturación en crudo.

La permeabilidad relativa del crudo decrece rápidamente con la disminución de la saturación en éste, pero la del agua permanece muy baja o nula hasta saturación en agua del orden del 45%. A partir de ese momento, crece muy rápidamente hasta alcanzar el valor 1 para una saturación del 100%.

En términos de producción, esto se traduce en que en un yacimiento petrolífero con bajo contenido inicial en agua, se podrá extraer petróleo sin

agua; al ir aumentando el grado de extracción, al alcanzar una saturación en crudo del orden del 50-55%, se extraerá una mezcla de crudo y agua, en la que la proporción de la segunda irá aumentando progresivamente, hasta un valor de saturación en agua del 80-90%, momento en que solamente se extraerá agua.

En definitiva, la permeabilidad condiciona el ritmo de extracción, así como los límites reales de la zona del campo que es posible explotar, lo que explica su importancia en el estudio de los almacenes de hidrocarburos.

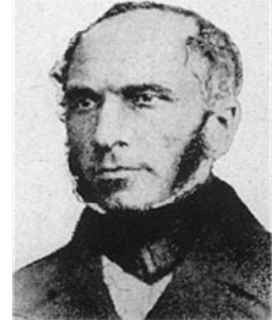
2.3. LEY DE DARCY

En 1856 en la ciudad francesa de Dijon el ingeniero Henry Darcy fue encargado del estudio de la red de abastecimiento a la ciudad, al parecer también se le encomendó la tarea de diseñar filtros de arena para purificar el agua, de ahí nació el interés por los factores que influían en el flujo del agua a través de los materiales porosos y presentó el resultado de sus trabajos como un apéndice a su informe de la red de distribución, ese apéndice ha sido la base de todos los estudios físico – matemáticos posteriores sobre el flujo en medios porosos, ahora conocido como la ley de Darcy. Brevemente la ley de Darcy establece que la tasa volumétrica de flujo por unidad de área transversal de medio permeable (el flujo volumétrico) es directamente proporcional al gradiente de presión, e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido, el coeficiente de proporcionalidad en esta relación es la permeabilidad. O de otra manera el gradiente de presión requerido por un flujo Stokes¹ es equivalente al producto de la viscosidad del fluido y al flujo volumétrico, dividido por la permeabilidad de la roca.

¹ *Flujo Stokes es un tipo de flujo de fluidos, donde las fuerzas inerciales son pequeños en comparación con las fuerzas viscosas. El número de Reynolds es bajo, es decir. Esta es una situación típica en las*

La norma API RP 40 establece la ley de Darcy para determinar la permeabilidad absoluta de la siguiente manera:

$$* K = \frac{C_2 q \mu L}{C_1 A \Delta p} \quad \text{Ley de Darcy} \quad (1)$$



Henry Philibert Gaspard Darcy
(1803 – 1858)

*Tomado de la Norma STD.API / PETRO RP 40 – ENGL 1998

Donde:

C_1, C_2 Son constantes de proporcionalidad.

q = Flujo a través de la sección transversal de la muestra

K = permeabilidad

μ = viscosidad

Δp = gradiente de presión del fluido en la dirección del movimiento,

Este parámetro depende, fundamentalmente, del tamaño medio y de la forma de los granos que constituyen la roca.

2.4. UNIDADES DE MEDIDA

corrientes donde el líquido fluye con velocidades muy lentas, la viscosidad es muy grande, o las escalas de longitud de la corriente son muy pequeñas.

2.4.1. Unidades Tradicionales

La unidad Darcy es la unidad de medida tradicional y se define para un medio poroso cuando un fluido de una sola fase y un centipoise de viscosidad llena completamente los espacios del medio a través del cual fluiría bajo condiciones de flujo Stokes a una tasa de 1cm³/s por centímetro cuadrado de sección transversal sometida a un diferencial de presión de 1 atm/cm.

$$K = \frac{C_2 q \mu L}{C_1 A \Delta p} \text{ Se presentan los resultados en milidarcy cuando}$$

C_1 = constante de proporcionalidad equivalente a 9.8046E-2

C_2 = constante de proporcionalidad equivalente a 1000

$$q = \text{Flujo en } \frac{cm^3}{s}$$

K = permeabilidad en *milidarcy*

μ = viscosidad en *centipoise*

Δp = gradiente de presión del fluido en la dirección del movimiento en *psi*.

2.4.2. Sistema Internacional SI

La unidad fundamental de la permeabilidad en este sistema es m² y establece que por un metro cuadrado pasará un flujo de 1 m³/s con 1 Pa.s de viscosidad, donde un Darcy equivale a 0.986923x10⁻¹² m², debido a que es un valor tan pequeño al sociedad de ingenieros de petróleos adscritos a la AIME (The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers) prefieren usar medidas de micrómetros cuadrados o miliDarcy la cual equivale a 0.986923 μm².

2.5 CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA LEY DE DARCY

2.5.1. Resistencia Inercial De Forchheimer

PHILIPP FORCHHEIMER Ingeniero Austriaco (Viena 1852 – 1933), uno de los más importantes contribuyentes al estudio de la hidrología subterránea durante los últimos años del siglo XIX y principios del siglo XX. Mostró que muchas de las técnicas estándar de la física matemática se podría aplicar a los problemas de las aguas subterráneas de circulación, el establecimiento de este tema en una firme base científica en los que se destaca el análisis de la ley de *Darcy*, estableciendo que solamente era válida para algunos casos, en donde el flujo volumétrico a través de la roca es muy lento; ya que cuando la roca experimenta un flujo volumétrico rápido, es necesario incluir a la ecuación de Darcy un coeficiente de resistividad inercial (β) causado por el rozamiento entre el fluido y las partículas de la roca. En un campo petrolero, especialmente lejos del pozo de producción o inyección, los flujos volumétricos son tan lentos que la ley de *Darcy* se puede aplicar, pero entre más cerca se esté de éstos pozos, la ley de *Darcy* no es tan aplicable y se hace necesario utilizar el factor β para obtener resultados mucho más acordes con la realidad.

2.5.2. Deslizamiento De Gas De Klinkenberg

Cuando se utiliza Gas para realizar las pruebas de permeabilidad, es necesario tener en cuenta un fenómeno llamado “Deslizamiento de Gas” (“Gas Slippage”), el cual obedece al deslizamiento de partículas de gas en las paredes de los caminos porosos de la roca, obteniendo una permeabilidad sobre estimada en comparación a la adquirida con líquidos.

Por ésta razón, Klinkenberg propuso por primera vez una correlación para ajustar éste valor hacia el valor real usando la siguiente relación:

$$k_g = k_\infty \left[1 + \frac{b}{P} \right] \quad (2)$$

Donde

k_g Permeabilidad aparente del gas con el que se realiza la medición

k_∞ Permeabilidad absoluta (hallada con líquido)

P Presión media en la muestra y

b Factor de deslizamiento del gas.

La implementación de líquidos en la determinación de la permeabilidad, elimina éste fenómeno, ya que las partículas de los líquidos son más compactas y viscosas, lo cual impide el deslizamiento de las mismas con las paredes internas del medio poroso, pero por otro lado éstos ensayos requieren una muestra totalmente seca y limpia antes de saturarla con el líquido seleccionado (normalmente soluciones acuosas), además muy pocas pruebas se pueden realizar con el mismo núcleo, ya que el fluido a elevadas presiones puede interferir en la porosidad de la roca, desmoronando la misma al paso de cada ensayo.

2.5.3. Esfuerzos De Confinamiento

La permeabilidad de un medio poroso es sensible a la magnitud de la red de esfuerzos de compresión a las que el medio está sujeto y a los que fue sometido a lo largo del tiempo, hasta limitar el estado de esfuerzos en la roca disminuyendo la permeabilidad, el decrecimiento observado cuando los esfuerzos de confinamiento son incrementados de 200 o 300 psi a varios

miles de psi esta dado por un pequeño porcentaje en muestras consolidadas, en muestras que presentan micro fracturas el porcentaje es mayor, es conveniente realizar las pruebas de laboratorio con una presión de confinamiento cercana a los esfuerzos in situ para de esta manera obtener valores de permeabilidad acordes a la realidad.

2.5.4. Condiciones para la Aplicación de la Ley de Darcy

Para que se cumpla la ley de Darcy se tienen que cumplir una serie de condiciones:

- El flujo debe ser estable
- Fluido incompresible
- El fluido debe saturar el 100% del medio poroso
- El flujo debe ser monofásico al momento de saturar y atravesar la muestra
- Sistema de fluido homogéneo en todas sus propiedades
- Se debe garantizar un Flujo laminar ($Re < 1$) en todo el tiempo en que se desarrolle la prueba

$$Re = 100 * \frac{d * v * \rho}{\mu} \quad (3)$$

Donde:

Re = numero de Reynolds

d = diámetro medio de grano (cm)

v = velocidad intersticial, $Q/(A * \text{Porosidad})$, (cm/s)

ρ = Densidad del fluido (g/cc)

2.6 ECUACIONES DE PERMEABILIDAD EN ESTADO ESTACIONARIO PARA LÍQUIDOS

A diferencia de los gases, los líquidos son menos compresibles, poseen una elevada densidad y mantienen una viscosidad significativamente mayor, lo cual establece ciertos cambios para la medición de la permeabilidad, ya que no es necesario realizar las correcciones por resistencia inercial de Forchheimer (Densidades y viscosidades altas, representan flujos volumétricos lentos para diferenciales de presión iguales a los utilizados en las mediciones de gas con flujos volumétricos elevados) y el factor de Kinklenberg (Utilizado para corregir las mediciones realizadas con gases) a la ecuación de Darcy para encontrar la permeabilidad de un medio poroso, pero por las mismas propiedades intrínsecas en los líquidos, es necesario tener en cuenta el efecto causado por la gravedad en los análisis correspondientes para ensayos verticales.

En el momento de preparar la probeta se debe garantizar que el líquido monofásico esta presente en el 100% del volumen poroso de la muestra de tal manera que impida el desprendimiento de granos internos cuando se alcancen diferenciales de presión muy altos, también se hace necesario conocer las posibles reacciones químicas entre el líquido y el tipo de roca a medir, para impedir mediciones erróneas de la permeabilidad.

A continuación se muestra el efecto de la gravedad incluido en la ecuación de *Darcy*.

$$v_s = \frac{q}{A} = \frac{-C_1 k}{C_2 \mu} \cdot \left(\frac{dp}{ds} - \frac{pg}{C_4} \cdot \frac{dz}{ds} \right) \quad (4)$$

Donde:

s = distancia a lo largo de la dirección del flujo.

v_s = Flujo volumétrico (Volumen de flujo a través de una unidad de área del medio poroso por unidad de tiempo).

z = Coordenada vertical (incrementa hacia abajo).

ρ = Densidad del líquido.

$\frac{dp}{ds}$ = Gradiente de presión a lo largo de s .

μ = Viscosidad del líquido.

k = Permeabilidad del medio poroso.

q = rata de flujo volumétrico.

A = Área transversal a las líneas de flujo.

C_1 , C_2 y C_3 son constantes para corregir unidades.

2.6.1. Flujo Horizontal

Para un flujo horizontal se tiene que para la ecuación general, dz/ds es igual a cero, por lo tanto integrando ésta ecuación respecto s , obtenemos la permeabilidad en la siguiente ecuación.

$$k = \frac{C_2 \cdot q \mu}{C_1 \cdot G_f \cdot (p_1 - p_2)} \quad (5)$$

Donde G_f es un factor geométrico con unidades de distancia, el cual se define más adelante.

2.6.2. Flujo Vertical

Existen dos casos particulares cuando se realizan mediciones con flujo vertical, y se refieren a utilizar el flujo hacia arriba de la muestra o hacia

abajo, obteniendo de la ecuación general, dz/ds igual a -1 ó $+1$ respectivamente.

2.6.3. Flujo Vertical Hacia Abajo:

Cuando se presenta una columna de agua sobre la muestra induciendo una presión y un flujo que atraviesa la muestra.

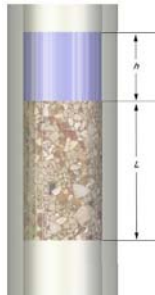
$$k = \frac{C_2 C_4 q \mu L}{C_1 A \rho g \cdot (h + L)} \quad (6)$$

Donde

L largo de la muestra

h cabezal de manejo en la prueba, ver figura 2.

Figura 1 Flujo De Líquido Hacia Abajo Con Cabezal De Manejo.



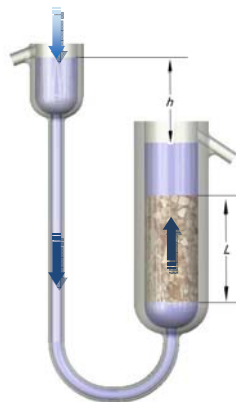
se usa cuando la muestra posee una alta permeabilidad y no se hace necesario una diferencia de presión significativa para hacer fluir un líquido a través de ella.

2.6.4. Flujo Vertical Hacia Arriba

Con un flujo hacia arriba es necesario definir el cabezal del manejo como se muestra en la figura 3, para obtener la siguiente ecuación.

$$k = \frac{C_2 C_4 q \mu L}{C_1 A \rho g h} \quad (7)$$

Figura 2 Flujo De Líquido Hacia Arriba Con Cabezal De Manejo.

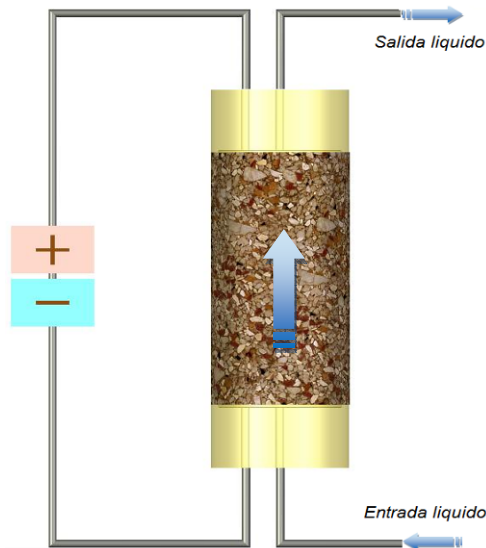


Finalmente cuando se alcanza un diferencial de presión invariante en el tiempo, se puede implementar la ecuación abajo referenciada para realizar

los cálculos de permeabilidad, éste arreglo se muestra en la figura 4, en donde a diferencia de las mediciones anteriores, se utiliza un diferencial de presión inducido en un sistema hidráulico. Por medio de ésta ecuación se realizan los cálculos de permeabilidad en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, utilizando la instrumentación adecuada para establecer el diferencial de presión y medir los datos necesarios para encontrar la permeabilidad de un medio poroso.

$$k = \frac{C_2 q \mu L}{C_1 A \Delta p} \quad (8)$$

Figura 3 Medición De Flujo De Líquido Hacia Arriba Con Diferencial De Presión Inducido.



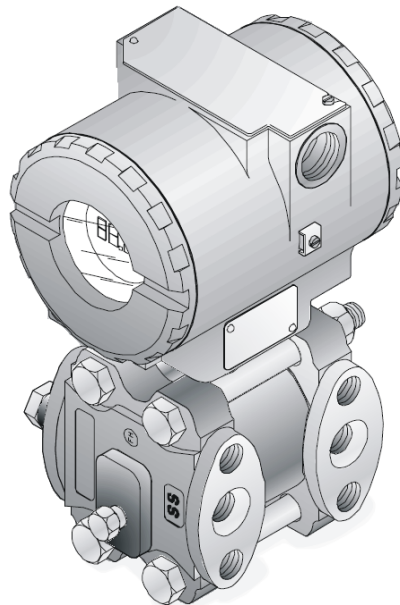
Este es el modelo implementado en el Laboratorio De Mecanica De Rocas realizando la fijacion y la inyeccion del fluido de una manera controlada simulando las condiciones de la formacion.

2.7. ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD

2.7.1. Transmisor De Presión Diferencial

El LD301 Es un transmisor de presión inteligente para la medición diferencial, manométrica y absoluta de presión, nivel y flujo. El transmisor se basa en un sensor con diafragma capacitivo el cual transforma la presión señales eléctricas, ofrecen un funcionamiento seguro y de alto rendimiento. La tecnología digital permite seleccionar varios tipos de funciones de transferencia, una fácil interfaz entre el campo y la sala de control y algunas características que reducen notablemente los costos de instalación, operación y mantenimiento.

Figura 4 Transmisor De Presión Diferencial SMAR LD – 301



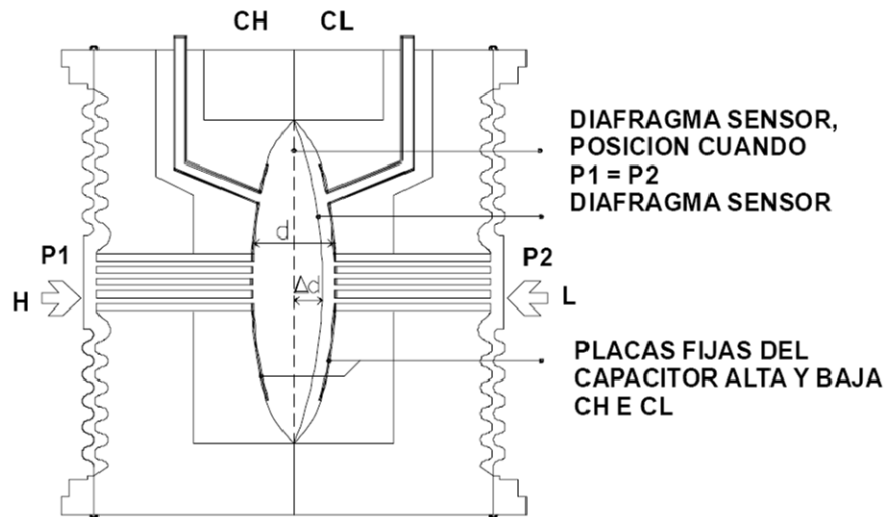
Fuente: Manual De Instrucciones Y Operación SMAR LD – 301

El laboratorio de mecanica de rocas implementa para esta prueba cuatro medidores LD301 los cuales registran un rango de presion a corde a la siguiente tabla

Tabla 1 Rangos de Presión de Trabajo

TRANSMISOR DE PRESIÓN SMAR	RANGO
H2	0-7 psi
H3	0-36 psi
H4	0-360 psi
H5	0-3600

Figura 5 Célula Capacitiva



Fuente:

Manual De Instrucciones Y Operación SMAR LD – 301

En la figura 5 se representa el funcionamiento del sensor de presión diferencial y sus principales elementos de la siguiente manera>

P1 y P2 son las presiones en las cámaras H y L

CH Capacitancia entre la placa fija en el lado P1 y el diafragma sensor.

CL Capacitancia entre la placa fija en el lado P2 y el diafragma sensor.

d Distancia entre las placas fijas CH y CL.

Δd Deflexión del diafragma sensor debida a la presión diferencial DP
= P1 – P2

2.7.2 Bomba ISCO A 100 DM

El equipo A100DM está compuesto de dos módulos de bomba A100 para garantizar un flujo continuo usando un paquete de válvulas neumáticas que controla la conmutación de las dos bombas entregando un flujo sin pulsos por un tiempo ilimitado operando a presión o flujo constante.

Esta construida con elementos de alta calidad con capacidad de manejar líquidos acuosos, orgánicos, soluciones corrosivas, líquidos calientes, gases licuados, fluidos con alto grado de viscosidad y de manera opcional se construye con materiales especiales como Hastelloy C-276

Modos de comunicación o interfaz

- ✓ Interfaz serie RS232
- ✓ Entradas analógicas de voltaje
- ✓ Entradas y salidas digitales

Figura 6 Bomba ISCO 100 DM – DX



Fuente: D-Series Pumps Installation and Operation Guide

Aplicaciones

- ✓ La medición y la dispensación en experimentos piloto y plantas donde se manipulen elementos explosivos.
- ✓ Adición de fluidos con alta precisión para investigación y procesos de fabricación.
- ✓ Suministro de reactantes en el desarrollo de procesos químicos, desarrollo de catalizadores y plásticos.
- ✓ Medición exacta de gases licuados.

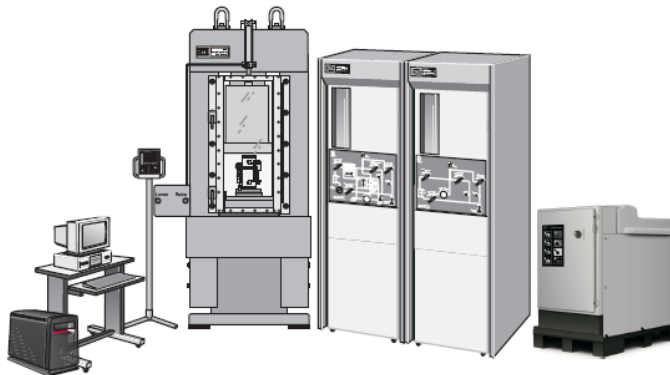
Aprobada para trabajar con los siguientes fluidos:

- ✓ Etano
- ✓ Butano
- ✓ Gasóleo
- ✓ Isopropanol
- ✓ Benceno
- ✓ Ethelyne
- ✓ Butadieno
- ✓ Combustible Para Aviones
- ✓ Acetona
- ✓ Etilbenceno
- ✓ Propano
- ✓ Hexano
- ✓ Amoníaco
- ✓ Acetonitrilo
- ✓ Propileno
- ✓ Gasolina
- ✓ Metanol

2.7.3 Heptanoistema de pruebas mecánicas para rocas y concretos (MTS)

El Modelo 815 es un sistema multipropósito para ensayos en rocas y concretos lo cual provee al laboratorio una amplia gama de pruebas en un sistema modular, compacto y confiable. Este sistema puede ser configurado para pruebas de tensión o compresión uniaxial, triaxiales, directa o modo de prueba de cizalla.

Figura 7 MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems



Fuente: Manual MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems

Gracias a la modularidad del sistema se pueden realizar una amplia gama de pruebas con una inversión mínima de equipos. Es ideal para ensayos en rocas y materiales de diferentes composiciones en materiales quebradizos

El modelo 815 incluye el sistema de pruebas de carga junto con una serie de módulos para su correcto funcionamiento en los que se encuentra un controlador FlexTest, un computador personal, un sistema de alimentación auxiliar en caso de un corte de energía repentino y una unidad potencia hidráulica suministrar.

2.7.4. Válvulas Vindum Engineering CV (CV-210; CV-310)

Las válvulas para alta presión CV de la empresa Vindum Engineering están disponibles en dos configuraciones; 2 posiciones como válvulas on-off o válvulas de 3 vías 4 posiciones, ambas son accionadas de manera neumática y cuentan con un tiempo de activación inferior a 0,1 segundo, implementada por su aplicabilidad a este proyecto dado a que está diseñada de manera que no desplaza el fluido cuando se abre o se cierra, esto le permite mantener presiones y volúmenes constantes durante el cambio de ciclo.

Las válvulas CV de la empresa Vindum Engineering se fabrican en dos materiales; acero inoxidable 316 resistente a la corrosión o Hastelloy C-276, que se utiliza en aplicaciones con sustancias altamente corrosivas, en este caso salmuera.

Figura 8 Válvulas Serie CV Vindum Engineering



Fuente: Manual MTS CV Series High-Pressure Valves

Principales Materiales De Sello O-Ring

Las válvulas cuentan con O-Ring hechos de los siguientes materiales:

- ✓ Aflas: es el nombre comercial de un fluoroelastómero basado en un copolímero alternativo de tetrafluoroetileno y polipropileno («TFE/P»), sus propiedades principales se centran en poseer una excelente resistencia al calor con capacidad de servicio continuo hasta 230°C, quimiorresistencia, incluyendo resistencia a ácidos y bases fuertes, alta resistividad eléctrica, y excelente resistencia a aceites.
- ✓ Buna: También conocido como estireno-butadieno, o SBR por sus siglas en inglés (Styrene-Butadiene-Rubber), es un copolímero elastómero sintético de gran resistencia al calor y rozamiento.
- ✓ Teflón: El fluoropolímero cuenta con una excepcional resistencia a las altas temperaturas, la reacción química, la corrosión, grietas y el estrés. Las propiedades de Teflon lo convierten en el preferido de plástico para una serie de aplicaciones industriales y las diferentes técnicas de procesamiento.

- ✓ UHMW: Ultra high molecular weight polyethylene (polietileno de ultra alto peso molecular 1000) Apropriado para elementos de roce. Es el plástico de mejor resistencia a la abrasión. Indicado para guías y recubrimientos antidesgaste, rodillos, tornillos alimentadores, etc.
- ✓ Viton: El fluoroelastómero Viton es el más utilizado y destaca por su excelente resistencia al calor (400°F/200°C), a los combustibles y a los químicos agresivos. Además está certificado mundialmente por ISO 9000 e ISO/TS 16949.

Rangos de Presión

Las válvulas CV de la empresa Vindum Engineering cuentan con un rango de presión de 5000 psi, 10000 psi, 20000psi, dependiendo de las necesidades del cliente, para este proyecto se hace necesario implementar las válvulas con capacidad de trabajo hasta 10000psi debido a que esta es la presión máxima obtenida de la bomba.

Válvula Piloto Accionada por Solenoide

El piloto de las válvulas es operado de manera neumática con presiones de 80 a 120 psi y controlado por una válvula solenoide que funciona 12 VDC ó 24 VDC, para esta aplicación se usa la configuración de 12 VDC voltios.

Figura 9 Manifold Neumático



En el manifold neumático cada una de las válvulas solenoide cuenta con una luz que se enciende al momento de ser activada cambiando el flujo de aire presurizado que pasa de estar en el puerto B al puerto A.

2.7.5. ACCESORIOS SWAGELOK



Fuente: manual accesorios Swagelok

Swagelok provee accesorios para tubing en acero inoxidable al igual que los elementos apropiados para manipularlos y adaptarlos a la necesidad que se presenta en el transcurso del proyecto, los accesorios y herramientas más usados son:

- ✓ Te
- ✓ Racores
- ✓ Férulas
- ✓ Contra férulas
- ✓ Tubing
- ✓ Válvula de paso
- ✓ Corta tubing
- ✓ Dobla tubing

3. PRUEBA

3.1. GENERALIDADES

La prueba de permeabilidad que se Realiza en el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo, tiene como fin establecer la permeabilidad absoluta de una muestra extraída de corazones de perforación con dimensiones establecidas por la norma ASTM 4543-08 por medio de los valores de presión diferencial que se presentan al atravesar la muestra con un fluido a alta presión gracias al trabajo realizado por una bomba de desplazamiento positivo, el tiempo que dura la prueba está determinado por la formación a analizar y el diseño que se haga por parte del personal de laboratorio teniendo en cuenta una serie de parámetros y propiedades, debido a que la prueba se realiza hasta alcanzar una uniformidad en los valores de la presión diferencial, se considera que la presión diferencial es estable cuando oscila en 5% sobre un valor constante de presión el tiempo necesario para que por la muestra pase el flujo equivalente a 10 veces el volumen poroso de la muestra, definiendo volumen poroso como el volumen equivalente a los espacios presentes en la probeta.

Figura 10 Grafica Teórica Permeabilidad Vs Volumen Poroso

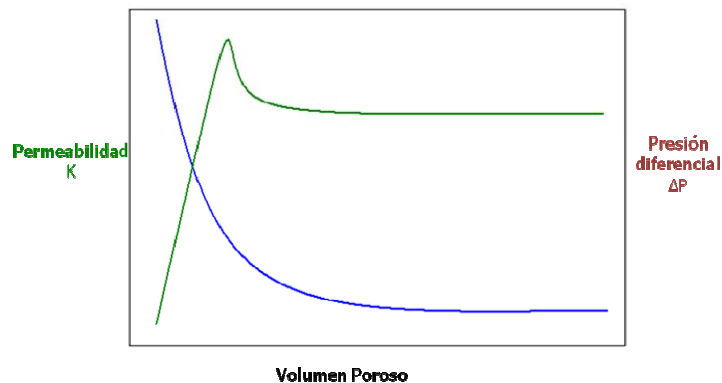
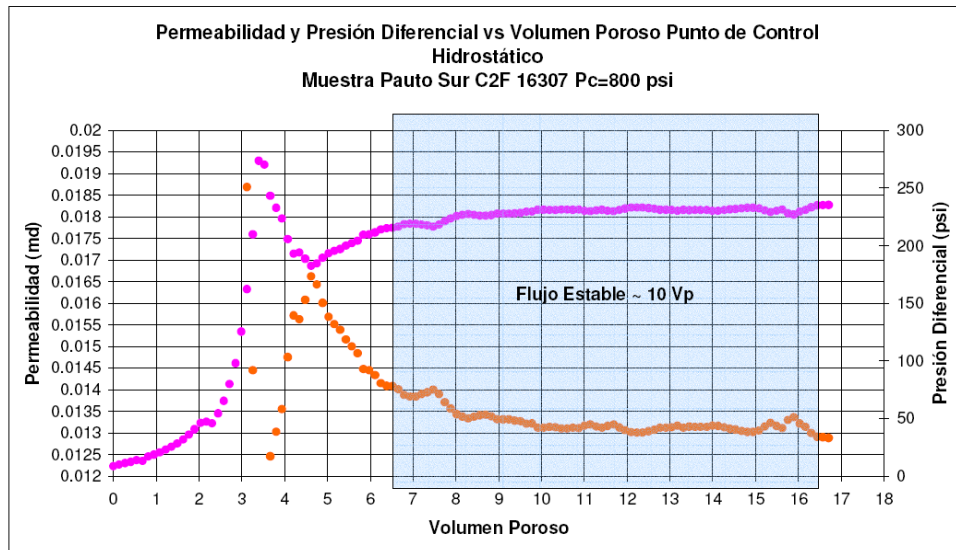


Figura 11 Grafica Real Permeabilidad Vs Volumen Poroso



Fuente: Laboratorio De Mecánica de Rocas ICP

3.2. EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN NECESARIOS

Durante el presente ensayo se utilizan los siguientes instrumentos y equipos:

- ✓ Configuración Triaxial Del Sistema de Mecánica de Rocas MTS 815: Con este equipo se realiza el ensayo, el sistema es controlado por computador y permite el registro constante de los parámetros de operación del equipo.
- ✓ Cámara Fotográfica: Utilizada para llevar a cabo el registro fotográfico de la muestra ensayada.
- ✓ Bomba ISCO: Es la bomba de desplazamiento positivo que transfiere el fluido con el cual se va a evaluar la permeabilidad.
- ✓ Deformímetros: Pueden ser strain gates y extensómetros axiales y/o circunferenciales y son utilizados para medir la deformación en las muestras.

- ✓ Sensores De Presión Diferencial: Con estos instrumentos se mide la caída de presión en el rango de 0 a 3600 psi.

3.3. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN EN PRESIÓN DE CONFINAMIENTO Y CARGA AXIAL

Para realizar la prueba de permeabilidad de rocas, es necesario definir ciertas condiciones iniciales, como encontrar el esfuerzo promedio aplicado a la muestra, el cual se halla de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_v + \sigma_H + \sigma_h}{3} \quad (9)$$

$$\sigma_{v,H,h} = \Delta\sigma_{v,H,h} * h \quad (10)$$

Donde:

σ Esfuerzo in situ (psi) en dirección vertical (v), horizontal máxima (H) y/o horizontal mínima (h).

$\Delta\sigma$ Gradiente del esfuerzo (psi/ft)

h Profundidad de la muestra (ft)

Ahora es necesario encontrar una trayectoria de esfuerzos (K) para evaluarla durante la prueba. Por lo tanto:

$$K = \frac{\Delta\sigma_{h,H}}{\Delta\sigma_v} \quad (11)$$

Donde K es la trayectoria de esfuerzos.

Una vez realizado el análisis de la determinación de la presión de confinamiento y carga axial se procede a la implementación de los protocolos establecidos para la realización del ensayo de permeabilidad absoluta.

3.4. PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LA PROBETA

PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LA PROBETA

Seleccionar la muestra que será probada, registrar sus dimensiones y medir plenitud y cilindricidad acorde a la norma ASTM D 4543 -08

Poner la muestra en una atmósfera de vacío por cuatro horas.

Preparar el fluido de saturación y saturar la muestra

Cortar cuatro secciones de alambre dulce con una longitud aproximadamente de 60 mm más dos veces el perímetro del endcup.

una sección de manga termoencogible de diámetro adecuado para la muestra y con la suficiente longitud para que se cubra hasta la mitad del cuerpo de los endcups aproximadamente.

Colocar los alambres formando una horqueta sobre la cinta de teflón, dos en el endcup superior, y dos en el inferior.

Poner la muestra entre los dos endcups.

Cortar dos secciones de cinta de teflón de longitud igual a dos veces el perímetro del endcup para ensayos con presión de poro y adherir la cinta a los extremos de éste que estarán en contacto con la muestra.

Calentar la manga hasta que quede completamente ajustada a la muestra evitando la formación de burbujas de aire utilizando un secador industrial.

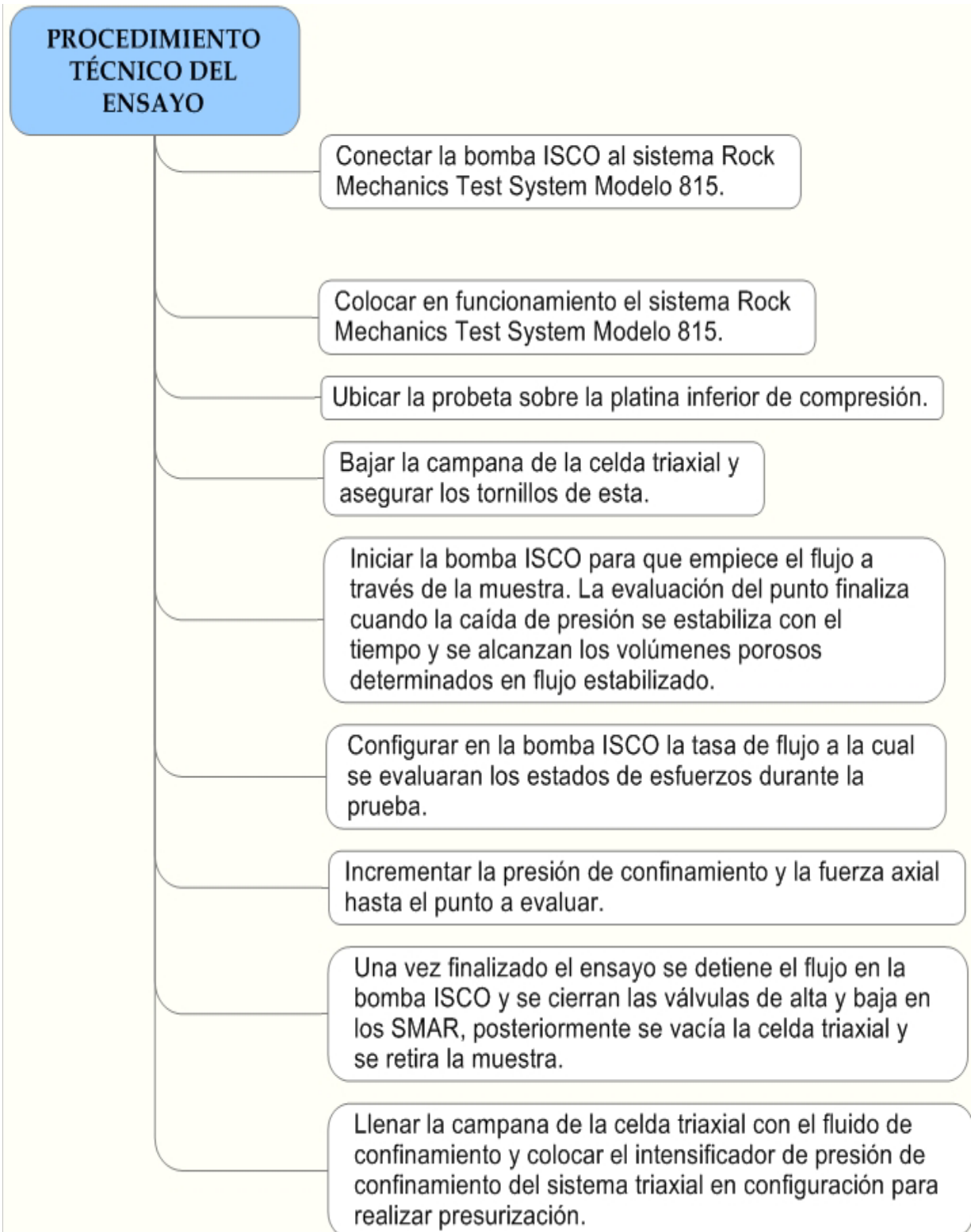
Se recomienda que los amarres en cada endcup queden ubicados a 180° uno con respecto al otro.

Cubrir con silicona la región del endcup por encima y por debajo de la cinta de teflón y en los extremos de la manga inferior y superior.

Para asegurar que no hayan fugas en el sistema se recomienda utilizar abrazaderas sobre la manga en el espacio entre la silicona sobre la cinta de teflón y sobre el extremo de la manga.

Por último colocar los extensómetros triaxiales para medir deformación axial y circunferencial sobre la muestra encaquetada.

3.5. PROCEDIMIENTO TÉCNICO DEL ENSAYO



3.6. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO PARA LA DETERMINACION DE LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA

Haciendo uso de la experiencia y la implementación de cada una de las constantes que se plantean en la ley de Darcy que propone la norma, el Laboratorio De mecánica de rocas del ICP sintetizó la determinación de la permeabilidad de la siguiente manera:

$$K = 245 * \frac{q\mu L}{A\Delta p} \quad (12)$$

Donde:

q = Flujo a través de la sección transversal de la muestra

K = permeabilidad

μ = viscosidad

Δp = gradiente de presión del fluido en la dirección del movimiento

Calcular el esfuerzo promedio en el cual se evaluó la permeabilidad:

$$\sigma_p' = (P_{axial} + 2 * P_c) - \alpha * P_p \quad (13)$$

3.7. REPORTE DE RESULTADOS

El laboratorio de mecánica de rocas del instituto colombiano del petróleo cuenta con formatos establecidos para la presentación de los resultados de las pruebas de permeabilidad a continuación se da presentan algunos de los parámetros que dicho formato contiene.

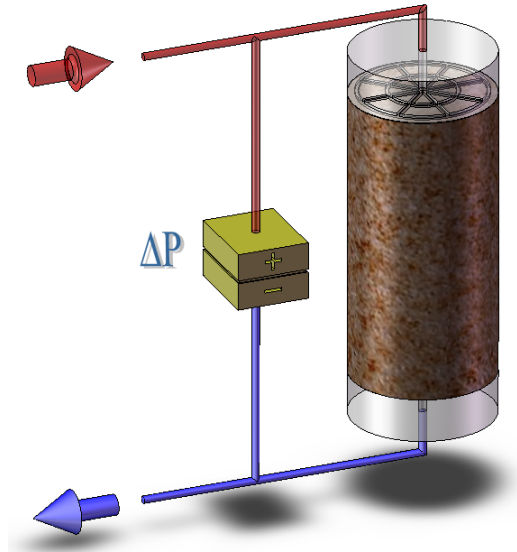
- ✓ Número del reporte: Asignado secuencialmente, de acuerdo con la base de datos del laboratorio.
- ✓ Información general: Se consigna la información general concerniente a la prueba realizada, el responsable del laboratorio y su personal técnico, la fecha del ensayo y la información del cliente.
- ✓ Cronograma de trabajo seguido durante el ensayo.
- ✓ Fotografías de la muestra, antes y después de realizado el ensayo.
- ✓ Datos de la muestra: Nombre, profundidad, diámetro, longitud, densidad, porosidad y permeabilidad.
- ✓ Referenciar los esfuerzos aplicados y la permeabilidad obtenida en el punto.
- ✓ Una figura donde se presenta el comportamiento de la presión diferencial y la permeabilidad vs. Volúmenes porosos acumulados en la muestra

3.8. MODELO FÍSICO DE LA PRUEBA

El modelo implementado en el Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto Colombiano del Petróleo es basado en el modelo presentado en la sección 2.6.4. Medición de flujo de líquido con diferencial de presión inducido tomado de la norma API RP 40 – ENGL 1998 , sección 6.2.2.1.1.

El modelo presentado en esta sección muestra la entrada y la salida de salmuera, este esquema no contempla enchaquetamiento ni aislamiento por medio de abrazaderas de alambre dulce y silicona, y se muestra la manera en que se registra la presión diferencial.

Figura 12 Modelo Físico De La Prueba De Permeabilidad Absoluta



Haciendo uso de la experiencia en el laboratorio establece el valor de las constantes presentes en la ley de Darcy que propone la norma y las reduce a un valor de la siguiente manera:

$$K = 245 * \frac{q\mu L}{A\Delta p} \quad (12)$$

Ecuación Usada en el laboratorio de mecánica de rocas del instituto colombiano del petróleo.

Por medio de esta relación se puede conocer la permeabilidad absoluta de una muestra extraída de una formación, la única variable es la diferencia de presión que se presenta entre la entrada y la salida de fluido en la muestra.

4. DISEÑO Y SELECCIÓN

La metodología del diseño cuenta actualmente con herramientas computacionales tipo CAD – CAE – CAM para facilitar el diseño, selección y ubicación de elementos, creando así un número determinado de opciones que son sometidas a estudios y comparaciones para escoger la mejor de ellas garantizando una mejor calidad en el desarrollo del producto valorando un número mayor posibilidades desde las etapas más tempranas del diseño reduciendo el tiempo de manufactura y gastos, aumentando la eficiencia de los procesos de selección y construcción.

En el desarrollo de las opciones a implementar en este proyecto se trabajó con una variedad de software especializado tipo CAD – CAE para el diseño mecánico e hidráulico, de esta manera se modelaron y visualizaron todos y cada uno de los elementos que constituyen en banco de la permeabilidad absoluta ubicándolos acorde a las necesidades planteadas en el estudio inicial del problema.

4.1. ALTERNATIVAS DE DISEÑO HIDRAULICO

En el transcurso de la investigación para el desarrollo de este proyecto se estudiaron una serie de diseños hidráulicos posibles para la medición de la presión diferencial en pruebas de permeabilidad, a continuación se presenta un dibujo esquemático de la manera cómo funcionaría el montaje especificando los elementos usados en cada uno de los diseños y el proveedor.

Los elementos con los que ya cuenta el laboratorio que se implementarán en el diseño solución son los siguientes:

- Bomba ISCO serie D
- Equipo para pruebas en rocas MTS 815
- Computador de escritorio
- Trasmisores de presión diferencial SMAR 301 con rango de registro escalonado de acuerdo a la siguiente tabla

TRANSMISOR DE PRESIÓN SMAR	RANGO
H2	0-7 psi
H3	0-36 psi
H4	0-360 psi
H5	0-3601

4.1.1. Modelo Hidráulico I

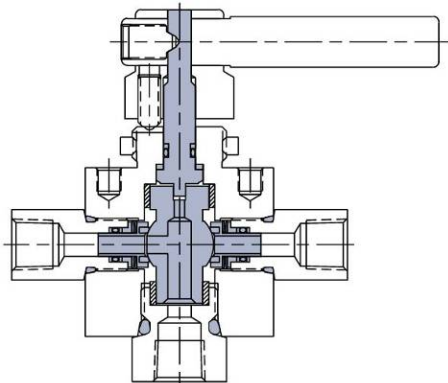
Usando una válvula de 5 vías de bola tipo ventana representada en la figura 13. La configuración de la válvula de cinco vías ofrecida por la empresa BuTech es de una entrada y cuatro salidas cada una conectada a la entrada de alta presión de los trasmisores de presión diferencial, adicionalmente se conecta una válvula de dos vías que separa la línea de alta y baja presión que en el momento de realizar la toma de la presión diferencial se cierra permitiendo que llegue al transmisor de presión los valores a medir alta y baja presión, dicha válvula de dos vías también es la encargada de igualar las presiones para proteger el transmisor una vez la presión supere el rango para el cual el transmisor está diseñado.

Las válvulas serán accionadas por actuadores neumáticos controlados por elementos electrónicos de precisión tales como motores paso a paso, los cuales ubicarán la ventana de la válvula en la posición correcta para realizar la medición correspondiente.

Tabla 2 Elementos Principales Diseño I

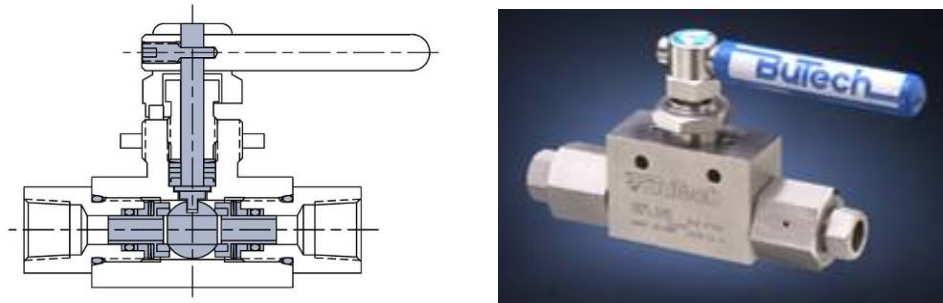
ELEMENTO	PROVEEDOR	CANTIDAD
Válvula de 5 vías	BuTech	1
Válvula de dos vías	BuTech	5

Figura 13 Esquema Valvula De Cinco Vías



Fuente: Manual BuTech

Figura 14 Esquema Válvula De Dos Vías



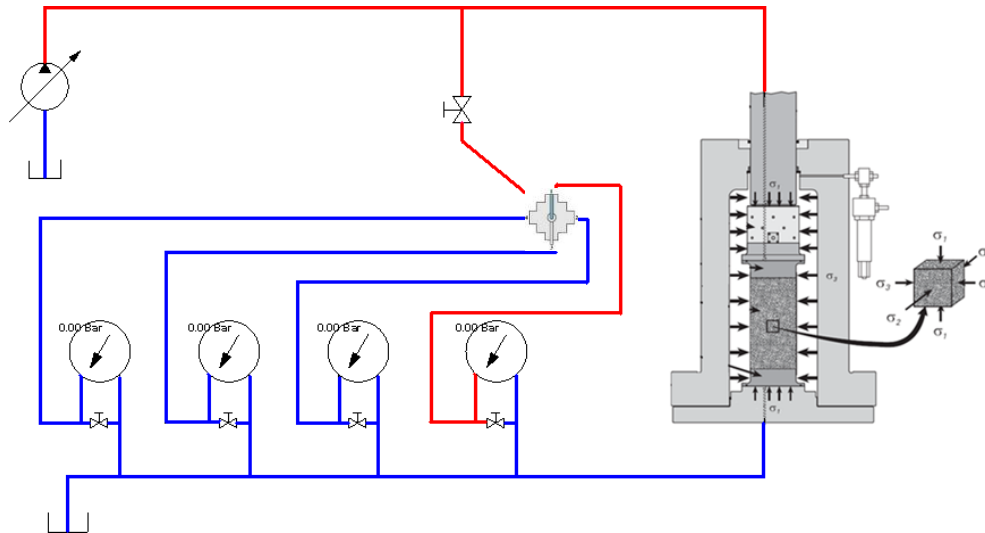
Fuente: Manual BuTech

Figura 15 Válvula Con Actuator BuTech



Fuente: Manual BuTech

Figura 16 Esquema Diseño I



En este diseño se puede apreciar la responsabilidad de la válvula de 5 vías como elemento principal para la conmutación generando un punto de baja confiabilidad en caso de que este elemento vital presente fallas.

4.1.2. Modelo Hidráulico II

Modelo del sistema AFS 200 representado en la figura 18

Este modelo implementa válvulas de la empresa Vindum de la siguiente manera:

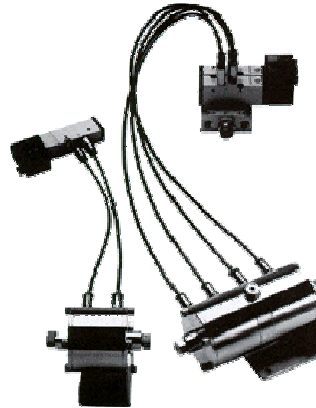
Válvula de tres vías: encargada de conmutar la línea de alta y de baja presión hacia el transmisor de presión.

Válvula de dos vías: abren o cierran el sistema para iniciar el registro de presiones diferenciales, están abiertas hasta el momento en que la presión diferencial supera los 3600 psi valor máximo que pueden registrar los equipos.

Tabla 3 Elementos Principales Diseño II

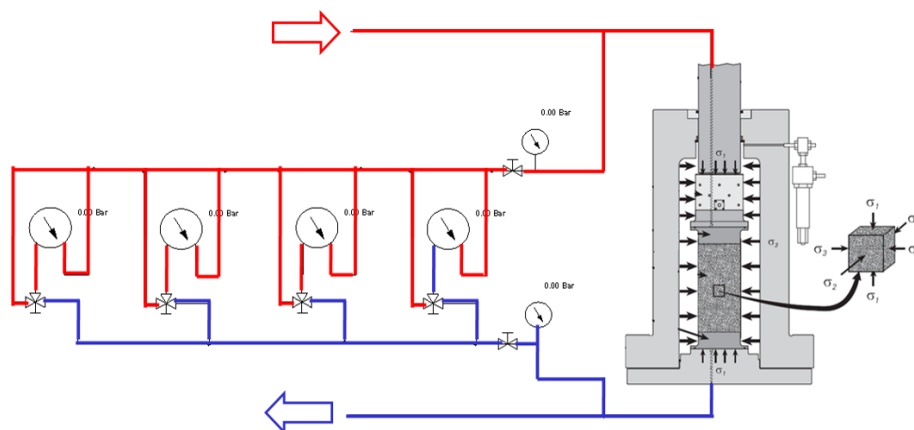
ELEMENTO	PROVEEDOR	CANTIDAD
Válvula de 3 vías	Vindum	4
Válvula de dos vías	Vindum	2

Figura 17 Válvulas Vindum Engineering Con Actuadores Neumáticos



Fuente: <http://vindum.com/valves.html>

Figura 18 Esquema Diseño II



Este diseño se caracteriza por ser un montaje modular lo que brinda confiabilidad e incorpora elementos de medición adicionales con el objeto de proteger el banco de sobrepresiones presentes en el sistema debido a que los transmisores de presión están conectados directamente a la línea de alta presión garantizando que la diferencia de presión en los transmisores sea cero cuando no estén en el rango de medición, en caso de una presión superior a 6500 psi manométricos en la línea de alta generaría en los elementos de medición ruptura de la carcasa, por tal motivo no se recomienda realizar el montaje de esta manera.

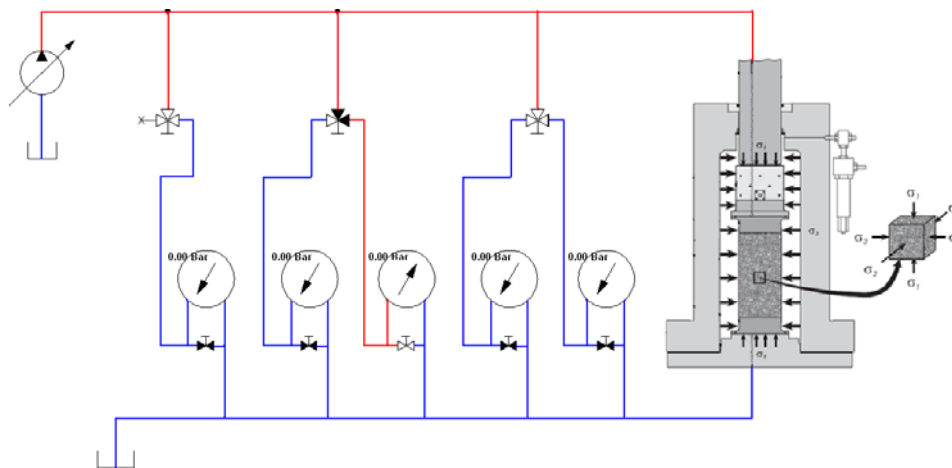
4.1.3. Modelo Hidráulico III

Este modelo se presenta mejorando las características de los anteriores dado a que reúne ventajas importantes como lo son: un diseño modular en donde se puede operar de manera confiable y en caso de avería se pueda reemplazar fácilmente un elemento sin detener completamente el sistema, este modelo elimina los elementos vitales haciendo el montaje redundante, implementando tres válvulas de tres vías encargadas de administrar la alta presión acorde a las necesidades de la muestra.

El proveedor de estas válvulas es la empresa Vindum Engineering que las cataloga en la serie CV que quiere decir válvulas operadas a volumen constante, son válvulas accionadas por medio neumático y la parte neumática es operada por medio de solenoides controlados por computador usando el software OPTO 22, esta automatización es un proyecto paralelo realizado por un estudiante de la escuela de ingeniería electrónica.

ELEMENTO	PROVEEDOR	CANTIDAD
Válvula de 3 vías	Vindum	2
Válvula de dos vías	Vindum	4
Manifold 8 puertos	Vindum	1

Figura 19 Esquema Diseño III

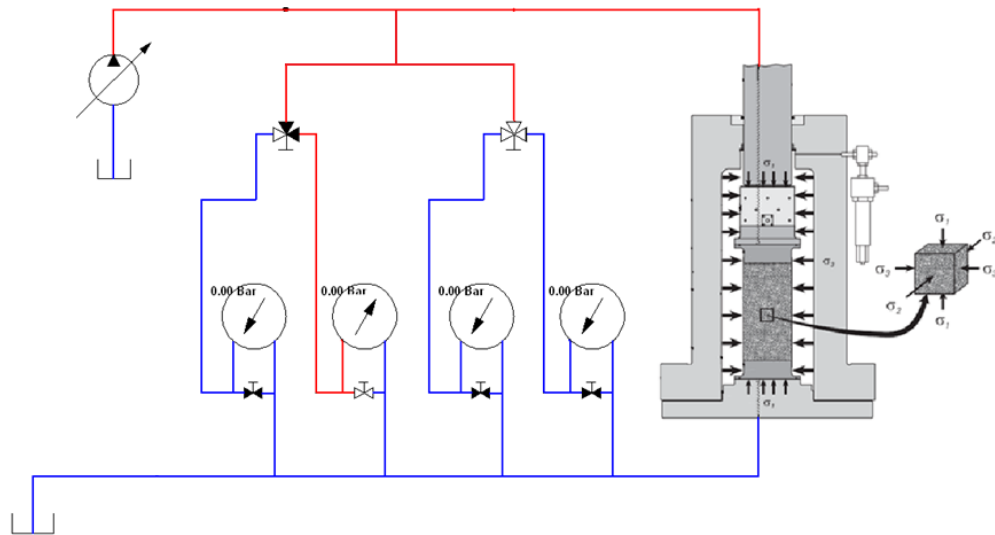


Las características de este diseño son muy favorables por contar con un diseño modular y robusto a tal punto de presentar un elemento de conmutación en reserva en caso que se incorpore un elemento para la medición de presión diferencial con capacidad de medición mayor a 3600 psi diferenciales.

4.1.4. Modelo Hidráulico IV

Este modelo presenta mejoras en todos los aspectos que los anteriores tenían fallas aumentando la confiabilidad, siendo un modelo modular y robusto asignando una válvula a cada una de las operaciones a realizar en la conmutación.

Figura 20 Esquema Diseño IV



Una de las principales ventajas de este diseño es que por trabajar con la línea de baja presión los transmisores de presión son protegidos y al momento de registrar mas de 3600 psi diferenciales el sistema estará protegido debido a que las válvulas de tres vías estarán cerradas y estas soportan hasta 10000 psi de presión, manteniendo los transmisores conectados a la línea de baja se garantiza que el diferencial de presión es cero cuando las válvulas de dos vías están abiertas y no se alcanzará la presión de rotura de los transmisores de presión.

4.2. DISEÑO HIDRAULICO A IMPLEMENTAR

El diseño a implementar es el modelo hidráulico IV que usa válvulas de la empresa Vindum Engineering con las cuales se tendrá un montaje confiable, modular a un costo moderado, en la figura 20 se presenta el plano hidráulico detallado del montaje a realizar en el laboratorio de mecánica de rocas para la medición de la presión diferencial en pruebas de permeabilidad absoluta.

El plano está dividido en dos partes, el diseño neumático figura 21 y el diseño hidráulico figura 22 y 23, en el plano neumático se inicia con la toma de aire a 120 psi, continua el recorrido pasando por elementos de control y regulación para entrar al manifold de control, encargado de enviar las señales neumáticas a las válvulas direccionales del sistema hidráulico.

En el plano que representa el sistema hidráulico figura 23 se inicia el recorrido en la bomba ISCO con capacidad de presión de 10000 psi y 25 ml/min de salmuera (2200 ppm) la que llega al puerto A que representa la entrada a la campana de confinamiento y el puerto B representa la salida de la campana la cual dará la presión a la salida de la roca.

El sistema de medición de presión diferencial se conecta de forma paralela al sistema principal de manera que la presión que se registra en la entrada y la salida de la muestra sea la misma presión que se registre en los elementos de medición de presión diferencial SMAR.

Las válvulas suministradas por la empresa VINDUM tienen como función permitir la conmutación de los transmisores de presión SMAR cuidando la integridad de los mismos en el rango adecuado. Las válvulas de tres vías son las que controlan el flujo proveniente del sistema principal aislando y dando paso al flujo presurizado de salmuera hacia la entrada de alta presión de los transmisores y a la entrada de las válvulas direccionales de dos vías que tienen como función separar la alta presión y la baja presión cuando está cerrada y permitir una comunicación cuando la válvula está abierta, de tal manera que en el momento de estar abierta garantiza un delta (Δ) de presión igual a cero y cuando está cerrada me permite registrar el valor de presión diferencial entre la entrada y la salida de la probeta.

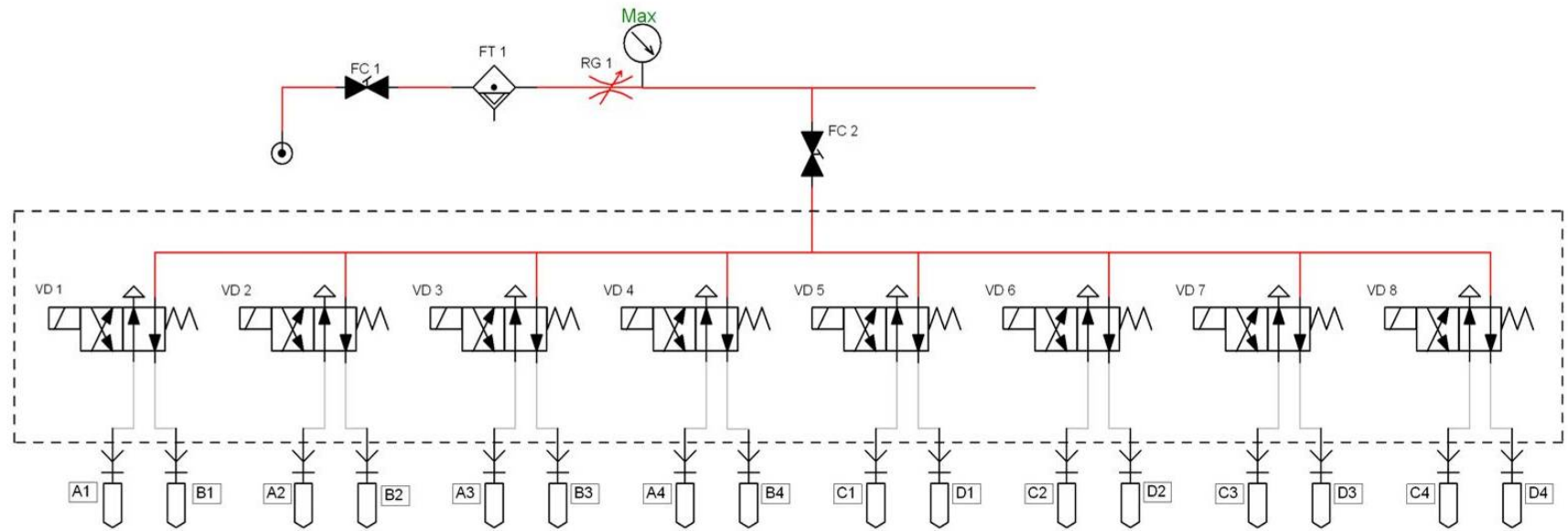
A continuación se presenta una tabla donde se comparan los diseños analizados:

Tabla 4 Comparación Diseños Propuestos

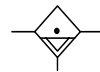
<i>PROPIEDADES</i>	<i>DISEÑO</i>				
	5 vías diseño I	5 vías modificado	AFS 200 modificado	3 vías diseño III	On – off Diseño IV
CONFIABILIDAD	Baja	Baja	Buena	Alta	Alta
MODULAR	No	No	Si	Si	Si
VÁLVULAS	1(5v) 1(2v)	1(5v) 1(V. aguja)	4 (3v) 2 (aguja)	3 (3v) 4(2 vías)	2 (3v) 4(2 vías)
ACTUADORES	2	2	6	6	8
MANÓMETROS	No	No	Si	No	No

La tabla 4 muestra una comparación entre los diseños propuestos por medio de propiedades importantes al momento de realizar la selección, la alternativa seleccionada es la alternativa IV en base a las características de modularidad y la alta confiabilidad que representa la realización de este montaje implementando válvulas de la empresa VINDUM ENGINEERING.

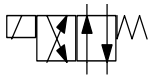
Figura 21 Diseño Neumático De Control



Toma de aire comprimido 120
psi



Filtro con drenaje automático



Válvula 5 vías dos posiciones
accionada por solenoide



Conector rápido tipo OD hacia
la válvula

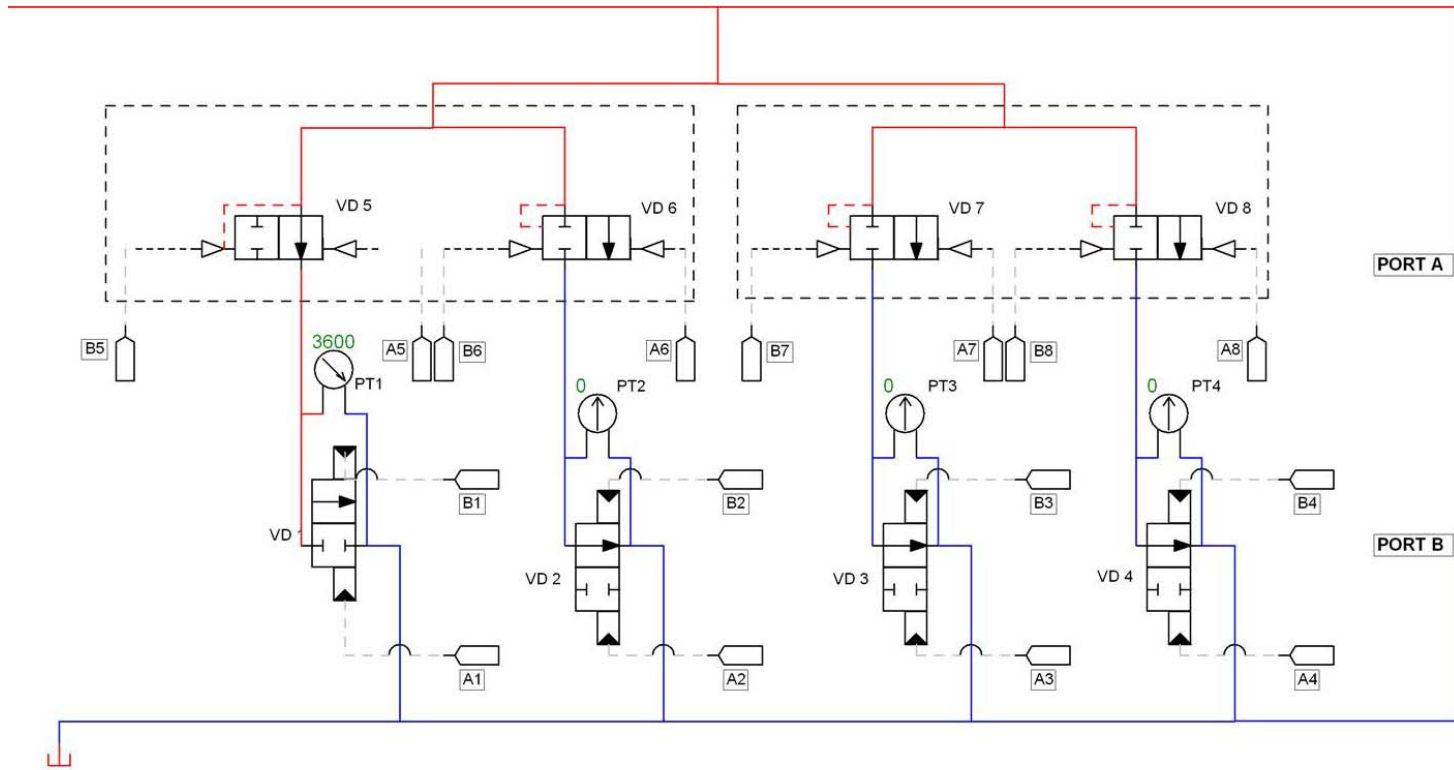
4.2.1. Elementos Implementados En El Diseño Seleccionado

Diseño Neumático

La figura 22 se presenta el plano neumático el cual controla el accionamiento de las válvulas hidráulicas por medio de ocho válvulas solenoides ubicadas en un manifold alimentado por una línea de aire comprimido a 120 psi, los elementos que conforman el montaje neumático son:

- ✓ Manifold de control neumático alimentado por medio de una conexión tipo OD de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro para tubería flexible, salida tipo conexión rápida tipo OD para tubería flexible de $\frac{1}{8}$ pulgadas de diámetro, las válvulas solenoides son accionadas con corriente directa a 24 Voltios.
- ✓ Tubería flexible de diámetro $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{8}$ de pulgada
- ✓ Válvula de paso galvanizada de $\frac{1}{4}$ pulgada.
- ✓ Filtro para aire con conexión $\frac{1}{4}$ NPT
- ✓ Válvula reguladora de presión neumática con conexión $\frac{1}{4}$ NPT y manómetro de inspección.
- ✓ Tubería rígida en acero inoxidable y accesorios Swagelok de $\frac{1}{4}$ NPT

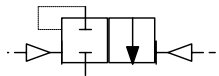
Figura 22 Diseño Hidráulico



Transmisor de presión diferencial

PORT B

Puerto de entrada al equipo MTS 815

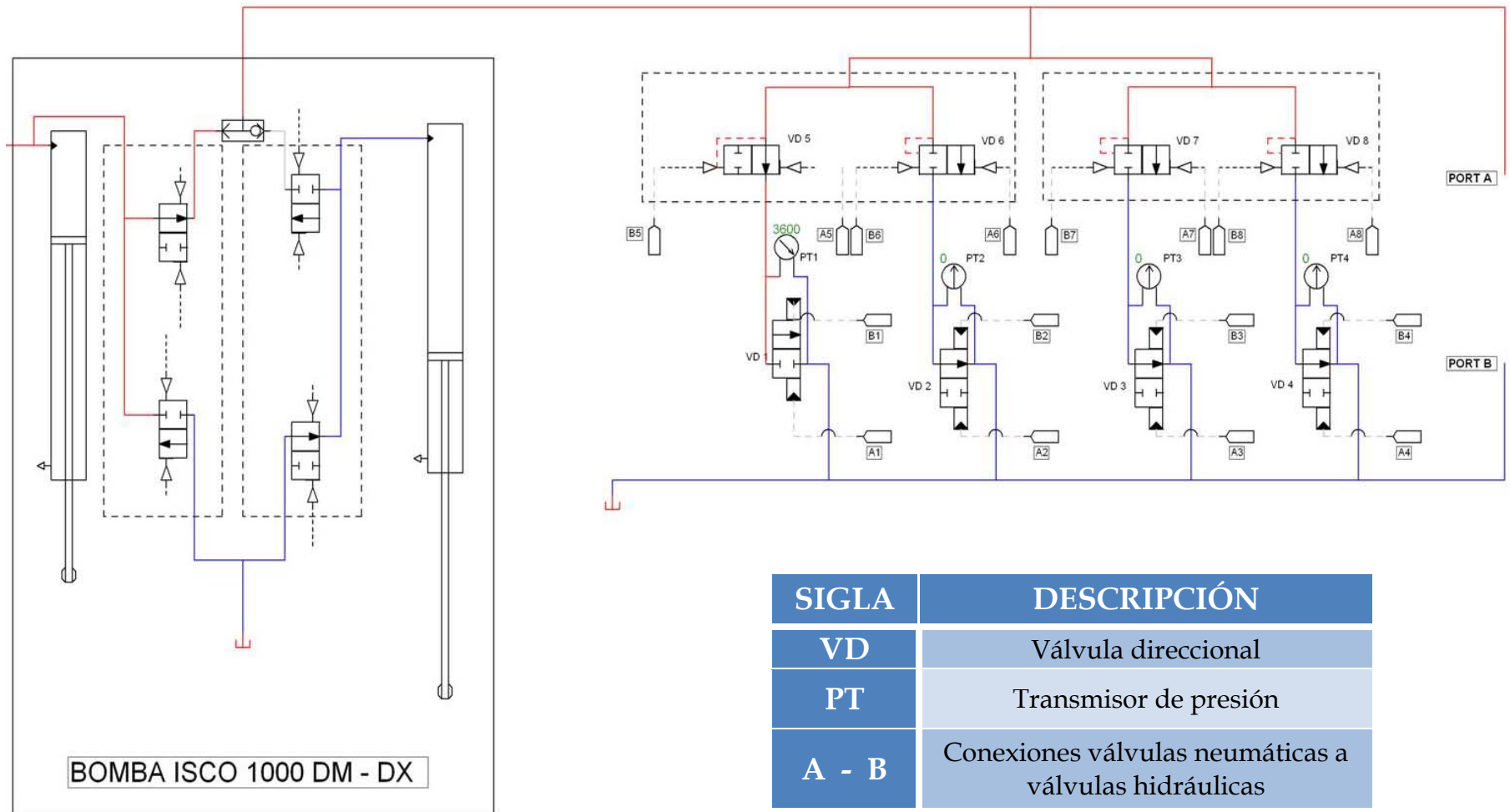


Válvula de 2 vías dos posiciones accionada neumáticamente

PORT A

Puerto de salida del equipo MTS 815

Figura 23 Diseño Hidráulico Conectado A Bomba ISCO 100 DM-DX



Diseño Hidráulico

Las figuras 22 y 23 muestran la manera como interconectar las válvulas encargadas de realizar la conmutación a los transmisores de presión diferencial conectando la bomba ISCO al sistema y simulando una presión diferencial, las partes que constituyen este diseño se presentan a continuación:

- ✓ Válvulas de dos y tres vías marca Vindum Engineering para conexión de tubing (1/8 de pulgada)
- ✓ Accesorios Swagelok (férulas, contraférulas, tubing, conectores en T, conectores en cruz, adaptadores 1/4 x 1/8 NPT, tapon 1/4)
- ✓ Transmisores de presión SMAR (H2 – H3 – H4 - H5)
- ✓ Bomba ISCO 100DX
- ✓ Válvulas de paso conexión 1/8 NPT Swagelok

El sistema es controlado por medio de la implementación del software y hardware OPTO 22 siguiendo una secuencia establecida basada en cada una de las fases de la prueba.

Tabla 5 Secuencia de Funcionamiento

	FUNCIONES	EQUIPO DE MEDICION	CONTROL VÁLVULAS SOLENOIDES							
			VD1	VD2	VD3	VD4	VD5	VD6	VD7	VD8
SECUENCIA OBLIGATORIA DE ARRANQUE	ENCENDIDO		ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	P > 3600 PSI		OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	REG. PT 1 <3600 psi	H5	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
	REG. PT 2 < 360 psi	H4	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
	REG. PT 3 < 36 psi	H3	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF
	REG. PT 4 < 7 psi	H2	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
EN FUNCIONAMIENTO	REG. PT 1 >= 3600 psi		OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	REG. PT 2 360 ≤ reg < 3600	H5	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
	REG. PT 3 36 ≤ reg < 360	H4	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
	REG. PT 4 7 ≤ reg < 36	H3	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF
	REG. PT 4 0 < reg < 7	H2	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

En la tabla 5 se presenta la secuencia de funcionamiento que comanda la conmutación de los transmisores de presión diferencial mediante el accionamiento de válvulas on-off de la empresa Vindum Engineering a través de la programación realizada en OPTO – 22, la secuencia está dividida en tres etapas de la siguiente manera:

Encendido: Permite al sistema liberar cualquier presión residual que esté contenida en el sistema de válvulas y transmisores de presión, para esto se abren las válvulas de tres vías representadas como VD de la número 1 al número 4 que funcionan como normalmente cerradas.

Ubicación del transmisor correspondiente al rango presente de presión diferencial: El sistema por si solo ubicará el transmisor de presión correspondiente al rango de medición presente en la muestra, se inicia un barrido iniciando con el transmisor H5 siguiendo de manera consecutiva hasta el H2 siguiendo las condiciones presentes en la tabla 5.

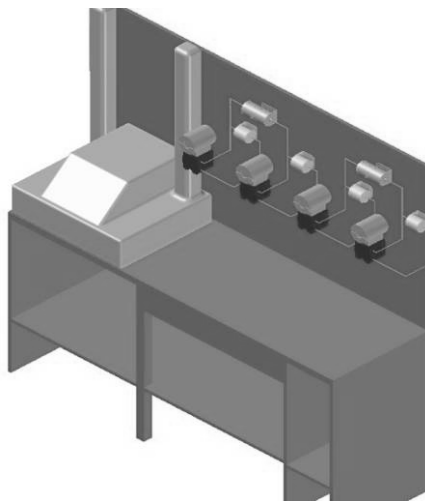
Funcionamiento: en esta etapa el sistema cuenta con total autonomía en realizar los cambios de transmisor de presión siguiendo un orden consecutivo de menor a mayor o viceversa teniendo en cuenta el rango de presión con la restricción de cerrar las válvulas de tres vías en caso que la presión diferencial supere los 3600 psi momento en el cual se entrara a tomar registro directamente de la bomba ISCO de la presión manométrica entregada.

4.3. DISEÑO ESTRUCTURAL

Para la ubicación de los elementos que constituyen el sistema hidráulico, sistema electrónico de control es necesario diseñar una estructura en la cual se situen estos elementos de una manera ordenada y acorde al espacio con el que el Laboratorio De Mecánica De Rocas cuente, con este fin se presentaron una serie de modelos

4.3.1. Diseño Estructural I

Figura 24 Diseño Estructural I



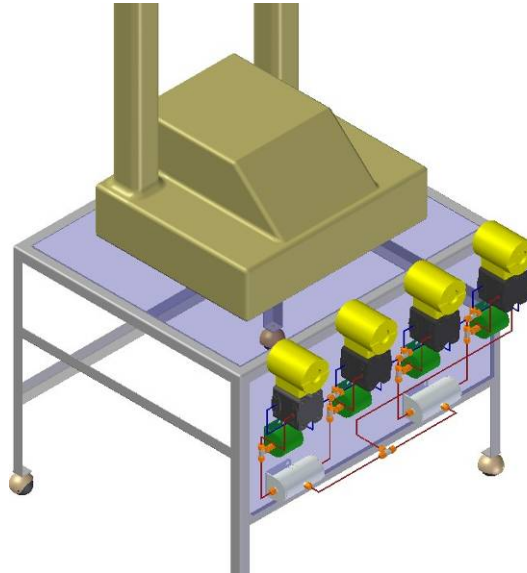
Se planteó un diseño basado en la utilización del espacio del laboratorio de mecánica de rocas, donde se pudieran ubicar todos los elementos que constituyen el banco de medición de presión diferencial con el fin de establecer la permeabilidad absoluta.

Los materiales a utilizar en este diseño son básicamente lamina cold roled, madera, tubo cuadrado de 1 pulgada, la principal ventaja radica básicamente en la ubicación de todos los elementos de una manera frontal donde se puede acceder fácilmente para el mantenimiento de cualquiera de los sistemas.

Este modelo se rechazó por ser completamente estático y ocupar un espacio importante en el laboratorio de mecánica de rocas.

4.3.2. Diseño Estructural II

Figura 25 Diseño Estructural II

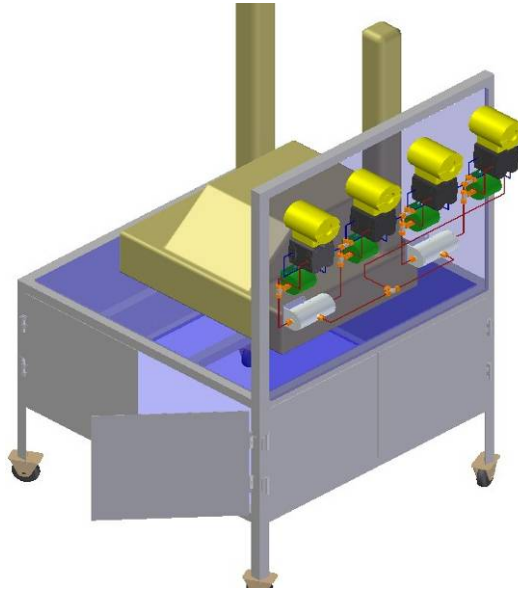


Se presenta un segundo diseño de montaje más robusto hecho en acero estructural, lamina de alfajor para garantizar la durabilidad y firmeza, se suprime la idea de hacer un modulo estacionario dado a que en el Laboratorio la realización de pruebas de permeabilidad no es una constante, a demás al hacerlo móvil garantizamos el fácil acceso a cada uno de los sistemas de control y potencia para el mantenimiento.

Este diseño no se implementa por la dificultar que tuviera el operario al momento de realizar la limpieza y el mantenimiento dado a que tendría que tomar una posición ergonómicamente incorrecta

4.3.3. Diseño Estructural III

Figura 26 Diseño Estructural III

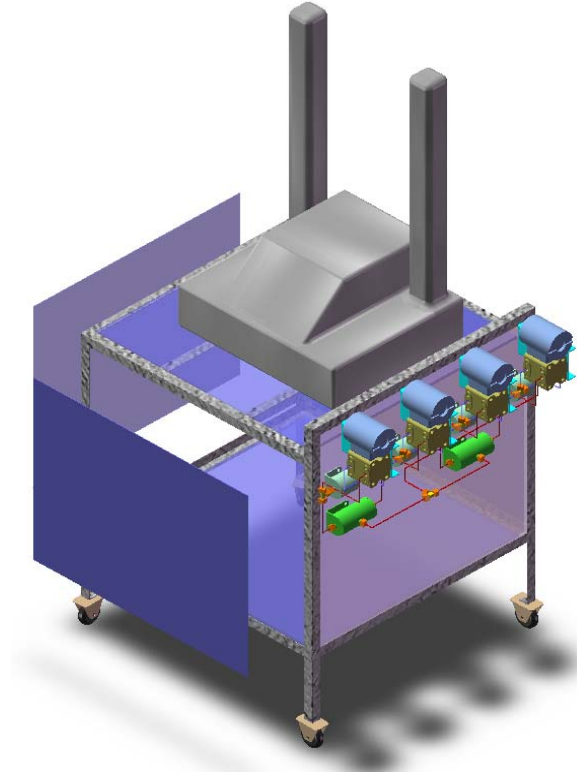


En este diseño se presenta el sistema de válvulas de una manera más elevada para garantizar un diseño ergonómico al momento de realizar el montaje y mantenimiento de las válvulas, los materiales usados son ángulo en L de una pulgada por un octavo de pulgada en acero estructural, lamina cold roled que conformaran las caras del cajón que se forma en la parte baja de la estructura, lamina de alfajor en donde se ubicaran los equipos principalmente la bomba ISCO y el sistema de válvulas interconectados al equipo de pruebas MTS 815.

Se realizaron mejoras al diseño y se obtuvo como resultado el diseño a aplicar.

4.3.4. Diseño Seleccionado

Figura 27 Diseño Estructural Seleccionado

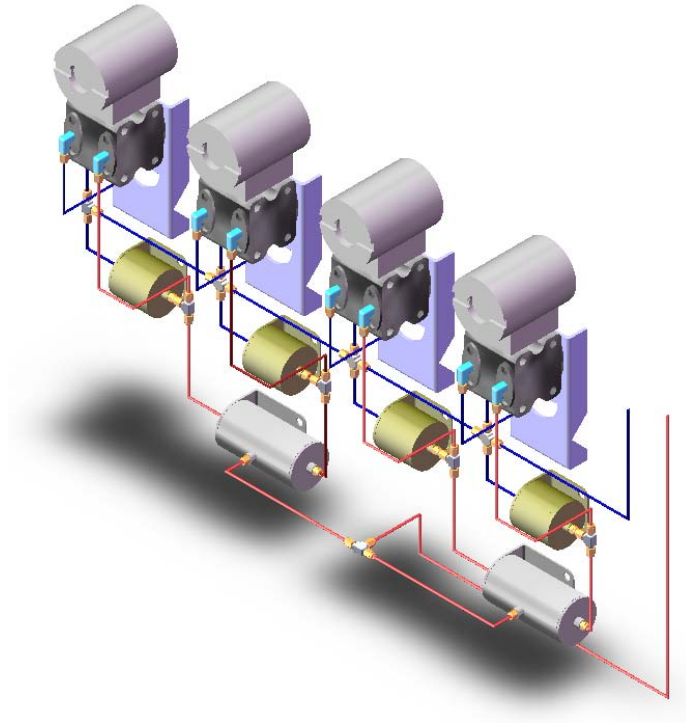


Este diseño sintetiza las mejores cualidades de los diseños anteriormente presentados por contar con una estructura rígida hecha en ángulo en L de una pulgada por un octavo de pulgada de acero estructural con el que se garantiza rigidez y tenacidad, las laminas de los costados son en lamina cold rolled y la lamina superior es una lamina de alfajor la cual esta reforzada por dos travesaños, cuenta con ruedas de alta capacidad de carga y frenos para evitar el movimiento durante el transcurso de las pruebas.

La estructura contará con uniones soldadas y las tapas removibles se unen a la estructura por medio de tornillos.

4.3.5. Montaje de las Válvulas

Figura 28 Montaje de las Válvulas



El montaje de las válvulas a la estructura final está acorde a el montaje realizado en el software SolidWorks, por medio de este modelo se dimensiona completamente el banco y la distribución en la que cada uno de los elementos será unido a la estructura con tornillos pasantes asegurados con tuerca y arandela de seguridad garantizando la firmeza y la durabilidad del montaje, las interconexión de las válvulas se realiza por medio de tubing el cual tiene un diámetro externo de un octavo de pulgada en acero inoxidable.

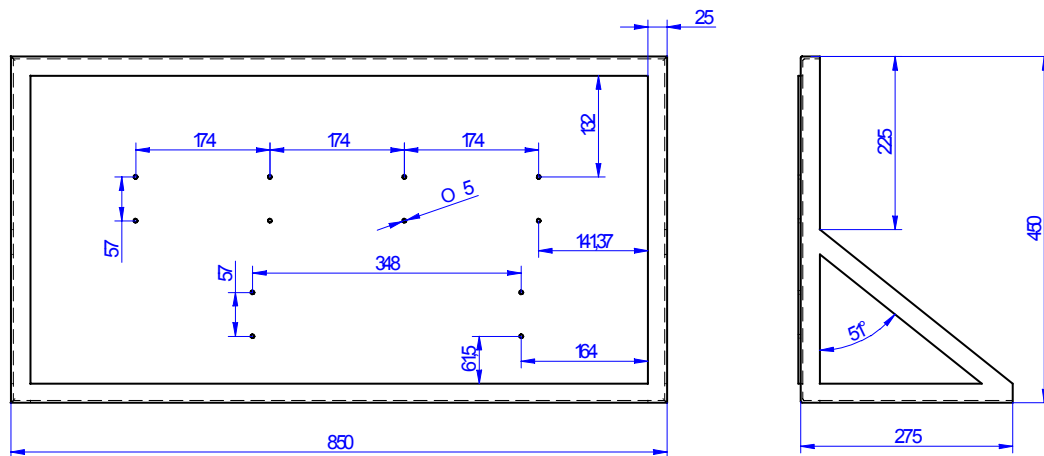
4.3.6. Elementos Provisionales Diseñados y Construidos

Mientras se construye la estructura final para el montaje del banco de permeabilidad absoluta se realizó el montaje en una estructura provisional en donde se mantiene la configuración de las válvulas y la ubicación de los transmisores de presión diferencial, los sistemas auxiliares del banco serán ubicados en la parte posterior de la estructura. El sistema será probado y validado acorde a las exigencias del laboratorio.

✓ Estructura de Soporte

La estructura provisional está conformada por una lamina cold roled cal 16 con las perforaciones que se muestran en la figura adjunta, el marco esta hecho en tubo cuadrado de una pulgada recubierto de pintura base aceite color negro, las uniones entre la tubería y la lamina son soldadas y pulidas

Figura 29 Detalles Estructura Provisional



Esta estructura provisional será ubicada en una base presente en el laboratorio de mecánica de rocas la cual le dará soporte y brinda para los operarios de mantenimiento facilidad gracias a que es un diseño ergonómico con fácil acceso a todos y cada uno de los elementos.

✓ Férulas de Fijación y Sello

Para el montaje provisional se hizo necesario diseñar y construir las férulas que son los elementos que realizan y garantizan el sello mecánico entre el tubing y las válvulas de la empresa Vindum Engineering, originalmente la empresa proveedora de las válvulas suministra las férulas en cuestión, pero debido al montaje provisional los elementos suministrados por la empresa proveedora se deben preservar para el montaje final.

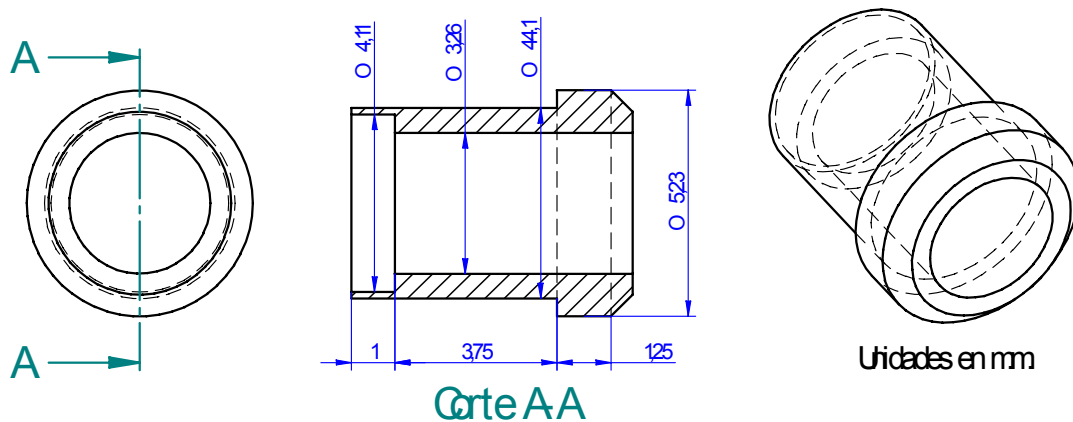
Las férulas provisionales están hechas en aluminio 6061-T6 que es una Aleación Dúctil y Ligera, con gran resistencia y excelentes características de acabado, ideal para la elaboración de piezas maquinadas con excelente calidad garantizando un muy buen acabado superficial.

La composición química del aluminio 6061-T6 es la siguiente:

- ✓ 0.40/0.80% de silicio
- ✓ 0.7% máximo de Hierro
- ✓ 0.15/0.40% de cobre
- ✓ 0.8/1.2% de magnesio
- ✓ 0.04/0.35% de cromo
- ✓ 0.25 máximo de zinc
- ✓ 0.015 máximo de titanio

En total se fabricaron 15 de las cuales 14 son usadas en la unión de tubing – válvulas y la restante se uso para realizar pruebas de resistencia y analizar la deformación que presenta al momento de realizar el sello mecánico con el máximo apriete , el dimensionamiento de las férulas es el que se presenta a continuación:

Figura 30 Detalles Férulas Provisionales



de todos los elementos e integración de los sistemas acorde a la planeación y disposición realizada en los modelos tipo CAD-CAE para el ensamble se implementan elementos de unión y fijación comunes tales como:

- Tornillos galvanizados totalmente roscados de 4 mm de diámetro exterior y una pulgada de largo con cabeza ranurada, para fijar las válvulas y el manifold neumático.
- Arandela de presión diámetro interno 5 mm.
- Tornillos galvanizados totalmente roscados de ½ pulgada de diámetro y una pulgada de largo con cabeza hexagonal, para fijar las bases de los transmisores de presión.

4.4. MONTAJE DE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA

El ensamble de todos los elementos se realizó en el Laboratorio De Mecánica De Rocas Del Instituto Colombiano Del Petróleo, en donde se cuenta con todos los elementos de trabajo y los componentes del Banco.

4.4.1 Montaje de Válvulas Hidráulicas

En base a los modelos realizados en el software tipo CAD-CAE se dispuso un orden para el montaje de los elementos que constituye el sistema hidráulico formado por las válvulas de dos y tres vías de la empresa Vindum, se realiza el montaje acorde a los modelos planteados dando la confianza de contar con las perforaciones adecuadas para la fijación entre la estructura y las válvulas como se puede apreciar en la figura 33.

Figura 33 Montaje de Válvulas Hidráulicas



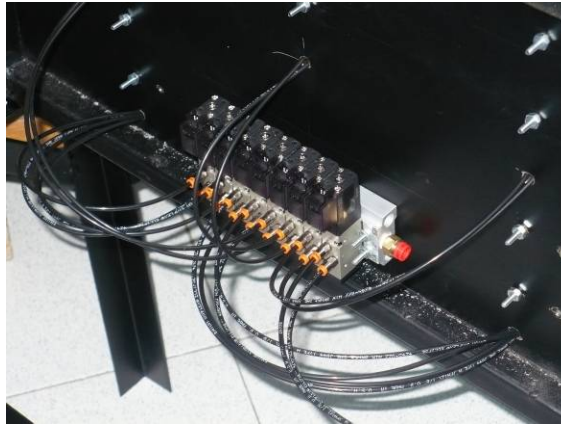
La figura 33 presenta el montaje de las válvulas hidráulicas en la estructura provisional la fijación se realizó por medio de tornillos pasantes con cabeza plana, arandela de presión y tuerca.

4.4.2. Montaje de Manifold Neumático

La ubicación del manifold es la parte posterior del sistema hidráulico dado a que de esta manera se reduce la distancia de la tubería flexible que dará las ordenes a cada uno de las válvulas de dos y tres vías acorde a la secuencia establecida y programada por medio del software Opto 22, para la interconexión de los sistemas neumático e hidráulico se realiza por medio de tubería flexible tipo OD de diámetro 1/8 de pulgada para lo cual se perforó la estructura con una broca de 10 mm. Para pasar la tubería OD como se puede ver en la siguiente figura.

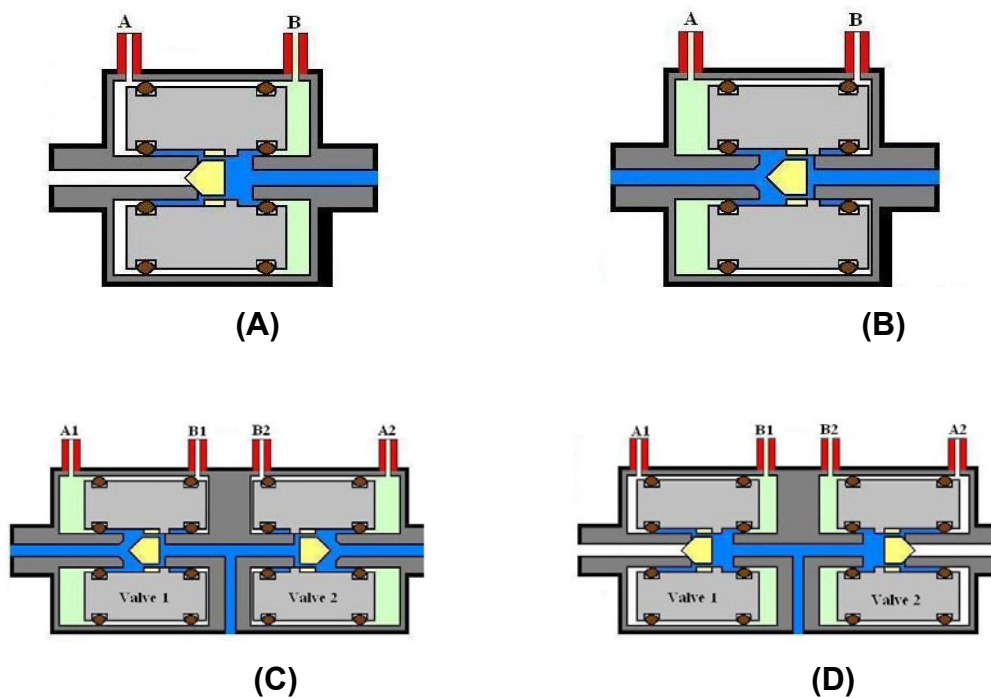
El manifold es alimentado por una línea de aire comprimido tarada a 120 psi, la unión se realiza por medio de tubería flexible tipo OD de ¼ de pulgada.

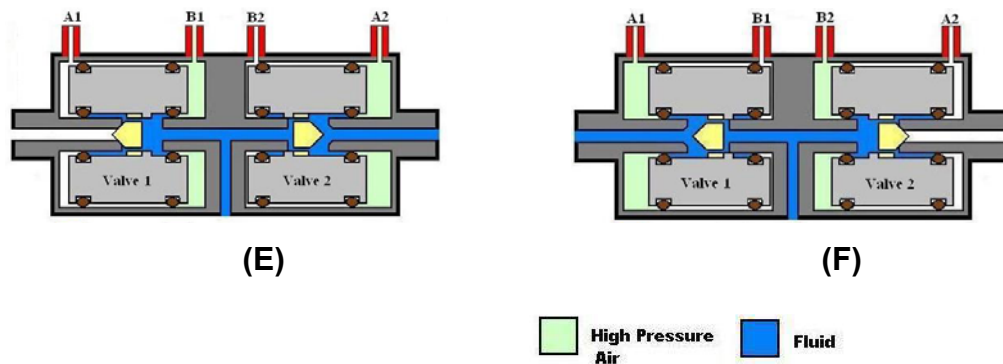
Figura 34 Montaje de Manifold Neumático



Las válvulas que ofrece la empresa Vindum Engineering pueden trabajar de dos maneras como normalmente abiertas o normalmente cerradas dependiendo únicamente de cómo se realice la conexión entre el manifold neumático y las válvulas para esto se identifican los puertos A y B de cada una de las válvulas y del manifold como lo muestra la figura 34.

Figura 35 Configuración de válvulas Vindum Engineering





Fuente: Manual CV Series High-Pressure Valves

Considerando que para obtener la configuración de normalmente cerrada figura 34 (A) se conecta el puerto B del manifold con el puerto B de la válvula y para la configuración de normalmente abierta figura 34 (B) se conecta el puerto B del manifold con el puerto A de la válvula. Estos tipos de conexión son validos para las válvulas de dos y tres vías haciendo la aclaración que la válvula de tres vías cuenta con una configuración semejante a dos válvulas de dos vías unidas por una conexión en T y por lo tanto pueden tomar la configuración de normalmente abierta figura 34 (C), normalmente cerrada figura 34 (D), abierta hacia la izquierda y cerrada a la derecha figura 34 (E), abierta hacia la derecha y cerrada hacia la izquierda figura 34 (F).

4.4.3. Montaje de los Medidores de Presión Diferencial

Los medidores de presión diferencial cuentan con una base metálica la que permite una variedad de posiciones para la fijación del transmisor, la base se ubicó acorde al diseño planteado y se une a la estructura por medio de tornillos de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, una pulgada y media de largo y la parte roscada equivale a $\frac{3}{4}$ de pulgada por la parte posterior se ubican las tuercas y para garantizar la rigidez del sistema arandelas de presión.

Figura 36 Montaje De Los Medidores De Presión Diferencial



Figura 37 Detalles Montaje De Los Medidores De Presión Diferencial



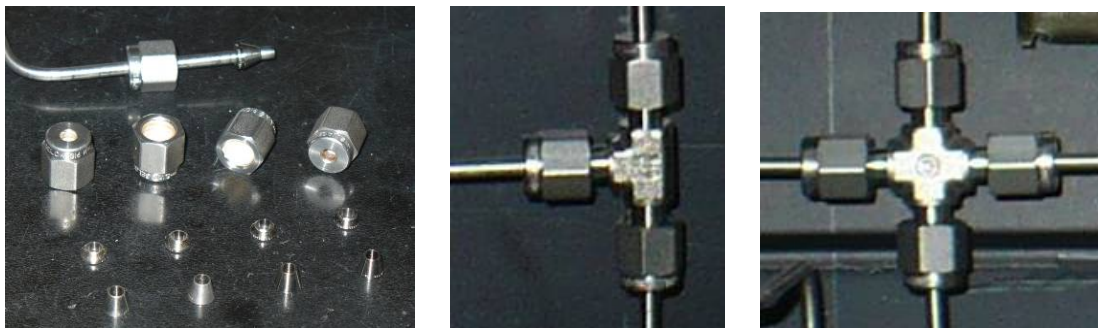
En las figuras 36 y 37 se muestra como para la fijación de los transmisores a la base se usan tornillos de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro y $\frac{3}{4}$ de pulgada de largo con cabeza hexagonal, estos tornillos se enroscan directamente en la base del transmisor y para garantizar la rigidez de la unión se usa arandelas de presión acorde a la medida del tornillo.

4.4.4. Interconexión válvulas sensores de presión diferencial

Para la interconexión de las válvulas con los transmisores de presión se usa tubería rígida de acero inoxidable 316 a la cual se le realizaron los dobleces necesarios para adecuarla al diseño propuesto, para esto se implementa un dobla tubos que me permite dar un radio en la curvatura de 15mm, adicional se le realizan cortes al tubing dando las dimensiones apropiadas para el montaje.

En el momento de realizar las uniones del tubing con los accesorios tales como Tés y Cruces y racores se implementa uniones del tipo contraférula - férula cónica la cual garantiza el sello entre el tubing y el accesorio implementado, todos los elementos usados son de acero inoxidable 304, los accesorios y el tubing implementado son marca Swagelok.

Figura 38 Detalles Accesorios Implementados

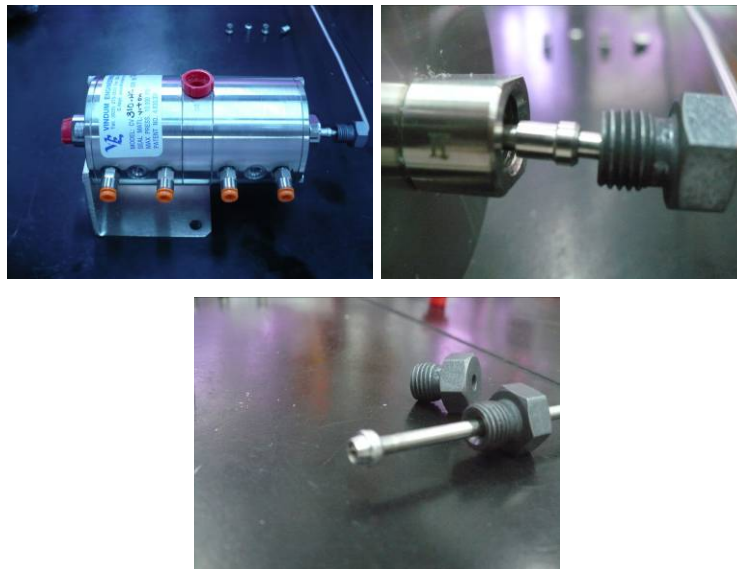


Para fijar el tubing a las válvulas encargadas de la conmutación se usan férulas cilíndricas las cuales se deforman garantizando el sello metálico en la unión válvula tubing este sello tiene que ser garantizado hasta 10000 psi debido a que este es la tolerancia máxima a la presión de las válvulas, la empresa Vindum Engineering provee una férula por cada unión las cuales están fabricadas en Hastelloy C-276 que es una aleación de níquel-molibdeno-cromo con adición de tungsteno diseñado para tener una

excelente resistencia a la corrosión en un rango amplio de ambientes severos.

Las férulas usadas en el montaje fueron las férulas fabricadas en aluminio 6061-T6, material que soporta muy bien ambientes corrosivos y se deforma con facilidad facilitando el sello entre tubing y válvula.

Figura 39 Conexión Tubing - Válvulas

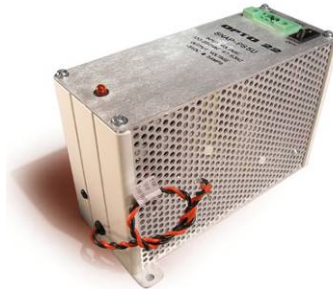


En la figura 39 se muestra la manera como se unen el tubing, la férula, la contra férula y la válvula y la manera como se deforma la férula diseñada para garantizar el sello mecánico.

4.4.5. Montaje de control electrónico

Para realizar el control del banco de permeabilidad se implementa hardware y software de la empresa OPTO 22, los elementos que componen este sistema son:

Figura 40 Fuente de Poder



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

- ✓ Fuente de poder 120 VAC A 12 VDC figura 40, con capacidad de suministrar energía hasta de 5 amperios, de manera segura y silenciosa, cuenta con leds indicadores de funcionamiento.
- ✓ Controlador de automatización programable compacto con capacidad de interpretación de señales analógicas y digitales con puerto serial SNAP-PAC-R1 con capacidad de control y comunicación de datos y procesos on-off en un modulo compacto de fácil acople.

Figura 41 Controlador Programable



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

la figura 41 muestra el controlador elemento con el cual las se digitalizan las señales y se envían al computador donde se almacenan y se interpretan.

- ✓ Modulo digital de salida SNAP-ODC5-I el cual está encargado de enviar las señales de control hacia las válvulas solenoides del manifold neumático on-off, cuenta con indicadores tipo led numerados de uno a cuatro que es la cantidad de señales que puede enviar, en total se usan dos módulos.

Figura 42 Modulo Digital De Salida



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

La figura 42 presenta el elemento que recibe, interpreta y envía las señales de accionamiento a la válvula solenoide del manifold neumático.

- ✓ Modulo análogo de entrada de datos SNAP-IDC-HT-16, con capacidad de adquisición de 16 señales, necesita de un cerebro para poder interpretar los datos y enviarlos al computador, funciona a 12 VDC, se implementa un solo dispositivo al sistema de control electrónico.

Figura 43 Modulo Análogo De Entrada

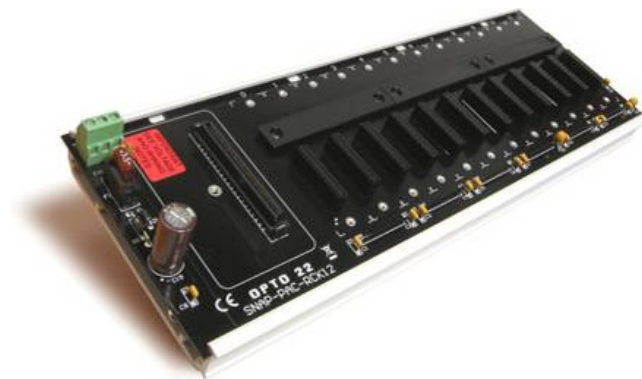


Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

La figura 43 muestra el modulo análogo de entrada de datos al computador usando interprete figura 41, a pesar de solo necesitar un modulo el banco de medición de la permeabilidad cuenta con dos elementos de este tipo.

- ✓ Modulo de montaje SNAP-PAC-RCK12 con capacidad de 12 módulos análogos o digitales, permite la intercomunicación con el cerebro SNAP-PAC-R1 y hace el montaje compacto y seguro.

Figura 44 Modulo De Montaje Electrónico



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

La figura 44 muestra el modulo donde se fijan los elementos anteriormente descritos de una manera ordenada y deja algunos espacios en caso que se requiera la incorporacion de mas elementos de control.

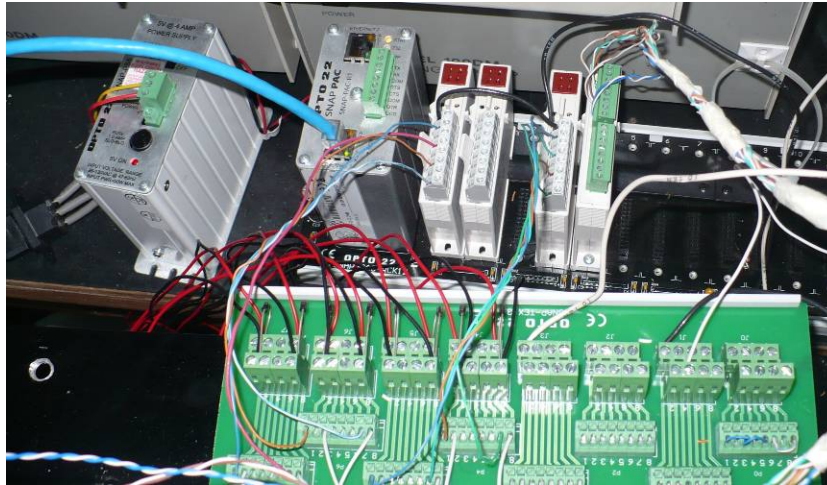
Figura 45 Esquema De Montaje Sistema De Control Electrónico



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

La figura 45 muestra la manera como todos los elementos anteriormente descritos se incorporan en un montaje sencillo y ordenado.

Figura 46 Montaje Real Sistema De Control OPTO 22



El montaje mostrado en la figura 46 muestra la manera como se realizaron las interconexiones entre los elementos de control y ejecución de la parte electrónica del banco de medición de la presión diferencial para la determinación de la permeabilidad las conexiones se realizaron siguiendo el manual de instalación de cada uno de los equipos presentes en el montaje, instalando elementos “fusibles” tales como diodos, resistencias y limitadores de corriente para la protección de los elementos mostrados.

5. PRUEBAS

Para el correcto funcionamiento del banco de permeabilidad se realizaron pruebas preliminares de funcionamiento de todos y cada uno de los elementos a implementar antes de realizar el montaje en el tiempo en que al mismo tiempo se construía la estructura que daría soporte a todo el sistema.

Las pruebas preliminares que se realizaron a los equipos neumáticos e hidráulicos consistieron en verificar cada uno de los puertos para conexión de tubería flexible y tubería rígida, por medio de presión de aire a 80 psi. Una vez validados los puertos se procede a su almacenamiento para futuro montaje.

Los transmisores de presión fueron calibrados por parte del departamento de mantenimiento del Instituto Colombiano Del Petróleo al igual que la bomba de desplazamiento positivo ISCO, los elementos de control electrónico solo fueron probados al momento de realizar el montaje.

5.1. PRUEBAS HIDRÁULICAS

Una vez ensamblado el sistema neumático y el sistema hidráulico se procedió a realizar pruebas de presión, estas pruebas consistieron en presurizar el sistema hidráulico gradualmente hasta 6000 psi, este incremento se hizo de la siguiente manera:

Tabla 6 Presiones De Prueba Hidrostática

PRESIÓN psi	OBSERVACIONES
10	El sistema responde positivamente y sin fugas
50	El sistema responde positivamente y sin fugas
100	El sistema responde positivamente y sin fugas
500	El sistema responde positivamente y sin fugas
1000	El sistema responde positivamente y sin fugas
2000	El sistema responde positivamente y sin fugas
3000	El sistema responde positivamente y sin fugas
4000	El sistema responde positivamente y sin fugas
5000	El sistema responde positivamente y sin fugas
6000	El sistema responde positivamente y sin fugas

Los elementos involucrados en esta prueba respondieron de manera favorable, se mantuvo el valor de cada una de las presiones presentes en la tabla por un tiempo superior 15 minutos sin ningún tipo de anomalía.

Figura 47 Válvulas De Entrada De Presión Al Banco De Permeabilidad

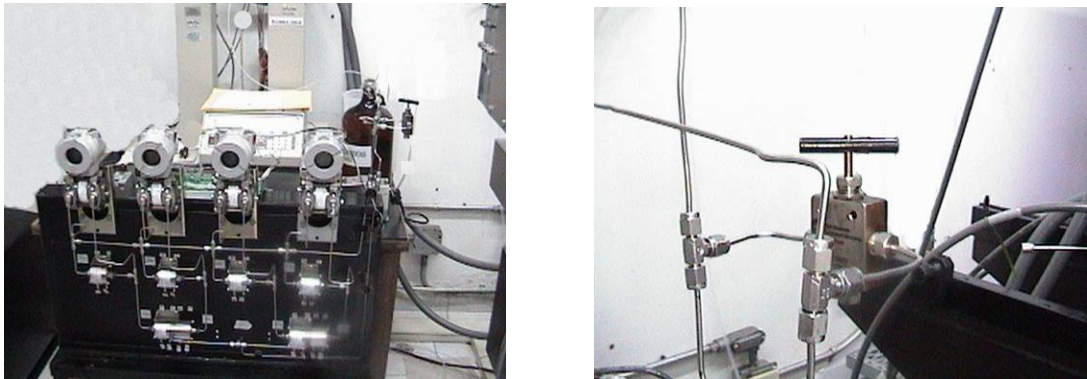


En la figura 47 se muestra la entrada de presión (rojo) y la salida (azul), cada uno de los conductos cuenta con una válvula de paso con el fin de aislar el sistema en caso de ser necesario, y para la prueba de presión estática se cerró la válvula correspondiente a la tubería azul o baja presión y usando la Potencia de la bomba ISCO se levanto presión hasta 6000 psi en todo el sistema dado a que las válvulas se configuraron como normalmente abiertas garantizando un diferencial de presión de cero en cada uno de los transmisores de presión SMAR, Se tomó una presión de 6000 psi manométricos debido a que la presión máxima que tolera la carcasa de cada uno de los transmisores es de 6500 psi, la presión se sostuvo por un tiempo de 16 horas, transcurrido este tiempo se verifico que no se presentaran goteos y que el sistema respondía de manera positiva al sostenimiento de presión al no encontrar indicios de fugas se instalo de nuevo la bomba la cual corroboró la estanqueidad y hermeticidad del sistema.

5.2. PRUEBAS PRELIMINARES PARA MEDIR LA PRESION DIFERENCIAL

Para la realización de pruebas de permeabilidad se hizo necesario implementar el protocolo de preparación de la muestra extraída de una perforación presente en la sección 3.4. En base al tiempo estimado para la preparación de estas muestras se incorporó en el sistema una válvula reguladora de presión marca HIP con conexión para tubería rígida de 1/8 de pulgada de diámetro, con la cual se simuló el diferencial de presión presente entre la entrada y la salida de la muestra como se puede apreciar en la figura 48.

Figura 48 Válvula Reguladora De Presión Para Pruebas



Usando la válvula de la empresa HIP se pudo probar el sistema de control electrónico siguiendo la secuencia anteriormente presentada (tabla 5), en donde se identifican tres etapas, la inicial en la que todas las válvulas se abren para evitar que presiones confinadas afecten algún equipo al momento de arrancar el sistema, etapa de ubicación del transmisor de presión correspondiente partiendo del valor máximo y capaz de registrar mediciones en el rango de 0 a 7 psi en el orden de centésimas de psi.

Con la primera prueba de control se operó cada una de las válvulas mediante el software proporcionado por OPTO 22 y se validó el buen funcionamiento

de todos los sistemas acoplados aun cuando la conmutación de las válvulas se hizo de tal manera que el operador tuviese el control de cuales válvulas se accionaran, en cuanto a la lectura de los datos se corrobora que el sistema presenta los datos correctos e iguales a los que se presenta en el display de cada uno de los transmisores de presión, se configuró la rutina y las acciones a realizar con los datos obtenidos del comportamiento del sistema como un todo llamado banco de medición de presión diferencial, la realización de las graficas en tiempo real y la organización del vector de datos para el futuro análisis.

Una vez validado el buen funcionamiento de los sistemas hidráulico y neumático acorde a las ordenes suministradas por el software se procede a correr de manera autónoma la conmutación de las válvulas y toma de datos, para esto se sigue manteniendo la configuración anterior usando las válvula reguladora de presión de la empresa HIP, el sistema se presurizó de tal manera que ninguno de los transmisores de presión sufriera daños y el sistema respondió positivamente, por lo tanto se incrementa la presión de manera gradual y se observa el cambio de medidor de presión autónomo y al mismo tiempo la desactivación del transmisor de menor rango al cual se llegó después de hacer un barrido que consiste en buscar el rango de presión presente en la entrada y la salida de la válvula, se manipula la válvula de tal manera que se tenga la posibilidad de realizar la conmutación en todos y cada uno de los transmisores de presión, en la secuencia de ascenso se presenta un fenómeno el cual consiste en que al momento de iniciar la medición con el transmisor de presión del rango siguiente durante la conmutación se presenta la deformación de la membrana capacitiva del transmisor la presión generando un volumen lo que conlleva a que la presión caiga a un valor más bajo y luego el sistema vuelve a incrementar la presión hasta llegar al rango adecuado, por tal motivo el sistema se configuró para que leyera el valor presente en los cuatro transmisores cuando la presión se

encontrara en el rango más bajo de presión diferencial (0 – 7 psi) y mientras la presión se incrementa los transmisores se van desactivando uno a uno de menor a mayor hasta alcanzar los 3600 psi de presión diferencial valor máximo de registro de los transmisores SMAR y a partir de los 3600 psi diferenciales se toman los datos de presión manométrica de la bomba ISCO.

Establecidos todos los parámetros y las variables a controlar en el transcurso de una prueba de permeabilidad se programa la primera prueba de permeabilidad a una muestra de la formación tambor con la cual se pondría a prueba el sistema de adquisición de datos, se realizó el proceso de preparación de la muestra el montaje en el equipo MTS 815. En el momento de dar inicio a la prueba no se presentaron anomalías.

La muestra ensayada presenta una permeabilidad alta por lo que la presión no sube a valores superiores a 7 psi, entonces no se observa conmutación de los transmisores de presión y el registro de la presión no es significativo aun bombeando salmuera a 25 ml/ min, capacidad máxima de la bomba ISCO.

Esperando que el comportamiento del sistema pudiera ser evaluado en conjunto se realiza una segunda prueba de permeabilidad con un plot sintético nombrado UIS 4 con el cual tampoco se pudieron obtener datos significativos debido principalmente a que la muestra no permitió registrar más de 9 psi de presión diferencial, y la prueba tuvo que ser suspendida después de 4 horas debido a que los valores de presión no se estabilizaron.

Por medio de las pruebas realizadas se pudo concluir que el sistema es muy sensible a los cambios de presión, robusto en cuanto a los rangos de presión capaz de medir, completamente autónomo y preciso al momento de realizar la conmutación, de las pruebas, de los ensayos anteriormente no se tomaron datos significativos para la realización de graficas.

El sistema se encuentra listo para la realización de pruebas de permeabilidad reales en rocas extraídas de perforaciones petroleras.

5.3. PRUEBAS DE PERMEABILIDAD

El Laboratorio de Mecánica de Rocas programó pruebas de permeabilidad para los días 23 y 24 de junio de 2.009 en los cuales se implementó el equipo para la medición de presión diferencial, la prueba fue diseñada por el personal del Laboratorio en la cual se establece realizar la toma de datos de presión diferencial cuando la muestra se encuentre sometida a una presión de confinamiento de 13000 psi y una fuerza axial de 119,68 KN, simulando así las condiciones a las que se encuentra sometida la formación original y predecir el comportamiento del pozo.

5.3.1 Propiedades De La Muestra a Ensayar

La muestra de roca se somete a pruebas preliminares donde se determinan algunas propiedades geológicas y físicas las cuales son valores importantes al momento de realizar los cálculos dado a que estos valores se presentan como variables en las ecuaciones implementadas en el Laboratorio de Mecánica de Rocas, estas pruebas son realizadas por parte del Laboratorio de Análisis Petrofísicos Básicos del Instituto Colombiano del Petróleo, las propiedades petrofísicas de la muestra a ensayar se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 7 Propiedades Petrofísicas Básicas De La Muestra

MUESTRA	
LONGITUD	56,31 mm
DIÁMETRO	37,64 mm

PRESIÓN DE CONFINAMIENTO	13000 psi
POROSIDAD	23,2 %
PERMEABILIDAD AL AIRE	618 miliDarcy
VOLUMEN MUESTRA	62,66 cm³
VOLUMEN POROSO	14,54 cm³

Una vez conocidas las propiedades petrofísicas básicas de la muestra se procede a realizar el proceso de saturación en salmuera con una concentración de 2200 partes por millón, siguiendo los pasos establecidos en el procedimiento técnico de preparación de muestras para el ensayo de la permeabilidad sección 3.4. Realizado el montaje de la probeta en el equipo MTS 815 y se confina quedando todo preparado para la iniciar el ensayo.

Inicio de ensayo

Fecha: 23 de junio de 2009 Hora: 10:30 am.

Fin de ensayo

Fecha: 24 de junio de 2009 Hora: 3:58 am.

En el transcurso del ensayo no se presenta ninguna anomalía con el montaje de la probeta en el equipo MTS ni con el equipo de medición de presión diferencial el cual está registrando valores de presión diferencial, permeabilidad absoluta, volúmenes porosos que atraviesan la muestra y cantidad de salmuera total que atraviesa la muestra cada segundo.

El ensayo inicialmente se diseñó para evaluar nueve valores de flujo con una presión de confinamiento de 13000 psi y 14000 psi, dando un total de 18 puntos de permeabilidad absoluta lo cual no se pudo completar con éxito debido a que la muestra de roca falló mientras se realizaba un procedimiento de adecuación del equipo MTS 815.

En el tiempo total de ensayo se pudieron evaluar cinco puntos de permeabilidad absoluta con una presión de confinamiento de 13000 psi. Los cuales presentan comportamientos acorde a las graficas presentes en la siguiente sección.

5.3.2. Análisis de resultados

La cantidad de datos presentados por el sistema de medición de la permeabilidad equivale a 157600 datos divididos en cuatro grupos principales como lo muestra la tabla 8 a continuación.

Tabla 8 Descripción De Datos Por Grupo

GRUPO DE DATOS	DESCRIPCIÓN
1	Permeabilidad absoluta
2	Presión diferencial
3	Volúmenes porosos
4	Volumen de salmuera desplazado

✓ Procesamiento de los datos obtenidos

Inicialmente los datos son presentados en un archivo .DAT que contiene cuatro columnas, el archivo se puede importar como una hoja de cálculo la cual presenta un esquema según lo muestra la tabla 9:

Tabla 9 Datos Obtenidos Del Equipo de Medicion de Presion Diferencial

RESULTADOS			
IDENTIFICACION DEL GRUPO DE DATOS	FECHA	HORA	REGISTRO
1	06/23/2009	12:00:00 A.M.	206.899185
2	06/23/2009	12:00:00 A.M.	61.722
3	06/23/2009	12:00:00 A.M.	740.178955
4	06/23/2009	12:00:00 A.M.	10759.7041
1	06/24/2009	12:00:01 A.M.	206.899185

2	06/24/2009	12:00:01 A.M.	61.722
3	06/24/2009	12:00:01 A.M.	740.178955
4	06/24/2009	12:00:01 A.M.	10759.7041

El archivo cuenta con un volumen de datos de aproximadamente 160000 filas en tres columnas después de organizarlos en la hoja de cálculo tomando como discriminante el numero del grupo al que pertenece y el tiempo en el que fue tomado el archivo se obtienen 40000 filas aproximadamente organizadas en 12 columnas tomando grupos de tres columnas se determina los valores de cada una de las propiedades que registra el sistema como lo muestra la tabla 10

Tabla 10 Registro de Datos organizados por grupo

1			2			3			4		
Registro	Hora	Fecha	Registro	Hora	Fecha	Registro	Hora	Fecha	Registro	Hora	Fecha
1856.75012	11:45:35 a.m.	06/23/2009	0.273135	11:45:35 a.m.	06/23/2009	0.005159	11:45:35 a.m.	06/23/2009	0.075	11:45:35 a.m.	06/23/2009
1856.75012	11:45:36 a.m.	06/23/2009	0.273135	11:45:36 a.m.	06/23/2009	0.005159	11:45:36 a.m.	06/23/2009	0.075	11:45:36 a.m.	06/23/2009
1720.75403	11:45:37 a.m.	06/23/2009	0.275583	11:45:37 a.m.	06/23/2009	0.005847	11:45:37 a.m.	06/23/2009	0.085	11:45:37 a.m.	06/23/2009
1720.75403	11:45:38 a.m.	06/23/2009	0.275583	11:45:38 a.m.	06/23/2009	0.005847	11:45:38 a.m.	06/23/2009	0.085	11:45:38 a.m.	06/23/2009
2702.09253	11:45:39 a.m.	06/23/2009	0.280477	11:45:39 a.m.	06/23/2009	0.007292	11:45:39 a.m.	06/23/2009	0.106	11:45:39 a.m.	06/23/2009
2702.09253	11:45:40 a.m.	06/23/2009	0.280477	11:45:40 a.m.	06/23/2009	0.007292	11:45:40 a.m.	06/23/2009	0.106	11:45:40 a.m.	06/23/2009
2702.09253	11:45:41 a.m.	06/23/2009	0.280477	11:45:41 a.m.	06/23/2009	0.007292	11:45:41 a.m.	06/23/2009	0.106	11:45:41 a.m.	06/23/2009
4328.88086	11:45:42 a.m.	06/23/2009	0.29516	11:45:42 a.m.	06/23/2009	0.009356	11:45:42 a.m.	06/23/2009	0.136	11:45:42 a.m.	06/23/2009
5504.48096	11:45:43 a.m.	06/23/2009	0.323128	11:45:43 a.m.	06/23/2009	0.013414	11:45:43 a.m.	06/23/2009	0.195	11:45:43 a.m.	06/23/2009

Organizados los datos se realiza un filtro para eliminar los valores correspondientes al inicio de la prueba en los que no se tenía flujo de salmuera y mientras el sistema entra en régimen. Establecidos todos los parámetros se procede a la realización de graficas para determinar los valores de permeabilidad absoluta que presenta la muestra de roca a cada flujo de salmuera.

Debido a la manera en que los datos están organizados se pueden realizar graficas de diferencia de presión, permeabilidad, volúmenes porosos a través de la muestra, salmuera total inyectada a la muestra y tiempo tomando cualquiera de las propiedades como abscisa al igual que como ordenada.

Las graficas presentes a contracción representan el comportamiento en la permeabilidad y la diferencia de presión con respecto a la cantidad de volúmenes porosos que atraviesan la muestra recordando que el valor de un volumen poroso es de 14,54 cm³.

La figura 49 representa el valor leído de los transmisores de presión SMAR LD 301 a través de todo el tiempo de ensayo en función a los volúmenes porosos de salmuera que atraviesan la roca.

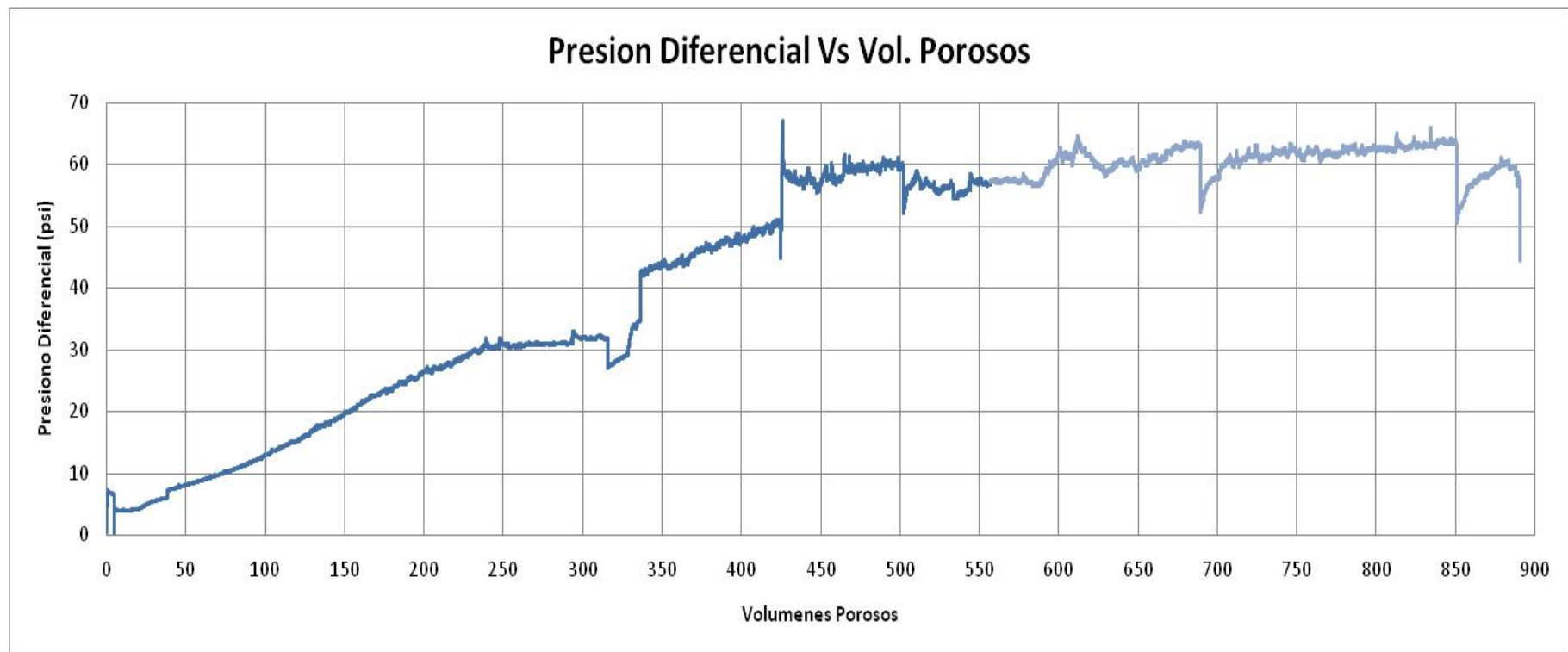


Figura 49 Comportamiento De La Presión Diferencial Vs Vol. Porosos

La figura 49 representa el comportamiento de la presión diferencial en el transcurso de la prueba a medida que la atraviesan aproximadamente 900 volúmenes porosos equivalentes a 13000 cm³ de salmuera manejando diferentes caudales desde 17.5 ml/min hasta 7.5 ml/min disminuyendo el caudal en 2.5 ml/min, una vez sea clara la zona de estabilización siguiendo el diseño de la prueba determinado por el personal del Laboratorio De Mecánica De Rocas.

Las condiciones en las que se realizaron las pruebas fueron:

Caudal	17.5 – 15 – 12.5 – 10 – 7.5 [ml/min]
Longitud	56,31 mm
Diámetro	37,64 mm
Presión De Confinamiento	13000 psi
Porosidad	23,2 %
Permeabilidad Al Aire	618 miliDarcy
Volumen Muestra	62,66 cm ³
Volumen Poroso	14,54 cm ³
Fuerza Axial	119,68 KN

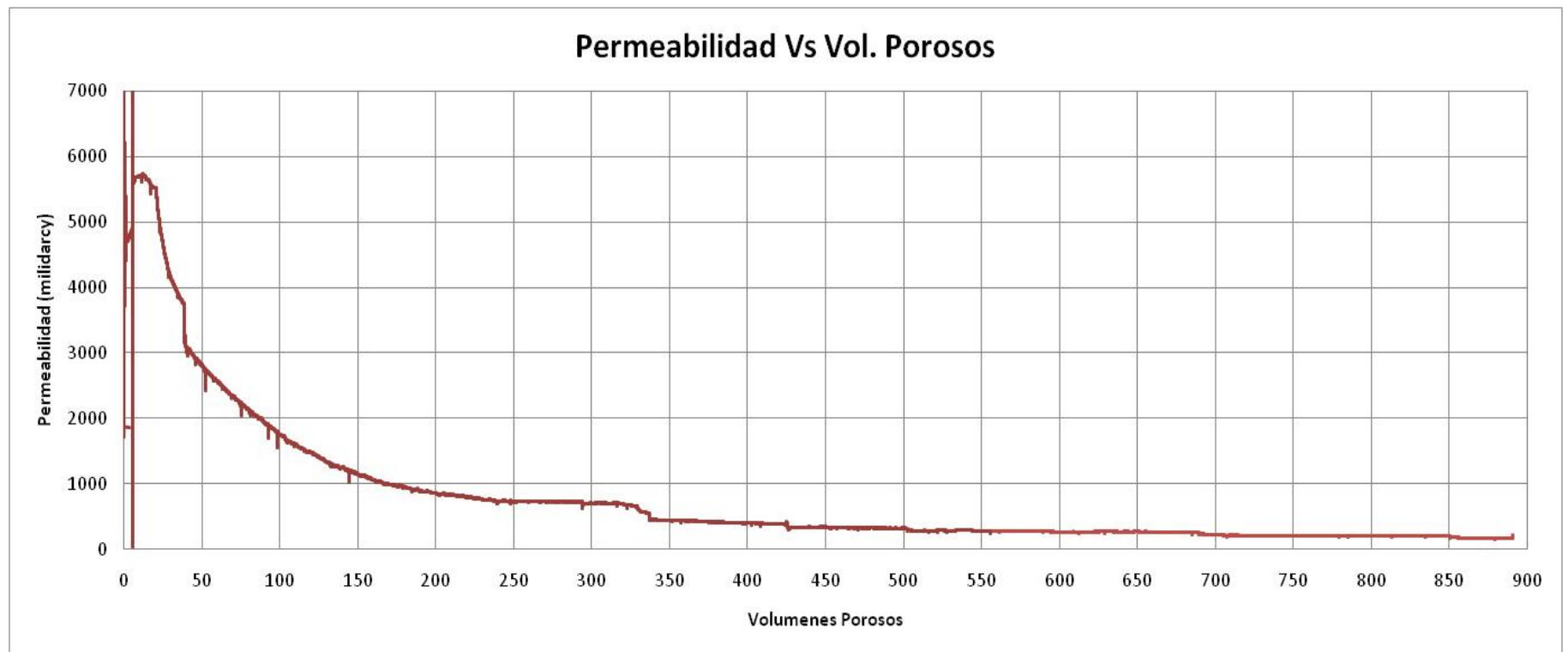


Figura 50 Comportamiento De La Permeabilidad Vs Volúmenes Porosos

La figura 50 muestra de manera grafica el comportamiento de la permeabilidad en función de los volúmenes porosos de salmuera que atraviesan la muestra, la grafica representa el comportamiento de la permeabilidad en todo el tiempo del ensayo en el cual se presentan diferentes valores de flujo de salmuera.

Los valores representados en la grafica son producto de aplicar la ecuación de Darcy teniendo como variable la diferencia de presión ecuación 12

$$K = 245 * \frac{q\mu L}{A\Delta p} \quad (12)$$

Donde:

q = Flujo a través de la sección transversal de la muestra

K = permeabilidad

μ = viscosidad

Δp = gradiente de presión del fluido en la dirección del movimiento,

Las condiciones en las que se realizaron las pruebas fueron:

Caudal	17.5 – 15 – 12.5 – 10 – 7.5 [ml/min]
Longitud	56,31 mm
Diámetro	37,64 mm
Porosidad	23,2 %
Permeabilidad Al Aire	618 miliDarcy
Volumen Muestra	62,66 cm ³
Volumen Poroso	14,54 cm ³
Fuerza Axial	119,68 KN
Presión De Confinamiento	13000 psi

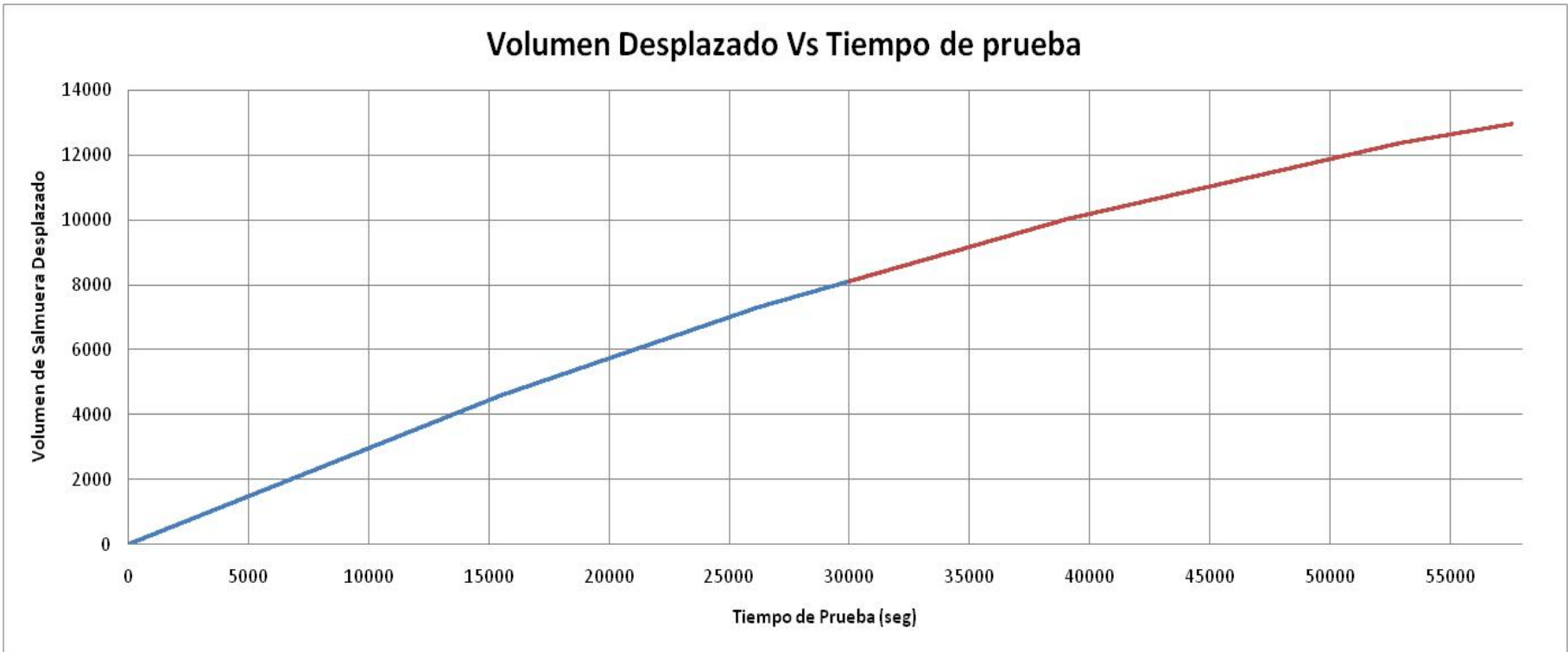


Figura 51 Desplazamiento De Salmuera Vs Tiempo De Ensayo

En la grafica de Volumen desplazado de salmuera Vs tiempo de ensayo representado en la figura 51, el comportamiento del flujo de salmuera representado en la pendiente de la grafica, disminuye de manera sigilosa debido a que el valor de los flujos presentes en el transcurso del ensayo es del orden de mililitros por minuto.

Se aprecia en la grafica un línea continua sin ningún tipo de sobresalto representando que durante el transcurso de la prueba no se presentaron perdidas de liquido por fugas o por el contrario taponamientos en la muestra

Las condiciones en las que se realizaron las pruebas fueron:

Caudal	17.5 – 15 – 12.5 – 10 – 7.5 [ml/min]
Longitud	56,31 mm
Diámetro	37,64 mm
Porosidad	23,2 %
Permeabilidad Al Aire	618 miliDarcy
Volumen Muestra	62,66 cm ³
Volumen Poroso	14,54 cm ³
Fuerza Axial	119,68 KN
Presión De Confinamiento	13000 psi

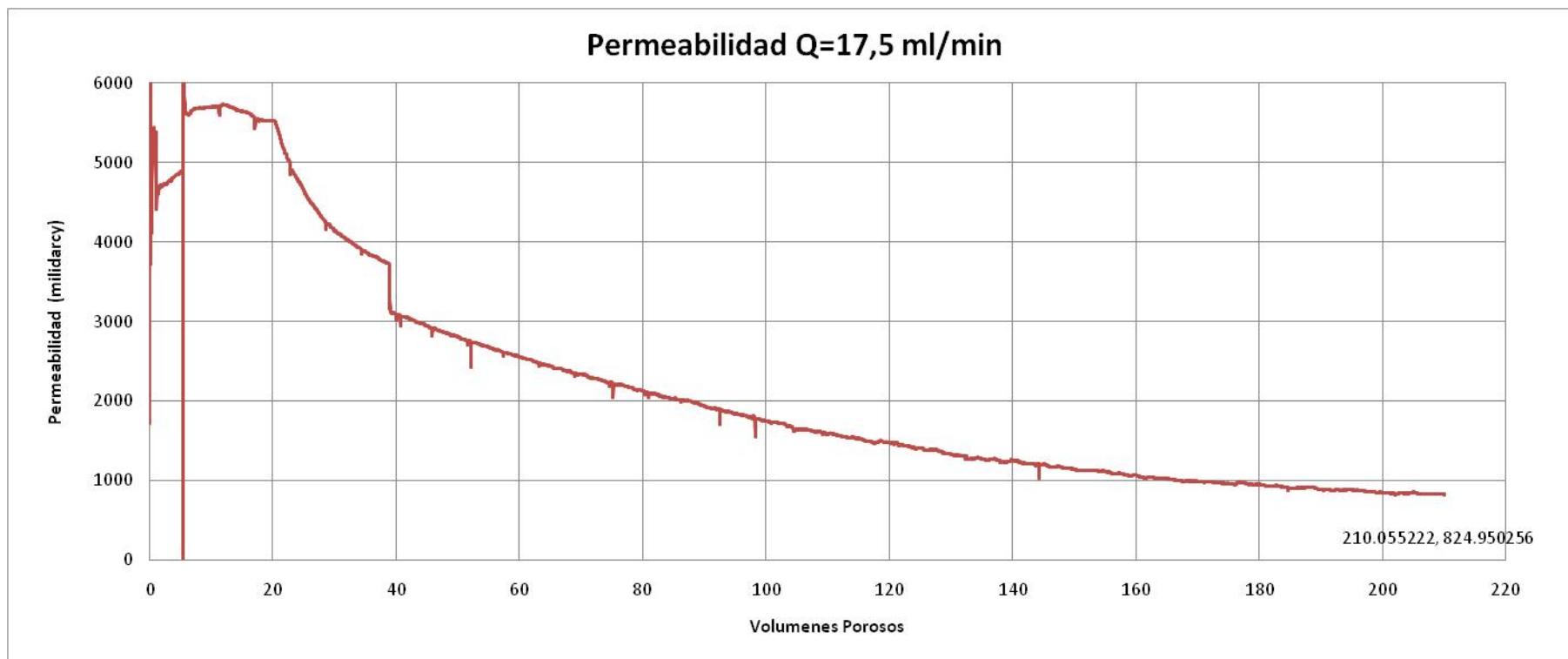


Figura 52 Permeabilidad Absoluta con Caudal Q = 17,5 ml/min

La figura 52 muestra el comportamiento en el primer flujo presente en la prueba correspondiente a 17,5 ml/min este valor de flujo se presenta en los primeros 220 volúmenes porosos aproximadamente y se puede ver como la prueba al inicio presenta comportamientos bruscos antes de lograr estabilizarse presentando un comportamiento uniforme.

Para determinar el valor de la permeabilidad absoluta en los primeros 220 volúmenes porosos se establece al final de la grafica donde el valor es de 820 milidarcy en promedio desde los 190 a los 220 volúmenes porosos, las condiciones a las que fue sometida la roca son las siguientes:

Caudal	17.5 [ml/min]
Longitud	56,31 mm
Diámetro	37,64 mm
Porosidad	23,2 %
Permeabilidad Al Aire	618 miliDarcy
Volumen Muestra	62,66 cm ³
Volumen Poroso	14,54 cm ³
Fuerza Axial	119,68 KN
Presión De Confinamiento	13000 psi

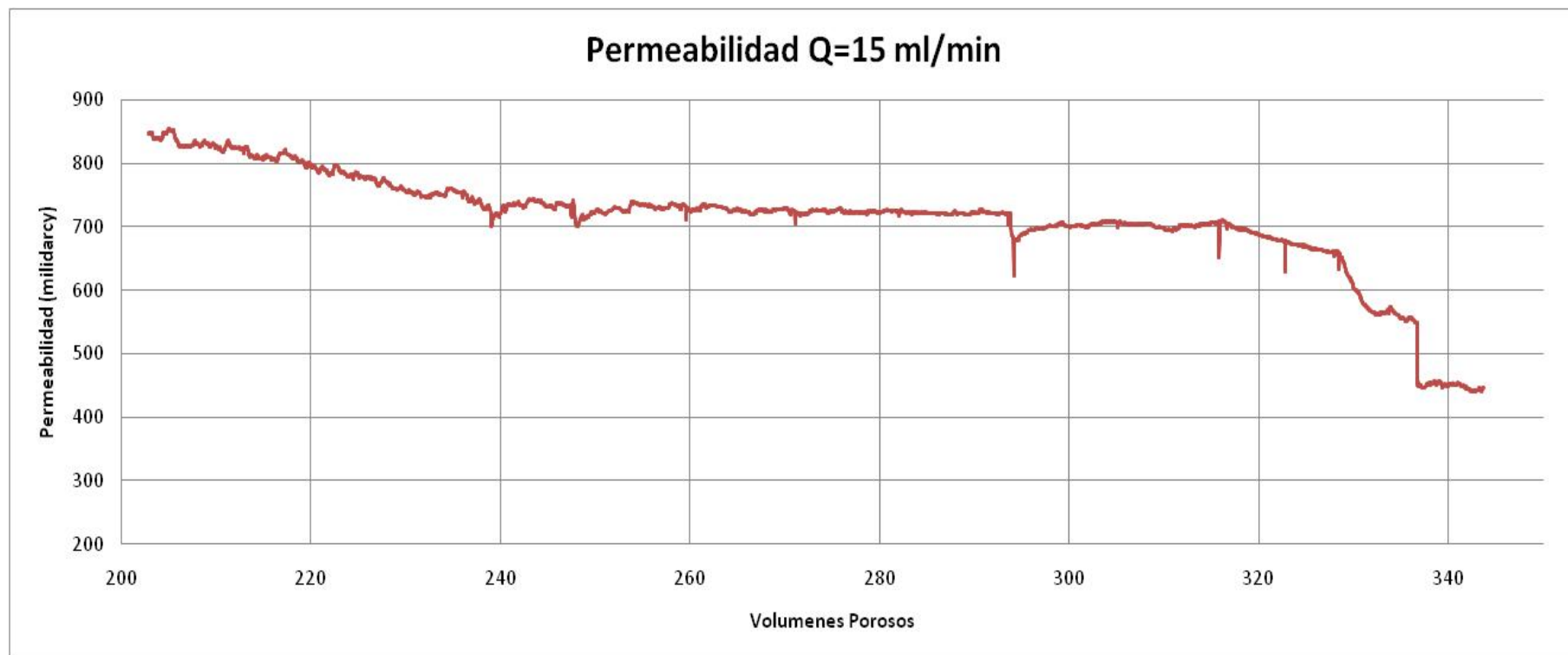


Figura 53 Permeabilidad Absoluta con Caudal Q = 15 ml/min

La figura 53 representa el comportamiento de la permeabilidad entre los 200 y 350 volúmenes porosos, la grafica muestra un comportamiento uniforme en un rango de 60 volúmenes porosos iniciando en 240, donde se puede promediar un valor de permeabilidad absoluta de 720 miliDarcy fluyendo salmuera a 15 ml/min con unas condiciones estables presentes a continuación.

Caudal	15 [ml/min]
Longitud	56,31 mm
Diámetro	37,64 mm
Porosidad	23,2 %
Permeabilidad Al Aire	618 miliDarcy
Volumen Muestra	62,66 cm ³
Volumen Poroso	14,54 cm ³
Fuerza Axial	119,68 KN
Presión De Confinamiento	13000 psi

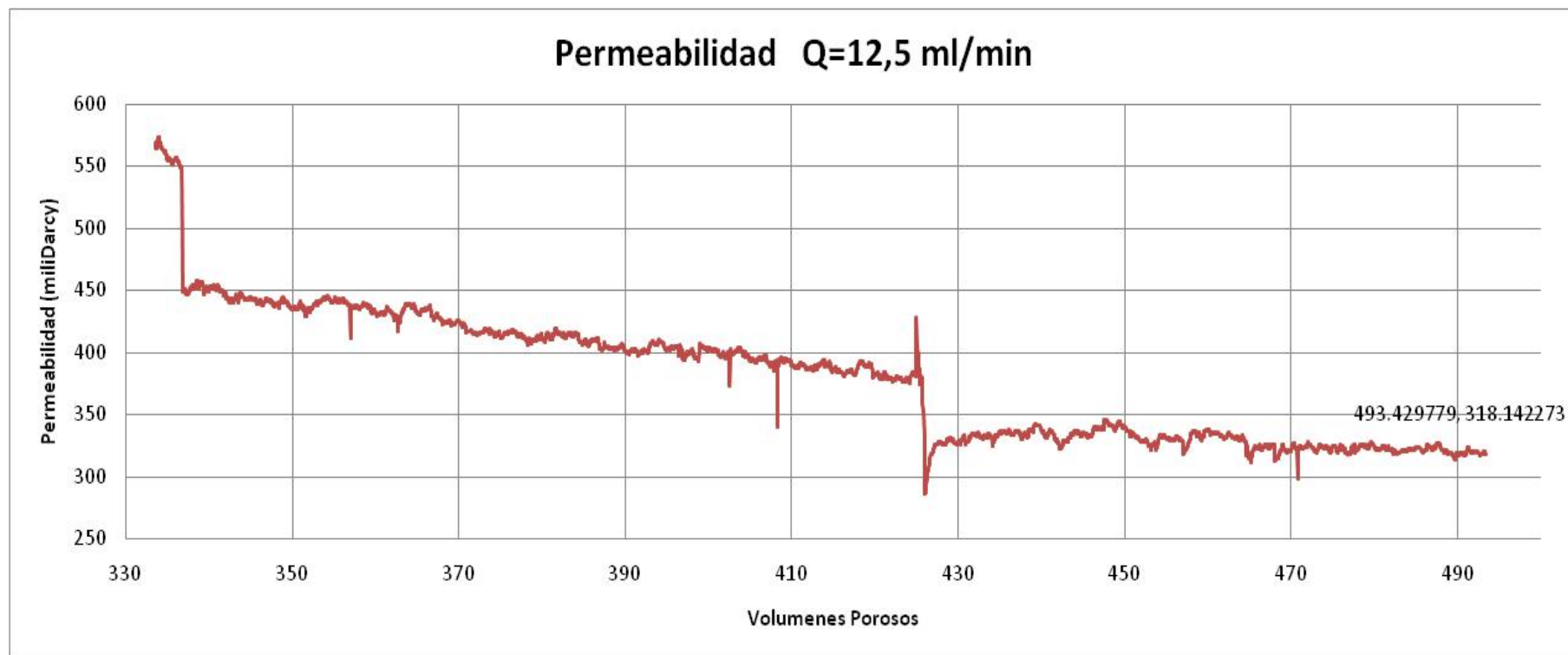


Figura 54 Permeabilidad Absoluta con Caudal Q = 12,5 ml/min

En la figura 54 se presentan dos zonas de estabilidad en la permeabilidad lo cual puede indicar un cambio de flujo cuando habían pasado 425 volúmenes porosos y no en los tiempos registrados por el personal del laboratorio de mecánica de rocas, se puede observar la primera zona desde los 340 volúmenes porosos indicando un valor de permeabilidad absoluta promedio de 420 miliDarcy, la segunda zona de estabilidad se presenta entre los 430 a 490 volúmenes porosos con un valor de permeabilidad absoluta de 330 miliDarcy, ambos valores con un caudal de 12,5 ml/min, se debe comprobar que el cambio de flujo se presenta cuando han fluido 330 volúmenes porosos y si a los 425 se realizó un cambio de flujo para darle explicación a la caída de la permeabilidad en 90 unidades de permeabilidad, las condiciones presentes en esta parte del ensayo fueron:

Caudal	12.5 [ml/min]
Longitud	56,31 mm
Diámetro	37,64 mm
Porosidad	23,2 %
Permeabilidad Al Aire	618 miliDarcy
Volumen Muestra	62,66 cm ³
Volumen Poroso	14,54 cm ³
Fuerza Axial	119,68 KN
Presión De Confinamiento	13000 psi

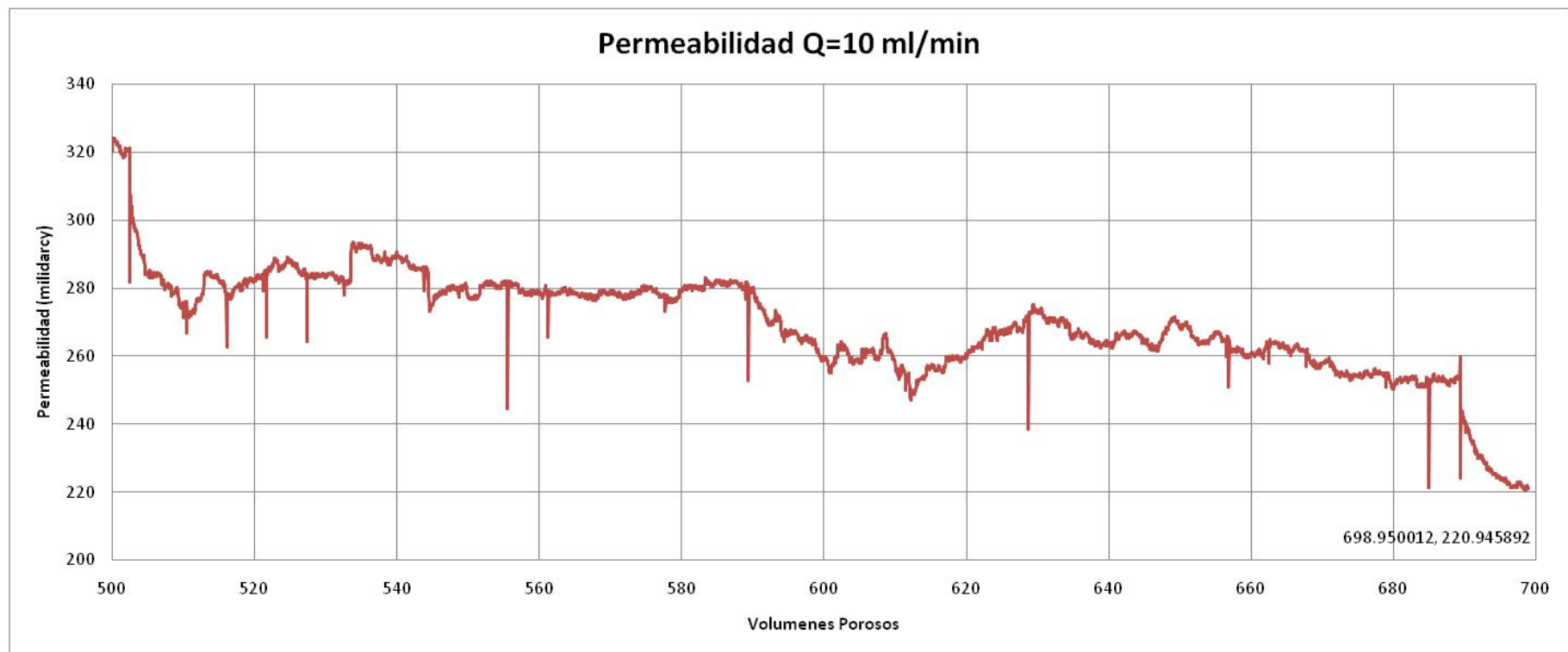


Figura 55 Permeabilidad Absoluta con Caudal Q = 10 ml/min

La figura 55 muestra el comportamiento de la permeabilidad absoluta entre los 500 y 700 volúmenes porosos y debido a la escala de la permeabilidad en la grafica se podría presumir un comportamiento poco uniforme, lo cual es algo se descarta al ver que la permeabilidad absoluta a 10 ml/min se mantiene en el rango comprendido entre 290-250 miliDarcy mostrando el comportamiento mas estable alrededor de los 280 miliDarcy y las condiciones de la muestra son las siguientes:

Caudal	10 [ml/min]
Longitud	56,31 mm
Diámetro	37,64 mm
Porosidad	23,2 %
Permeabilidad Al Aire	618 miliDarcy
Volumen Muestra	62,66 cm ³
Volumen Poroso	14,54 cm ³
Fuerza Axial	119,68 KN
Presión De Confinamiento	13000 psi

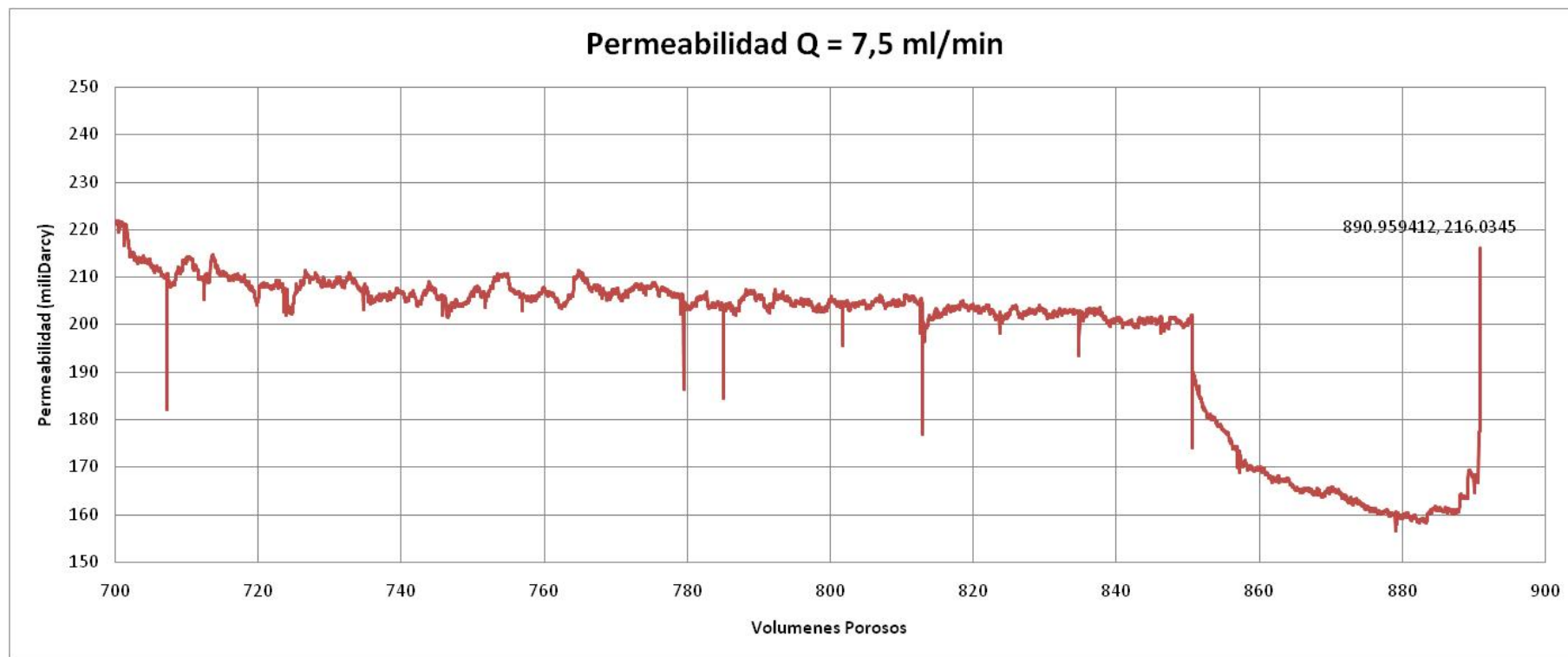


Figura 56 Permeabilidad Absoluta con Caudal Q = 7,5 ml/min

La figura 56 representa el comportamiento de la permeabilidad en el rango de 700 a a 900 volúmenes porosos, se puede observar en la grafica un comportamiento muy estable aun cuando el eje que representa la permeabilidad está dividido cada 10 miliDarcy, la prueba se desestabiliza al momento de realizar las actividades necesarias para garantizar que las condiciones de confinamiento y fuerza axial se mantengan, finalizando con la ruptura de la muestra.

Condiciones de ensayo:

Caudal	17.5 – 15 – 12.5 – 10 – 7.5 [ml/min]
Longitud	56,31 mm
Diámetro	37,64 mm
Porosidad	23,2 %
Permeabilidad Al Aire	618 miliDarcy
Volumen Muestra	62,66 cm ³
Volumen Poroso	14,54 cm ³
Fuerza Axial	119,68 KN
Presión De Confinamiento	13000 psi

✓ Interpretación De Las Graficas

El sistema proporciona un vector de datos importante y muy preciso con el cual el personal del Laboratorio de Mecánica de Rocas puede realizar graficas de permeabilidad Absoluta, Presión diferencial, número de volúmenes porosos, cantidad de salmuera desplazada y tiempo transcurrido del ensayo relacionándolas entre ellas.

De las graficas representadas en las figuras 49 a 56 se puede concluir que se presentan cinco valores de estabilidad en el tiempo necesario para que aproximadamente cuarenta volúmenes porosos fluyan a través de la

muestra siendo necesarios solo 10 volúmenes porosos para establecer un punto de permeabilidad a un caudal establecido y un estado de esfuerzos que simule las condiciones in situ.

Estado de esfuerzos:

Tabla 11 Estado de Esfuerzos in Situ

PRESION DE CONFINAMIENTO	13000 PSI
FUERZA AXIAL	119,68 KN

Puntos de permeabilidad:

Tabla 12 Valores de Permeabilidad

Caudal Q	Valor Promedio De Permeabilidad Absoluta K [mildarcy]
17,5	820 mildarcy
15	720 mildarcy
12,5	410 - 330 mildarcy
10	280 mildarcy
7,5	204 mildarcy

Según el flujo de salmuera inyectado se establecen rangos estables en cuanto al valor de permeabilidad absoluta se refiere, se puede concluir que en esta prueba dichos valores son los presentes en la tabla 12.

La discriminación de la gráfica de permeabilidad Vs Volúmenes porosos es de vital importancia debido a que por medio de ella podemos conocer el comportamiento de las propiedades dependiendo del flujo de salmuera al

que se somete la muestra, en una de las graficas presentadas se presentan dos zonas de permeabilidad estable, este comportamiento no es algo natural del flujo en un medio poroso por lo que se presume que el momento en que se anuncia el cambio de flujo no está acorde al fenómeno físico presentado y registrado en las graficas.

Una vez establecidos todas las observaciones se entrega al laboratorio de mecánica de rocas del instituto colombiano del petróleo resultados claros, graficas en tiempo real por medio de OPTO 22 y un vector de datos muy completo para la realización de graficas del comportamiento de la probeta sometida a diferentes configuraciones de confinamiento e inyección de salmuera.

CONCLUSIONES

Se diseñó un circuito hidráulico de inyección de salmuera para la medición de la presión diferencial con la cual se determina la permeabilidad absoluta en probetas extraídas de corazones de perforaciones petroleras, implementando elementos especializados en el manejo de caudales del orden de ml/min a una presión diferencial máxima de 3600 psi y una presión manométrica máxima de 10.000 psi.

Se entrega al Laboratorio de Mecánica de Rocas del Instituto colombiano del Petróleo un banco para la medición de la presión diferencial hidráulicamente funcional ubicado en una estructura que se presenta a través del desarrollo del proyecto como provisional por petición del Laboratorio.

La conmutación de las válvulas se realiza de manera autónoma en tiempos adecuados que garantizan la integridad de los transmisores de presión SMAR y gracias a la velocidad de conmutación y el tipo de válvulas (volumen constante) no se presentan picos de presión dando como resultados graficas continuas en el tiempo.

Con los resultados y comportamientos presentes en el banco de medición de presión diferencial para la determinación de la permeabilidad absoluta se puede supervisar el comportamiento de las siguientes propiedades permeabilidad, presión diferencial y los comportamientos de flujo a través de la roca en tiempo real.

Resulta conveniente conocer el comportamiento del flujo en la roca debido a que se establecen las características para realizar el cambio de flujo de salmuera estableciendo así un nuevo punto de permeabilidad absoluta.

Para el buen funcionamiento del banco de medición de presión diferencial se entrega al laboratorio un manual de funcionamiento en donde se presentan las partes y funciones de cada uno de los equipos que constituyen el banco junto con el protocolo de inspección y mantenimiento preventivo.

Con el fin de estandarizar los procedimientos a realizar en la manipulación del banco de la medición de presión diferencial se entrega al Laboratorio de Mecánica de Rocas un procedimiento técnico de operación (PTO) de tal manera que oriente al operario en las actividades a realizar.

El sistema cumplió de una manera satisfactoria las pruebas hidrostáticas al llegar a valores de 6000 psi manométricos (6500psi limite de falla de carcasa), se mantuvo por 18 horas sin presentar fugas ni pérdidas de presión.

En las pruebas hidrodinámicas el sistema se llevó a condiciones extremas de presión diferencial (3600 psi) en poco tiempo respondiendo de manera satisfactoria en la conmutación de los transmisores de presión manteniendo la integridad de todos los elementos componentes del banco.

Al final de las pruebas de permeabilidad el sistema entrega un archivo de extensión .dat el cual contiene el registro del comportamiento de la presión diferencial, permeabilidad, y comportamientos del flujo inyectado a la muestra, los cuales son ordenados y presentados en graficas claras para la determinación de la permeabilidad y posterior entrega de resultados al cliente en corto tiempo.

Se da por parte de la Universidad Industrial De Santander soporte tecnológico al Instituto Colombiano Del Petróleo por medio de la aplicación de herramientas y procesos especializados, reduciendo los tiempos de análisis y dando al Laboratorio De Mecánica De Rocas tecnologías vanguardistas en la optimización de los procesos que allí se realizan.

BIBLIOGRAFÍA

De WIEST Roger J.M., Flow through porous media, Academic press, New York and London, 1.969

PIRSON. Sylvain J., Oil Reservoir Engineering, Mc Graw Hill, New York, Toronto, London, 1.958, Second Edition.

MANUAL DE OPERACION: Vindum Engineering, CV Series High-Pressure Valves, <http://www.vindum.com/Vindum%20Valve%20Manual0306.pdf>

MANUAL DE OPERACION: D-Series Pumps Installation and Operation Guide, <http://www.isco.com/pcfiles/PartPDF4/UP000ZO5.pdf>

MANUAL DE OPERACION: transmisor inteligente de presión Con control PID incorporado SMAR LD301. <http://www.smar.com/manual301.pdf>

MANUAL DE OPERACION: MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems, http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev_002698.pdf

NORTON, Robert L. Diseño de maquinas. Prentice Hall. 1999.

NORMA API RP 40 – Recommended Practice for Core Analysis

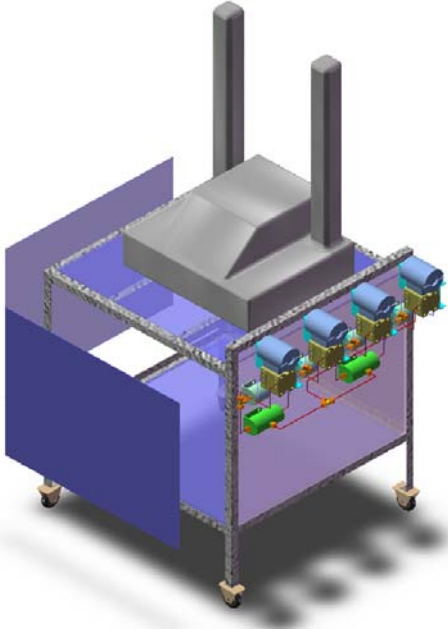
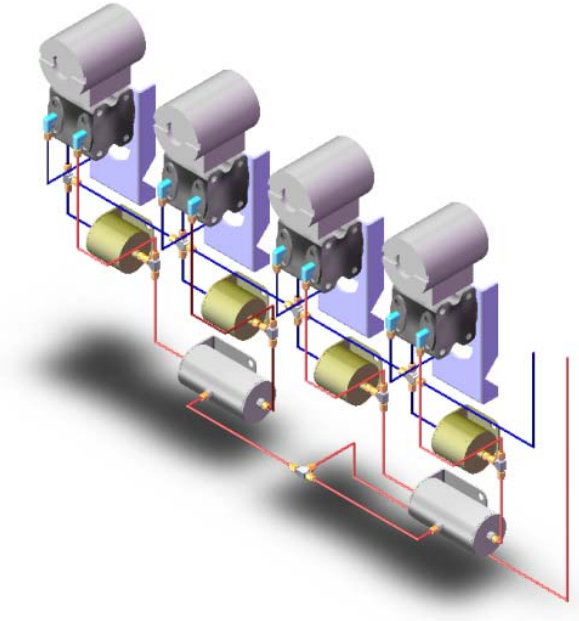
NORMA ASTM D4543 – 08 Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances

NORMA ASTM: D 7012 – 07 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Module of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

ANEXOS

**ANEXO A. MANUAL DE EQUIPO PARA LA MEDICION DE LA PRESION
DIFERENCIAL**

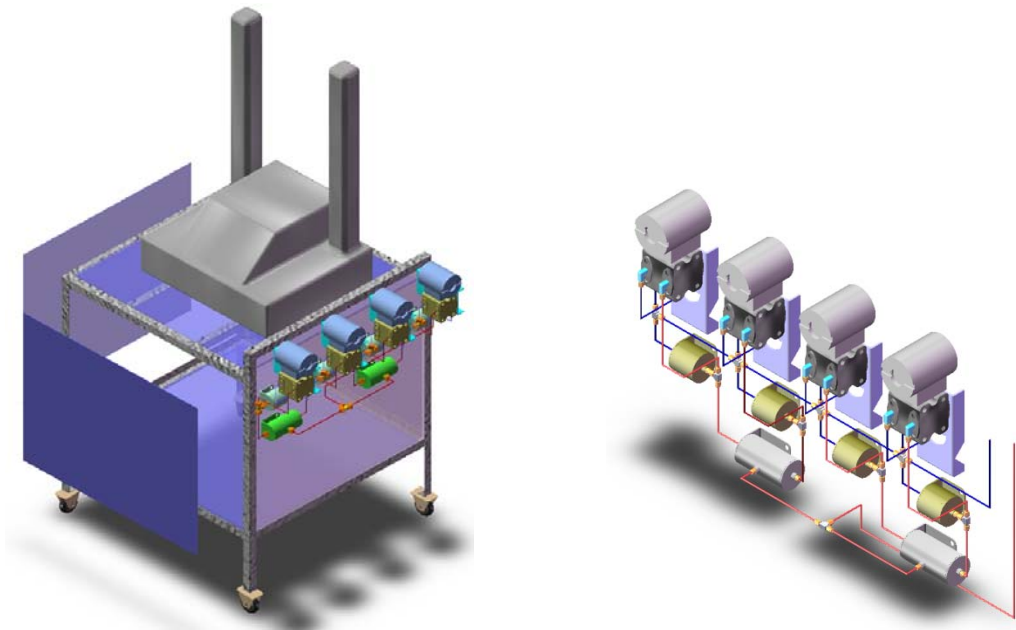
LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS



DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El banco de medición de la permeabilidad es un sistema robusto y preciso para la medición de la presión diferencial que se presenta entre la entrada y la salida de un espécimen de roca al momento de inyectar salmuera con especificaciones de 2200 partes de sal por un millón de partes de agua. El banco se puede dividir en tres partes de la siguiente manera:

Figura 57 Banco de medición de presión diferencial



Equipo de ensayo: Es donde se ubica el espécimen después de realizar los procedimientos de preparación, el espécimen es montado previamente sobre dos end cups encargados de dar soporte rigidez al espécimen y permiten el bombeo de fluido a través de él.

Equipo de medición: el equipo de medición se conecta de manera paralela a la entrada y la salida del equipo de ensayo, compuesto por diversos elementos que permiten medir la diferencia de presión en diferentes rangos con alta precisión y confiabilidad.

Equipo electrónico: Su función es coordinar todas las actividades del equipo de medición, la conmutación de los medidores de presión diferencial acorde al rango al que se encuentre sometido el espécimen.

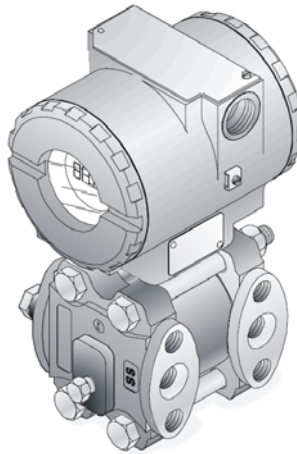
Todos los componentes que conforman el banco de medición de la permeabilidad están ubicados en una estructura rígida formada por perfilera y lamina de acero estructural recubierta por una capa de pintura que la protege de la corrosión

1.1. ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD

1.1.1. Transmisor De Presión Diferencial

El LD301 Es un transmisor de presión inteligente para la medición diferencial, manométrica y absoluta de presión, nivel y flujo. El transmisor se basa en un sensor con diafragma capacitivo el cual transforma la presión señales eléctricas, ofrecen un funcionamiento seguro y de alto rendimiento. La tecnología digital permite seleccionar varios tipos de funciones de transferencia, una fácil interfaz entre el campo y la sala de control y algunas características que reducen notablemente los costos de instalación, operación y mantenimiento.

Figura 58 Transmisor De Presión Diferencial SMAR LD – 301



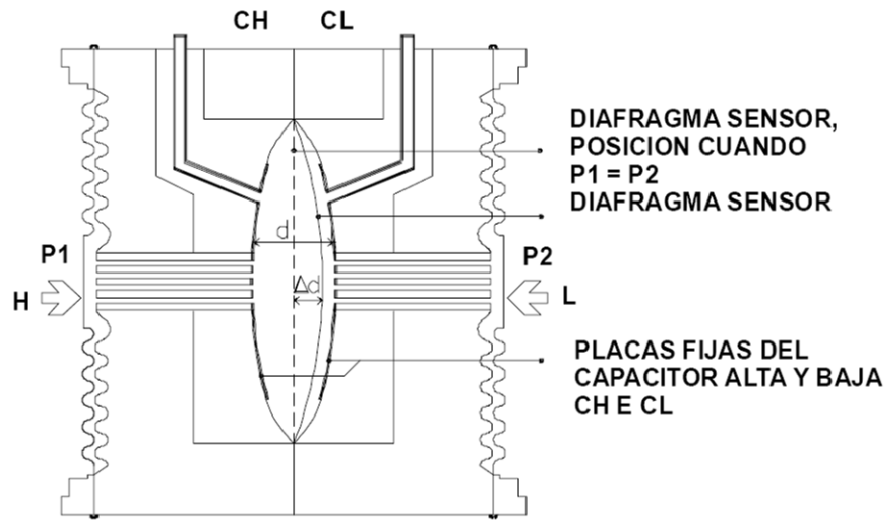
Fuente: Manual De Instrucciones Y Operación SMAR LD – 301

El laboratorio de mecanica de rocas implementa para esta prueba cuatro medidores LD301 los cuales registran un rango de presion a corde a la siguiente tabla

Tabla 13 Rangos de Presión de Trabajo

TRANSMISOR DE PRESIÓN SMAR	RANGO
H2	0-7 psi
H3	0-36 psi
H4	0-360 psi
H5	0-3602

Figura 59 Célula Capacitiva



Fuente: Manual De Instrucciones Y Operación SMAR LD – 301

Los medidores LD301 cuentan con una CPU dotado con una memoria interna (EEPROM) no volátil, dónde se almacenan datos que deben retenerse. Son ejemplos: la calibración, configuración e identificación de datos. La EEPROM permite 10.000 grabaciones en la misma posición de memoria, adicionalmente otra EEPROM se ubica dentro de la placa del sensor. Ella contiene datos que pertenecen a las características del sensor en diferentes presiones y temperaturas. Esta caracterización se hace para cada sensor, ya que cada sensor es caracterizado en la fábrica.

Para realizar la comunicación el sistema suministra el cambio de los datos entre el configurador y el transmisor, usando la comunicación digital del tipo slave-master (esclavo-amó). El transmisor demodula informaciones de la línea de corriente, y modula los datos de la respuesta en la propia línea, de tal manera que un " 1 " representa 1200 Hz y el " 0 " 2200 Hz y por la naturaleza de la señal de frecuencia que es simétrica no afecta el nivel de DC de la salida de 4-20 mA.

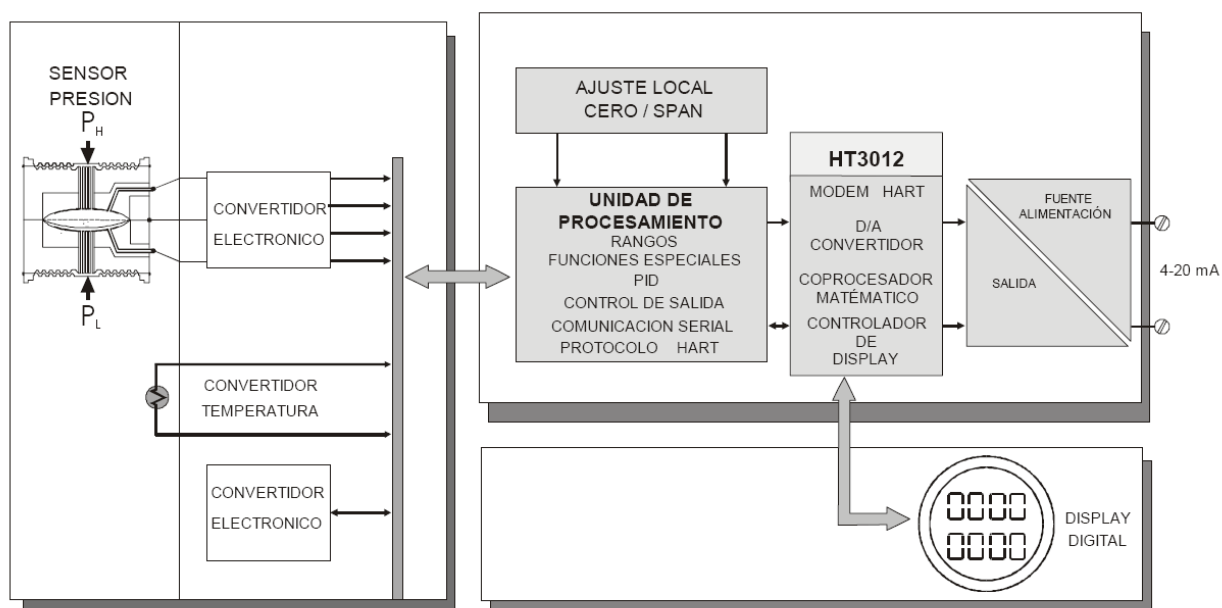
Fuente de Alimentación: La energía es proporcionada al circuito del transmisor por medio de la línea de señal (sistema de 2- alambres + -). El consumo inactivo (quiescent) del transmisor es 3.6 mA; durante la operación, el consumo puede alcanzar 21 mA, conforme el estado de la medición y del sensor.

El LD301, en la modalidad de transmisor, muestra la indicación de fallo en 3.6 mA si está configurado para fallo de señal bajo; en 21 mA, si configurado para el fallo de señal alto; 3.8 mA en caso de saturación baja; 20.5 mA cuando ocurre saturación alta y mediciones proporcionales a la presión aplicada en el rango entre 3.8 mA y 20,5 mA. El 4 mA corresponde a 0% del rango de trabajo y 20 mA al 100% del rango de trabajo.

Para realizarle ajustes al LD301 en cuanto a su configuración local se manipulan dos interruptores que se activan magnéticamente por un destornillador magnético, sin contacto externo, sea mecánico o eléctrico.

El diagrama de bloques representa el funcionamiento y las partes que conforman el transmisor de presión diferencial LD301 de la empresa SMAR

Figura 60 diagrama de bloques de funcionamiento del transmisor SMAR



Fuente: Manual De Instrucciones Y Operación SMAR LD – 301

1.1.2. Bomba ISCO A 100 DM

El equipo A100DM está compuesto de dos módulos de bomba A100 para garantizar un flujo continuo usando un paquete de válvulas neumáticas que controla la conmutación de las dos bombas entregando un flujo sin pulsos por un tiempo ilimitado operando a presión o flujo constante.

Esta construida con elementos de alta calidad con capacidad de manejar líquidos acuosos, orgánicos, soluciones corrosivas, líquidos calientes, gases licuados, fluidos con alto grado de viscosidad y de manera opcional se construye con materiales especiales como Hastelloy C-276

Modos de comunicación o interfaz

- ✓ Interfaz serie RS232
- ✓ Entradas analógicas de voltaje
- ✓ Entradas y salidas digitales

Figura 61 Bomba ISCO 100 DM – DX



Fuente: D-Series Pumps Installation and Operation Guide

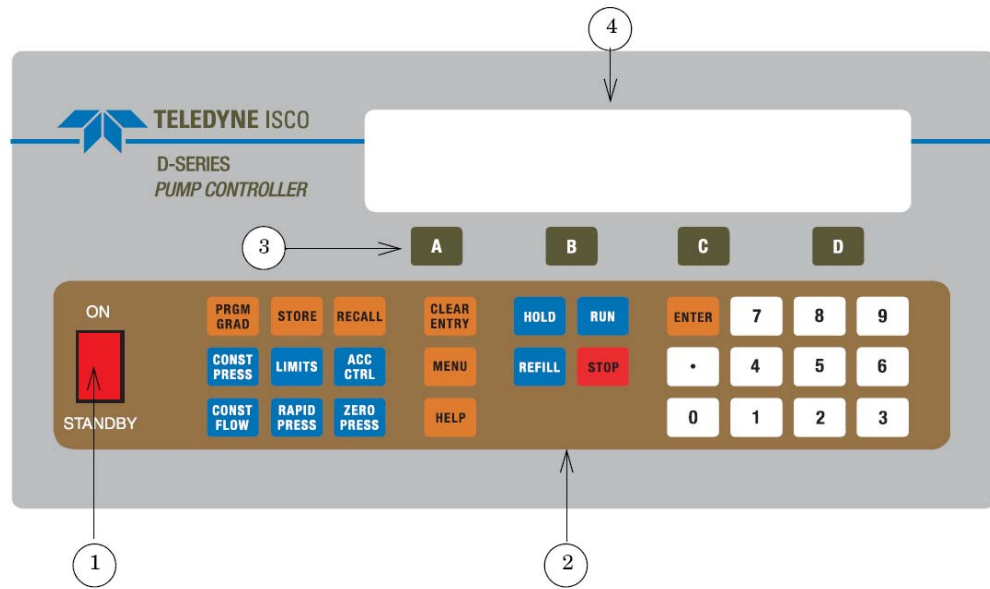
Tabla 14 especificaciones técnicas bomba ISCO

MODULO DE BOMBA 100DM-DX	
Capacidad:	103 ml
Rango De Flujo (ml/min):	0.00001 – 30
Precisión De Flujo:	0.5% of setpoint
Resolución De Desplazamiento:	4.8 nl
Estabilidad De Motor:	± 0.001% por año

Rango De Presión:	10 - 10,000 psi (0.7 to 695 bar)
Precisión Estándar De Presión:	0.5% FS
Precisión Opcional De Presión:	0.1% FS
Materiales En Contacto Con Fluido (Estándar):	Nitronic 50, PTFE, Hastelloy C-276
Puertos Hidráulicos:	1/8" Valco
Temperatura De Operación:	5 - 40° C Ambient
Alimentación Eléctrica:	100 Vac, 117 Vac, 234 Vac, 50/60 Hz (specify)
Dimensiones (Hxwx, Cm):	103 x 27 x 45
Peso:	Pump module - 33 kg; controller - 3 kg

Controles e Indicadores: La bomba está diseñada para ubicarla cómodamente en la parte superior del controlador el cual regula todas las funciones de bombeo ingresando los datos por medio de un teclado frontal acorde a la figura anexa

Tabla 15 Panel Frontal Controlador De Bomba



Fuente: D-Series Pumps Installation and Operation Guide

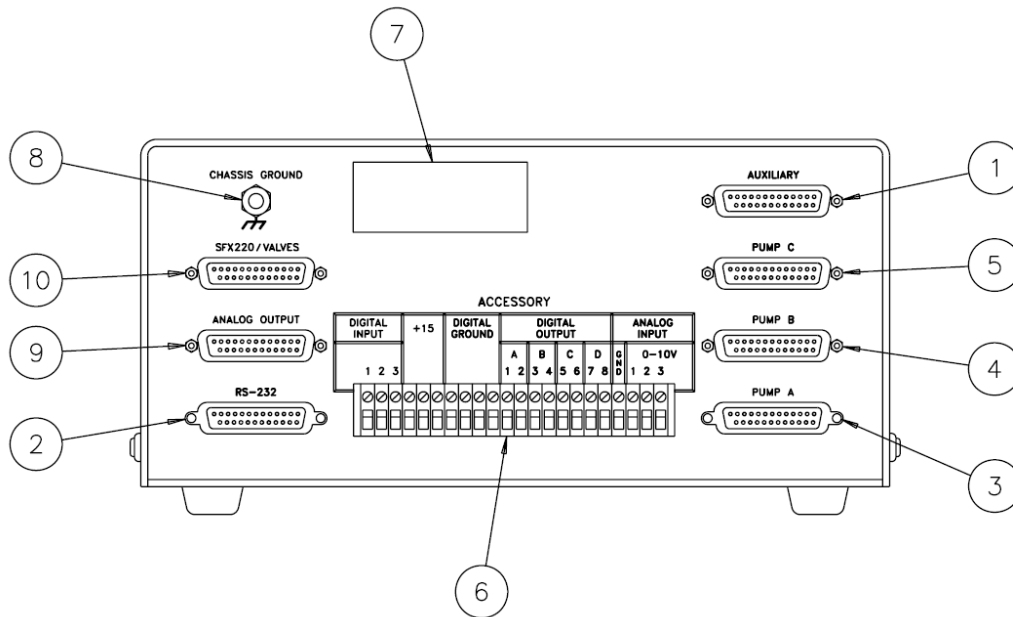
Tabla 16 Especificaciones Panel Frontal Controlador

PANEL FRONTAL DEL CONTROLADOR		
Ítem No. de la figura	CONECTOR	DESCRIPCIÓN
1	Interruptor encendido	Enciende y apaga
2	Teclado de programación	Programa el funcionamiento y registro del equipo
3	Teclas de acceso	Los botones etiquetados A-B-C-D; son usados para seleccionar los ítem del menú de opciones que aparecen en la pantalla de

		cristal liquido.
4	Pantalla de cristal liquido	Con capacidad de 40 caracteres X 4 líneas

El panel trasero del controlador de la bomba contiene varios puertos de entrada y de salida, se detalla en la figura anexa

Figura 62 Panel Trasero Del Controlador



Fuente: D-Series Pumps Installation and Operation Guide

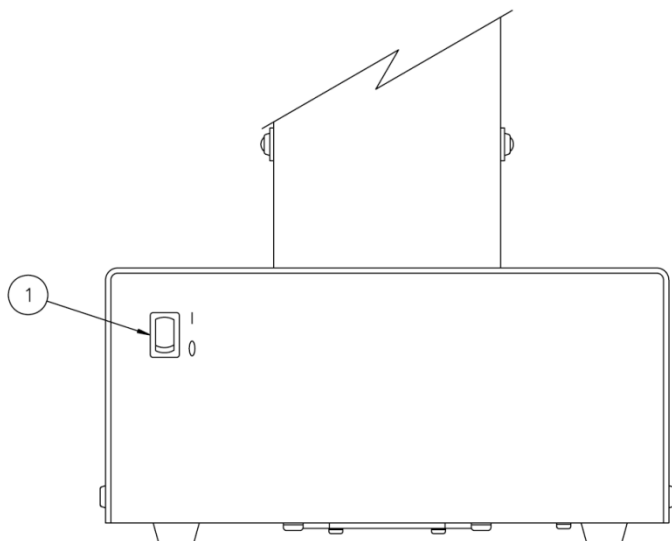
Figura 63 Especificaciones Panel Trasero Del Controlador

CONECTORES PANEL TRASERO DEL CONTROLADOR DE LA BOMBA		
Ítem. No. De la figura	CONECTOR	DESCRIPCIÓN
1	Puerto auxiliar	Provee al sistema para la conexión de una bomba externa o futuros accesorios

2	RS – 232	Este puerto serial puede ser usado con un cable RS – 232 para controlar la bomba desde un PC
3	Bomba A	En este puerto se conecta el cable de control de la bomba A al controlador y debe asegurarse con tornillo
4	Bomba B	Este puerto se usa cuando se requiere la operación de múltiples bombas
5	Bomba C	Este puerto se usa cuando se requiere la operación de múltiples bombas
6	Accesorios	Terminales para la conexión de señales de análogas o digitales de entrada y salida
7	Etiqueta de serie	Esta etiqueta indica el número de serie de aparato
8	Puerto a tierra – chasis	Punto para conexión del chasis a tierra en medios rodados estática ó cuando se usa control desde medios remotos
9	Salidas análogas	Circuito opcional que provee rata de flujo y salida de volumen de liquido
10	SFX – 220 / Válvulas	Circuito opcional que provee control a un motor externo para la operación de una válvula

El único control operativo en la bomba en sí es el interruptor de encendido, se muestra en la Figura 1-8. El panel trasero contiene varios conectores, se detalla en la Tabla 1-10, y se muestra en la Figura 1-7.

Figura 64 panel frontal bomba ISCO

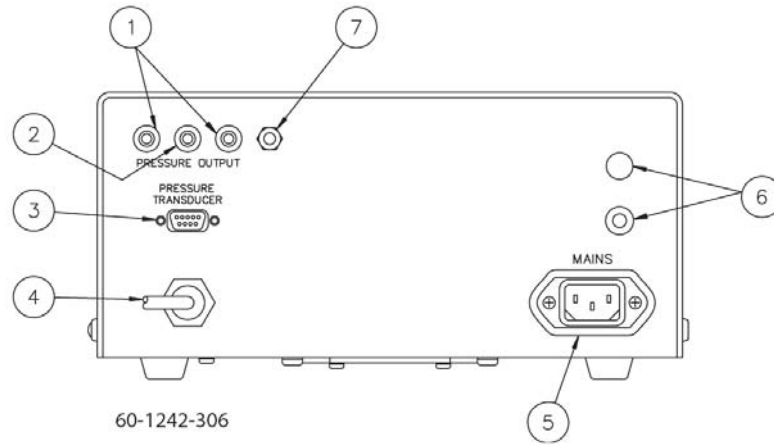


Fuente: D-Series Pumps Installation and Operation Guide

Tabla 17 Especificaciones Panel Frontal Bomba

PANEL FRONTAL DE LA BOMBA		
Ítem No. de la figura	CONECTOR	DESCRIPCIÓN
1	Interruptor de encendido principal	Suministra la energía de los circuitos de la bomba para los cambios de configuración tal como un control de conexión.

Figura 65 Panel Trasero Bomba ISCO



Fuente: D-Series Pumps Installation and Operation Guide

Tabla 18 Especificaciones Panel Trasero Bomba ISCO

CONECTORES PANEL TRASERO DEL CONTROLADOR DE LA BOMBA		
Ítem. No. De la figura	CONECTOR	DESCRIPCIÓN
1	Salidas De Presión	Dos conectores rojos tipo banana que provee los voltajes correspondientes a la presión.
2	Conexión Común Para Múltiples Circuitos	Conector común negro tipo banana
3	Transductor De Presión	Conexión para el cable del transductor de presión que debe estar conectado par operar
4	Conector Para El Control	Conecta la bomba con el controlador
5	Alimentación Principal	Conexión de poder de la bomba

6	Fusibles	Limita la energía que se le suministra a la bomba
7	Conexión A Tierra	Conexión a tierra en caso de instalaciones con estática

1.1.3. Válvulas Vindum Engineering CV (CV-210; CV-310)

Las válvulas para alta presión CV de la empresa Vindum Engineering están disponibles en dos configuraciones; 2 posiciones como válvulas on-off o válvulas de 3 vías 4 posiciones, ambas son accionadas de manera neumática y cuentan con un tiempo de activación inferior a 0,1 segundo, implementada a este proyecto dado a que está diseñada de manera que no desplaza el fluido cuando se abre o se cierra, esto le permite mantener presiones y volúmenes constantes durante el cambio de ciclo.

Las válvulas CV de la empresa Vindum Engineering se fabrican en dos materiales; acero inoxidable 316 resistente a la corrosión o Hastelloy C-276, que se utiliza en aplicaciones con sustancias altamente corrosivas, en este caso salmuera.

Figura 66 Válvulas Serie CV Vindum Engineering



Fuente: Manual CV Series High-Pressure Valves

- **Principales Materiales De Sello O-Ring**

Las válvulas cuentan con O-Ring hechos de los siguientes materiales:

- ✓ Aflas: es el nombre comercial de un fluoroelastómero basado en un copolímero alternativo de tetrafluoroetileno y polipropileno («TFE/P»), sus propiedades principales se centran en poseer una excelente resistencia al calor con capacidad de servicio continuo hasta 230°C, quimiorresistencia, incluyendo resistencia a ácidos y bases fuertes, alta resistividad eléctrica, y excelente resistencia a aceites.
- ✓ Buna: También conocido como estireno-butadieno, o SBR por sus siglas en inglés (Styrene-Butadiene-Rubber), es un copolímero elastómero sintético de gran resistencia al calor y rozamiento.
- ✓ Teflón: El fluoropolímero cuenta con una excepcional resistencia a las altas temperaturas, la reacción química, la corrosión, grietas y el estrés. Las propiedades de Teflon lo convierten en el preferido de plástico para una serie de aplicaciones industriales y las diferentes técnicas de procesamiento.
- ✓ UHMW: Ultra high molecular weight polyethylene (polietileno de ultra alto peso molecular 1000) Apropriado para elementos de roce. Es el plástico de mejor resistencia a la abrasión. Indicado para guías y recubrimientos antidesgaste, rodillos, tornillos alimentadores, etc.
- ✓ Viton: El fluoroelastómero Viton es el más utilizado y destaca por su excelente resistencia al calor (400°F/200°C), a los combustibles y a los químicos agresivos. Además está certificado mundialmente por ISO 9000 e ISO/TS 16949.

- **Rangos De Presión**

Las válvulas CV de la empresa Vindum Engineering cuentan con un rango de presión de 5000 psi, 10000 psi, 20000psi, dependiendo de las necesidades del cliente, para este proyecto se hace necesario implementar las válvulas

con capacidad de trabajo hasta 10000psi debido a que esta es la presión máxima obtenida de la bomba.

- **Válvula Piloto Accionada Por Solenoide**

El piloto de las válvulas es operado de manera neumática con presiones de 80 a 120 psi y controlado por una válvula solenoide que funciona con 12 VDC ó 24 VDC, para esta aplicación se usa la configuración de 12 VDC voltios para el control.

En el manifold neumático cada una de las válvulas solenoide cuenta con una luz que se enciende al momento de ser activada cambiando el flujo de aire presurizado que pasa de estar en el puerto B al puerto A.

Figura 67 Manifold Neumático



1.1.3. ACCESORIOS SWAGELOK

Figura 68 Accesorios Swagelok



Fuente: manual accesorios Swagelok

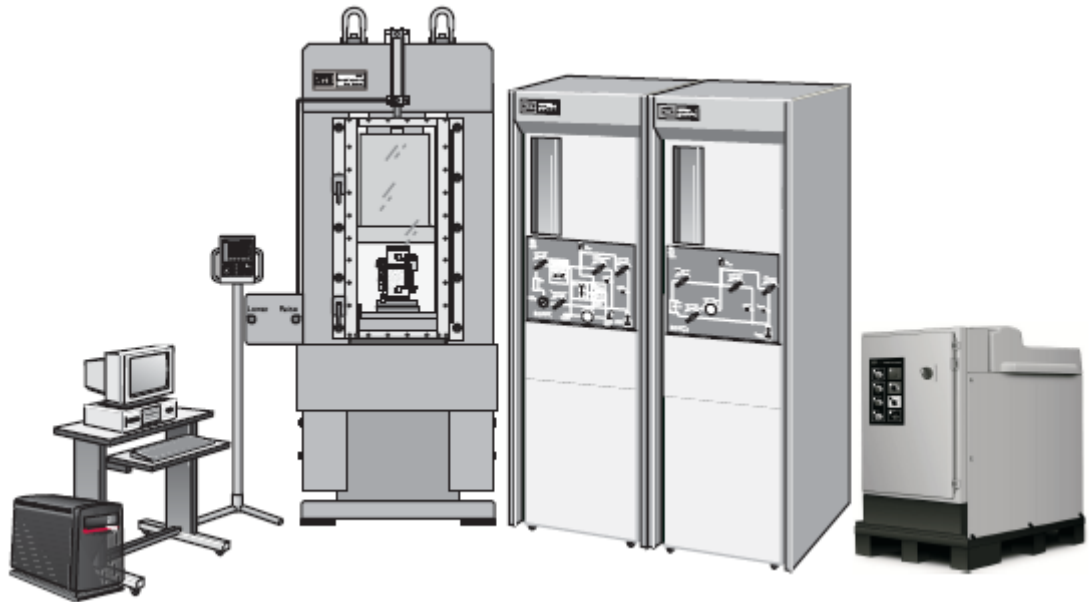
Swagelok provee accesorios para tubing en acero inoxidable al igual que los elementos apropiados para manipularlos y adaptarlos a la necesidad que se presenta en el transcurso del proyecto, los accesorios y herramientas más usados son:

- ✓ Te
- ✓ Racores
- ✓ Férulas
- ✓ Contra férulas
- ✓ Tubing
- ✓ Válvula de paso
- ✓ Corta tubing

✓ Dobra tubing

1.1.4. Sistema de pruebas mecánicas para rocas y concretos (MTS)

Figura 69 MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems



Fuente: Manual MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems

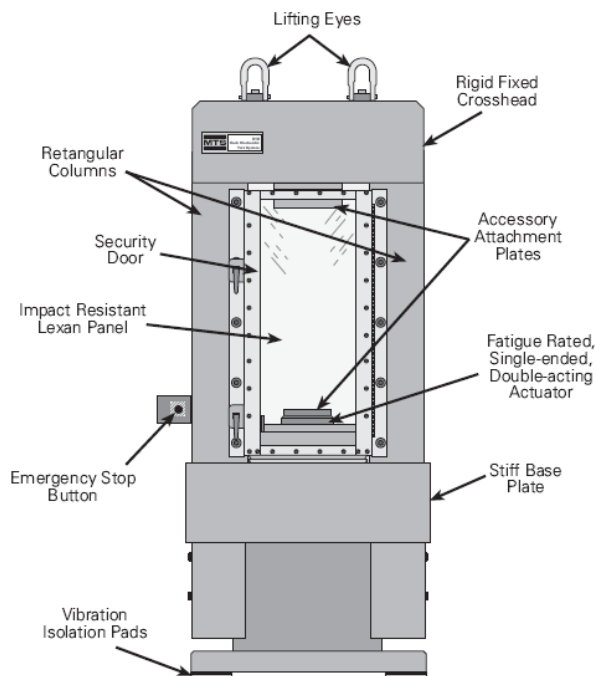
El Modelo 815 es un sistema multipropósito para ensayos en rocas y concretos lo cual provee al laboratorio una amplia gama de pruebas en un sistema modular, compacto y confiable. Este sistema puede ser configurado para pruebas de tensión o compresión uniaxial, triaxiales, directa o modo de prueba de cizalla.

Gracias a la modularidad del sistema se pueden realizar una amplia gama de pruebas con una inversión mínima de equipos. Es ideal para ensayos en rocas y materiales de diferentes composiciones en materiales quebradizos

El modelo 815 incluye el sistema de pruebas de carga junto con una serie de modulos para su correcto funcionamiento en los que se encuentra un controlador FlexTest, un computador personal, un sistema de alimentación auxiliar en caso de un corte de energía repentino y una unidad potencia hidráulica suministrar.

El modulo en donde se ubican los especímenes a ensayar consta de diferentes partes como se muestra en la figura anexa

Figura 70 Módulo De Ensayos Del Equipo MTS 815



Fuente: Manual MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems

Figura 71 Vista Frontal Del Sistema De Medición De Presión Diferencial

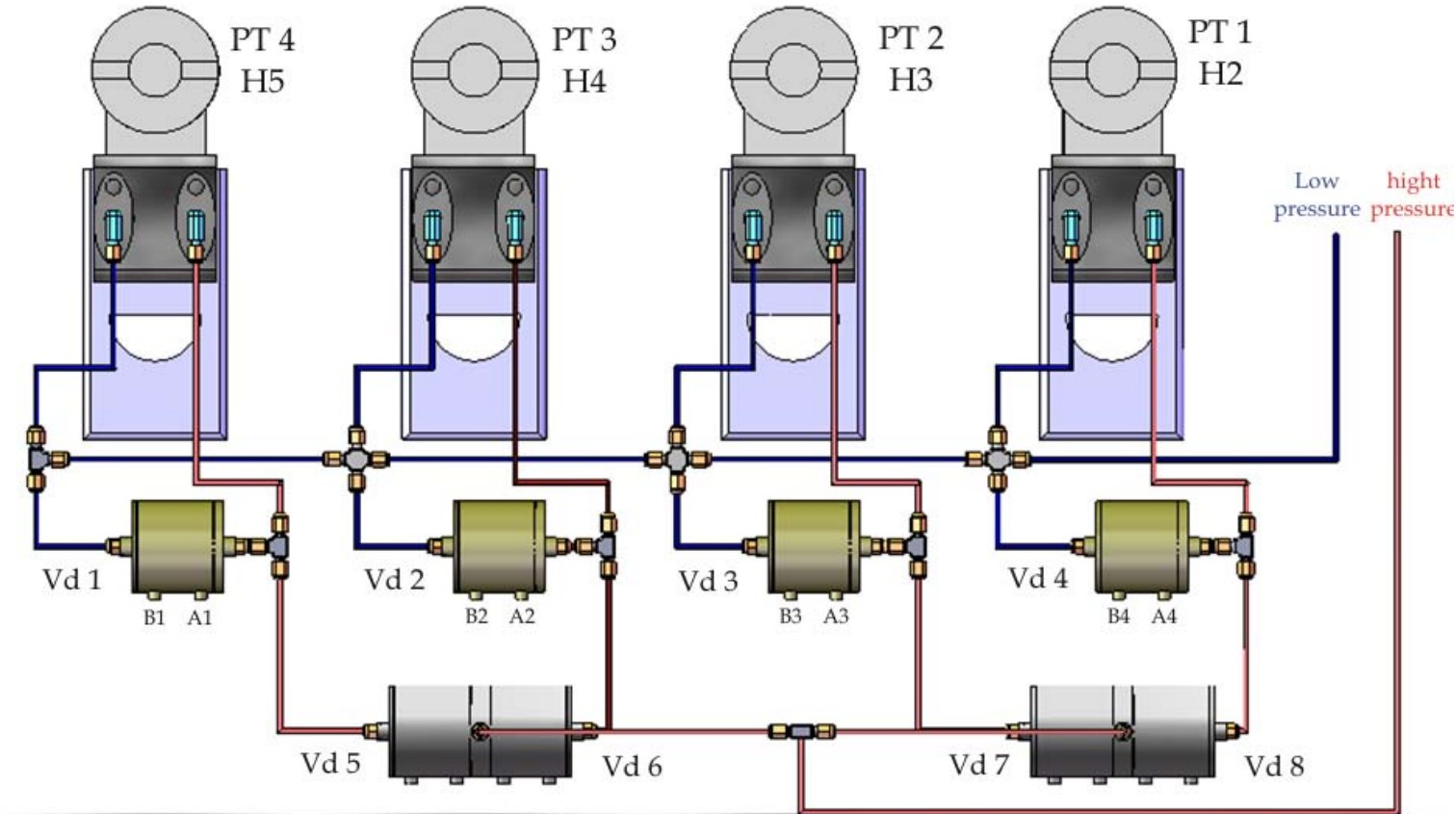


Figura 72 DISEÑO NEUMÁTICO

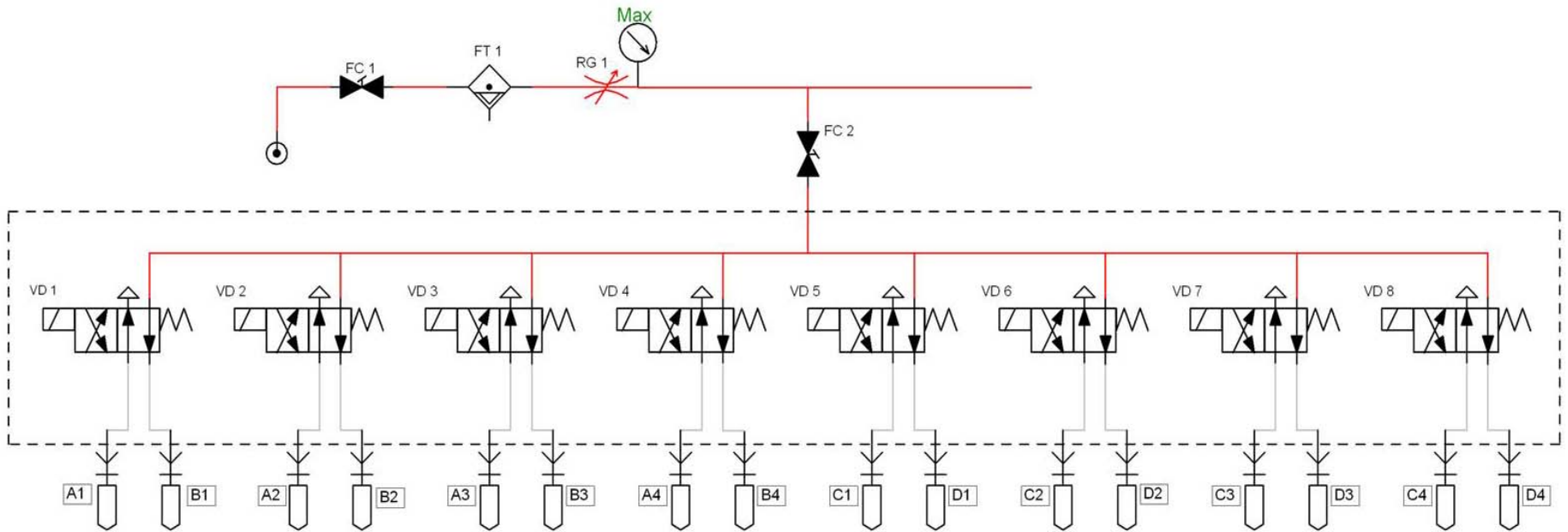
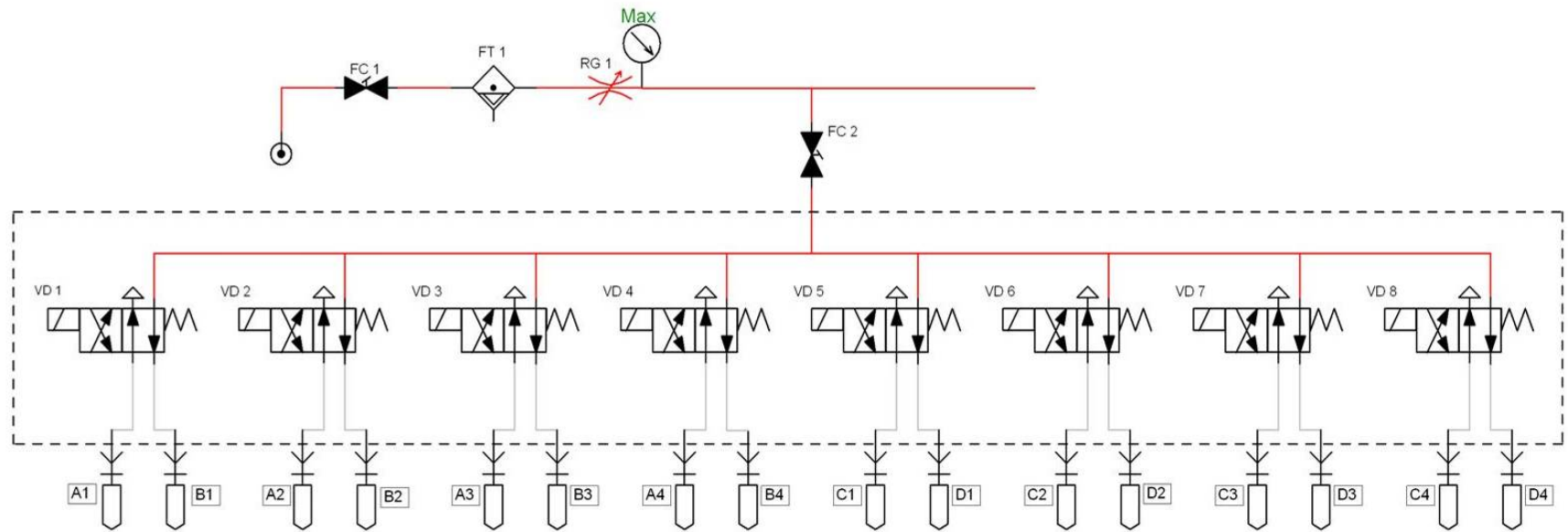


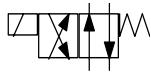
Figura 73 Diseño Neumático De Control



Toma de aire comprimido 120
psi



Filtro con drenaje automático



Válvula 5 vías dos posiciones
accionada por solenoide



Conector rápido tipo OD hacia
la válvula

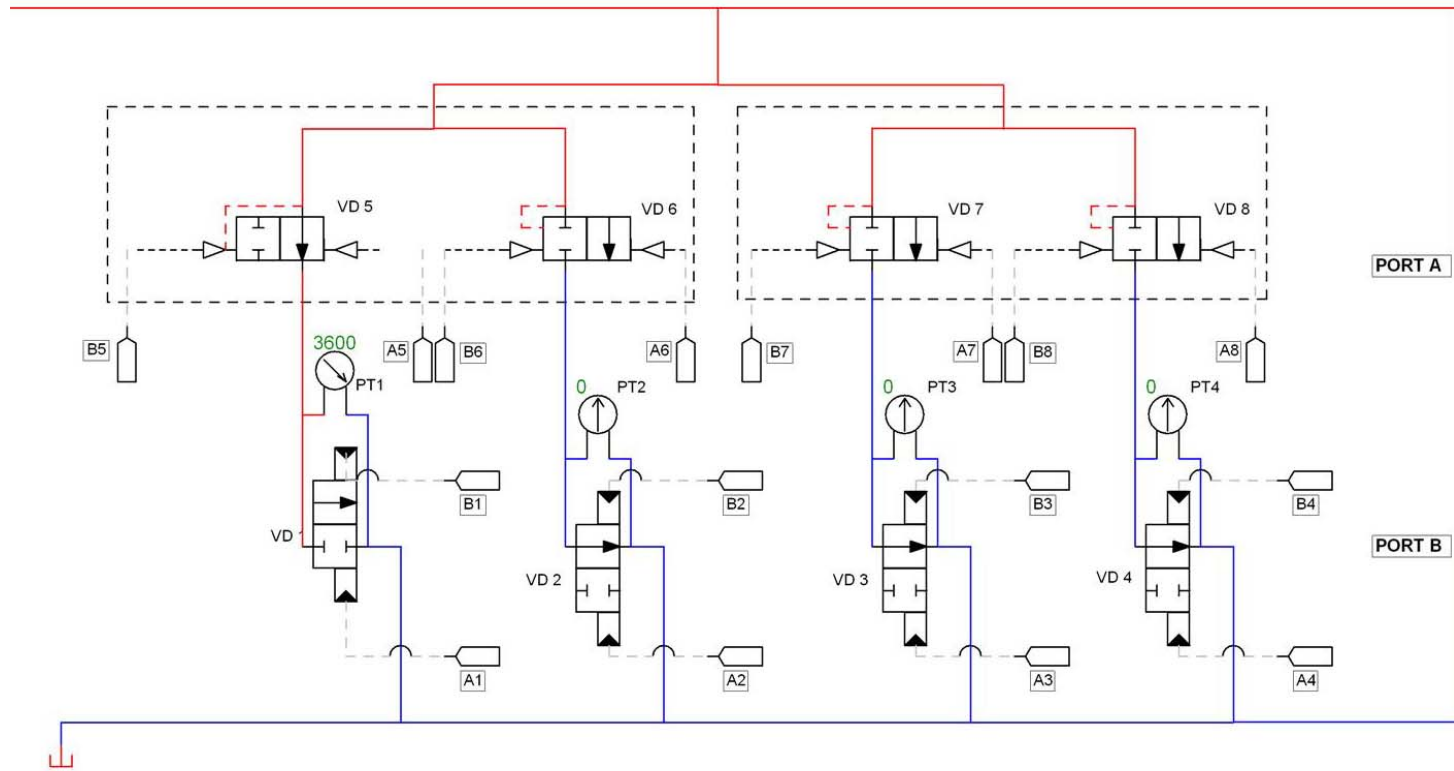
1.1.5. Elementos Implementados En El Diseño Seleccionado

Diseño Neumático

La figura 22 se presenta el plano neumático el cual controla el accionamiento de las válvulas hidráulicas por medio de ocho válvulas solenoides ubicadas en un manifold alimentado por una línea de aire comprimido a 120 psi, los elementos que conforman el montaje neumático son:

- ✓ Manifold de control neumático alimentado por medio de una conexión tipo OD de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro para tubería flexible, salida tipo conexión rápida tipo OD para tubería flexible de $\frac{1}{8}$ pulgadas de diámetro, las válvulas solenoides son accionadas con corriente directa a 24 Voltios.
- ✓ Tubería flexible de diámetro $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{8}$ de pulgada
- ✓ Válvula de paso galvanizada de $\frac{1}{4}$ pulgada.
- ✓ Filtro para aire con conexión $\frac{1}{4}$ NPT
- ✓ Válvula reguladora de presión neumática con conexión $\frac{1}{4}$ NPT y manómetro de inspección.
- ✓ Tubería rígida en acero inoxidable y accesorios Swagelok de $\frac{1}{4}$ NPT

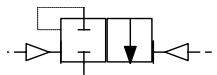
Figura 74 Diseño Hidráulico



Transmisor de presión diferencial

PORT B

Puerto de entrada al equipo MTS 815

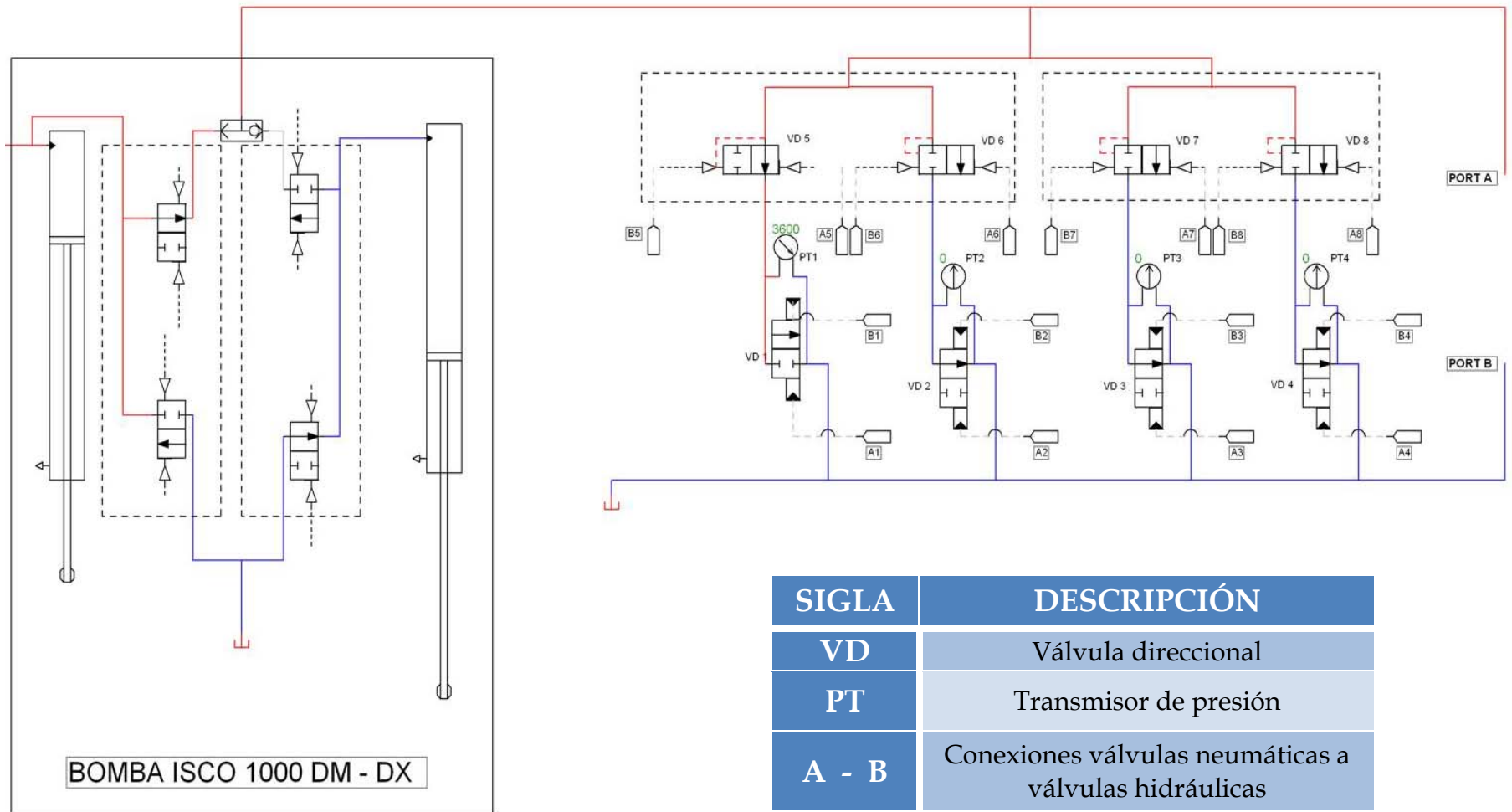


Válvula de 2 vías dos posiciones accionada neumáticamente

PORT A

Puerto de salida del equipo MTS 815

Figura 75 Diseño Hidráulico Conectado A Bomba ISCO 100 DM-DX



Diseño Hidráulico

Las figuras 18 y 19 muestran la manera como interconectar las válvulas encargadas de realizar la conmutación a los transmisores de presión diferencial conectando la bomba ISCO al sistema y simulando una presión diferencial, las partes que constituyen este diseño se presentan a continuación:

- ✓ Válvulas de dos y tres vías marca Vindum Engineering para conexión de tubing (1/8 de pulgada)
- ✓ Accesorios Swagelok (férulas, contraférulas, tubing, conectores en T, conectores en cruz, adaptadores 1/4 x 1/8 NPT, tapon 1/4)
- ✓ Transmisores de presión SMAR (H2 – H3 – H4 - H5)
- ✓ Bomba ISCO 100DX
- ✓ Válvulas de paso conexión 1/8 NPT Swagelok

El sistema es controlado por medio de la implementación del software y hardware OPTO 22 siguiendo una secuencia establecida basada en cada una de las fases de la prueba.

Tabla 19 Secuencia de Funcionamiento

	FUNCIONES	EQUIPO DE MEDICION	CONTROL VÁLVULAS SOLENOIDES							
			VD1	VD2	VD3	VD4	VD5	VD6	VD7	VD8
SECUENCIA OBLIGATORIA DE ARRANQUE	ENCENDIDO		ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
	P > 3600 PSI		OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	REG. PT 1 <3600 psi	H5	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
	REG. PT 2 < 360 psi	H4	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
	REG. PT 3 < 36 psi	H3	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF
	REG. PT 4 < 7 psi	H2	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
EN FUNCIONAMIENTO	REG. PT 1 >= 3600 psi		OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	REG. PT 2 360 ≤ reg < 3600	H5	ON	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
	REG. PT 3 36 ≤ reg < 360	H4	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
	REG. PT 4 7 ≤ reg < 36	H3	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF
	REG. PT 4 0 < reg < 7	H2	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON

En la tabla 7 se presenta la secuencia de funcionamiento que comanda la conmutación de los transmisores de presión diferencial mediante el accionamiento de válvulas on-off de la empresa Vindum Engineering a través de la programación realizada en OPTO – 22, la secuencia está dividida en tres etapas de la siguiente manera:

Encendido: Permite al sistema liberar cualquier presión residual que esté contenida en el sistema de válvulas y transmisores de presión, para esto se abren las válvulas de tres vías representadas como VD de la número 1 al número 4 que funcionan como normalmente cerradas.

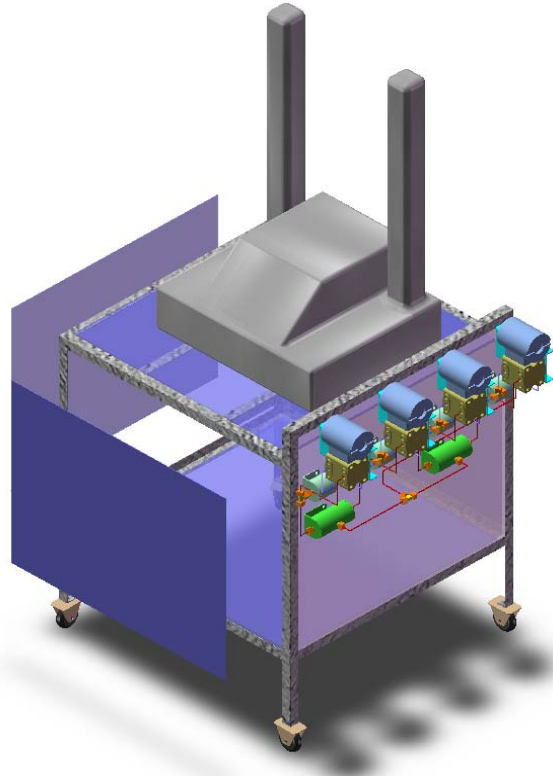
Ubicación del transmisor correspondiente al rango presente de presión diferencial: El sistema por si solo ubicará el transmisor de presión correspondiente al rango de medición presente en la muestra, se inicia un barrido iniciando con el transmisor H5 siguiendo de manera consecutiva hasta el H2 siguiendo las condiciones presentes en la tabla 5.

Funcionamiento: en esta etapa el sistema cuenta con total autonomía en realizar los cambios de transmisor de presión siguiendo un orden consecutivo de menor a mayor o viceversa teniendo en cuenta el rango de presión con la restricción de cerrar las válvulas de tres vías en caso que la presión diferencial supere los 3600 psi momento en el cual se entrara a tomar registro directamente de la bomba ISCO de la presión manométrica entregada.

1.2. MONTAJE DE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA

1.2.1. Diseño Seleccionado

Figura 76 Diseño Estructural Seleccionado

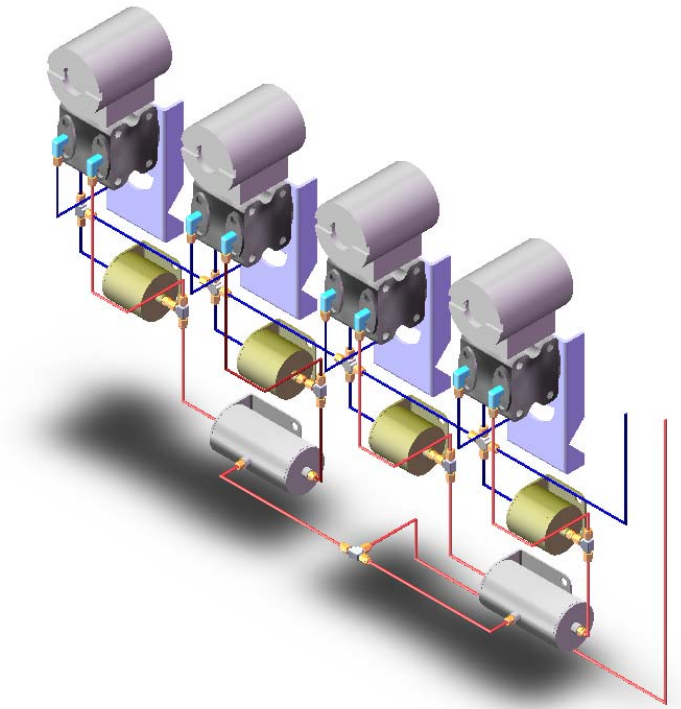


Este diseño sintetiza las mejores cualidades de los diseños anteriormente presentados por contar con una estructura rígida hecha en ángulo en L de una pulgada por un octavo de pulgada de acero estructural con el que se garantiza rigidez y tenacidad, las laminas de los costados son en lamina cold roled y la lamina superior es una lamina de alfajor la cual esta reforzada por dos travesaños, cuenta con ruedas de alta capacidad de carga y frenos para evitar el movimiento durante el transcurso de las pruebas.

La estructura contará con uniones soldadas y las tapas removibles se unen a la estructura por medio de tornillos.

1.2.2. Montaje de las Válvulas

Figura 77 Montaje de las Válvulas



El montaje de las válvulas a la estructura final está acorde a el montaje realizado en el software SolidWorks, por medio de este modelo se dimensiona completamente el banco y la distribución en la que cada uno de los elementos será unido a la estructura con tornillos pasantes asegurados con tuerca y arandela de seguridad garantizando la firmeza y la durabilidad del montaje, las interconexión de las válvulas se realiza por medio de tubing el cual tiene un diámetro externo de un octavo de pulgada en acero inoxidable.

1.2.3. Elementos Provisionales Diseñados y Construidos

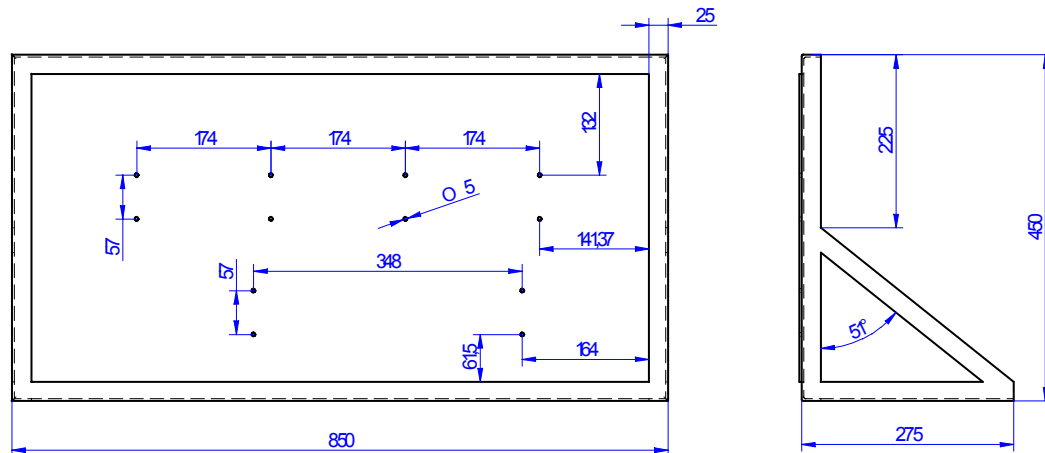
Mientras se construye la estructura final para el montaje del banco de permeabilidad absoluta se realizó el montaje en una estructura provisional en donde se mantiene la configuración de las válvulas y la ubicación de los

transmisores de presión diferencial, los sistemas auxiliares del banco serán ubicados en la parte posterior de la estructura. El sistema será probado y validado acorde a las exigencias del laboratorio.

✓ Estructura de Soporte

La estructura provisional está conformada por una lamina cold roled cal 16 con las perforaciones que se muestran en la figura adjunta, el marco esta hecho en tubo cuadrado de una pulgada recubierto de pintura base aceite color negro, las uniones entre la tubería y la lamina son soldadas y pulidas

Figura 78 Detalles Estructura Provisional



Esta estructura provisional será ubicada en una base presente en el laboratorio de mecánica de rocas la cual le dará soporte y brinda para los operarios de mantenimiento facilidad gracias a que es un diseño ergonómico con fácil acceso a todos y cada uno de los elementos.

✓ Férulas de Fijación y Sello

Para el montaje provisional se hizo necesario diseñar y construir las férulas que son los elementos que realizan y garantizan el sello mecánico entre el tubing y las válvulas de la empresa Vindum Engineering, originalmente la

empresa proveedora de las válvulas suministra las férulas en cuestión, pero debido al montaje provisional los elementos suministrados por la empresa proveedora se deben preservar para el montaje final.

Las férulas provisionales están hechas en aluminio 6061-T6 que es una Aleación Dúctil y Ligera, con gran resistencia y excelentes características de acabado, ideal para la elaboración de piezas maquinadas con excelente calidad garantizando un muy buen acabado superficial.

La composición química del aluminio 6061-T6 es la siguiente:

- ✓ 0.40/0.80% de silicio
- ✓ 0.7% máximo de Hierro
- ✓ 0.15/0.40% de cobre
- ✓ 0.8/1.2% de magnesio
- ✓ 0.04/0.35% de cromo
- ✓ 0.25 máximo de zinc
- ✓ 0.015 máximo de titanio

En total se fabricaron 15 de las cuales 14 son usadas en la unión de tubing – válvulas y la restante se uso para realizar pruebas de resistencia y analizar la deformación que presenta al momento de realizar el sello mecánico con el máximo apriete , el dimensionamiento de las férulas es el que se presenta a continuación:

Figura 79 Detalles Férulas Provisionales

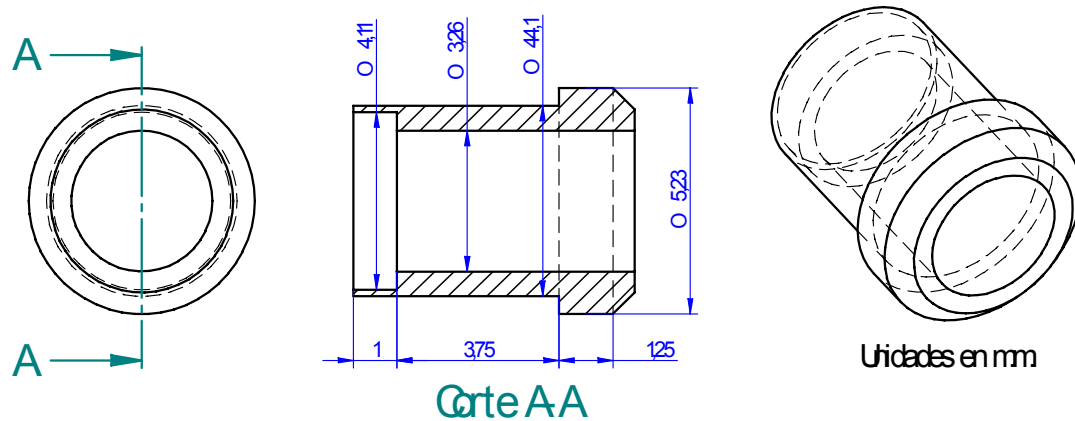
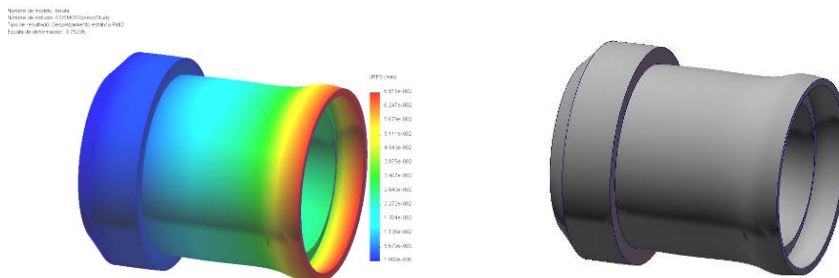


Figura 80 Comportamiento Férulas Provisionales



Las férulas o elementos de sello entre las válvulas de la empresa Vindum y el tubing una vez diseñadas fueron analizadas por medio de elementos finitos en el software SolidWorks Cosmos como se muestra en la figura 24, donde se pudo verificar la forma como se deformaría al momento de ajustarlas garantizando el sello mecánico capaz de soportar las presiones de trabajo del banco de medición de presión diferencial.

Figura 81 Férula Provisional Deformada



La figura 25 muestra el comportamiento que presenta la férula y la manera como se deforma al ser sometida a la presión ejercida por la contra férula para fijarla a la válvula, y se garantiza que esta deformación da un muy buen sello mecánico y una fijación tubing férula muy fuerte.

Una vez fabricados todos los elementos provisionales para el montaje del banco de permeabilidad absoluta se procede a la realización del ensamble de todos los elementos e integración de los sistemas acorde a la planeación y disposición realizada en los modelos tipo CAD-CAE para el ensamble se implementan elementos de unión y fijación comunes tales como:

- Tornillos galvanizados totalmente roscados de 4 mm de diámetro exterior y una pulgada de largo con cabeza ranurada, para fijar las válvulas y el manifold neumático.
- Arandela de presión diámetro interno 5 mm.
- Tornillos galvanizados totalmente roscados de ½ pulgada de diámetro y una pulgada de largo con cabeza hexagonal, para fijar las bases de los transmisores de presión.

1.3. MONTAJE DE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL BANCO DE PERMEABILIDAD ABSOLUTA

El ensamble de todos los elementos se realizó en el Laboratorio De Mecánica De Rocas Del Instituto Colombiano Del Petróleo, en donde se cuenta con todos los elementos de trabajo y los componentes del Banco.

1.3.1. Montaje de Válvulas Hidráulicas

En base a los modelos realizados en el software tipo CAD-CAE se dispuso un orden para el montaje de los elementos que constituye el sistema hidráulico formado por las válvulas de dos y tres vías de la empresa Vindum, se realiza el montaje acorde a los modelos planteados dando la confianza de contar con las perforaciones adecuadas para la fijación entre la estructura y las válvulas como se puede apreciar en la figura 26.

Figura 82 Montaje de Válvulas Hidráulicas



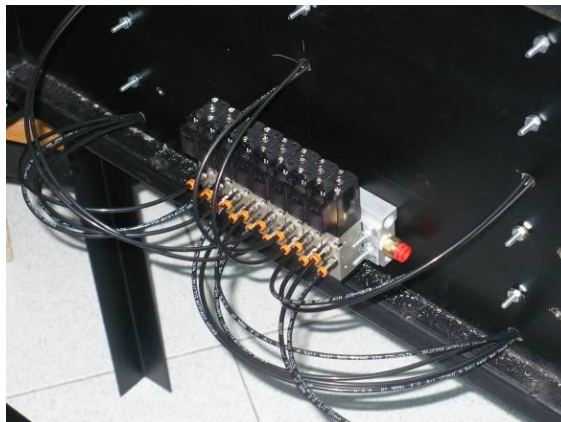
La figura 26 presenta el montaje de las válvulas hidráulicas en la estructura provisional la fijación se realizó por medio de tornillos pasantes con cabeza plana, arandela de presión y tuerca.

1.3.2. Montaje de Manifold Neumático

La ubicación del manifold es la parte posterior del sistema hidráulico dado a que de esta manera se reduce la distancia de la tubería flexible que dará las ordenes a cada uno de las válvulas de dos y tres vías acorde a la secuencia establecida y programada por medio del software Opto 22, para la interconexión de los sistemas neumático e hidráulico se realiza por medio de tubería flexible tipo OD de diámetro 1/8 de pulgada para lo cual se perforó la estructura con una broca de 10 mm. Para pasar la tubería OD como se puede ver en la siguiente figura.

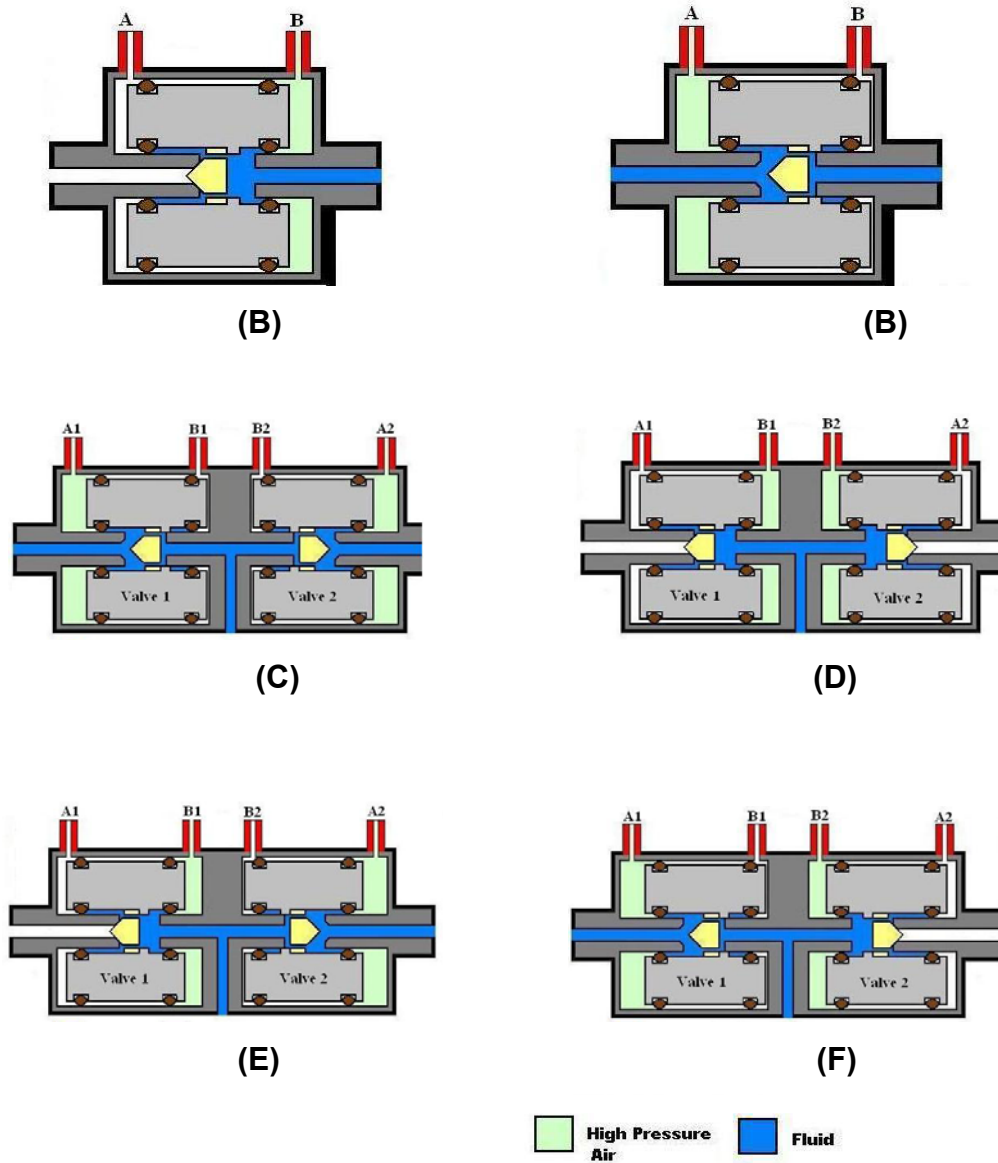
El manifold es alimentado por una línea de aire comprimido tarada a 120 psi, la unión se realiza por medio de tubería flexible tipo OD de ¼ de pulgada.

Figura 83 Montaje de Manifold Neumático



Las válvulas que ofrece la empresa Vindum Engineering pueden trabajar de dos maneras como normalmente abiertas o normalmente cerradas dependiendo únicamente de cómo se realice la conexión entre el manifold neumático y las válvulas para esto se identifican los puertos A y B de cada una de las válvulas y del manifold como lo muestra la figura 27.

Figura 84 Configuración de válvulas Vindum Engineering



Fuente: Manual CV Series High-Pressure Valves

Considerando que para obtener la configuración de normalmente cerrada figura 28 (A) se conecta el puerto B del manifold con el puerto B de la válvula y para la configuración de normalmente abierta figura 28 (B) se conecta el puerto B del manifold con el puerto A de la válvula. Estos tipos de conexión

son validos para las válvulas de dos y tres vías haciendo la aclaración que la válvula de tres vías cuenta con una configuración semejante a dos válvulas de dos vías unidas por una conexión en T y por lo tanto pueden tomar la configuración de normalmente abierta figura 28 (C), normalmente cerrada figura 28 (D), abierta hacia la izquierda y cerrada a la derecha figura 28 (E), abierta hacia la derecha y cerrada hacia la izquierda figura 28 (F).

1.3.3. Montaje de los Medidores de Presión Diferencial

Los medidores de presión diferencial cuentan con una base metálica la que permite una variedad de posiciones para la fijación del transmisor, la base se ubicó acorde al diseño planteado y se une a la estructura por medio de tornillos de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro, una pulgada y media de largo y la parte roscada equivale a $\frac{3}{4}$ de pulgada por la parte posterior se ubican las tuercas y para garantizar la rigidez del sistema arandelas de presión.

Figura 85 Montaje De Los Medidores De Presión Diferencial



Figura 86 Detalles Montaje De Los Medidores De Presión Diferencial



En las figuras 29 y 30 se muestra como para la fijación de los transmisores a la base se usan tornillos de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro y $\frac{3}{4}$ de pulgada de largo con cabeza hexagonal, estos tornillos se enroscan directamente en la base del transmisor y para garantizar la rigidez de la unión se usa arandelas de presión acorde a la medida del tornillo.

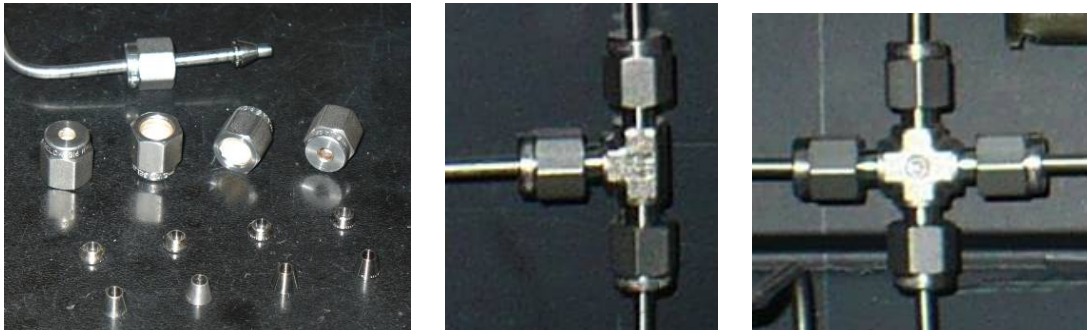
1.3.4. Interconexión válvulas sensores de presión diferencial

Para la interconexión de las válvulas con los transmisores de presión se usa tubería rígida de acero inoxidable 316 a la cual se le realizaron los dobleces necesarios para adecuarla al diseño propuesto, para esto se implementa un dobla tubos que me permite dar un radio en la curvatura de 15mm, adicional se le realizan cortes al tubing dando las dimensiones apropiadas para el montaje.

En el momento de realizar las uniones del tubing con los accesorios tales como Tés y Cruces y racores se implementa uniones del tipo contraférula - férula cónica la cual garantiza el sello entre el tubing y el accesorio

implementado, todos los elementos usados son de acero inoxidable 304, los accesorios y el tubing implementado son marca Swagelok.

Figura 87 Detalles Accesorios Implementados



Para fijar el tubing a las válvulas encargadas de la conmutación se usan férulas cilíndricas las cuales se deforman garantizando el sello metálico en la unión válvula tubing este sello tiene que ser garantizado hasta 10000 psi debido a que este es la tolerancia máxima a la presión de las válvulas, la empresa Vindum Engineering provee una férula por cada unión las cuales están fabricadas en Hastelloy C-276 que es una aleación de níquel-molibdeno-cromo con adición de tungsteno diseñado para tener una excelente resistencia a la corrosión en un rango amplio de ambientes severos.

Las férulas usadas en el montaje fueron las férulas fabricadas en aluminio 6061-T6, material que soporta muy bien ambientes corrosivos y se deforma con facilidad facilitando el sello entre tubing y válvula.

Figura 88 Conexión Tubing - Válvulas

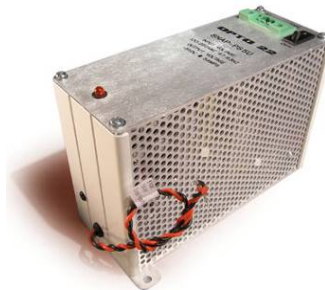


En la figura 32 se muestra la manera como se unen el tubing, la férula, la contra férula y la válvula y la manera como se deforma la férula diseñada para garantizar el sello mecánico.

1.3.5. Montaje de control electrónico

Para realizar el control del banco de permeabilidad se implementa hardware y software de la empresa OPTO 22, los elementos que componen este sistema son:

Figura 89 Fuente de Poder



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

- ✓ Fuente de poder 120 VAC A 12 VDC figura 33, con capacidad de suministrar energía hasta de 5 amperios, de manera segura y silenciosa, cuenta con leds indicadores de funcionamiento.

- ✓ Controlador de automatización programable compacto con capacidad de interpretación de señales análogas y digitales con puerto serial

SNAP-PAC-R1 con capacidad de control y comunicación de datos y procesos on-off en un modulo compacto de fácil acople.

Figura 90 Controlador Programable



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

la figura 34 muestra el controlador elemento con el cual las señales se digitalizan y se envían al computador donde se almacenan y se interpretan.

- ✓ Modulo digital de salida SNAP-ODC5-I el cual está encargado de enviar las señales de control hacia las válvulas solenoides del manifold neumático on-off, cuenta con indicadores tipo led numerados de uno a cuatro que es la cantidad de señales que puede enviar, en total se usan dos módulos.

Figura 91 Modulo Digital De Salida



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

La figura 35 presenta el elemento que recibe, interpreta y envía las señales de accionamiento a la válvula solenoide del manifold neumático.

- ✓ Modulo análogo de entrada de datos SNAP-IDC-HT-16, con capacidad de adquisición de 16 señales, necesita de un cerebro para poder interpretar los datos y enviarlos al computador, funciona a 12 VDC, se implementa un solo dispositivo al sistema de control electrónico.

Figura 92 Modulo Análogo De Entrada

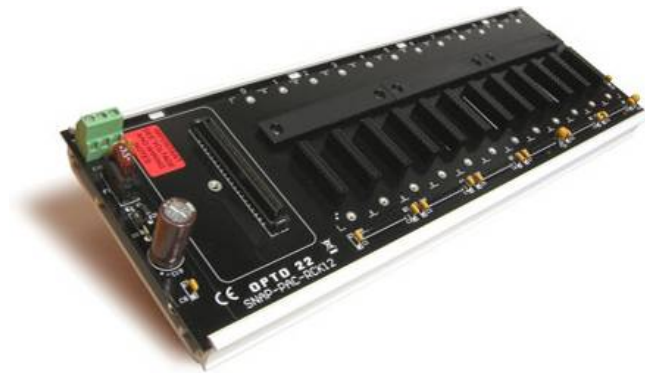


Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

La figura 36 muestra el modulo análogo de entrada de datos al computador usando interprete figura 41, a pesar de solo necesitar un modulo el banco de medición de la permeabilidad cuenta con dos elementos de este tipo.

- ✓ Modulo de montaje SNAP-PAC-RCK12 con capacidad de 12 módulos análogos o digitales, permite la intercomunicación con el cerebro SNAP-PAC-R1 y hace el montaje compacto y seguro.

Figura 93 Modulo De Montaje Electrónico



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

La figura 37 muestra el modulo donde se fijan los elementos anteriormente descritos de una manera ordenada y deja algunos espacios en caso que se requiera la incorporacion de mas elementos de control.

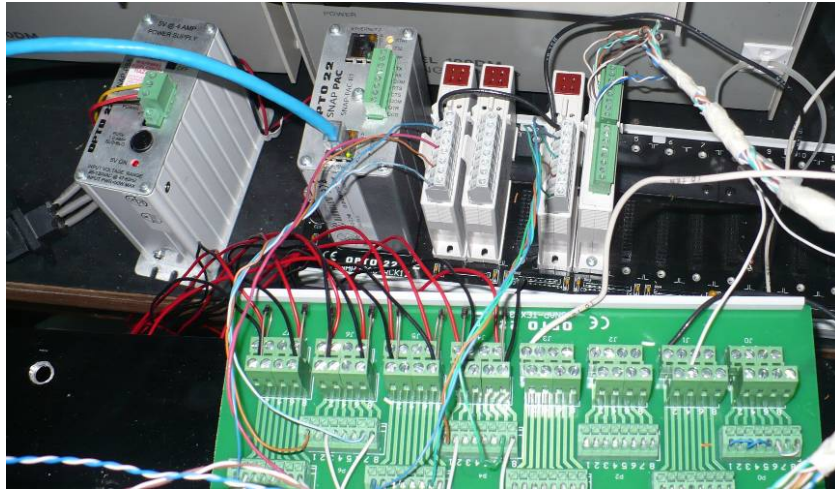
Figura 94 Esquema De Montaje Sistema De Control Electrónico



Fuente: Catalogo De Hardware OPTO 22

La figura 38 muestra la manera como todos los elementos anteriormente descritos se incorporan en un montaje sencillo y ordenado.

Figura 95 Montaje Real Sistema De Control OPTO 22



El montaje mostrado en la figura 39 muestra la manera como se realizaron las interconexiones entre los elementos de control y ejecución de la parte electrónica del banco de medición de la presión diferencial para la determinación de la permeabilidad las conexiones se realizaron siguiendo el manual de instalación de cada uno de los equipos presentes en el montaje, instalando elementos “fusibles” tales como diodos, resistencias y limitadores de corriente para la protección de los elementos mostrados.

2. MANTENIMIENTO DE DEL BANCO DE MEDICION DE PRESION DIFERENCIAL

Con el fin de establecer y unificar los criterios técnicos y actividades a realizar para garantizar el correcto funcionamiento del banco de medición de presión diferencial se presenta el siguiente programa de mantenimiento.

2.1. CLASES DE MANTENIMIENTO

2.1.1. Mantenimiento Preventivo

Se define como la acción técnica administrativa que se lleva a efecto para el cuidado e inspección sistemático de un equipo o elemento. Con el propósito de mantenerlos en buen estado de funcionamiento, evitar y detectar fallas menores antes de que estas se conviertan en defectos mayores.

La aplicación del mantenimiento preventivo permite que los equipos funcionen a plena capacidad técnica y elimina los posibles riesgos de quedar fuera de servicio, ocasionando paradas largas por averías graves, lo cual ocasiona retrasos en las pruebas y ensayos.

El programa de mantenimiento preventivo se basa en inspecciones diarias o rutinas semanales y en algunos casos acciones inmediatas al presentarse la falla de una pieza por desgaste o mala lubricación las cuales no estaban programadas.

2.1.2. Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento correctivo, es la acción técnica administrativa que se utiliza cuando un equipo o sistema ha dejado de funcionar ó lo hace defectuosamente y se tiene que entrar a reparar, para esto se hace necesario suspender el trabajo del equipo, revisarlo y dado caso la adquisición de repuestos cumpliendo los protocolos establecidos por el Instituto Colombiano del Petróleo.

2.1.3. Mantenimiento Predictivo

Es más una filosofía que un método de trabajo. Se basa fundamentalmente en detectar una falla antes que suceda, para dar tiempo a corregirla sin perjuicios al servicio; se usa para ello instrumentos de diagnóstico y pruebas no destructivas. Por ejemplo, permite estimar la vida que le resta a un equipo, aislamiento, rodamientos, recipientes, motores, etc.

2.2. ACTIVIDADES EN EL MANTENIMIENTO

2.2.1. Inspección

Consiste en hacer un examen minucioso en forma visual y en algunos casos mediante elementos de medición de cada uno de los elementos y sistemas del banco, con el fin de comprobar que el funcionamiento sea óptimo, con el fin de realizar una inspección satisfactoria se establecen tres criterios los cuales son:

- ✓ Evaluación: Se evalúa su estado físico y funcional acorde a el comportamiento en ensayos anteriores.

- ✓ Apariencia: Identificar anomalías en los elementos tales como rasguños, hendiduras, decoloración, deformaciones o cualquier otro defecto verificar el funcionamiento y las razones del defecto
- ✓ Integridad: Identificar y comprobar que todas las partes del elemento y sistema están completas sean eléctricas, mecánicas y demás accesorios que sean indispensables para el perfecto funcionamiento.

2.2.2. Limpieza

Consiste en la remoción de elementos extraños y nocivos en la estructura y los elementos que constituyen el banco, para esta actividad se implementan elementos tales como papel absorbente, toallas, aire presurizado entre otros.

2.2.3. Calibración

Consiste en realizar las correcciones necesarias para que los equipos de medición y ejecución cuenten con la mayor precisión posible estableciendo condiciones iniciales al ensayo acorde a la realidad presentada en la probeta, este proceso se realiza en los transmisores de presión diferencial, bomba de desplazamiento positivo, registro de valores en el computador, válvulas neumáticas e hidráulicas.

2.3. PROTOCOLO DE INSPECCION Y MANTENIMIENTO PREVENTIVO

La siguiente lista de chequeo indica el protocolo en la revisión de cada uno de los elementos que constituyen el banco para la medición de la presión diferencial así como las características que se deben observar durante la revisión.

En caso de que algún elemento o un sistema presente una inconformidad se debe informar al líder del laboratorio de el por qué no se valida el equipo y se realiza el proceso de solicitud al departamento de mantenimiento del Instituto Colombiano del Petróleo en donde se realizaran los procedimientos necesarios para garantizar el correcto funcionamiento.

**INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO
LABORATORIO DE MECANICA DE ROCAS**

**BANCO DE MEDICION DE LA PRESION DIFERENCIAL PARA DETERMINAR LA PERMEABILIDAD
ABSOLUTA**

HOJA DE PROTOCOLO DE INSPECCION Y MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Nombre del Operador _____

Fecha _____ No Revisión _____

Transmisores De Presión SMAR					
	Apariencia	integridad	limpieza	calibración	OBSERVACIONES
PT 1 - H2					
PT 2 - H3					
PT 3 - H3					
PT 4 - H4					

Bomba ISCO 100 DM - DX					
	Apariencia	integridad	limpieza	calibración	OBSERVACIONES
Bomba A					
Bomba B					
Controlador					
Conexiones Eléctricas					
Válvulas Hidráulicas					
Manifold Neumático					
Tanque Alimentador					
Tanque Desagüe					

Válvulas Hidráulicas					
	Apariencia	integridad	limpieza	conexión	OBSERVACIONES
VD 1					
VD 2					
VD 3					
VD 4					
VD 5					
VD 6					
VD 7					
VD 8					

Válvulas Neumáticas					
	Apariencia	integridad	limpieza	conexión	OBSERVACIONES

VD 1					
VD 2					
VD 3					
VD 4					
VD 5					
VD 6					
VD 7					
VD 8					

Interconexión De Elementos Hidráulicos Y Neumáticos				
	Apariencia	integridad	limpieza	OBSERVACIONES
Tubing				
Tubería Flexible				
Terminales Tubing				
Adap. Cruz				
Adap. Te				
Adap. Smar				

Modulo De Montaje Opto 22				
	Apariencia	integridad	limpieza	OBSERVACIONES
M. Análogo (In)				
M. Digital (Out)				
Controlador				
Fuente De Poder 5 VDC				
Fuente De Poder 12 VDC				
Cables De Conexión				

BIBLIOGRAFÍA

De WIEST Roger J.M., Flow through porous media, Academic press, New York and London, 1.969

PIRSON. Sylvain J., Oil Reservoir Engineering, Mc Graw Hill, New York, Toronto, London, 1.958, Second Edition.

NORTON, Robert L. Diseño de maquinas. Prentice Hall. 1999.

NORMA API RP 40 – Recommended Practice for Core Analysis

NORMA ASTM D4543 – 08 Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances

NORMA ASTM: D 7012 – 07 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Module of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures

MANUAL DE OPERACION: Vindum Engineering, CV Series High-Pressure Valves, <http://www.vindum.com/Vindum%20Valve%20Manual0306.pdf>

MANUAL DE OPERACION: D-Series Pumps Installation and Operation Guide, <http://www.isco.com/pcfiles/PartPDF4/UP000ZO5.pdf>

MANUAL DE OPERACION: transmisor inteligente de presión Con control PID incorporado SMAR LD301. <http://www.smar.com/manual301.pdf>

MANUAL DE OPERACION: MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems, http://www.mts.com/stellent/groups/public/documents/library/dev_002698.pdf

AMEXO B. PROCEDIMIENTO TECNICO DE OPERACIÓN, BANCO DE MEDICIÓN DE PRESIÓN DIFERENCIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PERMEABILIDAD ABSOLUTA.

**LABORATORIO DE MECÁNICA DE ROCAS
INSTITUTO COLOMBIANO DEL PETROLEO**

PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE LA PROBETA

1. Seleccionar la muestra que será ensayada, registrar sus dimensiones (diámetro, longitud, peso) y medir plenitud y cilindricidad acorde a la norma ASTM D 4543 -08

Figura 96 Espécimen De Roca A Evaluar



2. Poner la muestra en una atmosfera de vacio por cuatro horas.
3. Preparar el fluido de saturación y saturar la muestra poniéndola 4 horas sumergida en el fluido por cuatro horas.
4. Cortar dos secciones de cinta de teflón de longitud igual a dos veces el perímetro del endcup para ensayos de permeabilidad y adherir la cinta a los extremos de éste que estarán en contacto con la muestra.
5. Poner la muestra entre los dos endcups.

Figura 97 Ubicación De Muestra En Los Endcups



6. Cortar una sección de manga termoencogible de diámetro adecuado para la muestra y con la suficiente longitud para que se cubra hasta la mitad del cuerpo de los endcups aproximadamente.
7. Calentar la manga hasta que quede completamente ajustada a la muestra evitando la formación de burbujas de aire utilizando un secador industrial. Para evitar la formación de burbujas de aire es recomendable empezar a calentar en el área de la mitad de la probeta e ir bajando con movimientos ascendentes y descendentes y simultáneamente girar lentamente la misma alrededor de su eje. Después este procedimiento se repite de la mitad hacia arriba.

Figura 98 Ajuste De Funda Termoencogible



8. Cortar cuatro secciones de alambre dulce con una longitud aproximadamente de 60 mm más dos veces el perímetro del endcup.
9. Colocar los alambres formando una horqueta sobre la cinta de teflón, dos en el endcup superior, y dos en el inferior.
10. Se recomienda que los amarres en cada endcup queden ubicados a 180° uno con respecto al otro.

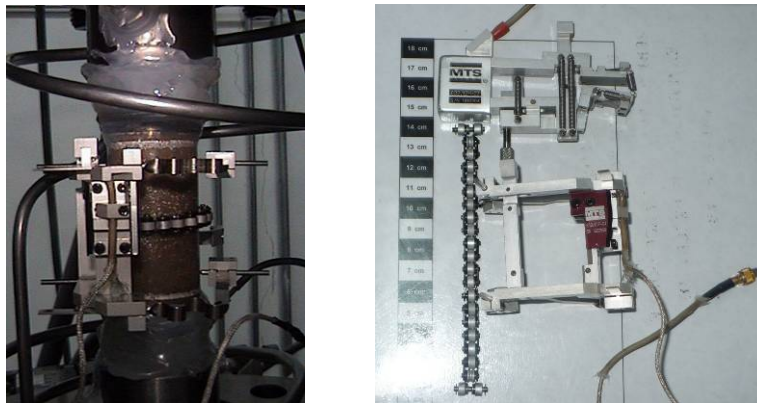
11. Cubrir con silicona la región del endcup por encima y por debajo del alambre, también en los extremos de la manga inferior y superior.

Figura 99 Aplicación De Silicona Al Montaje



12. Para asegurar que no hayan fugas en el sistema se recomienda utilizar abrazaderas sobre la manga en el espacio entre la silicona sobre la cinta de teflón y sobre el extremo de la manga.
13. Por último colocar los extensómetros triaxiales para medir deformación axial y circunferencial sobre la muestra enchaquetada.

Figura 100 Instalación De Extensómetros A La Muestra



PROCEDIMIENTO TÉCNICO DEL ENSAYO

1. Conectar la bomba ISCO al sistema Rock Mechanics Test System Modelo 815.

Figura 101 Conexión Bomba ISCO Equipo MTS 815



2. Poner en funcionamiento el sistema Rock Mechanics Test System Modelo 815.
3. Ubicar la probeta sobre la platina inferior del equipo MTS 815.

Figura 102 Ubicación De La Probeta En El Equipo MTS 815



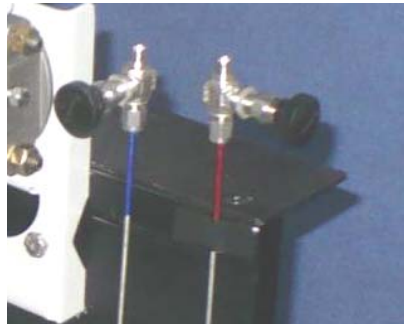
4. Bajar la campana de la celda triaxial y asegurar los tornillos de esta.

Figura 103 Aseguramiento De Campana Del Equipo MTS 815



5. Llenar la campana de la celda triaxial con el fluido de confinamiento y colocar el intensificador de presión de confinamiento del sistema triaxial en configuración para realizar presurización.
6. Preparación de banco de medición de presión diferencial para el registro de datos.
7. Abrir válvulas de alta y baja presión

Figura 104 Válvulas Entrada De Alta Y Baja Presión



8. Verificar que los transmisores de presión SMAR se inicien el registro de datos en cero psi o 4 mA.

Figura 105 Registro De Presiones En Transmisores SMAR



9. Iniciar la secuencia de medición
10. Configurar en la bomba ISCO la tasa de flujo de salmuera a la cual se evaluarán los estados de esfuerzos durante la prueba.

Figura 106 Tablero De Control Bomba ISCO



11. Incrementar la presión de confinamiento y la fuerza axial hasta el punto a evaluar.
12. Iniciar la bomba ISCO para que empiece el flujo a través de la muestra. La evaluación del punto finaliza cuando la caída de presión se estabiliza con el tiempo y se alcanzan los volúmenes porosos determinados en flujo estabilizado.
13. Una vez finalizado el ensayo se detiene el flujo en la bomba ISCO y se cierran las válvulas de alta y baja en el banco de permeabilidad, posteriormente se vacía la celda triaxial y se retira la muestra.