



ENSAYO DE LA PERMEABILIDAD DE ROCAS: AUTOMATIZACIÓN DE LA PRUEBA

ANDREI LACHE SALCEDO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2008**



ENSAYO DE LA PERMEABILIDAD DE ROCAS: AUTOMATIZACIÓN DE LA PRUEBA

ANDREI LACHE SALCEDO

**Trabajo de Investigación presentado como requisito parcial para optar el
título de: Ingeniero Electrónico**

DIRECTOR:

JAIME GUILLERMO BARRERO, MPE

CODIRECTOR:

JENNY MABEL CARVAJAL, ING DE PETRÓLEOS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2008**

*A Dios por guiarme y
acompañarme durante
cada etapa de mi vida.*

*A mis padres y hermanos
por la educación moral y la
enseñanza continúa de
valores que me forman
como persona.*

*A mis familiares, mi novia
y mis amigos por compartir
conmigo momentos
especiales que me hacen
crecer cada vez más.*

Andrei Lache Salcedo

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Industrial de Santander, a la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por guiarme en todo el proceso de formación y entregarme las herramientas necesarias para desarrollarme como un excelente profesional. Al instituto Colombiano de Petróleos, al grupo Estabilidad de Pozo por brindarme la oportunidad de ser miembro de tan selecto equipo de trabajo para la generación de conocimiento.

Especiales agradecimientos al Ingeniero Electrónico Jorge Leonardo Galvis por su apoyo en el planteamiento y desarrollo de éste proyecto; a mi director Jaime Guillermo Barrero Pérez, por la colaboración y la enseñanza profesional que me ha entregado; también a mi codirectora Jenny Carvajal por la confianza que ha depositado en mí.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	14
1. MARCO TEÓRICO.....	16
1.1. PERMEABILIDAD DE ROCAS.	16
1.1.1. DEFINICIONES:	16
1.1.2. UNIDADES DE PERMEABILIDAD:	20
1.1.3. TEORIA:.....	21
1.1.3.1. Ecuaciones de permeabilidad en estado estacionario para gases:	22
1.1.3.2. Ecuaciones de permeabilidad en estado estacionario para líquidos:	25
1.1.4. MEDICIONES DE PERMEABILIDAD SUGERIDAS POR LA NORMA API RP 40.	28
1.1.4.1. Gases:	29
1.1.4.2. Líquidos:.....	35
2. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD	37
2.1. Técnica implementada:.....	37
2.2. Equipos e instrumentación:.....	37
2.3. Condiciones de operación en presión de confinamiento y carga axial:	41
2.4. Adecuación de la muestra de ensayo:	42
2.5. Procedimiento técnico del ensayo:	42
2.6. Cálculos del ensayo:.....	43
3. SELECCIÓN INSTRUMENTACIÓN.....	44
3.1. Inicialización del sistema:.....	45
3.2. Control y desarrollo del ensayo de permeabilidad:	47
3.3. Transducción y acondicionamiento de señal:	48
3.3.1. Presión diferencial:.....	48
3.3.2. Volumen y rata de flujo desplazados:	51
3.4. Adquisición de las señales:.....	52
3.4.1. Tarjeta de adquisición de datos miniLAB 1008:	54
3.5. Procesamiento y presentación de resultados:	57
4. SOFTWARE	58

4.1.	LabVIEW:.....	58
4.2.	Diseño del software:.....	58
4.2.1.	Inicialización del programa:	58
4.2.2.	Adquisición de datos:.....	59
4.2.3.	Permeabilidad:	60
4.2.4.	Desarrollo del ensayo:	61
4.2.5.	Interfaz con el usuario y presentación de resultados:	61
5.	PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS.....	72
5.1.	Pruebas Simuladas:	72
5.1.1.	Berea X1:.....	72
5.1.2.	Berea X2:.....	74
5.1.3.	Berea X3:.....	75
5.1.4.	Berea X4:.....	77
5.1.5.	Berea X5:.....	78
5.2.	Prueba sistema de automatización:	79
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
	BIBLIOGRAFIA.....	82
	ANEXOS.....	84
	ANEXO A. DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD A LA BEREAL XX.....	85

LISTADO DE TABLAS

TABLA 1. UNIDADES DE VARIABLES Y CONSTANTES INVOLUCRADAS EN LAS ECUACIONES DE <i>DARCY</i> Y <i>FORCHHEIMER</i> PARA CALCULAR LA PERMEABILIDAD. ^{FUENTE [1]}	21
TABLA 2. DESCRIPCIÓN DEL PANEL FRONTAL DEL CONTROLADOR DE LA BOMBA ISCO. ^{FUENTE [5]}	45
TABLA 3. DESCRIPCIÓN DE LOS PUERTOS DE COMUNICACIÓN DEL CONTROLADOR DE LA BOMBA ISCO. ^{FUENTE [5]}	46
TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE LOS PINES DEL PUERTO <i>ANALOG OUTPUT</i> DB25. ^{FUENTE [5]}	52
TABLA 5. DESCRIPCIÓN PUERTO DB37. ^{FUENTE [7]}	56

LISTADO DE FIGURAS

FIGURA 1. EQUIPO UTILIZADO POR <i>HENRY DARCY</i> PARA DEMOSTRAR LA VERACIDAD DE SU ECUACIÓN EMPÍRICA. <i>INFLOW</i> Y <i>OUTFLOW</i> HACEN REFERENCIA A LA ENTRADA Y SALIDA DE FLUJO RESPECTIVAMENTE. FUENTE [2]	17
FIGURA 2. FLUJO DE LÍQUIDO HACIA ABAJO CON CABEZAL DE MANEJO. FUENTE [1]	26
FIGURA 3. FLUJO DE LÍQUIDO HACIA ARRIBA CON CABEZAL DE MANEJO. FUENTE [1]	27
FIGURA 4. MEDICIÓN DE FLUJO DE LÍQUIDO HACIA ARRIBA CON DIFERENCIAL DE PRESIÓN INDUCIDO. FUENTE [1]	28
FIGURA 5. ARREGLO PARA UNA MEDICIÓN TIPO AXIAL. FUENTE [1]	30
FIGURA 6. MUESTRA DE ROCA METAMÓRFICA CON UN CORTE EN LA CUAL EL EJE AXIAL ES PERPENDICULAR A LOS SEDIMENTOS. FUENTE [3]	30
FIGURA 7. CORTE TRANSVERSAL A LA MUESTRA PARA OBSERVAR EL FLUJO DEL FLUIDO A TRAVÉS DE LAS PANTALLAS Y LA MUESTRA POROSA; <i>INLET</i> Y <i>OUTLET</i> REPRESENTAN LA ENTRADA Y SALIDA DE FLUJO RESPECTIVAMENTE, <i>SEALED</i> SIGNIFICA QUE LA MUESTRA ESTÁ SELLADA. FUENTE [1]	31
FIGURA 8. VISTA GENERAL DE UNA MUESTRA DE TIPO TRANSVERSAL; <i>METAL PLUG</i> ES UNA MASA DE METAL PARA CONFINAR AXIALMENTE LA MUESTRA, <i>SCREEN</i> ES UNA RED PARA INDUCIR EL FLUJO HACIA DETERMINADOS LUGARES, Y <i>RUBBER DISC</i> ES UN DISCO DE PLÁSTICO PARA IMPEDIR FUGAS DEL FLUIDO. FUENTE [1]	32
FIGURA 9. VALORES DE G_{θ} PARA DETERMINADOS ÁNGULOS θ . FUENTE [1]	33
FIGURA 10. ARREGLO DEL NÚCLEO PARA PERMITIR LA MEDICIÓN DE PERMEABILIDAD CON FLUJO RADIAL. FUENTE [1]	34
FIGURA 11. MTS 815. FUENTE [4]	38
FIGURA 12. BOMBA ISCO 100DM. FUENTE [5]	39
FIGURA 13. BOMBAS ISCO 100DM CONFIGURACIÓN DUAL. FUENTE [5]	39
FIGURA 14. TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESIÓN SMAR LD301. FUENTE [6]	40
FIGURA 15. DIAFRAGMA CAPACITIVO DEL TRANSMISOR INTELIGENTE LD301. FUENTE [6]	41
FIGURA 16. TERMINALES DE CONEXIÓN DEL TRANSMISOR INTELIGENTE DE PRESIÓN LD301. FUENTE [6]	41
FIGURA 17. PERMEABILIDAD Y PRESIÓN DIFERENCIAL VS. VOLÚMENES POROSOS. FUENTE [17]	43
FIGURA 18. DIAGRAMA GENERAL DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD. FUENTE [AUTOR]	44
FIGURA 19. PANEL FRONTAL DEL CONTROLADOR DE LA BOMBA ISCO. FUENTE [5]	45
FIGURA 20. PUERTOS DE COMUNICACIÓN DEL CONTROLADOR DE LA BOMBA ISCO. FUENTE [5]	46
FIGURA 21. TERMINALES DE CONEXIÓN DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN LD301. FUENTE [6]	48
FIGURA 22. DIAFRAGMA CAPACITIVO EN EL TRANSMISOR DE PRESIÓN LD301. FUENTE [6]	50
FIGURA 23. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CIRCUITO UTILIZADO EN EL TRANSMISOR LD301. FUENTE [6]	50
FIGURA 24. RANGOS DE CORRIENTE DE SALIDA DEL TRANSMISOR DE PRESIÓN LD301. FUENTE [6]	51
FIGURA 25. INTERFAZ RS 232 PARA LA COMUNICACIÓN ENTRE EL COMPUTADOR Y EL CONTROLADOR. FUENTE [5]	51
FIGURA 26. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS MINILAB 1008. FUENTE [7]	54
FIGURA 27. DIAGRAMA DE BLOQUES TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS MINILAB 1008. FUENTE [7]	55
FIGURA 28. PUERTO DB37. FUENTE [7]	55
FIGURA 29. DESCRIPCIÓN PINES EXTERNOS DE LA TARJETA MINILAB 1008 PARA 4 CANALES DIFERENCIALES. FUENTE [7]	56
FIGURA 30. DESCRIPCIÓN PINES EXTERNOS DE LA TARJETA MINILAB 1008 PARA 8 CANALES COMUNES. FUENTE [7]	57
FIGURA 31. SUBVI ENTRADA DE DATOS MUESTRA.VI FUENTE [AUTOR]	59
FIGURA 32. CONFIGURACIÓN INTERNA DE ENTRADA DE DATOS MUESTRA.VI FUENTE [AUTOR]	59
FIGURA 33. SALIDAS DEL SUBVI ADQUISICION.VI FUENTE [AUTOR]	60
FIGURA 34. CONFIGURACIÓN INTERNA DE ADQUISICION.VI FUENTE [AUTOR]	60

FIGURA 35. PERMEABILIDAD.VI	FUENTE [AUTORES]	60
FIGURA 36. CONFIGURACIÓN INTERNA DE PERMEABILIDAD.VI	FUENTE [AUTOR]	61
FIGURA 37. TIEMPO PARA ADQUIRIR Y PRESENTAR DATOS CONTROLADO POR EL USUARIO.	FUENTE [AUTOR]	61
FIGURA 38. TABLA PARA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS AL OPERARIO DEL ENSAYO.	FUENTE [AUTOR]	62
FIGURA 39. BUILD TABLE.VI Y TABLE.VI	FUENTE [AUTOR]	63
FIGURA 40. GRÁFICA DE PERMEABILIDAD VS. VOLÚMENES POROSOS.	FUENTE [AUTOR]	63
FIGURA 41. TIPO DE DATOS QUE INGRESAN A LA GRÁFICA PERMEABILIDAD VS. VOLÚMENES POROSOS.	FUENTE [AUTOR]	64
FIGURA 42. VI ENCARGADO DE GENERAR ARCHIVOS DE TEXTO.	FUENTE [AUTOR]	64
FIGURA 43. EXPRESS VI FILE DIALOG.	FUENTE [AUTOR]	64
FIGURA 44. VENTANA PRINCIPAL DEL SOFTWARE.	FUENTE [AUTOR]	65
FIGURA 45. VENTANA DE INGRESO DE DATOS.	FUENTE [AUTOR]	65
FIGURA 46. VENTANA DE RESULTADOS Y DATOS INSTANTÁNEOS.	FUENTE [AUTOR]	66
FIGURA 47. VENTANA GRÁFICA.	FUENTE [AUTOR]	66
FIGURA 48. WEB SERVER CONFIGURATION.	FUENTE [AUTOR]	67
FIGURA 49. WEB SERVER: VISIBLE VIS.	FUENTE [AUTOR]	68
FIGURA 50. WEB SERVER: BROWSER ACCESS.	FUENTE [AUTOR]	69
FIGURA 51. LOGMEIN HAMACHI.	FUENTE [AUTOR]	70
FIGURA 52. OPCIÓN CONNECT TO REMOTE PANEL.	FUENTE [AUTOR]	70
FIGURA 53. MENSAJE QUE APARECE EN EL PC SERVIDOR LUEGO DE TRANSFERIR EL CONTROL HACIA EL PC CLIENTE.	FUENTE [AUTOR]	71
FIGURA 54. MENSAJE QUE APARECE LUEGO DE OBTENER EL CONTROL EN EL PC SERVIDOR.	FUENTE [AUTOR]	71
FIGURA 55. WEB PUBLISHING TOOL.	FUENTE [AUTOR]	71
FIGURA 56. PERMEABILIDAD VS. VOLÚMENES POROSOS; BERE A X1.	FUENTE [AUTOR]	73
FIGURA 57. PERMEABILIDAD VS. VOLÚMENES POROSOS; BERE A X1, PRUEBA SIMULADA.	FUENTE [AUTOR]	74
FIGURA 58. PERMEABILIDAD VS VOLÚMENES POROSOS; BERE A X2.	FUENTE [AUTOR]	75
FIGURA 59. PERMEABILIDAD VS VOLÚMENES POROSOS; BERE A X2, PRUEBA SIMULADA.	FUENTE [AUTOR]	75
FIGURA 60. PERMEABILIDAD VS VOLÚMENES POROSOS; BERE A X3.	FUENTE [AUTOR]	76
FIGURA 61. PERMEABILIDAD VS VOLÚMENES POROSOS; BERE A X2, PRUEBA SIMULADA.	FUENTE [AUTOR]	76
FIGURA 62. PERMEABILIDAD VS VOLÚMENES POROSOS; BERE A X4.	FUENTE [AUTOR]	77
FIGURA 63. PERMEABILIDAD VS VOLÚMENES POROSOS; BERE A X4, PRUEBA SIMULADA.	FUENTE [AUTOR]	78
FIGURA 64. PERMEABILIDAD VS VOLÚMENES POROSOS; BERE A X5.	FUENTE [AUTOR]	78
FIGURA 65. PERMEABILIDAD VS VOLÚMENES POROSOS; BERE A X5, PRUEBA SIMULADA.	FUENTE [AUTOR]	79
FIGURA 66. PERMEABILIDAD VS. VOLÚMENES POROSOS PARA LA BERE A XX.	FUENTE [AUTOR]	80

TITULO: ENSAYO DE LA PERMEABILIDAD DE ROCAS: AUTOMATIZACIÓN DE LA PRUEBA. *

AUTOR: ANDREI LACHE SALCEDO **

PALABRAS CLAVES: Automatización, Permeabilidad, Adquisición, Transducción, Interfaz gráfica, bomba desplazamiento positivo, transmisor de presión.

CONTENIDO:

Es de gran importancia para la industria petrolera, caracterizar adecuadamente los yacimientos y pozos de interés, con el fin conocer el comportamiento de los mismos y de ésta manera aumentar su productividad. Las propiedades de la roca juegan un papel muy importante a la hora de caracterizar éstos pozos y la permeabilidad es una de las más importantes, ya que permite conocer la capacidad de una roca para permitir que un fluido la atravesase sin alterar su estructura interna.

En este documento se describe el proceso de la automatización realizada al ensayo de permeabilidad de rocas en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, en la cual se implementó el software especializado en automatización y control LabVIEW 7.1. Además se seleccionó una tarjeta de adquisición acorde con las especificaciones requeridas en el proyecto para la adquisición y generación de señales eléctricas.

La interfaz gráfica desarrollada es de fácil manipulación y le permite al operario monitorear adecuadamente el ensayo de permeabilidad en tiempo real durante toda la prueba, mejorando considerablemente la confiabilidad y seguridad en el mismo. Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, son acordes a los esperados por el equipo de trabajo del laboratorio, confirmando la viabilidad del mismo en la realización de la prueba.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez. Codirector: Jenny Mabel Carvajal.

TITLE: TEST OF THE PERMEABILITY OF ROCK: THE TEST AUTOMATION. *

AUTHOR: ANDREI LACHE SALCEDO **

KEY WORDS: Automation, permeability, Purchasing, transduction, GUI, Positive displacement pump, pressure transmitter.

CONTENT:

It is of great importance to the oil industry, adequately characterize the fields and wells of interest, in order to know the behavior of the same and that way increase their productivity. The properties of the rock play an important role in the characterization of these wells and the permeability is one of the most important, as it studies the ability of a rock to allow the fluid passing through without altering its internal structure.

This document describes the process of the test conducted automating the permeability of rocks in the laboratory of rock mechanics of the PKI, which implemented the software that specializes in automation and control LabVIEW 7.1. In addition, selected a card purchase in line with the specifications required in the project for the acquisition and generation of electrical signals.

The graphical interface is developed for easy handling and allows the operator to adequately monitor the testing of permeability in real time throughout the test, considerably improving the reliability and security in it. The results of the tests are consistent with those expected by the task force's laboratory, confirming the feasibility of it in the test run.

* Work for Graduation.

** Faculty of Physic-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering.
Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez. Codirector: Jenny Mabel Carvajal.

INTRODUCCIÓN

Determinar adecuadamente la permeabilidad de una roca, es una tarea de gran importancia para la industria petrolera, ya que con éstos resultados se caracterizan las formaciones rocosas, prediciendo el comportamiento del yacimiento y del pozo de interés. Es por esto que se realizan ensayos de permeabilidad en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, para cumplir con las necesidades locales de caracterización de medios porosos buscando siempre obtener resultados confiables y semejantes al ambiente que se tiene en el yacimiento.

El manejo de una gran cantidad de datos para cada variable presente en las pruebas de permeabilidad, ha motivado al sector petrolero a implementar tecnología adecuada para manejar la información apropiadamente y presentarla de la mejor forma posible para su análisis y almacenamiento.

El objetivo principal de éste proyecto es el diseño de un sistema autónomo que permita controlar el ensayo de permeabilidad por medio de la adecuada selección de instrumentación y el uso de un computador para cumplir con el fin propuesto. El objetivo es mejorar la seguridad, confiabilidad y presentación de la prueba de permeabilidad del laboratorio de mecánica de rocas del ICP, con el fin de entregar resultados de una mejor manera y facilitar la operación de los equipos involucrados en el ensayo.

En el capítulo primero se encuentra un resumen sobre los conceptos fundamentales relacionados con permeabilidad, los cuales son necesarios para comprender adecuadamente la importancia de la prueba, además se enseñan diversas ecuaciones utilizadas en diferentes ensayos de permeabilidad de acuerdo al fluido implementado y la inyección del mismo hacia la muestra; al final del capítulo se presentan técnicas recomendadas por la norma API para encontrar esta propiedad rocosa y breves conclusiones sobre la técnica utilizada en el laboratorio del ICP.

El segundo capítulo realiza una descripción general sobre el desarrollo de la prueba de permeabilidad manejada en el laboratorio, presentando la técnica utilizada, los dispositivos implementados, el procedimiento a seguir y los cálculos realizados para encontrar la permeabilidad de acuerdo a los procedimientos y formatos técnicos aprobados por ECOPETROL.

En el tercer capítulo se presentan las diferentes etapas utilizadas para la realización de éste proyecto. Comenzando con la inicialización del ensayo, para adecuar la muestra y los dispositivos propios del procedimiento, luego se aborda el desarrollo del ensayo, la adquisición y análisis de datos y finalmente la presentación de resultados que se deben realizar para obtener una prueba autónoma que les permita a los operarios estudiar adecuadamente la permeabilidad de la roca. Simultáneamente en éste capítulo se presenta la selección de los dispositivos involucrados en la automatización, así como el software a implementar.

En el cuarto capítulo se presenta el software elaborado para cumplir con el control, almacenamiento y presentación de los resultados obtenidos de la prueba de permeabilidad por medio de un software especializado en automatización y control.

Finalmente en el capítulo cinco, se muestran las pruebas realizadas y los resultados finales en la automatización del ensayo de permeabilidad de rocas, presentando las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

1. MARCO TEÓRICO.

En éste capítulo se definen los principales conceptos que tienen relación con la permeabilidad de rocas. También se presentan varias técnicas de medición recomendadas por la API (*American Petroleum Institute*) y el análisis correspondiente a cada una.

1.1. PERMEABILIDAD DE ROCAS.

La permeabilidad es una propiedad de un medio poroso, que permite establecer la habilidad de éste medio para permitir el paso de fluidos a través del mismo. La propiedad recíproca es la resistividad viscosa y ocurre cuando el flujo mantiene una tasa de desplazamiento muy baja, asignándole el nombre de “flujo viscoso” o “*Stoke flow*” a ésta condición. De forma análoga, la permeabilidad se puede comparar con la conductividad eléctrica de un material, ya que ambas propiedades miden la habilidad del material para dejar pasar fluidos o corriente eléctrica respectivamente.

1.1.1. DEFINICIONES:

- **Permeabilidad absoluta:**

Es la permeabilidad específica que se obtiene utilizando un único líquido en la realización de la prueba, normalmente este valor 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.

- **Permeabilidad efectiva:**

Éste valor se encuentra cuando se realiza un ensayo de permeabilidad con distintos fluidos a la vez, por lo tanto cada fluido reduce la capacidad de fluir de los

demás y la permeabilidad que se halla para cada uno depende exclusivamente del ensayo realizado.

- **Permeabilidad relativa:**

Es la relación entre la permeabilidad efectiva y permeabilidad absoluta.

- **Permeabilidad horizontal ó vertical:**

Normalmente las formaciones rocosas son anisotrópicas, por lo cual sus propiedades dependen de la dirección en la que se miden, es por esto que para realizar las pruebas de permeabilidad, se construyen núcleos transversalmente isotrópicos con el fin de tener una permeabilidad horizontal k_h y una vertical k_v . En la sección 1.1.4. Se van a definir éstas permeabilidades y sus diferencias.

- **Ley de Darcy:**

Henry Darcy (1803 – 1858) fue un ingeniero hidráulico francés que desarrollo para su ciudad natal Paris, el primer sistema de abastecimiento de agua potable, siendo Paris, la segunda ciudad en Europa en implementar un acueducto de abastecimiento. Además de éste aporte tan significativo, *Henry Darcy* presentó en el año de 1857 a toda la comunidad científica el desarrollo de su trabajo experimental que relacionaba variables involucradas en el flujo de fluidos a través de un medio poroso por medio de una ecuación empírica, la cual se demostró usando un equipo de laboratorio parecido al de la figura 1.

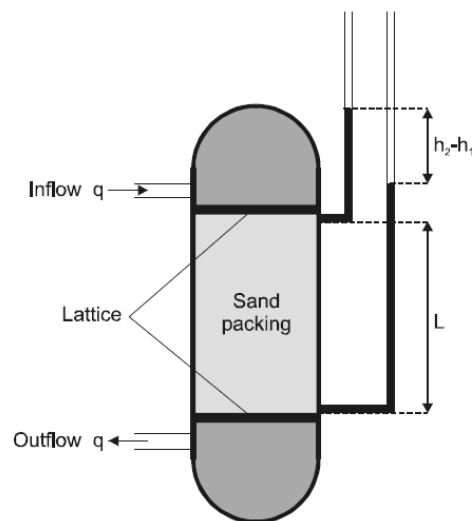


Figura 1. Equipo utilizado por *Henry Darcy* para demostrar la veracidad de su ecuación empírica.
Inflow y *Outflow* hacen referencia a la entrada y salida de flujo respectivamente. Fuente [2]

Hasta el año de 1933 la permeabilidad fue definida estrictamente por *Fancher, Lewis y Barnes*, y establece que la rata volumétrica de flujo por unidad de área

seccional del medio permeable (flujo volumétrico) es directamente proporcional al gradiente de presión, e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido, siendo la permeabilidad el coeficiente de proporcionalidad. Matemáticamente se puede escribir la ley de *Darcy* como aparece en la ecuación (1).

$$q = A \cdot \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad [\text{cm}^3/\text{s}] \quad (1)$$

Donde,

q = Rata de flujo a través de la muestra.

k = Permeabilidad.

A = Área de la sección transversal perpendicular a la dirección del flujo.

L = Longitud del medio poroso en dirección del flujo.

ΔP = Diferencial de presión a través del medio poroso.

μ = Viscosidad del fluido utilizado.

Todavía es muy común usar *Darcy* [D] como unidad de permeabilidad y de acuerdo con la ecuación (1), se tiene que la permeabilidad es igual a:

$$k = \frac{\mu \cdot q}{A} \cdot \frac{\Delta P}{L} = \frac{[\text{cp}] \cdot [\text{cm}^3/\text{s}]}{\text{cm}^2} \cdot \frac{[\text{atm}]}{\text{cm}} = 1\text{Darcy} \quad (2)$$

En unidades internacionales SI:

$$\frac{[\text{Nsm}^{-2}] \cdot [\text{m}^3 \text{s}^{-1}]}{[\text{m}^2]} \cdot \frac{[\text{Nm}^{-2}]}{[\text{m}]} = [\text{m}^2] \quad (3)$$

Anteriormente se comentó sobre la analogía de la permeabilidad con otros fenómenos físicos, por esta razón, ahora que se cuenta con la ley de *Darcy*, se puede observar directamente la similitud de ésta ley, con la ley de *Ohm* para la corriente eléctrica y la ley de *Fourier* para conductividad de calor.

Ley de *Darcy*:

$$q = A \cdot \frac{k}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4)$$

Ley de *Ohm* corriente eléctrica:

$$J = A \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{L} \quad [\text{A}] \quad (5)$$

Ley de *Fourier* conducción de calor:

$$Q = A \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad [\text{J/s}] \quad (6)$$

Donde:

A = Área de sección transversal [m²].

J = Densidad de Corriente [A].

k = Permeabilidad [m²].

L = Largo [m].

Q = Rata de calor [J/s].

q = Rata de flujo [m³/s].

U = Diferencial de potencial [V].

ΔP = Diferencial de presión [Pa].

ΔT = Diferencial de temperatura [°C].

μ = Viscosidad dinámica [Pa.s].

λ = Conductividad térmica [W°K/m].

ρ = Resistencia eléctrica [Ω m].

- **Resistencia inercial de *Forchheimer*:**

Philipp Forchheimer (1852 – 1933) fue un ingeniero Austriaco pionero en el campo de hidráulica de ingeniería civil, el cual, estableció que la ley de *Darcy*, 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 (1) el 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. En las siguientes secciones se presentarán varias técnicas para la medición y el análisis de resultados obtenidos en pruebas de permeabilidad, en donde se abordará de nuevo éste nuevo coeficiente de proporcionalidad para flujos volumétricos altos.

Para éste proyecto las condiciones en las cuales se realiza el ensayo de permeabilidad permiten omitir el factor β , minimizando de ésta forma los cálculos finales.

- ***Klinkenberg Gas Slippage*:**

Cuando se utiliza Gas para realizar las pruebas de permeabilidad, es necesario tener en cuenta un fenómeno llamado "*Gas Slippage*" ("Deslizamiento de Gas"), 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.

$$k_g = k_\infty \left[1 + \frac{b}{P} \right] \quad (7)$$

Donde k_g es la permeabilidad aparente del gas con el que se realiza la medición, k_∞ es la permeabilidad absoluta (hallada con líquido), P es la presión media en la muestra y b es el factor de deslizamiento del gas.

Implementar 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.

- **Stress de confinamiento:**

El stress de confinamiento se define como la suma de todas las fuerzas que actúan sobre la roca, modificando de esta manera la permeabilidad. Es por esto que en el laboratorio de mecánica de rocas se implementa un dispositivo de confinamiento para simular las presiones que se tienen en pozo, y de ésta manera aproximarse al ambiente deseado.

1.1.2. UNIDADES DE PERMEABILIDAD:

- **Unidad tradicional:**

Un medio poroso tiene permeabilidad de un “*Darcy*” (D), cuando un fluido de un cp (CentiPoises; Unidades de la viscosidad) de viscosidad que llena completamente los huecos del medio poroso bajo las condiciones de “*Stoke flow*” (o flujo lento) a una rata de $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ por centímetro cuadrado del área transversal a una presión equivalente a 1 atm/cm . Algunas veces es conveniente usar el mili *Darcy* (mD) para referenciar permeabilidades muy pequeñas en rocas supremamente compactas.

- **Unidades SI:**

La unidad fundamental en el sistema internacional para la permeabilidad es el metro cuadrado (m^2) y se define así: Una permeabilidad de un metro cuadrado permite el flujo de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ de fluido de $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ de viscosidad a través de un área transversal de 1 m^2 bajo un gradiente de presión de 1 Pa/m . Asimismo, un darcy es igual a $0.986923 \times 10^{-12} \text{ m}^2$, pero debido a éste exponente tan bajo, la sociedad

de ingenieros de petróleos de AIME ha preferido apropiarse el micrómetro cuadrado como la unidad de la permeabilidad, siendo un darcy igual a $0.986923 \mu\text{m}^2$.

En la siguiente tabla se pueden observar las variables y constantes involucradas en la medición de permeabilidad.

Variable or Constant	Units or Values of Constants			
	SI	Preferred SPE	Traditional	Common Usage
A , area perpendicular to flow	m^2	m^2	cm^2	cm^2
b , Klinkenberg slip factor	Pa	Pa	atm	psi
D , diameter of sample	m	m	cm	cm
g , gravitational acceleration	m/s^2	m/s^2	cm/s^2	cm/s^2
k , permeability	m^2		darcy	millidarcy
L , length of sample	m	m	cm	cm
M , gas molecular weight	kg/kg-mole	kg/kg-mole	g/g-mole	g/g-mole
P , absolute pressure	Pa	Pa	atm	psia
p , gauge pressure	Pa	Pa	atm	psig
Δp , differential pressure	Pa	Pa	atm	psi
q , volumetric flow rate				
r , radius of sample or seal	m	m	cm	cm
S , compressive storage				
s , flow-direction distance	m	m	cm	cm
T , absolute temperature	K	K	K	K
V_p , pore volume				
V_r , total reservoir volume				
v_s , volumetric flux	m/s	m/s	cm/s	cm/s
β , inertial resistivity	m^{-1}	m^{-1}	cm^{-1}	ft^{-1}
ρ , gas or liquid density	kg/m^3	kg/m^3	g/cm^3	g/cm^3
μ , gas or liquid viscosity	Pa-s	Pa-s	cp	cp
R , gas-law constant	8314	8314	82.05	1205.8
C_1 , in Darcy or Forch. eq.	1.0	1.0	1.0	6.8046E-2
C_2 , in Darcy or Forch. eq.	1.0	1.0E+12	1.0	1000.
C_3 , constant in Forch. eq.	1.0	1.0	9.8692E-7	3.2379E-8
C_4 , constant in eqs. with g	1.0	1.0	1.0133E+6	68 950.

Tabla 1. Unidades de variables y constantes involucradas en las ecuaciones de Darcy y Forchheimer para calcular la permeabilidad. Fuente [1]

1.1.3. TEORIA:

Las mediciones de permeabilidad pueden ser de una sola fase (Un solo fluido para el ensayo) ó de varias fases (Diferentes fluidos utilizados en la misma prueba), obteniendo de ésta manera la permeabilidad absoluta ó efectiva respectivamente.

Es de interés para éste proyecto profundizar en las pruebas de permeabilidad de una fase, los cuales se pueden clasificar en cuatro categorías: Aquellos que utilizan gas ó líquido, en pruebas con condiciones de estado estacionario o transitorio, por lo tanto en esta sección se va a presentar la teoría necesaria para analizar pruebas con gas y líquido bajo diferentes condiciones con el fin de conocer las ventajas y desventajas al trabajar con cada fluido.

1.1.3.1. Ecuaciones de permeabilidad en estado estacionario para gases:

A diferencia de los líquidos, los gases son altamente compresibles, además en condiciones normales la densidad de éstos es tan baja que se pueden despreciar los efectos de la gravedad sobre los ensayos de permeabilidad con gases. Por otro lado los flujos volumétricos obtenidos con gases son supremamente elevados alejándose de la condición estipulada por la ley de *Darcy* para flujos lentos, debido a esto, para encontrar una ecuación característica que permita realizar las mediciones de permeabilidad utilizando gases, se debe comenzar con el diferencial de la ecuación de *Forchheimer* a la cual se le agregará la corrección por deslizamiento que se presenta en los gases.

$$\frac{-dP}{ds} = \frac{C_2 \mu q_s}{C_1 A k_g} + \frac{C_3 \beta \rho_s^2}{C_1 A^2} \quad (8)$$

Donde:

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

q_s = Rata volumétrica de flujo de gas a través del área A por unidad de tiempo.

A = Área perpendicular al flujo de gas.

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

μ = Viscosidad dinámica del gas.

k_g = Permeabilidad aparente de un medio poroso para un gas particular (Ya que falta la corrección de deslizamiento de gas).

β = Coeficiente de resistividad inercial.

ρ = Densidad del gas.

Las constantes C₁, C₂ y C₃, son utilizadas para corregir dimensiones en la ecuación, así mismo sus valores se pueden encontrar en la tabla 1, de acuerdo a las unidades seleccionadas. Con el fin de no cometer futuros errores, en éste documento se va a utilizar la P (mayúscula) para denominar la presión absoluta y la p (minúscula) para el diferencial de presión, entonces se tiene que:

$$P = p + P_a \quad (9)$$

Donde P_a , es la presión absoluta en el ambiente, convertida a las unidades respectivas.

En la ecuación (8) se puede observar la permeabilidad aparente para el gas utilizado (k_g), y de acuerdo con la ecuación (7), ésta variable depende de la presión P , por lo tanto no se puede declarar como una constante a la hora de integrar (8). Además, en (7), b depende tanto de las propiedades de la roca como de las del gas, es por ello que *Klinkenberg*, estableció la siguiente relación entre b y el promedio de camino libre para el gas $\bar{\lambda}$ (Es el área promedio por la cual pueden transitar libremente las moléculas del gas, tiende a ser mucho más pequeño que el radio promedio de los poros de la roca).

$$\bar{\lambda} = \frac{br}{4cP} \quad (10)$$

Mientras que de acuerdo con la teoría cinética para gases ^[3], se tiene que el término $\bar{\lambda}$ es igual a:

$$\bar{\lambda} = \frac{1.881 \cdot \mu}{P} \cdot \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (11)$$

Por lo tanto, igualando las ecuaciones (10) y (11), se obtiene:

$$b = \left[99.5 \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \right] \left(\frac{c}{r} \right) \quad (12)$$

En donde:

μ = Viscosidad del gas [cp].

T = Temperatura absoluta del gas mientras se realiza la medición de b [K].

M = Peso molecular del gas.

c = Coeficiente menor a 1.0 de acuerdo a *Klinkenberg* [no tiene unidad].

r = Radio aproximado a los poros de la roca en estudio [μm].

En la ecuación (12), se puede observar que las variables dentro de los corchetes cerrados dependen directamente de las propiedades del gas, mientras que el factor en los paréntesis, depende de las propiedades de la roca, el cual, se define como el radio efectivo del deslizamiento de gas obteniendo:

$$r_b = \frac{99.5 \cdot \mu}{b} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (13)$$

Siendo r_b el factor de deslizamiento de gas recomendado para utilizar en la realización de las pruebas de permeabilidad.

Ahora que ya se cuenta con un factor de corrección confiable, se hace necesario prestar atención a la condición de estado estacionario, la cual se logra alcanzar cuando el diferencial de presión y el flujo de masa a través de la muestra son constantes, es decir, son invariantes con el tiempo, por lo tanto, bajo condiciones isotérmicas se tiene que:

$$\rho q_s = \rho_r q_r \quad (14)$$

Entonces como:

$$\rho = \frac{MP}{zRT} \quad (15)$$

Donde z es el factor de desviación del gas siendo igual a 1.0 para un gas ideal. Los valores de z en función de la temperatura y presión para diferentes gases se pueden encontrar en el apéndice A.

Utilizando (15) en (14), se tiene que:

$$\frac{P \cdot q_s}{z} = \frac{P_r \cdot q_r}{z_r} \quad (16)$$

Siendo el sufijo r una referencia para indicar la medición del flujo de masa bajo condiciones determinadas de presión y temperatura. Sustituyendo las ecuaciones (7), (15) y (16) en (8) se obtiene:

$$C_1 \cdot \left(\frac{-dP}{ds} \right) = \frac{C_2 \mu P_r q_r z}{A k_\infty z_1 (P + b)} + \frac{C_3 \beta M P_r^2 q_r^2 z}{A^2 R T z_r^2 P} \quad (17)$$

Integrando (17), se pueden obtener los valores de k_∞ , b y β , siempre y cuando se realicen por lo menos tres mediciones en las cuales el diferencial de presión varíe sustancialmente, con el fin de realizar buenas interpolaciones entre éstos datos.

Realizando una serie de cálculos con la ecuación (17), se obtiene la permeabilidad de la siguiente forma:

$$k_g = \frac{2C_2 \mu P_r q_r z_m}{C_1 z_r G_f (P_1 - P_2) \cdot (P_1 + P_2)} \quad (18)$$

Donde G_f es un factor geométrico que se presenta más adelante.

1.1.3.2. 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.

También se debe tener mucho cuidado al realizar pruebas con líquidos, en drenar y secar muy bien la roca, con el fin de impedir el desprendimiento de granos internos (Cuando se utilizan diferenciales de presión muy altos), además, 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*.

$$v_s = \frac{q}{A} = \frac{-C_1 k}{C_2 \mu} \cdot \left(\frac{dp}{ds} - \frac{\rho g}{C_4} \cdot \frac{dz}{ds} \right) \quad (19)$$

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.

La ecuación (19), se puede simplificar para ciertos casos especiales, como son:

- **Flujo Horizontal:**

Para un flujo horizontal se tiene que para la ecuación (19), dz/ds es igual a cero, por lo tanto integrando ésta ecuación respecto s , obtenemos la permeabilidad en la siguiente ecuación.

$$k = \frac{C_2 \cdot q\mu}{C_1 \cdot G_f \cdot (p_1 - p_2)} \quad (20)$$

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

- **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 (19), dz/ds igual a -1 ó +1 respectivamente.

- **Flujo vertical hacia abajo:**

$$k = \frac{C_2 C_4 q\mu L}{C_1 A \rho g \cdot (h + L)} \quad (21)$$

Donde L es el largo de la muestra y h es el cabezal de manejo en la prueba, ver figura 2.

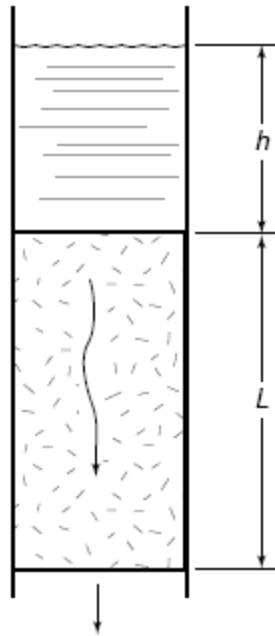


Figura 2. Flujo de líquido hacia abajo con cabezal de manejo. Fuente [1]

➤ **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.

$$k = \frac{C_2 C_4 q \mu L}{C_1 A \rho g h} \quad (22)$$

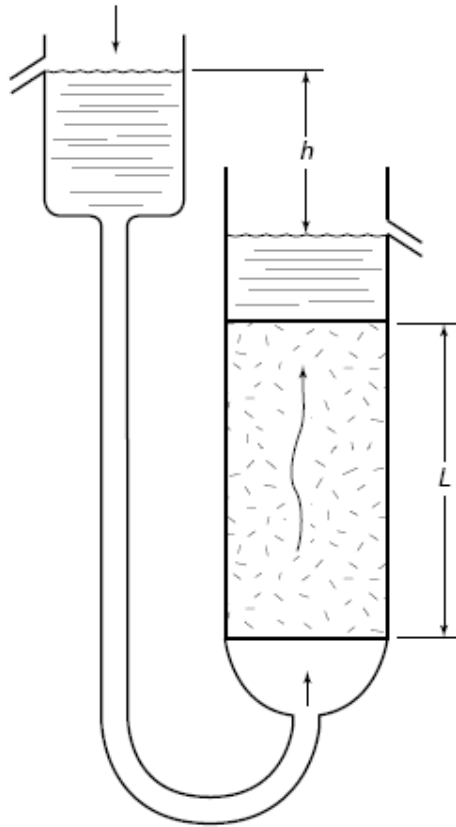


Figura 3. Flujo de líquido hacia arriba con cabezal de manejo. Fuente [1]

Finalmente cuando se alcanza un diferencial de presión invariante en el tiempo, se puede implementar la ecuación (23) 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.

$$k = \frac{C_2 q \mu L}{C_1 A \Delta p} \quad (23)$$

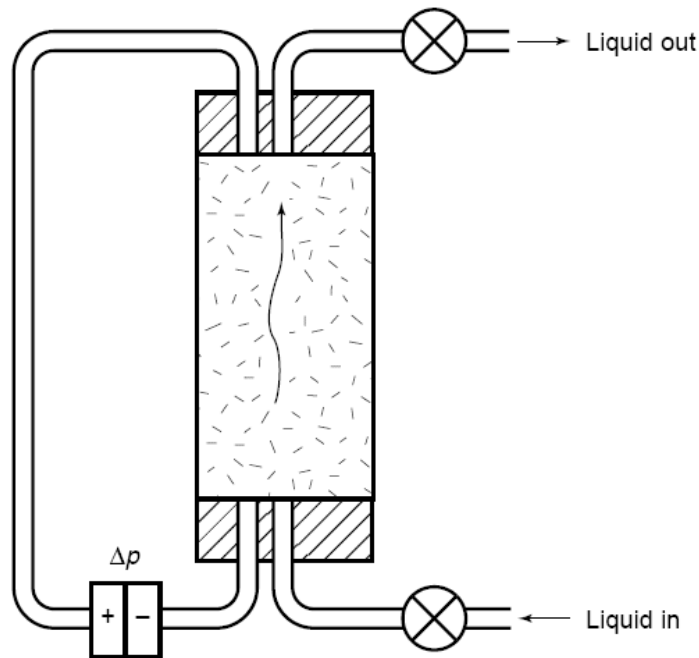


Figura 4. Medición de flujo de líquido hacia arriba con diferencial de presión inducido. Fuente [1]

1.1.4. MEDICIONES DE PERMEABILIDAD SUGERIDAS POR LA NORMA API RP 40.

Como se pudo observar en las secciones anteriores, existen diferentes maneras de medir la permeabilidad de un medio poroso, desde realizar las pruebas con gases ó líquidos hasta implementar el ensayo horizontal ó verticalmente. En ésta sección, se dan a conocer varios procedimientos recomendados por la norma API (*American Petroleum Institute*) en la determinación de la permeabilidad dentro de un laboratorio de rocas.

Como recomendaciones generales para cualquier medición de permeabilidad, se sugiere utilizar para flujos volumétricos altos, muestras de un diámetro mucho menor comparado con el largo de la misma; mientras que para flujos lentos es recomendable implementar muestras de gran diámetro y poco espesor, ya que se pueden reportar resultados mucho más exactos al usar éstas consideraciones en los ensayos de permeabilidad. También es muy importante contar con la muestra de roca totalmente limpia y seca, con el fin de evitar mediciones erróneas en el ensayo.

1.1.4.1. Gases:

- **Mediciones en estado estable, Flujo axial:**

Como su nombre lo indica, éste tipo de medición se realiza inyectando y recolectando el fluido de manera axial a la muestra de roca, es decir, a lo largo del eje central de la muestra, la cual suele ser un cilindro pequeño del medio poroso de diámetro D y largo L que se monta sobre un soporte adecuado para sostener el *plug* de roca.

El soporte de la muestra debe contar con una manga flexible (Normalmente hecha con plástico) para impedir la fuga del gas por las paredes cilíndricas, además de permitirle al aparato, ejercer fuerza radial sobre la muestra para establecer de ser necesario *stress* de confinamiento al ensayo de permeabilidad. También, el aparato de confinamiento, debe ser capaz de transmitir fuerza axial por los terminales de la muestra, con el fin de simular el ambiente de un pozo en el laboratorio. Se dice que cuando el *stress* del radial es igual al axial, se tiene una muestra isostáticamente ó hidrostáticamente estresada; mientras que si no son iguales, la muestra está biaxialmente estresada. Como se utilizan gases como fluido de prueba, el efecto de gravedad es despreciable, y no importa cómo se oriente el retenedor de la muestra ya sea vertical u horizontalmente para la realización del ensayo de permeabilidad.

En cada cara final de la muestra, se deben colocar puertos de entrada y salida para el gas, los cuales deben tener varias ranuras en forma circular o de espiral, para garantizar la entrega y absorción de gas por toda la superficie de las caras del cilindro de roca; también es necesario ubicar una línea de medición, la cual debe estar muy bien soportada para no crear picos de caída en la presión durante todo el ensayo.

A continuación se muestra un arreglo para realizar la medición de tipo axial, en donde las flechas rectas indican la fuerza de confinamiento ejercida sobre la muestra, mientras que la flecha curva, señala la dirección del flujo de gas.

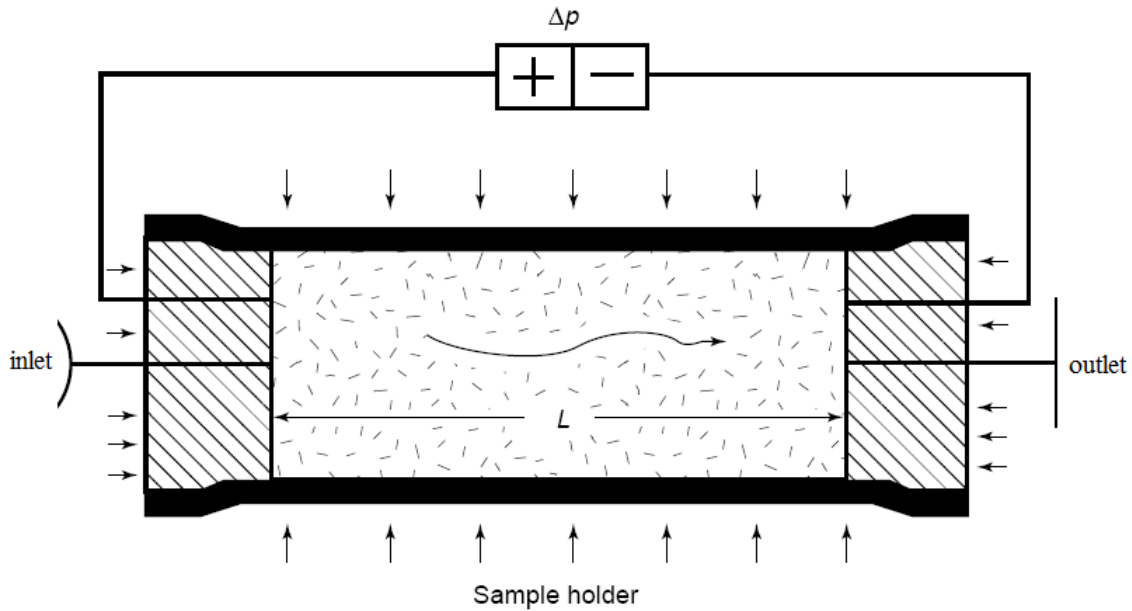


Figura 5. Arreglo para una medición tipo axial. Fuente [1]

Como se explicó en la sección 1.1.3.1. Los cálculos para pruebas con gases, se realizan con la ecuación (18), para la cual el factor geométrico G_f es igual a:

$$G_f = \frac{\pi D^2}{4L} \quad (24)$$

Normalmente cuando una muestra de roca se corta, el eje axial queda paralelo a los sedimentos de roca, por lo tanto la permeabilidad que se encuentra en ésta prueba, es una permeabilidad horizontal k_H , mientras que, cuando el corte se realiza de tal manera que el eje axial sea perpendicular a los sedimentos, entonces se dice que la permeabilidad encontrada es vertical k_V (Ver figura 6).



Figura 6. Muestra de roca metamórfica con un corte en la cual el eje axial es perpendicular a los sedimentos. Fuente [3]

➤ **Ventajas:**

- a. El gas no tiene ningún tipo de reacción con la roca, permitiendo que al final de ensayo, la muestra esté limpia y seca.
- b. Es una técnica muy económica, de fácil manejo y en cualquier momento se pueden cambiar los sensores de presión para extender el ensayo de permeabilidad.
- c. Ha sido una práctica muy utilizada desde hace muchos años, lo cual deja datos históricos importantes para comparar y tomar como datos patrones en la calibración del ensayo.

• **Mediciones en estado estable, flujo transversal:**

Esta técnica es muy utilizada para realizar mediciones de permeabilidad horizontal. Implementa dos pantallas paralelas a lo largo de toda la muestra que cubren un ángulo (θ) de las paredes del cilindro (Ver figura 7 y 8).

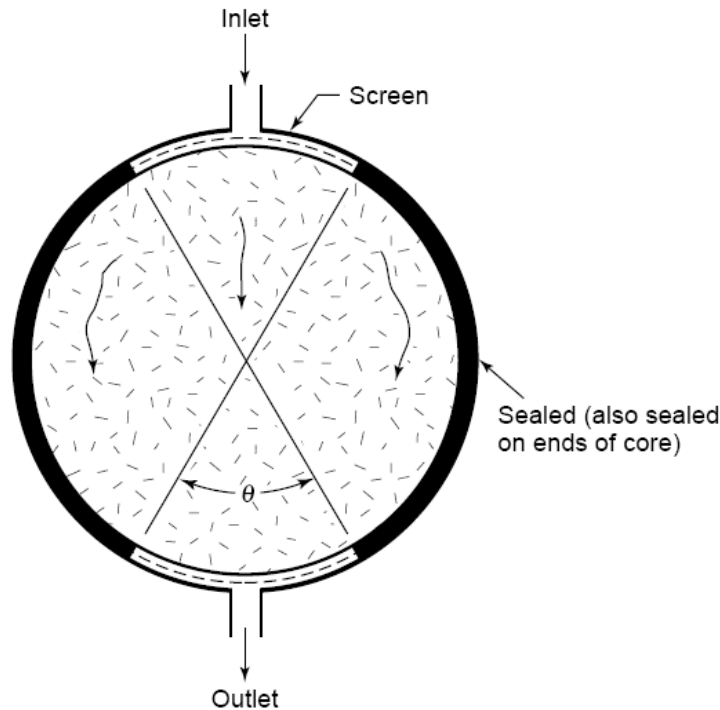


Figura 7. Corte transversal a la muestra para observar el flujo del fluido a través de las pantallas y la muestra porosa; *Inlet* y *Outlet* representan la entrada y salida de flujo respectivamente, sealed significa que la muestra está sellada. ^{Fuente [1]}

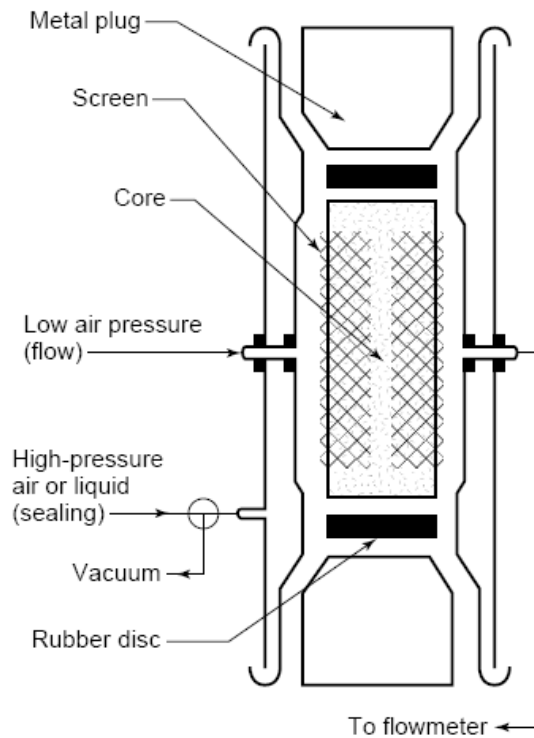


Figura 8. Vista general de una muestra de tipo transversal; Metal *plug* es una masa de metal para confinar axialmente la muestra, *screen* es una red para inducir el flujo hacia determinados lugares, y *rubber disc* es un disco de plástico para impedir fugas del fluido. Fuente [1]

El factor geométrico implementado en la ecuación (18) para realizar las mediciones sobre ésta técnica es el siguiente:

$$G_f = \frac{L}{G_\theta} \quad (25)$$

Donde G_θ es un factor geométrico que depende exclusivamente del ángulo θ y sus valores se escogen de acuerdo a la siguiente figura.

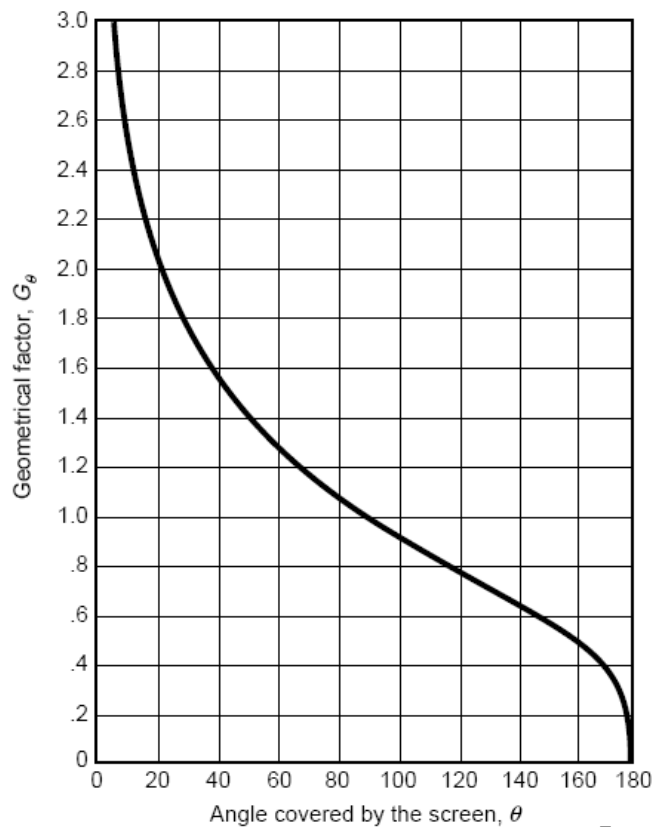


Figura 9. Valores de G_θ para determinados ángulos θ . Fuente [1]

➤ **Ventajas:**

- a. Se pueden utilizar muestras de gran volumen, lo cual representa de una mejor manera la permeabilidad del medio poroso.
- b. Aunque es una técnica especializada para encontrar la permeabilidad horizontal, también se puede hallar la permeabilidad vertical si se realiza un corte adecuado de la muestra.

• **Mediciones en estado estable, flujo radial:**

Para la realización de ésta técnica, el núcleo de roca debe ser un cilindro de radio r_e y largo L , luego es necesario realizar un corte a la muestra, de un cilindro concéntrico de radio r_w , donde $r_w < r_e$, dejando un hueco circular a lo largo del núcleo. Así mismo se tiene que sellar herméticamente toda la cara inferior del cilindro y la cara superior sin tapar el orificio, de esta forma el gas con presión P_1 se introduce a la muestra por las paredes del núcleo, mientras que sale de la misma por el hueco concéntrico a una presión P_2 . Normalmente se podría realizar la prueba de manera inversa, es decir, introducir el fluido por el orificio del núcleo y realizar la medición en las paredes externas del cilindro, pero debido a que las paredes en el hueco presentan un área menor, es muy posible que se presenten desprendimientos de partículas al inyectar el fluido con la presión requerida. En la

figura 10 se puede observar el arreglo necesario para realizar las mediciones de permeabilidad utilizando ésta técnica de flujo radial.

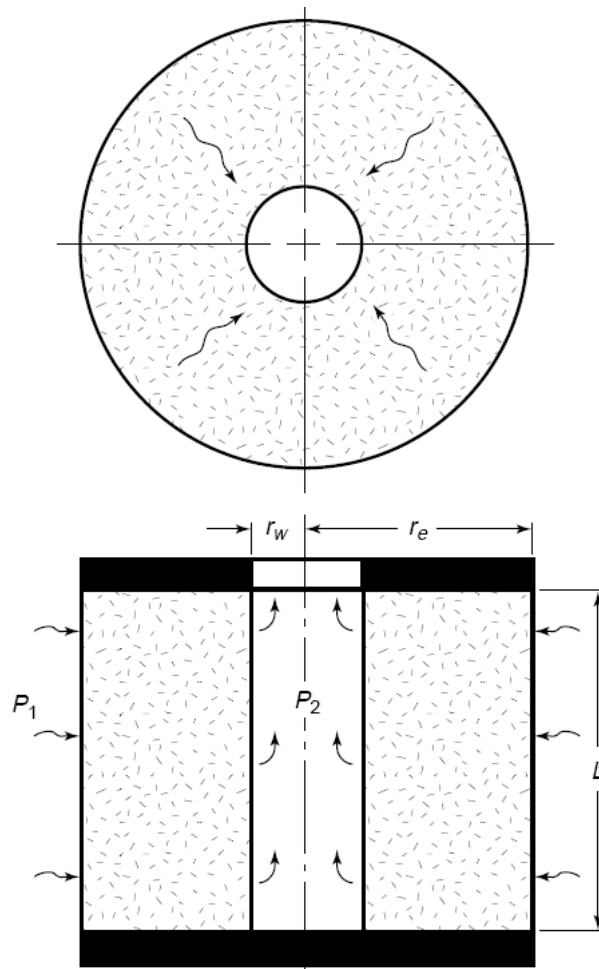


Figura 10. Arreglo del núcleo para permitir la medición de permeabilidad con flujo radial. *Fuente [1]*

De manera semejante a los casos presentados anteriormente, los cálculos para encontrar la permeabilidad se realizan cuando se alcanza el estado estable en el diferencial de presión y la tasa de flujo del gas, también se utiliza la ecuación (18) para encontrar k_g , usando el siguiente factor geométrico:

$$G_f = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \quad (26)$$

➤ **Ventajas:**

- a. La permeabilidad hallada en una muestra homogénea, es la permeabilidad promedio a lo largo de la muestra y en todas sus líneas radiales.

1.1.4.2. Líquidos:

Las técnicas implementadas en la sección 1.1.4.1 también se pueden utilizar para las mediciones de permeabilidad con líquidos, únicamente es necesario tener en cuenta que la densidad y viscosidad de éstos fluidos es mucho más grande que la de los gases, también son menos compresibles, pueden ser corrosivos, soportar actividad microbiológica y reaccionar químicamente con algunos componentes del medio poroso. Por ésta razón, se deben tomar las precauciones correspondientes en los equipos utilizados con el fin de evitar resultados erróneos. Además se deben utilizar las ecuaciones definidas en la sección 1.1.3.2 para encontrar la permeabilidad de la roca, dependiendo de la manera sobre cómo se realiza el ensayo.

A continuación se presentan dos técnicas que se pueden implementar con los líquidos:

- **Mediciones en estado estable, Δp impuesto:**

Esta técnica no necesita cabezales de líquido para entregar el fluido por toda la cara del núcleo, pero se pueden utilizar de ser necesario, sólo que se deben implementar con mucho cuidado, debido a la alta densidad de los líquidos, la cual puede llegar a causar un aumento de presión no deseado en la cara superior de la muestra. Éste problema se resuelve implementando técnicas de medición con el *plug* ubicado horizontalmente y utilizando la ecuación (20) para encontrar la permeabilidad (Donde G_f se halla dependiendo de la técnica utilizada en la sección anterior), por otro lado, ubicar los dos puertos del sensor diferencial de presión (Salida del flujo y entrada del flujo) a la misma altura y con todas las líneas hidráulicas llenas del fluido utilizado en la medición, puede usarse con muestras verticales implementando la ecuación (23).

Con el fin de mantener la rata de flujo constante durante la prueba, se hace necesario utilizar bombas de golpe sencillo y desplazamiento positivo, las cuales también permiten realizar la medición de la rata de flujo, directamente desde la bomba, sin tener que utilizar equipos adicionales. Es de especial cuidado conocer el volumen del líquido contenido en la bomba y saber si es suficiente para alcanzar el estado estable en el ensayo de permeabilidad (Requisito primario para implementar las ecuaciones de las secciones 1.1.3.1 y 1.1.3.2).

El procedimiento recomendado para la realización de ésta técnica, consta inicialmente en filtrar el líquido a utilizar en la prueba, por lo cual, se debe usar un filtro de 0.2 micras para remover partículas y cualquier agente biológico presente en el fluido. También es muy importante saturar completamente la muestra antes de ubicarla en el retenedor asegurándose que no queden burbujas de aire en el interior, obtener un *stress* de confinamiento deseado y analizar el fluido de salida para observar si existen partículas que se desprendieron de la muestra, causando errores en la medición de la permeabilidad.

➤ **Ventajas:**

- a. No es necesario incluir factores de corrección.
- b. La medición de la permeabilidad usando ésta técnica, hace que sea mucho más representativa en los pozos, ya que se asemeja mucho más a la realidad común.

Imponer un ΔP a través de la muestra, es la técnica recomendada por la API y utilizada por el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, ya que permite realizar los cálculos de permeabilidad de una manera sencilla, además las condiciones del ensayo son semejantes a las que se tendrían en yacimiento.

• **Mediciones en estado estable, utilizando cabezales líquidos:**

Es una técnica muy usada en medios porosos altamente permeables, ya que no requiere grandes inversiones y su aplicación y procedimientos son muy sencillos. Las figuras 2 y 3 muestran las configuraciones básicas utilizadas por ésta técnica, en donde no se necesitan bombas hidráulicas ó costosos sensores de presión, si no que por el contrario, se aprovecha la fuerza de gravedad y la alta densidad de los líquidos para crear presiones útiles a la hora de medir la permeabilidad de un medio poroso.

➤ **Ventajas:**

- a. Es un procedimiento muy sencillo y de muy bajo costo.
- b. No se necesitan soportes de muestra especializados.

2. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD

En este capítulo, se presenta el procedimiento general utilizado en el laboratorio de mecánica de rocas del Instituto Colombiano de Petróleos (ICP) para la realización de los ensayos de permeabilidad, basados en el PROCEDIMIENTO TÉCNICO DE ENSAYO PARA PRUEBAS DE PERMEABILIDAD TRIAXIAL, SIN APLICAR PRESIÓN DE PORO, REALIZADAS A TEMPERATURA AMBIENTE (PTE 151.017, Referencia 17).

2.1. Técnica implementada:

El ensayo de permeabilidad de rocas que se práctica en el laboratorio de mecánica de rocas en el ICP es una prueba triaxial, sin aplicar tensión de poro y a temperatura ambiente. Ésta técnica utiliza una presión de confinamiento alrededor de la muestra cilíndrica (triaxial) para generar trayectorias de esfuerzos solicitadas por el cliente, además se introduce axialmente al medio poroso salmuera con un diferencial de presión establecido, permitiendo el uso de las ecuaciones presentadas en la sección 1.1.3.2 para la realización de los cálculos en la determinación de la permeabilidad.

2.2. Equipos e instrumentación:

- **Rock Mechanics Test System Model (MTS 815):** Es un equipo que permite realizar ensayos de permeabilidad triaxiales, ya que se comporta como una cámara de confinamiento que puede ejercer dos esfuerzos: axial (Vertical) y radial (Horizontal). Para realizar el confinamiento radial, se utiliza un fluido alrededor de la muestra, la cual se debe recubrir con una manga plástica para evitar el contacto directo entre las paredes y el medio poroso (Para no afectar la medición), luego el equipo ejerce una presión de compresión sobre el fluido y éste a su vez es el que efectúa el esfuerzo sobre el núcleo de roca. El esfuerzo vertical se obtiene directamente por la presión que ejerce el equipo sobre la muestra, ya que ésta debe ir conectada a lo largo del eje axial al MTS 815. Ver figura 11. El equipo MTS 815, es un sistema completamente sistematizado y no es necesario ejercer ningún tipo de control sobre éste para la automatización de la prueba, ya que para el ensayo de permeabilidad, simplemente se ingresan las condiciones de confinamiento de acuerdo al diseño elaborado para la prueba.

La selección de éste equipo se realizó en el laboratorio del ICP hace varios años, de acuerdo a su capacidad para implementar confinamiento triaxial sobre las muestras rocosas. El costo del MTS 815 fue de 700.000.000 (Setecientos millones) de pesos.

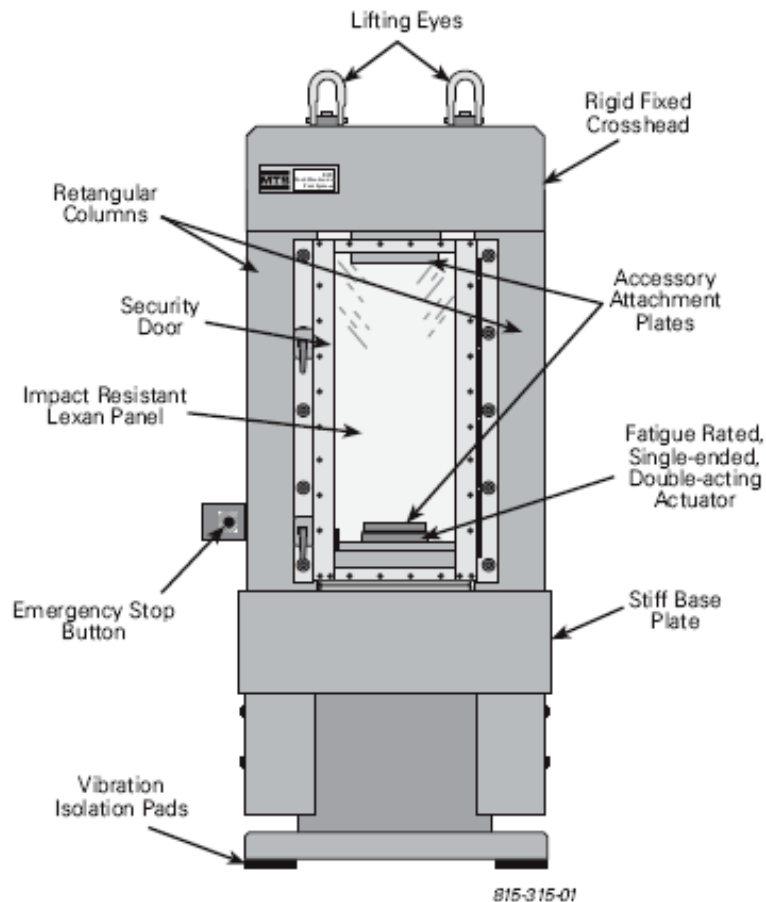


Figura 11. MTS 815. Fuente [4]

- **Bomba ISCO 100DM:** Es una bomba hidráulica de desplazamiento positivo que se puede controlar con la interfaz RS232 por medio de un computador para establecer la rata de flujo y la presión de inyección. Permite un flujo máximo de 30ml/min y contiene un tanque de 100ml (Ver figura 12). En el ensayo de permeabilidad de rocas para el cual se realiza éste proyecto, se utiliza una configuración de dos bombas ISCO 100DM (Ver figura 13) para garantizar un flujo deseado constante, ya que cuando se termine el fluido a inyectar, la otra bomba se encargará de mantener el flujo mientras se recarga la primera (Aproximadamente la recarga dura 30 segundos).



Figura 12. Bomba ISCO 100DM. *Fuente [5]*



Figura 13. Bombas ISCO 100DM Configuración dual. *Fuente [5]*

- **Transmisor inteligente de presión:** Para medir las presiones de salida del líquido utilizado en el ensayo de permeabilidad, se utiliza un Transmisor de presión Smar LD301 (Figura 14), el cual realiza mediciones de presión diferencial, manométrica y absoluta. El transmisor se basa en un sensor con diafragma capacitivo (Ver figura 15) que transforma la presión ejercida sobre las paredes del diafragma en señales eléctricas. La serie LD301 ofrece la posibilidad adquirir electrónicamente los datos de presión medidos en tiempo real por medio de los terminales de conexión mostrados en la figura 16.

El Smar LD301 utilizado en el laboratorio, tiene un rango de 30psi a 3600psi, ya que durante el ensayo de permeabilidad, se pueden alcanzar grandes diferenciales de presión permitiendo de ésta manera, la adecuada medición del diferencial presente en la prueba.

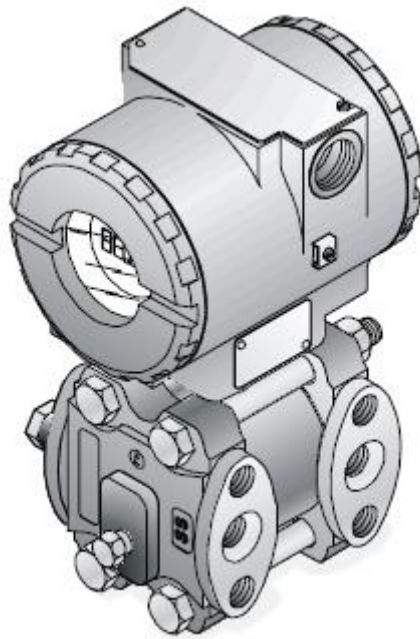


Figura 14. Transmisor inteligente de presión Smar LD301. *Fuente [6]*

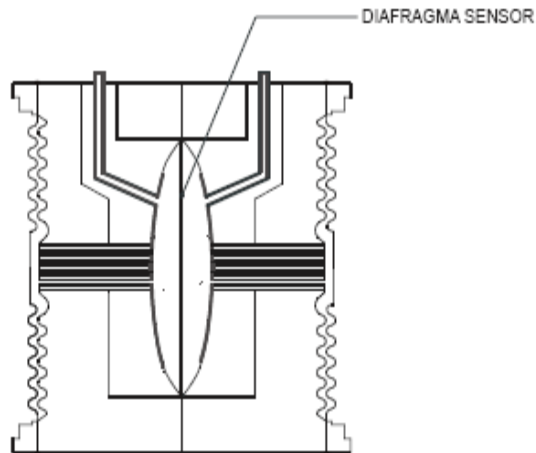


Figura 15. Diafragma Capacitivo del transmisor inteligente LD301. Fuente [6]

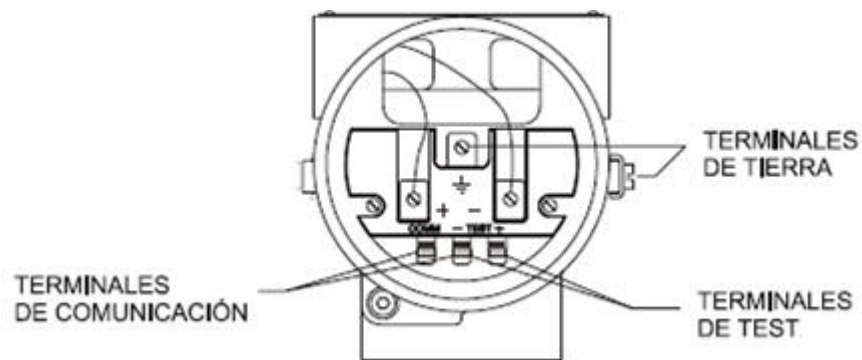


Figura 16. Terminales de conexión del transmisor inteligente de presión LD301. Fuente [6]

- **Cámara fotográfica:** Se utiliza para llevar un registro visual de la muestra a lo largo del ensayo de permeabilidad.
- **Deformímetros:** Pueden utilizarse extensómetros axiales y/o circunferenciales y son necesarios para medir la deformación en las muestras al finalizar el ensayo.

2.3. 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:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_v + \sigma_H + \sigma_h}{3} \quad (27)$$

$$\sigma_{v,H,h} = \Delta\sigma_{v,H,h} * h \quad (28)$$

Donde:

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

$\Delta\sigma$ = Denota el 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:

$$K = \frac{\Delta\sigma_{h,H}}{\Delta\sigma_v} \quad (29)$$

2.4. Adecuación de la muestra de ensayo:

Con el fin de preparar la muestra de medio poroso para el ensayo de permeabilidad, es necesario realizar procedimientos determinados para hacer los cortes, el pulimiento y finalmente saturar la muestra con salmuera para impedir la generación de burbujas durante el ensayo de permeabilidad de rocas.

2.5. Procedimiento técnico del ensayo:

1. Conectar la bomba ISCO al sistema *Rock Mechanics Test System* Modelo 815.
2. Colocar en funcionamiento el sistema *Rock Mechanics Test System* Modelo 815.
3. Ubicar la probeta sobre la platina inferior de compresión.
4. Bajar la campana de la celda triaxial y asegurar los tornillos de esta.
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. Configurar en la bomba ISCO la tasa de flujo a la cual se evaluarán los estados de esfuerzos durante la prueba.
7. Incrementar la presión de confinamiento y la fuerza axial hasta el punto a evaluar.
8. 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.
9. Una vez finalizado el ensayo se detiene el flujo en la bomba ISCO y se cierran las válvulas de alta y baja en los SMAR, posteriormente se vacía la celda triaxial y se retira la muestra.

2.6. Cálculos del ensayo:

Teniendo en cuenta la tasa de flujo correspondiente y el diferencial de presión en un momento determinado, se utiliza la ecuación (23) de la sección 1.1.3.2 para encontrar la permeabilidad instantánea del ensayo. El reporte de resultado se debe realizar de acuerdo a la siguiente información del ensayo:

1. Número del reporte: Asignado secuencialmente, de acuerdo con la base de datos del laboratorio.
2. 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.
3. Cronograma de trabajo seguido durante el ensayo.
4. Fotografías de la muestra, antes y después de realizado el ensayo.
5. Datos de la muestra: Nombre, profundidad, diámetro, longitud, densidad, porosidad y permeabilidad.
6. Referenciar los esfuerzos aplicados y la permeabilidad obtenida en el punto.
7. Una figura donde se presenta el comportamiento de la presión diferencial y la permeabilidad vs. Volúmenes porosos acumulados en la muestra (Figura 17).

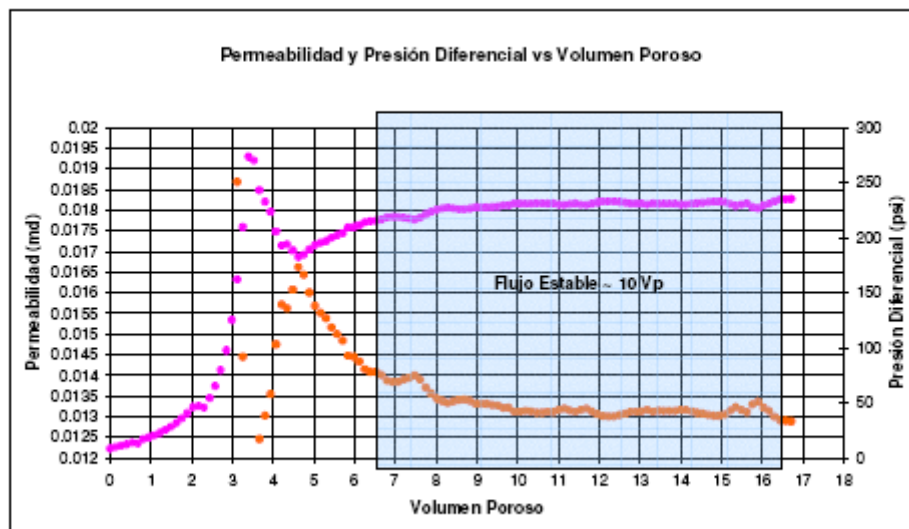


Figura 17. Permeabilidad y presión diferencial vs. Volúmenes porosos. Fuente [17]

3. SELECCIÓN INSTRUMENTACIÓN.

En éste capítulo se presentan las diferentes etapas implementadas en la automatización del ensayo de permeabilidad de rocas en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP. Las etapas desarrolladas son:

- Inicialización del sistema.
- Control y desarrollo del ensayo de permeabilidad.
- Transducción y acondicionamiento de señal.
- Adquisición de señal.
- Procesamiento y presentación de resultados.

En la figura 18 se muestra la configuración general de la automatización del ensayo de permeabilidad.

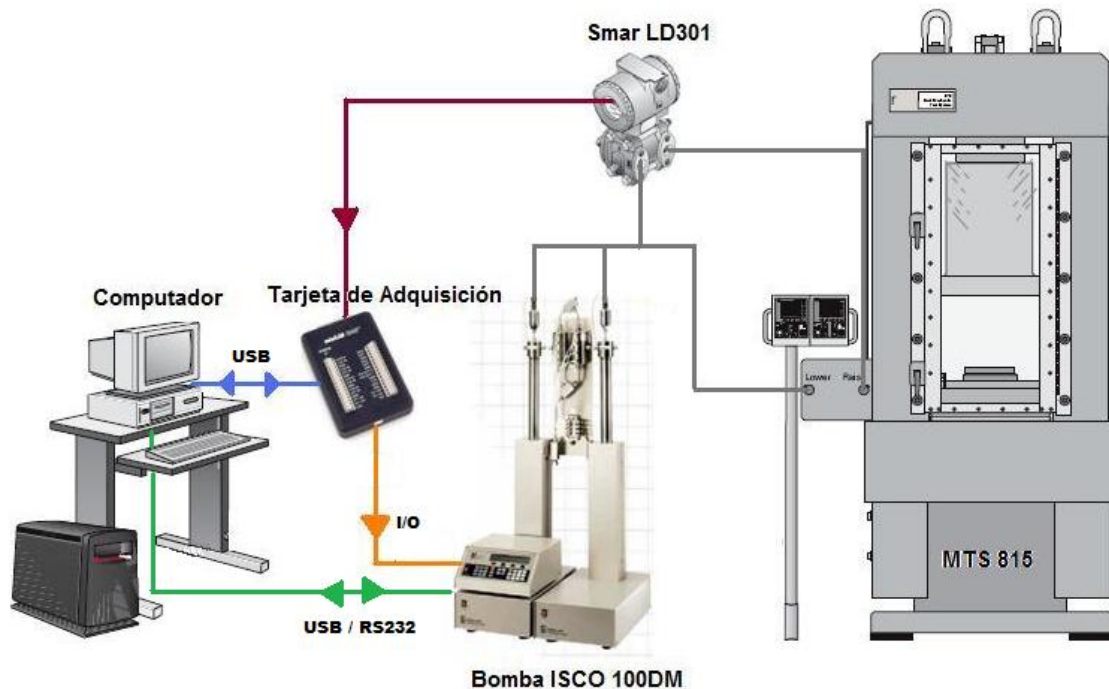


Figura 18. Diagrama general de la automatización del ensayo de permeabilidad. Fuente [Autor]

3.1. Inicialización del sistema:

De acuerdo con el capítulo anterior para comenzar el ensayo de permeabilidad de rocas es necesario realizar la conexión de la bomba ISCO 100DM al sistema MTS 815. Después de realizar todas las conexiones necesarias para inyectar el fluido en la cámara de confinamiento y medir la presión diferencial entre el fluido entrante y el saliente, se deben llenar todas las líneas hidráulicas con la salmuera para impedir que burbujas de aire penetren en la muestra. Este purgamiento de las líneas, se realiza con el control de la bomba ISCO, el cual se puede realizar manualmente (Utilizando el panel de control) ó automáticamente (Utilizando el puerto serial RS232). En la figura 19 se presentan los diferentes botones y funcionalidades del panel de control, mientras que en la figura 26 se muestran los puertos de comunicación de la bomba ISCO.

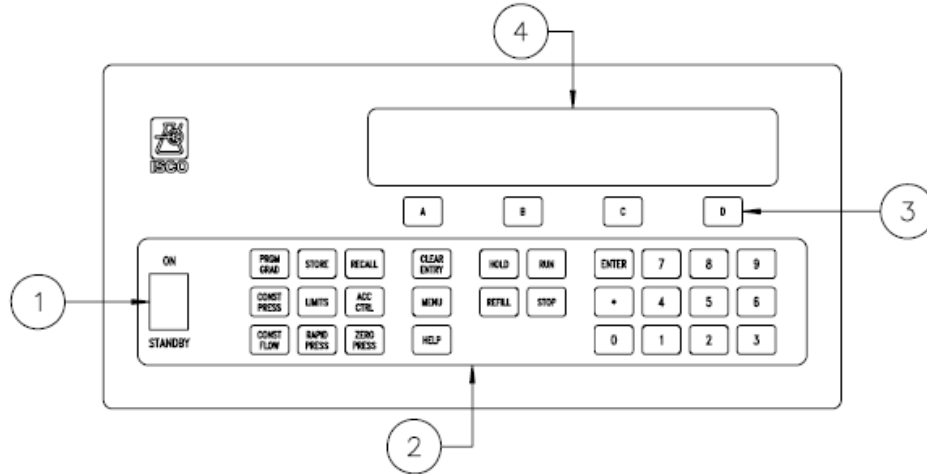


Figura 19. Panel frontal del controlador de la bomba ISCO. Fuente [5]

Item No en Fig. 25	Nombre	Descripción
1	<i>Switch On/Off</i>	Enciende o apaga el instrumento
2	Panel de control	Programar el controlador
3	Teclas auxiliares	A, B, C y D utilizadas para seleccionar menús en el <i>display</i>
4	<i>Liquid Cristal Display</i>	40 caracteres x 4 líneas

Tabla 2. Descripción del panel frontal del controlador de la bomba ISCO. Fuente [5]

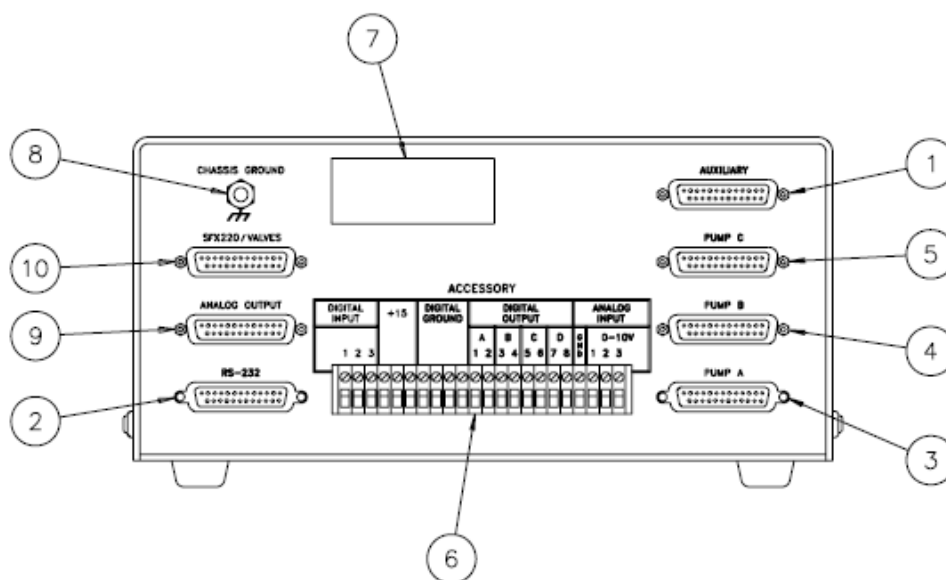


Figura 20. Puertos de comunicación del controlador de la bomba ISCO. Fuente [5]

Item No en figura 26	Nombre	Descripción
1	Auxiliar	Provee conexión para realizar controles y para agregar futuros accesorios
2	RS 232	Esta interfaz serial, puede utilizarse para controlar con un PC la bomba ISCO
3	<i>Pump A</i>	En este puerto se conecta la primera bomba a controlar
4	<i>Pump B</i>	Cuando se utiliza una segunda bomba éste es el puerto para controlarla
5	<i>Pump C</i>	Para controlar tres bombas al tiempo se utiliza éste conector con la tercera bomba
6	Accesorios	Permite la entrada y salida de señales de control
7	<i>Serial tag</i>	Indica el número serial del instrumento
8	<i>Chasis ground</i>	Punto común para el circuito
9	Salida análoga	Provee salida de la rata de flujo y el volumen total
10	SFX220/Válvulas	Provee el manejo de un motor para operar válvulas

Tabla 3. Descripción de los puertos de comunicación del controlador de la bomba ISCO. Fuente [5]

El control de la bomba ISCO se va a realizar por medio del software LabVIEW 7.1, ya que la Universidad Industrial de Santander cuenta con una licencia profesional

que permite utilizar éste programa; por otro lado, la comunicación computador Bomba ISCO puede hacerse de dos formas, la primera es conectar directamente la bomba al PC por medio de la interfaz RS232 (Usando un conversor RS232/USB) y realizar el control de la misma, mientras que la segunda opción es implementar una tarjeta de adquisición para generar y adquirir las señales de interés para controlar la bomba por medio del numeral 6 de la figura 20 y tabla 3. Es necesario, resaltar el uso de las dos opciones anteriores para controlar las bombas ISCO, ya que con la interfaz RS232, se pueden obtener los valores en tiempo real de presión, flujo y volumen entregado (Referencia [5]); mientras que con la segunda opción, se establecen los valores de presión constante, flujo constante o del volumen mínimo que debe tener cada bomba.

3.2. Control y desarrollo del ensayo de permeabilidad:

En el desarrollo de la prueba de permeabilidad, es necesario variar la rata de flujo de acuerdo al diseño del ensayo, es por esto que se deben controlar adecuadamente las bombas ISCO 100DM para tener el flujo deseado a través de la muestra durante toda la prueba de permeabilidad.

Para mantener un flujo deseado durante el ensayo, se deben utilizar dos bombas ISCO, ya que el fluido en el tanque de una sola bomba no es suficiente para completar toda la prueba, por esto es necesario implementar una segunda bomba ISCO para realizar un relevo entre las dos. El procedimiento general es así: Se tienen dos bombas **A** y **B** cada una con un tanque de 100ml y rata de flujo máxima de 25ml/min. Al comenzar la prueba, la bomba **A** establece el flujo deseado por el operario, entonces el ensayo transcurre con total normalidad hasta que el tanque de la bomba **A** llega a los 25ml, indicándole a la bomba **B** que debe hacerse cargo del flujo entregado para no cambiar las condiciones de la prueba y de ésta forma no alterar los resultados finales mientras la bomba **A**, realiza la operación de llenado que dura aproximadamente 30 segundos. Durante ésta transición entre las dos bombas, se debe realizar un control muy preciso, ya que si se establece el cierre total de de la bomba **A** y la apertura de la bomba **B**, lo más seguro es que ocurran caídas en el diferencial de presión y en consecuencia errores en los resultados, es por ello que se debe controlar adecuadamente las dos bombas con el fin de suavizar el cambio y entregar una rata de flujo constante durante el relevo entre las bombas **A** y **B**. Esta situación puede llegar a ocurrir varias veces durante un ensayo de permeabilidad, convirtiéndose en una etapa fundamental en la automatización de la prueba.

Como se había mencionado anteriormente, para realizar el control de las dos bombas ISCO se va a utilizar el software LabVIEW 7.1, en donde se va a implementar la estrategia de control a seguir con el fin de suavizar el relevo de las bombas.

3.3. Transducción y acondicionamiento de señal:

Esta etapa es la encargada de convertir las variables físicas presentes en el proyecto, en señales eléctricas para su procesamiento lógico en el computador, como lo es la presión diferencial en el ensayo, el volumen de líquido desplazado hacia la muestra y la rata de flujo inyectado a la misma.

3.3.1. Presión diferencial:

Existen dos variables de presión a medir en el ensayo de permeabilidad, la presión con la que el fluido llega a la muestra y la presión con la que deja el medio poroso, por ésta razón se utiliza un transmisor de presión Smar LD301 con el cual se puede realizar la medición de la presión diferencial entre éstos dos puntos, solamente se debe conectar el flujo de inyección hacia la entrada de alta del transmisor y el flujo a la salida de la MTS 815 en la entrada de baja del Smar LD301, obteniendo de ésta manera señales eléctricas correspondientes al nivel de presión diferencial durante el ensayo de permeabilidad de rocas.

El transmisor de presión Smar LD301 es fundamental en la automatización de la prueba, ya que aparte de tener la capacidad de presentar la presión en tiempo real durante el ensayo (Por medio de un *display*), tiene la facilidad de entregar un valor de corriente (Entre 4mA y 20mA) de acuerdo a la presión ejercida en el sensor, suministrando la señal eléctrica que va a ser adquirida hacia un computador por medio de una tarjeta de adquisición de datos, permitiendo de ésta manera un monitoreo constante y en tiempo real de los valores de presión en el ensayo. Cómo se había comentado en el capítulo anterior, en el transmisor de presión LD301 se tienen varios terminales de salida, los cuales son de gran interés por las razones expuestas anteriormente, en la figura 21 se encuentran tres pares de terminales: terminales de prueba (Teste), de comunicación y tierra; los primeros (“+” y “-”) se encargan de entregar la corriente 4mA – 20mA, los segundos (Entre los terminales “**COMM**” y “-”) establecen la comunicación con el configurador y finalmente los terminales de tierra facultados para referenciar todas las señales a un punto común del circuito eléctrico.

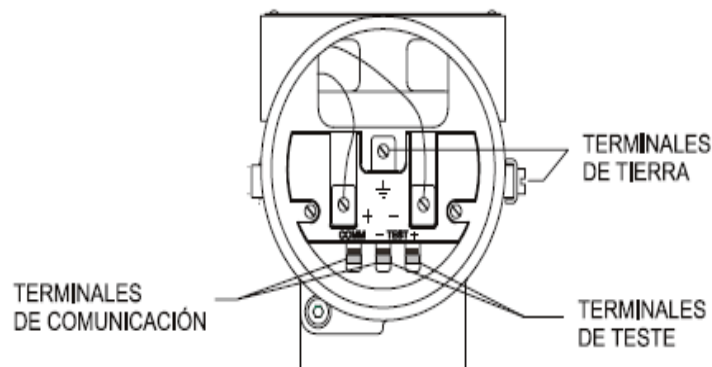


Figura 21. Terminales de conexión del transmisor de presión LD301. Fuente [6]

El transmisor de presión LD301 se basa en un diafragma capacitivo que varía su respuesta eléctrica dependiendo de la fuerza ejercida sobre sus paredes, en la figura 22 se puede observar el diafragma implementado en éste dispositivo; en donde P1 y P2 son las presiones en las cámaras H y L; CH es la capacitancia entre la placa fija en el lado P1 y el diafragma sensor; CL la capacitancia entre la placa fija en el lado P2 y el diafragma sensor; d la distancia entre las placas fijas CH y CL; Δd la deflexión del diafragma sensor debida a la presión diferencial ($DP = P1 - P2$), finalmente luego de desarrollar la fórmula establecida para definir la capacitancia del dispositivo se deduce que:

$$\Delta P = \frac{CL - CH}{CL + CH} = \frac{2\Delta d}{d} \quad (30)$$

Obteniendo de esta forma la presión diferencial entre las placas del transmisor. La etapa de sensado es la más relevante en el transmisor de presión, aunque es la adecuación y transmisión de una señal eléctrica lo que diferencia al sensor del transmisor, por lo cual existen otros componentes fundamentales en el funcionamiento del LD301 los cuales se presentan en la figura 23 y están constituidos por un oscilador encargado de generar una frecuencia en función de capacitancia del sensor; el aislador de señales que transfiere las señales del micro controlador a través de acopladores ópticos, mientras que la del oscilador se transfiere por medio de un transformador; el micro programado para administrar y operar todos los otros bloques, además de linealizar la señal y comunicarse con otros dispositivos por medio del protocolo HART; una EEPROM externa al micro controlador que contiene datos pertenecientes a las características del sensor para diferentes presiones y temperaturas (Esta caracterización es independiente para cada sensor y se garantiza por el fabricante); un conversor digital – analógico, el cual convierte la señal digital del controlador en una señal analógica con 14 bits de resolución; la etapa de salida que se encarga de controlar la corriente en la línea que alimenta el transmisor ya que actúa como carga resistiva dependiendo del valor de tensión entregado por el conversor D/A; la fuente de alimentación que entrega 3.6mA al transmisor cuando éste se encuentra inactivo y 21mA en su máximo consumo, es importante aclarar que el LD301 en la modalidad de transmisor, muestra la indicación de fallo en 3.6mA si está configurado para fallo de señal bajo; en 21mA si se configura para fallo de señal alto, en 3.8mA en caso de saturación baja y 20.5mA cuando ocurre saturación alta; 4mA corresponden a 0% del rango de trabajo y 20mA al 100% de este mismo rango (En la figura 24 se puede observar una gráfica con los rangos de salida); finalmente se tiene el controlador del visor, el cual se encarga de activar los segmentos del LCD para enseñar las mediciones realizadas en tiempo real.

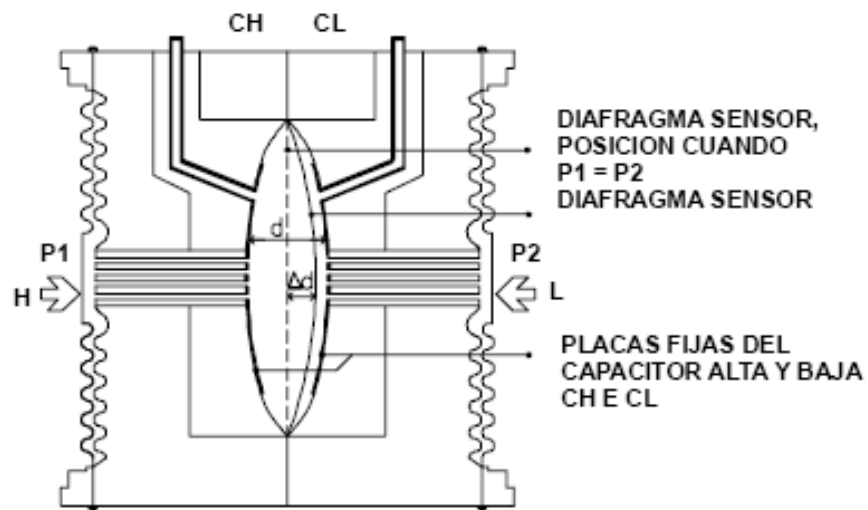


Figura 22. Diafragma capacitivo en el transmisor de presión LD301. Fuente [6]

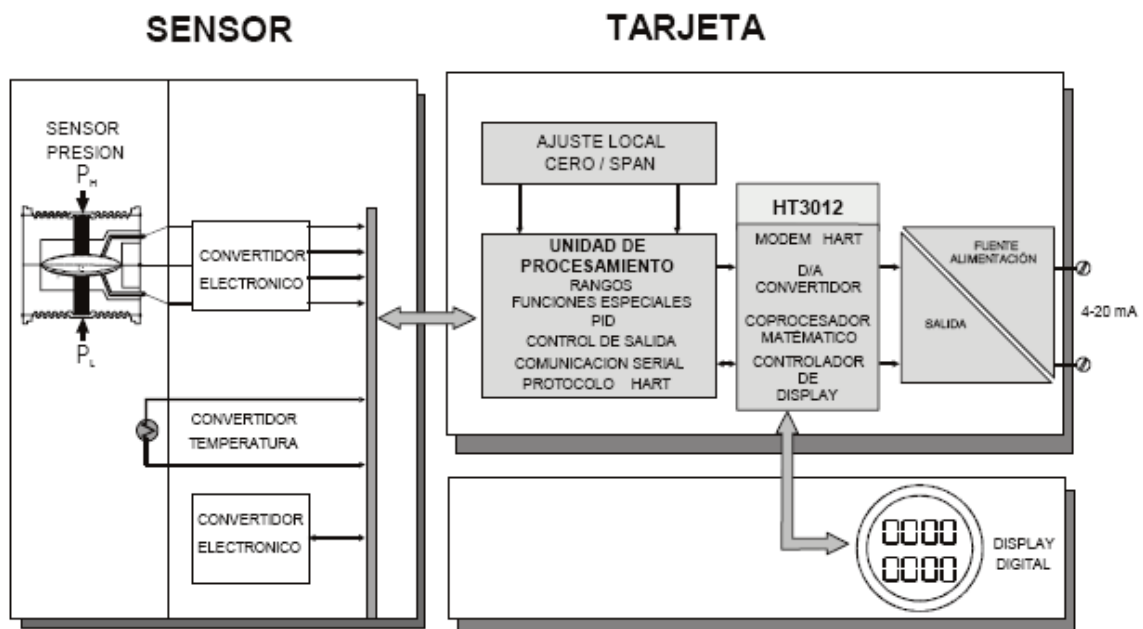


Figura 23. Diagrama de bloques del circuito utilizado en el transmisor LD301. Fuente [6]

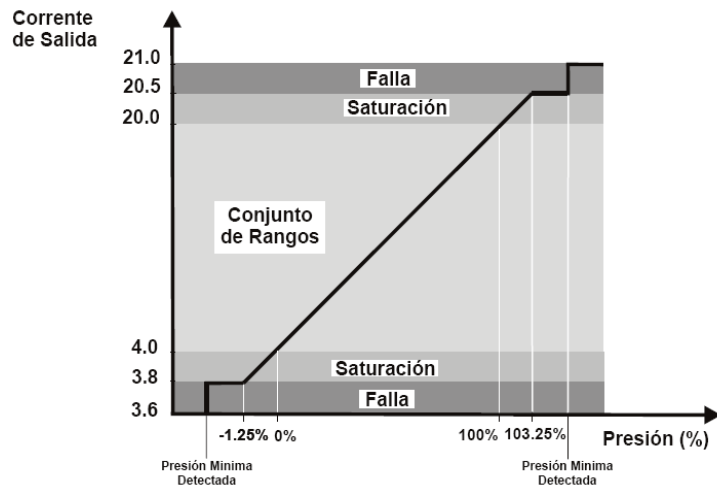


Figura 24. Rangos de corriente de salida del transmisor de presión LD301. Fuente [6]

3.3.2. Volumen y rata de flujo desplazados:

Para conocer el volumen y la rata de flujo desplazados hacia la muestra en cualquier instante del ensayo, el controlador de las bombas ISCO tiene una interfaz RS 232 que puede conectarse al computador y de ésta forma adquirir los datos de presión, flujo y volumen. Este control se efectúa por medio de LabVIEW y permite utilizar una serie de comandos para controlar la bomba ISCO.

En la figura 25 se muestra la conexión que se debe realizar entre el PC y el controlador de las bombas ISCO para implementar la comunicación entre los dos dispositivos.

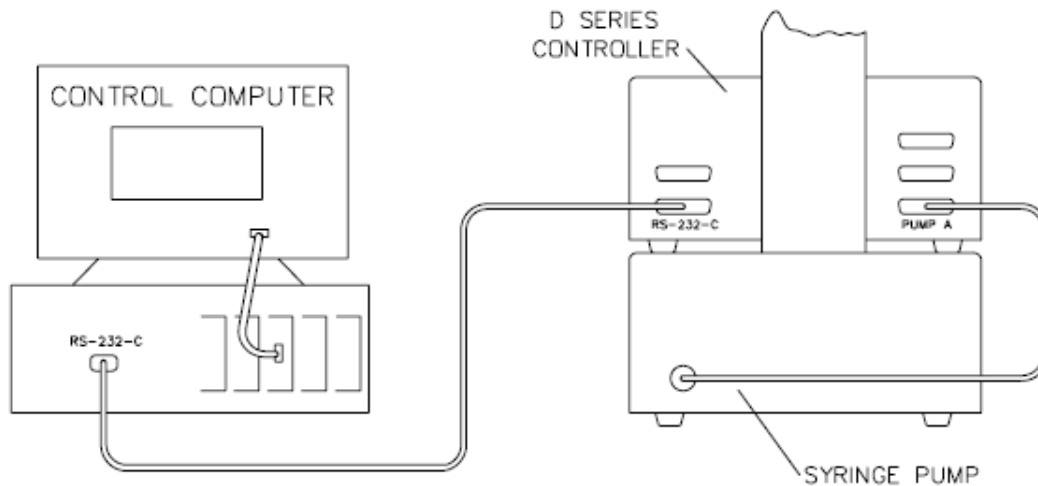


Figura 25. Interfaz RS 232 para la comunicación entre el computador y el controlador. Fuente [5]

La interfaz RS 232 C, consta de un conector DB25 y algunos pines de importancia se presentan en la tabla 4.

Pin No.	Descripción	Uso
1	Chasis (tierra)	Referencia
2	Receptor	Ingreso de datos
3	Transmisor	Entrega de datos
6	11 VDC	-
9	5 VDC	-
14	Cadena de transmisión	Datos series desde la unidad anterior
16	Cadena de recepción	Datos series hacia la unidad siguiente

Tabla 4. Descripción de los pines del puerto *Analog Output* DB25. ^{Fuente [5]}

De esta manera es posible obtener las señales eléctricas equivalentes al volumen de líquido entregado a la muestra y la rata de flujo inyectada a la misma, para cada instante del ensayo de permeabilidad de rocas.

3.4. Adquisición de las señales:

Con el fin de adquirir adecuadamente las señales eléctricas provenientes del ensayo de permeabilidad de rocas, se hace necesario seleccionar una tarjeta de adquisición de datos para efectuar la toma y transmisión de señales de acuerdo a una estrategia de control aplicada en un computador personal por medio de LabVIEW 7.1.

En el mercado, existen varios fabricantes especializados en tarjetas de adquisición y dispositivos para automatización y control de procesos industriales, es por esto que el primer criterio para la selección de la herramienta de adquisición es la compatibilidad con el software a utilizar en el proyecto, minimizando drásticamente las opciones a dos compañías que han sido recomendadas por docentes y profesionales, las cuales son *National Instruments* (Fabricante de LabVIEW) y *Measurement Computing* (Empresa norte americana líder en sistemas de adquisición de datos de bajo costo).

Los criterios empleados para la selección de la tarjeta de adquisición fueron los siguientes:

- Tipo de bus: Como su nombre lo dice, especifica el protocolo de comunicación a utilizar para conectar la tarjeta de adquisición al

computador. Se encuentran los siguientes tipos de bus: *CompactFlash*, *FireWire*, ISA, PCI, PCI Express, PCMCIA, GPIB, PXI, PXI Express y finalmente USB, siendo este último de gran interés para nosotros, ya que permite implementar la tarjeta de adquisición externamente por medio de un puerto de gran velocidad.

- Canales de entrada analógica: Existen diferentes tipos de tarjetas de adquisición, dependiendo del número de canales presentes en cada tarjeta, comúnmente los dispositivos cuentan como mínimo con 4, 8, 16 ó 32 canales; siendo la tarjeta de 8 entradas analógicas, ideal para cumplir las funciones del proyecto establecido, ya que permite adquirir las señales del transmisor de presión y la de las bombas ISCO, encargadas de inyectar la salmuera a la cámara de esfuerzos.
- Canales de salida analógica: Son los encargados de transmitir las señales de control provenientes del computador hacia el proceso industrial, con el fin de manipular variables físicas con diferentes valores; dos salidas análogas son suficientes para controlar la presión y/o la rata de flujo inyectadas por la bomba ISCO hacia la MTS 815.
- Canales E/S Digital: Estos canales permiten adquirir y transmitir señales digitales de diferentes valores lógicos, ya que algunas tarjetas pueden traer varias entradas/salidas digitales pero con un valor lógico de pocos VDC, mientras que otras poseen valores lógicos de mayor tensión. Debido al bajo costo de estos canales, casi todas las tarjetas de adquisición cuentan con por lo menos cuatro E/S digitales. Para éste proyecto se necesitan 4 canales digitales para controlar el encendido de las bombas y manipular los modos de operación de la misma.
- Precio: Es muy importante dar soluciones eficaces a un bajo costo, por lo tanto, el costo del dispositivo siempre será una característica relevante en la selección de herramientas electrónicas.
- Frecuencia de muestreo: Esta característica indica las muestras que se toman por unidad de tiempo de una señal continua con el fin de generar una señal discreta. Para la automatización del ensayo de permeabilidad de rocas, se utilizan tiempos de adquisición de 5 segundos, lo cual hace que éste parámetro no sea tan relevante en la selección de la tarjeta de adquisición de datos, ya que por lo general las frecuencias de muestreo que tienen estos dispositivos son altas.

Luego de aplicar los criterios mencionados en la selección de la tarjeta de adquisición de datos a utilizar en la automatización del ensayo de permeabilidad, el siguiente dispositivo fue escogido por su bajo costo, compatibilidad con el software y adecuados parámetros eléctricos.

3.4.1. Tarjeta de adquisición de datos miniLAB 1008:

La tarjeta de adquisición miniLAB 1008 (Ver figura 26) es fabricada por la compañía *Measurement Computing*, tiene un costo de \$ 129.00 dólares y sus características generales son las siguientes:

- 8 canales de entrada análoga comunes ó 4 canales de entrada análoga diferenciales (Ver figuras 29 y 30), con rangos de $\pm 10\text{VDC}$ ó $\pm 20\text{VDC}$ respectivamente a una frecuencia de muestreo máxima de 8kS/s ($S=\text{Muestras}$) a una resolución de 12bits.
- 2 canales de salida análoga con un rango de $0\text{VDC} - 5\text{VDC}$ a una resolución de 10bits.
- 4 E/S digitales con un rango del valor lógico alto entre $3\text{VDC} - 15\text{VDC}$ y un máximo en el valor lógico bajo de 0.8VDC .
- 24 E/S digitales con valores lógicos nominales de 0VDC y 5VDC . Se pueden acceder por medio de un conector DB37.
- Compatible con el software LabVIEW 7.1.
- Comunicación con el computador por medio del puerto USB, por donde también se alimenta la tarjeta de adquisición de datos.

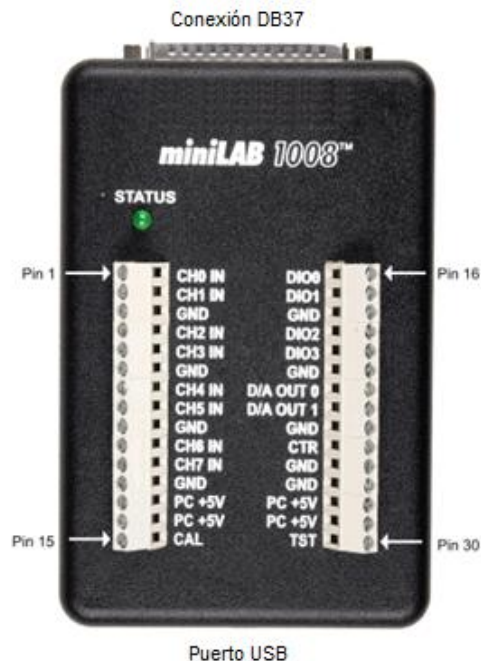


Figura 26. Tarjeta de adquisición de datos miniLAB 1008. Fuente [7]

Esta tarjeta de adquisición se basa en el siguiente diagrama de bloques:

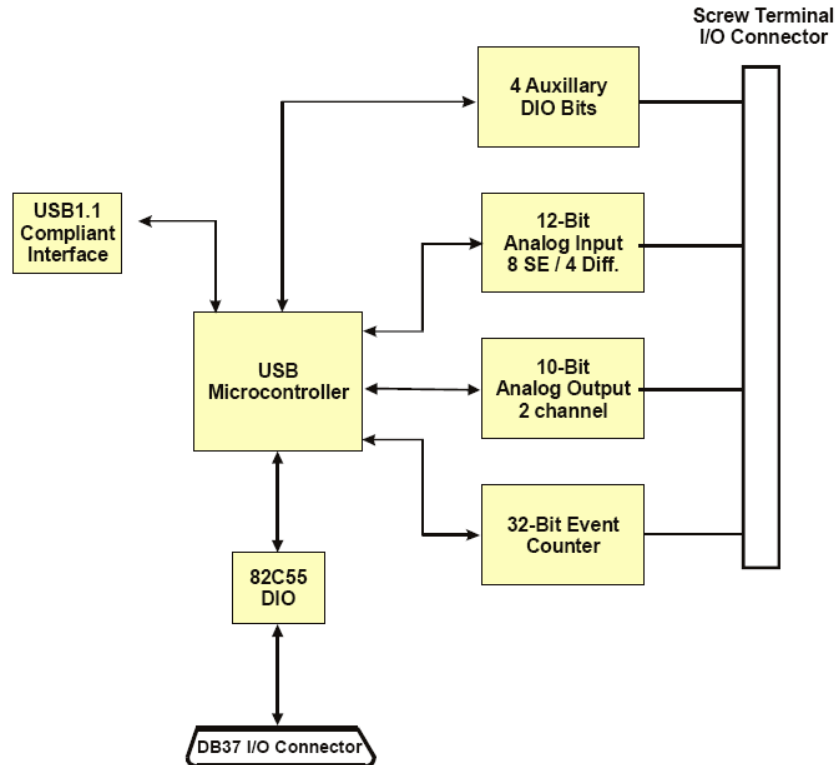


Figura 27. Diagrama de bloques tarjeta de adquisición de datos miniLAB 1008. Fuente [7]

A continuación se presentan las diferentes conexiones del puerto DB37 y los pines externos en la tarjeta de adquisición.



Figura 28. Puerto DB37. Fuente [7]

Pin	Nombre	Pin	Nombre
1	n/c	20	USB +5VDC
2	n/c	21	GND
3	Puerto B7	22	Puerto C7
4	Puerto B6	23	Puerto C6
5	Puerto B5	24	Puerto C5
6	Puerto B4	25	Puerto C4
7	Puerto B3	26	Puerto C3
8	Puerto B2	27	Puerto C2
9	Puerto B1	28	Puerto C1

10	Puerto B0	29	Puerto C0
11	GND	30	Puerto A7
12	n/c	31	Puerto A6
13	GND	32	Puerto A5
14	n/c	33	Puerto A4
15	GND	34	Puerto A3
16	n/c	35	Puerto A2
17	GND	36	Puerto A1
18	USB +5V	37	Puerto A0
19	GND		

Tabla 5. Descripción puerto DB37. Fuente [7]

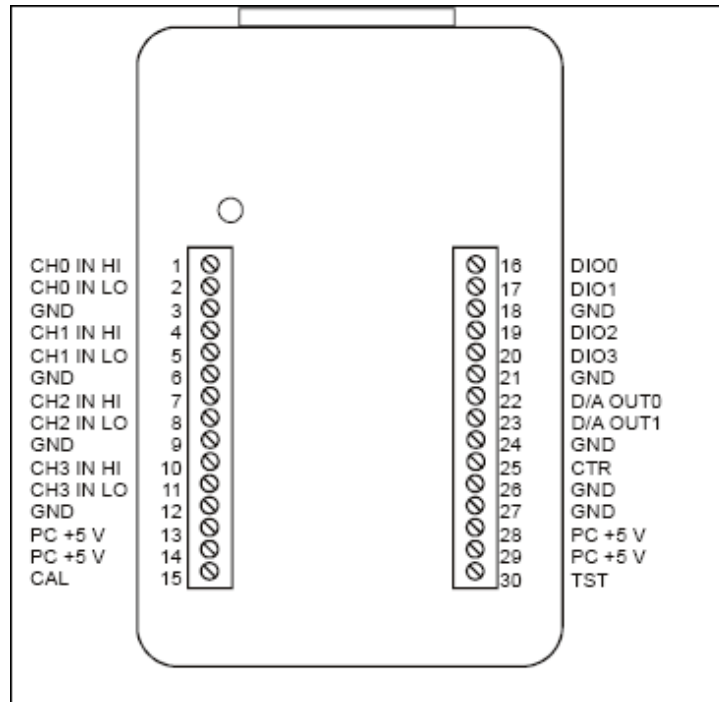


Figura 29. Descripción pines externos de la tarjeta miniLAB 1008 para 4 canales diferenciales. Fuente [7]

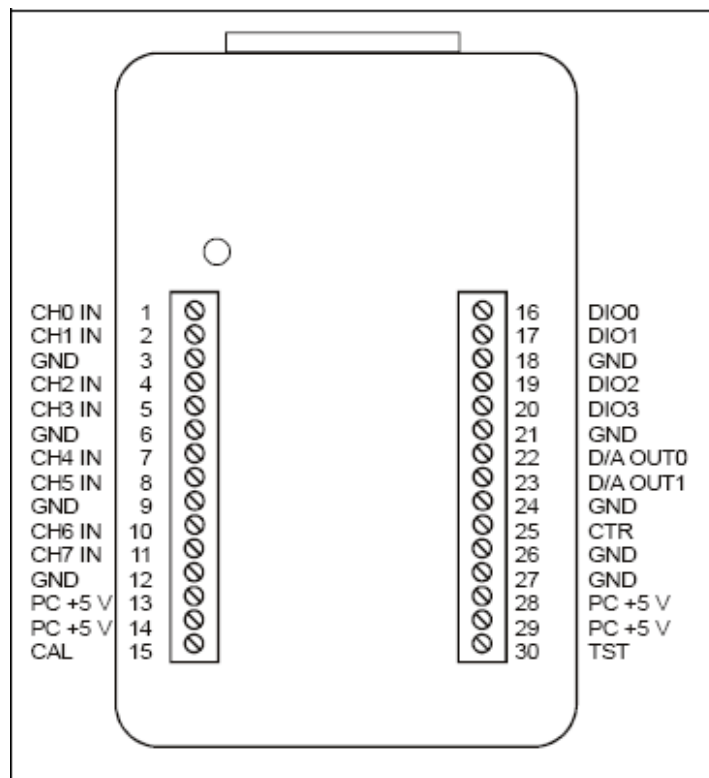


Figura 30. Descripción pines externos de la tarjeta miniLAB 1008 para 8 canales comunes. Fuente [7]

3.5. Procesamiento y presentación de resultados:

Es necesario procesar adecuadamente las señales adquiridas en el ensayo de permeabilidad, con el fin de controlar debidamente la prueba y obtener resultados confiables en todo momento. Además la presentación de los resultados debe ser agradable para el usuario final, mostrando todas las opciones y posibilidades del ensayo de permeabilidad disponibles para interactuar con los operarios de la prueba. Para este fin, se cuenta con el software LabVIEW 7.1, el cual se especializa en automatizar y controlar procesos industriales por medio del lenguaje de programación Gráfico. En el siguiente capítulo se presenta el programa diseñado para éste proyecto y la interfaz gráfica final utilizada para interactuar con el usuario.

4. SOFTWARE

En este capítulo se presenta el desarrollo del programa utilizado para automatizar el ensayo de permeabilidad de rocas mediante el lenguaje de programación gráfico LabVIEW 7.1.

4.1. LabVIEW:

Se puede definir LabVIEW como un lenguaje de programación gráfico (lenguaje G), creado por *National Instruments* para aplicaciones de instrumentación, automatización, adquisición de datos y control de procesos, aunque realmente, LabVIEW puede llegar a ser un lenguaje de programación de uso general, como lo es Pascal, C++, etc. Las ventajas que proporciona el uso de un lenguaje G son varias, ya que no sólo permite un ambiente amigable con el usuario, sino que su interfaz gráfica facilita la solución de posibles errores, debido a que LabVIEW posee una auto compilación continua, lo cual permite observar errores de programación en el momento en el que se realicen. La programación en LabVIEW se basa en instrumentos virtuales (VI, por sus siglas en inglés), los cuales son “cajitas” con entradas y/o salidas que permiten la interacción entre diferentes instrumentos virtuales.

4.2. Diseño del software:

Para realizar el diseño del programa a implementar, se siguieron las siguientes etapas:

4.2.1. Inicialización del programa:

Al comenzar el programa, es necesario ingresar los datos iniciales de la muestra y el líquido a utilizar en el ensayo de permeabilidad. Es por esto que se creó un SubVI llamado “entrada de datos muestra.vi” el cual se puede observar en la figura 31. A la derecha y a la izquierda del VI, se encuentran las salidas y entradas de datos respectivamente.

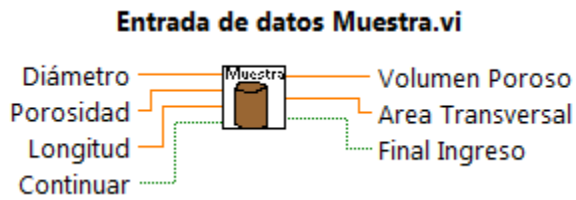


Figura 31. SubVI entrada de datos muestra.vi *Fuente [Autor]*

En la figura 32, se puede observar la configuración interna de éste SubVI, utilizada para generar los datos de salida de acuerdo a los datos de entrada digitados por el usuario.

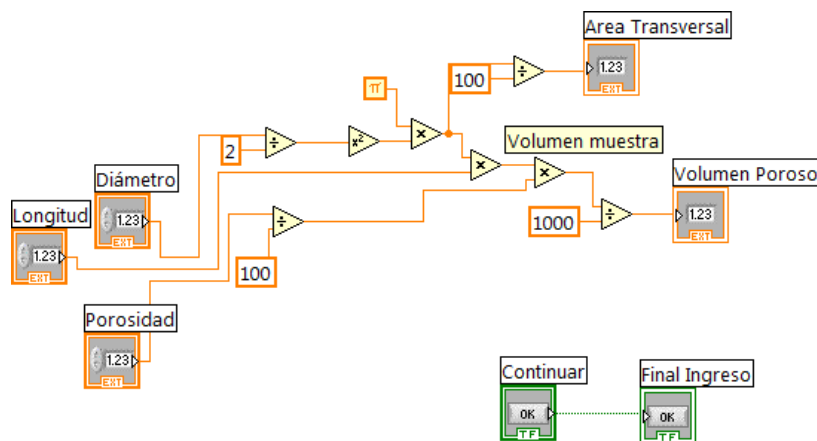


Figura 32. Configuración interna de Entrada de datos Muestra.vi *Fuente [Autor]*

Luego de ingresar los datos de la muestra y del líquido, se debe escribir el nombre y la ubicación del archivo de texto en el cual se almacenarán los datos finales, con el fin de mantener un historial de resultados en la base de datos del laboratorio. También se establecen algunas constantes como el rango de la gráfica de permeabilidad, el número de filas que debe tener la tabla y la fecha de inicio de la prueba.

4.2.2. Adquisición de datos:

La adquisición de los datos se realiza por medio de un SubVI llamado "Adquisicion.vi" (Ver figura 33 y 34), el cual simplemente entrega los datos obtenidos de la tarjeta de adquisición provenientes de la bomba ISCO y el transmisor de presión Smar LD301.

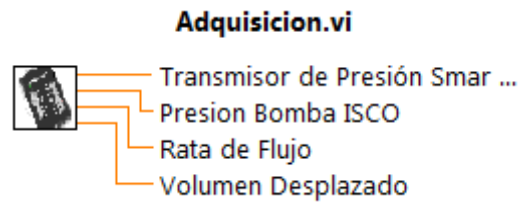


Figura 33. Salidas del SubVI Adquisicion.vi *Fuente [Autor]*

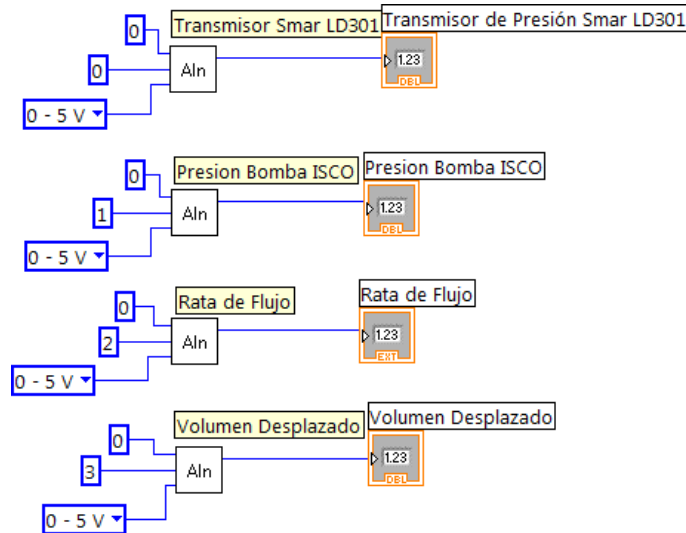


Figura 34. Configuración interna de Adquisicion.vi *Fuente [Autor]*

4.2.3. Permeabilidad:

Para realizar los cálculos de la permeabilidad, en el laboratorio se utiliza la ecuación (23), la cual se realizó en el SubVI “Permeabilidad.vi” (Figura 35 y 36), para $C_2/C_1=245$.

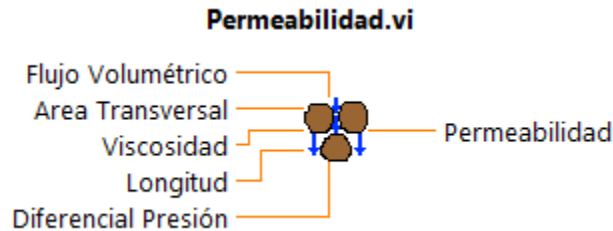


Figura 35. Permeabilidad.vi *Fuente [Autores]*

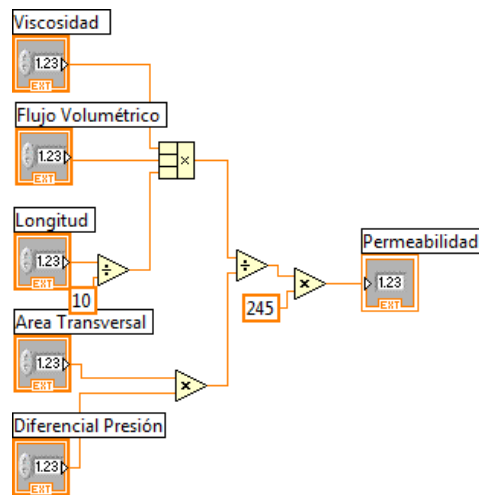


Figura 36. Configuración interna de Permeabilidad.vi *Fuente [Autor]*

4.2.4. Desarrollo del ensayo:

La automatización del ensayo de permeabilidad de rocas, requiere un monitoreo continuo de las variables involucradas en la prueba, es por esto que se utilizó una estructura *While*, para adquirir datos y calcular la permeabilidad frecuentemente, dependiendo del intervalo de tiempo (En segundos) que el usuario establezca para realizar la toma de datos; es por esto que la estructura tiene un tiempo de retraso controlado por el operario, tal como se puede observar en la figura 37, en donde se utiliza *Wait.vi* para realizar en el tiempo establecido, una iteración de la estructura.

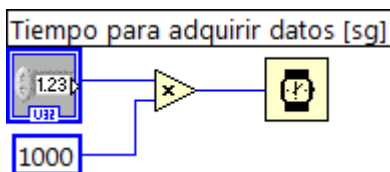


Figura 37. Tiempo para adquirir y presentar datos controlado por el usuario. *Fuente [Autor]*

4.2.5. Interfaz con el usuario y presentación de resultados:

Es necesario realizar una interfaz gráfica agradable para el usuario final, con el fin de facilitar la operación del ensayo de permeabilidad de rocas, además es muy importante presentar adecuadamente los resultados obtenidos para facilitar el análisis de los mismos.

El programa presenta en tiempo real los datos obtenidos y calculados durante la prueba por medio de una tabla de seis columnas y una gráfica de Permeabilidad vs. Volúmenes porosos, además genera un archivo *.txt* con toda la información contenida en la tabla para almacenar los datos del ensayo y de esta forma utilizarlos en futuros análisis.

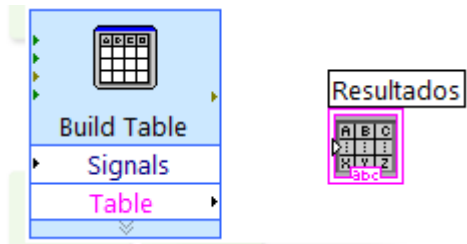


Figura 39. Build Table.vi y Table.vi Fuente [Autor]

- **Gráfica Permeabilidad vs. Volúmenes Porosos:**

La gráfica de Permeabilidad vs. Volúmenes Porosos, muestra los datos mencionados en tiempo real, permitiéndole al operario realizar un monitoreo continuo sobre el ensayo de permeabilidad de rocas sin interrumpir la prueba, además cuenta con un cursor dinámico para seleccionar algún punto deseado, herramienta de acercamiento y finalmente una herramienta para revisar datos anteriores durante la misma prueba. En la figura 40, se puede observar la gráfica utilizada para éste proyecto.

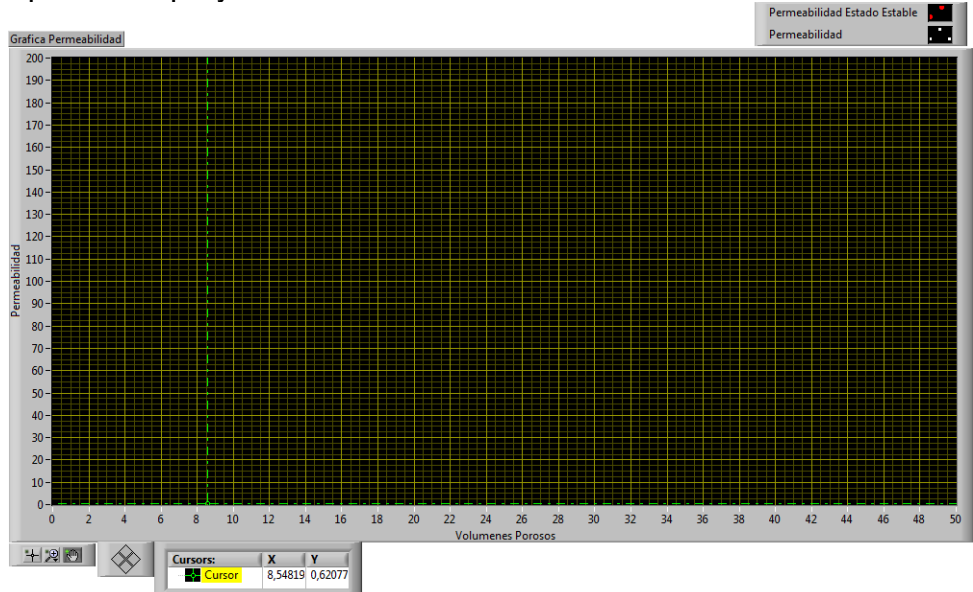


Figura 40. Gráfica de Permeabilidad vs. Volúmenes Porosos. Fuente [Autor]

Es muy importante resaltar que los puntos de permeabilidad se van actualizando cada instante, y al final del ensayo, se realiza una comparación entre los datos obtenidos para conocer los valores de permeabilidad en estado estable, los cuales son de interés para los usuarios del ensayo. Para cumplir con éste objetivo, se utilizó un arreglo de *clusters* que contienen a su vez arreglos, los cuales se encargan de ordenar las variables a mostrar en la gráfica, tal como se muestra en la figura 41.

Data type of wire

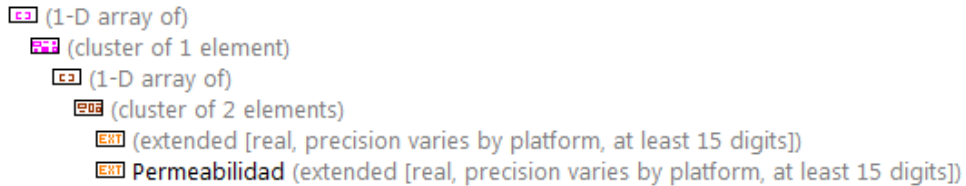


Figura 41. Tipo de datos que ingresan a la gráfica Permeabilidad vs. Volúmenes Porosos. Fuente [Autor]

- **Archivo .txt:**

La creación de un archivo de texto es fundamental para almacenar en una base de datos todos los resultados históricos de los ensayos de permeabilidad de rocas que se realicen desde la automatización de la prueba. Por lo tanto se utilizó el VI *Write to text file.vi*, el cual se encarga de generar un archivo de texto con los datos que presenta la tabla y separados por una tabulación.

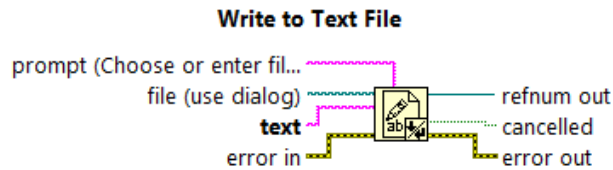


Figura 42. VI encargado de generar archivos de texto. Fuente [Autor]

Al inicio del ensayo, luego de ingresar los datos, una ventana de selección aparece, con el fin de permitirle al operario ingresar el nombre y la ubicación del archivo de texto, para facilitar el almacenamiento de los resultados obtenidos. El siguiente *Express VI* fue usado para cumplir con tal fin.

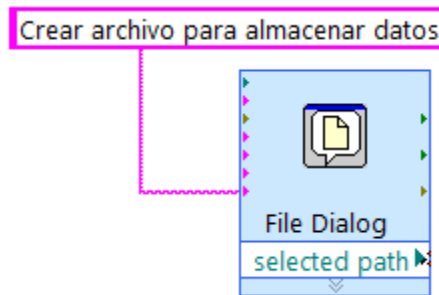


Figura 43. Express VI File Dialog. Fuente [Autor]

- **Interfaz gráfica del programa:**

El programa posee cuatro ventanas importantes:

- Ventana Principal: En esta ventana, se presenta una pequeña introducción del ensayo y un manual rápido sobre como navegar a través de la interfaz de usuario. Ver figura 44.

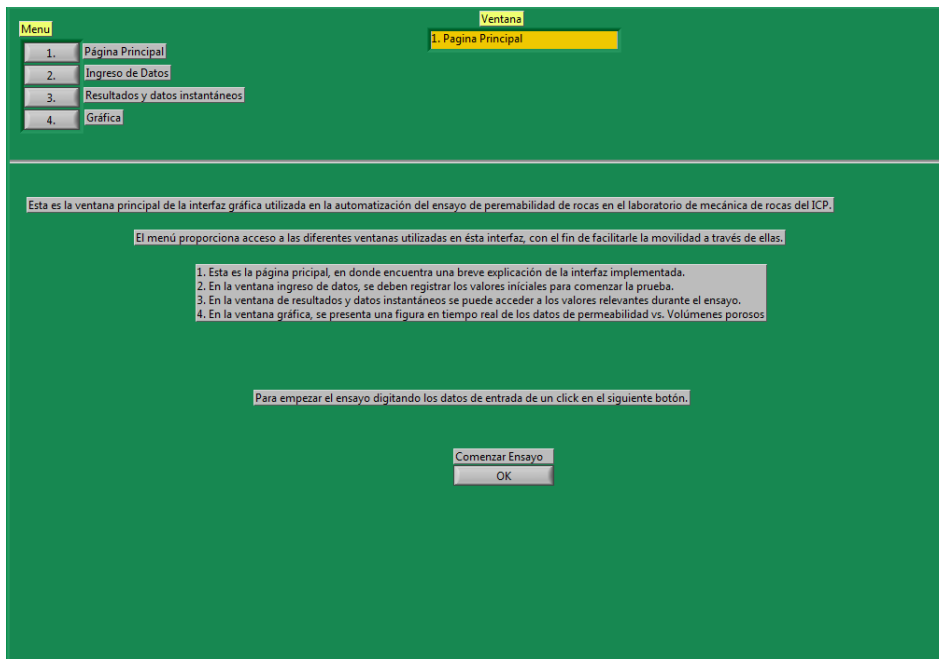


Figura 44. Ventana Principal del Software. Fuente [Autor]

- Ventana Ingreso de datos: Por medio de esta sección, el operario debe ingresar los datos iniciales correspondientes a la muestra rocosa y al líquido implementados en el ensayo. Figura 45.

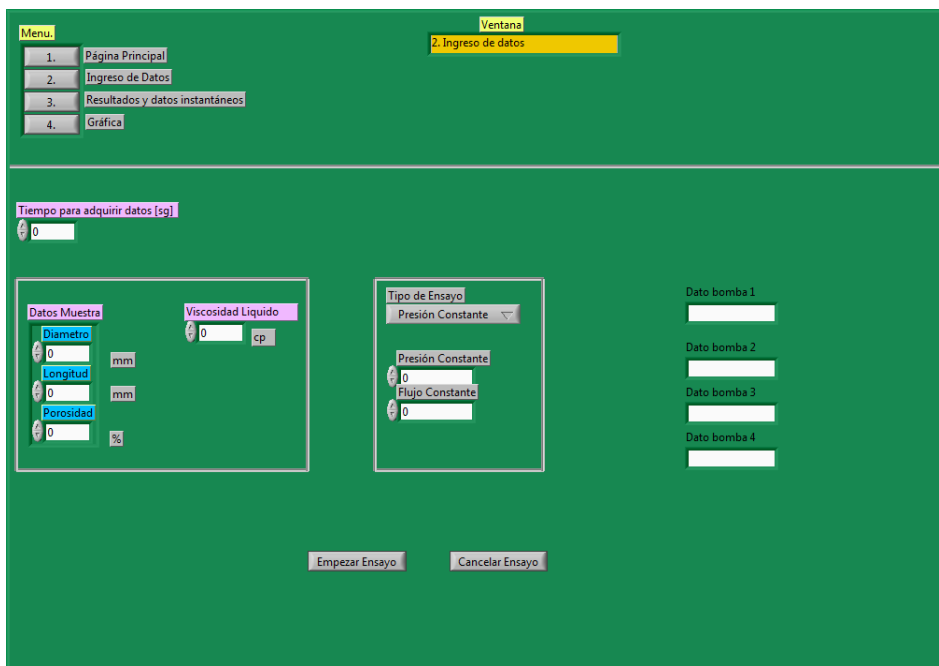


Figura 45. Ventana de Ingreso de datos. Fuente [Autor]

- Ventana Resultados y datos instantáneos: Esta ventana muestra los valores en tiempo real de los datos relevantes en la prueba de permeabilidad por medio de varios indicadores y una tabla de seis columnas. Figura 46.

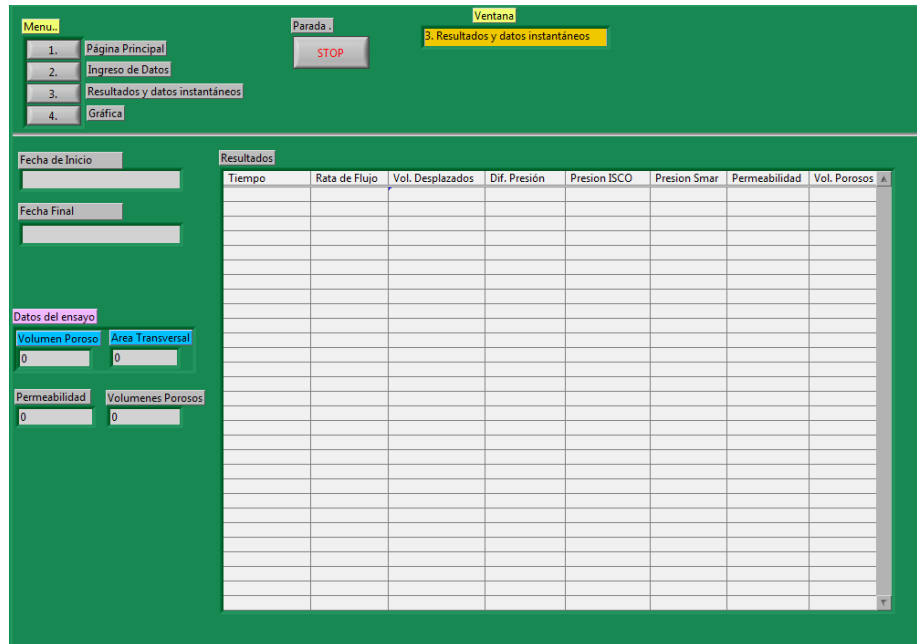


Figura 46. Ventana de resultados y datos instantáneos. Fuente [Autor]

- Ventana Gráfica: Aquí se presenta la gráfica Permeabilidad vs. Volúmenes Porosos en tiempo real, y al final, se muestran los valores en estado estable requeridos por el usuario. Figura 47.

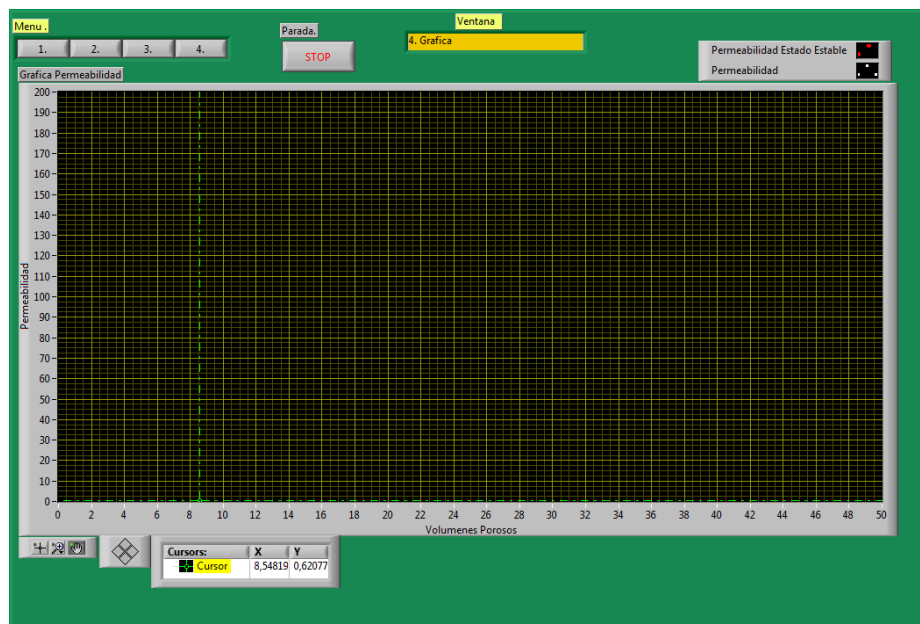


Figura 47. Ventana Gráfica. Fuente [Autor]

- **Presentación de resultados Online:**

Debido a que la prueba debe estar constantemente monitoreada por los auxiliares del laboratorio y el jefe en el mismo, se hace necesario implementar una interfaz virtual por medio de internet para acceder desde cualquier parte del mundo al control y análisis de resultados del ensayo de permeabilidad de rocas. Es por esto que se utiliza el computador dedicado a la automatización como un pequeño servidor que recibe la conexión de computadores “clientes”, para que puedan monitorear una prueba de permeabilidad desde cualquier parte del mundo con conexión a internet.

Debido a la necesidad de monitorear y controlar programas desde un lugar remoto, LabVIEW ofrece varias herramientas para realizar éstas operaciones en tiempo real por medio de internet, permitiéndole al usuario manejar el procedimiento desde cualquier parte del mundo con conexión a internet e instalando en su computador *Run Time* y *Publishing Tool box* de LabVIEW.

El procedimiento es muy sencillo, y se muestra a continuación:

- **Crear Web Server:** Es necesario establecer el computador encargado de procesar, adquirir y generar las señales como un pequeño servidor que va a posibilitar el control y monitoreo remoto. Para ello, se debe ingresar a las opciones del programa por medio de *Tools >> Options*. Después se selecciona la casilla *Enable Web Server* de la opción *Web Server: Configuration* tal como se muestra en la siguiente figura.

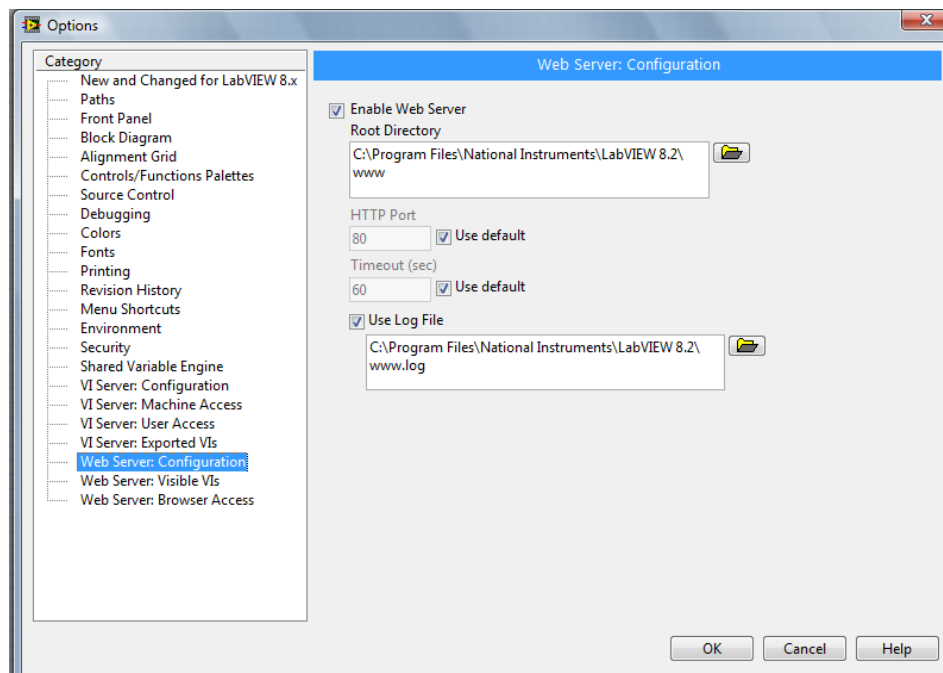


Figura 48. Web Server Configuration. Fuente [Autor]

- Autorizar los VIs a visualizar: Con el fin de tener un mayor control sobre el programa a controlar, se debe otorgar un permiso sobre los VIs que se puedan monitorear remotamente, es por ello que en la opción *Web Server: Visible VIs*, se especifican los VIs autorizados para ser monitoreados o controlados remotamente, siempre y cuando se encuentre abierto dicho VI. En la figura 49 se muestra la ventana correspondiente a la opción mencionada, en donde “*” significa que todos los programas en el computador se pueden controlar y monitorear desde internet.

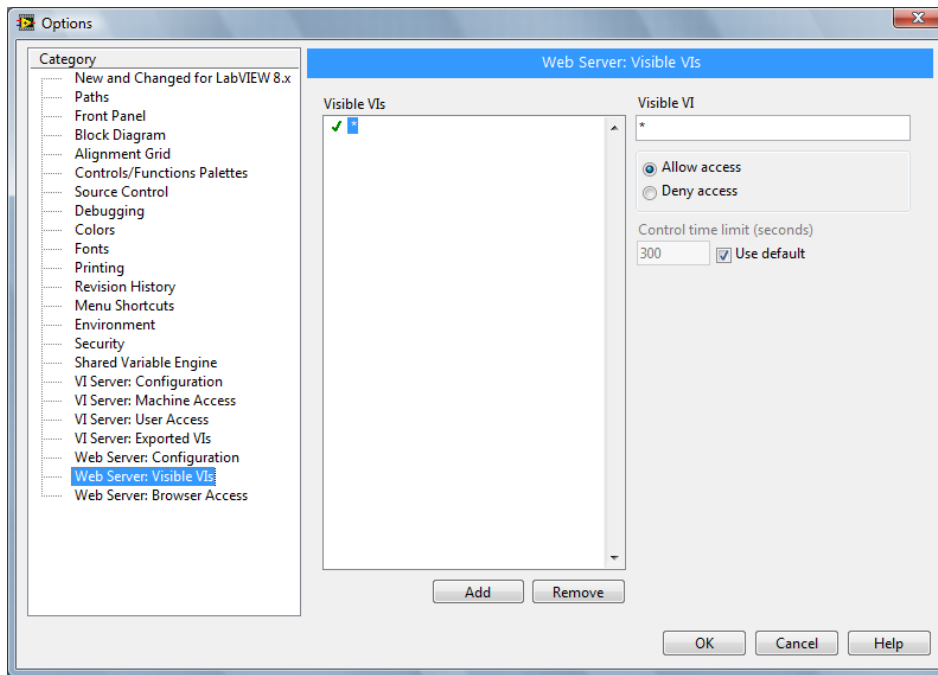


Figura 49. *Web Server: Visible VIs.* Fuente [Autor]

- Permisos de IPs: La opción *Web Server: Browser Access*, es la encargada de otorgar permisos a las IPs de determinados computadores para permitir el acceso de los mismos al programa que se desea controlar remotamente, también posibilita establecer para cada IP un permiso total de control y monitoreo, un permiso de sólo monitoreo y denegar el permiso de cualquier acción. En la figura 50 se puede observar la ventana para ésta opción de vital importancia para el monitoreo y control desde un computador remoto a la aplicación.

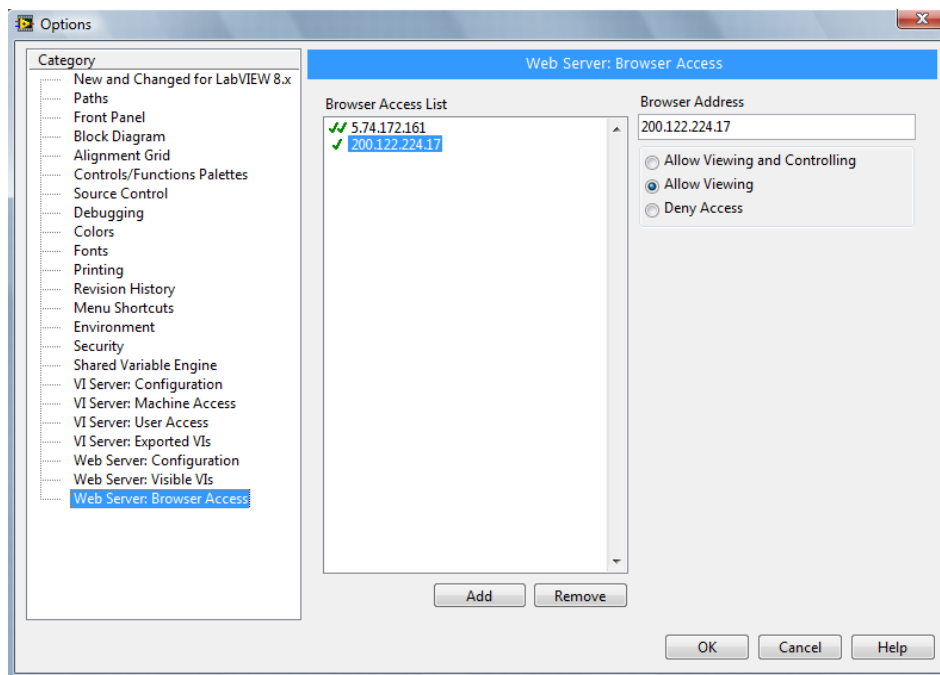


Figura 50. Web Server: Browser Access. Fuente [Autor]

Hasta ahora solo se ha presentado el procedimiento para implementar un computador como un servidor pequeño que permita el acceso de otras computadoras al programa deseado. El siguiente paso es configurar adecuadamente el computador cliente para poder acceder al servidor.

Con el fin de facilitar la conexión de los computadores clientes con el servidor y a su vez aumentar la seguridad del sistema, se recomienda utilizar el software LogMeIn Hamachi, el cual una vez instalado en el computador, permite simular redes LAN por medio de internet con otros computadores que tengan el mismo software y que pertenezcan a una red en común creada con un usuario y contraseña determinada. El programa genera una IP diferente en cada computador para usarla dentro de la red LAN creada. En la figura 51, se presenta el programa mencionado instalado en el computador servidor con nombre de usuario LabServer e **IP: 5.26.62.107**, y en el cual se tiene una red creada llamada "Laboratorio Mec", donde existe otro usuario llamado LabClient con **IP: 5.74.172.161**.

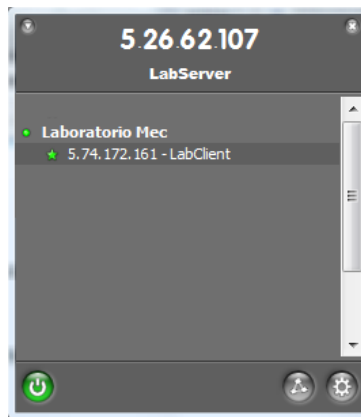


Figura 51. LogMeln Hamachi. Fuente [Autor]

Con éste programa gratuito (Sólo para la versión básica) instalado en el computador servidor y en el portátil de cada operario del laboratorio se deben otorgar los permisos a las IPs correspondientes dependiendo del nivel de acceso que es quiera dar. Luego cada cliente debe seleccionar en la ventana inicial de LabVIEW la pestaña *Operate >> Conect to remote panel* y aparecerá una ventana como la que se muestra en la siguiente figura.

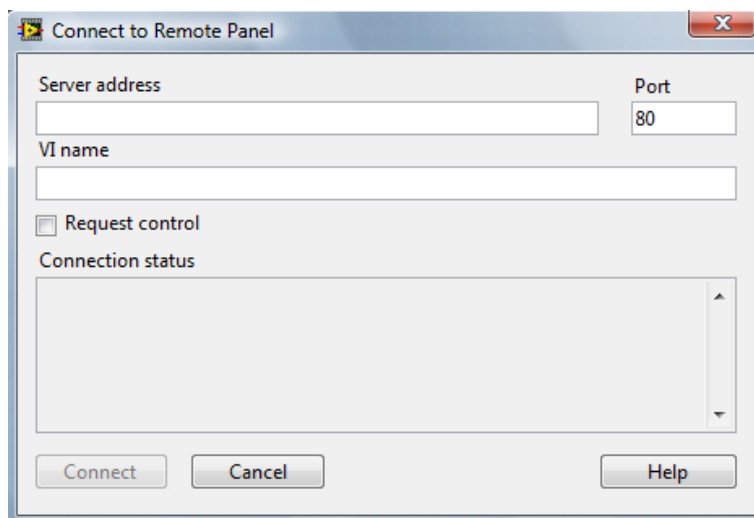


Figura 52. Opción Connect to Remote Panel. Fuente [Autor]

En donde se debe escribir la IP del servidor (La generada por Hamachi), el nombre del VI con extensión *.vi* y si se va a controlar el programa se debe seleccionar *Request Control* de acuerdo a los permisos otorgados. Después de realizar éstas operaciones se presiona el botón *Connect* y luego de algunos segundos aparecerá el programa en el cliente y en el computador servidor se visualizará el siguiente mensaje.

Control transferred to TOSHIBA

Figura 53. Mensaje que aparece en el PC servidor luego de transferir el control hacia el PC cliente.
Fuente [Autor]

De igual manera el computador Servidor puede solicitar en cualquier momento el control del programa presionando el *click* derecho del mouse sobre la ventana principal y seleccionando *Request control of VI* e inmediatamente aparecerá el siguiente mensaje.

Server has control

Figura 54. Mensaje que aparece luego de obtener el control en el PC servidor. Fuente [Autor]

Finalmente también se puede publicar en un buscador web el desarrollo del programa por medio de LabVIEW, éste proceso requiere igualmente de la activación del *Web Server*, y los permisos correspondientes para la IP deseada, con el fin de permitir el acceso únicamente a determinados usuarios. Para realizar ésta operación, luego de habilitar el servicios, se debe ingresar a *Tools >> Web Publishing Tool*, y aparecerá la siguiente ventana.

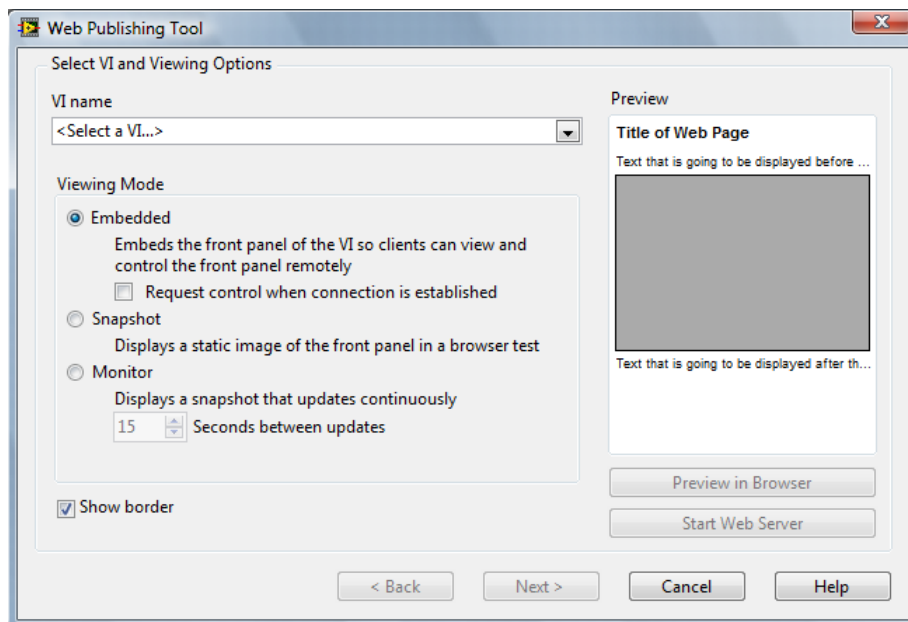


Figura 55. *Web Publishing Tool*. Fuente [Autor]

En esta ventana se selecciona el VI para generar la página Web, luego se establece el modo de operación desde la página, ya sea control y/o monitoreo; después de hacer éstas operaciones y continuar, aparece otra ventana en donde se debe ingresar el título de la página y el encabezado, finalmente, LabVIEW genera un archivo *.html* con una URL propia para utilizar en el navegador de internet desde el computador cliente.

5. PRUEBAS REALIZADAS Y RESULTADOS.

El capítulo cinco presenta las pruebas que se realizaron y los resultados obtenidos del software elaborado y el equipo implementado en este proyecto.

Los resultados obtenidos se comparan con datos históricos, con el fin de establecer el correcto funcionamiento del sistema autónomo y de ésta forma validar su funcionalidad en el laboratorio, es por esto que se realizaron varias pruebas simuladas, ya que el costo del ensayo de permeabilidad sólo permitió la realización de una prueba. El costo puede superar los 5.000.000 (Cinco millones) de pesos.

5.1. Pruebas Simuladas:

Las pruebas simuladas se realizan con datos de ensayos realizados anteriormente, con el fin de comparar los resultados obtenidos en el software diseñado y establecer el comportamiento de las diferentes variables presentes en el sistema autónomo.

5.1.1. Berea X1:

Esta prueba se realizó para una roca tipo Berea, utilizando salmuera (Viscosidad = 1cp) como el líquido que va a pasar por el medio poroso. Las características de la muestra son:

- Diámetro = 38mm.
- Longitud = 72.24 mm.
- Porosidad = 17.8%.

En la prueba se estableció un diferencial de presión de 3000 psi, con el fin de encontrar la permeabilidad de la roca, por lo tanto, para mantener éste diferencial constante, la rata de flujo debe variar y acomodarse a la presión requerida, entonces se van a tener diferentes puntos de permeabilidad a lo largo del ensayo, obteniendo una gráfica de permeabilidad vs Volúmenes porosos, ya que a medida que se inyecta el fluido en la muestra, se va introduciendo volumen del líquido, el cual se compara con el volumen poroso de la muestra, para conocer de ésta manera cuántos volúmenes porosos atraviesan la roca. Para determinar el volumen poroso correspondiente a cada punto de permeabilidad, se adquiere, de la bomba ISCO, el volumen de líquido desplazado hacia el núcleo, luego se divide

sobre el volumen poroso de la muestra y se suma con las cantidades anteriores para conocer el volumen poroso para cada permeabilidad.

Los datos obtenidos en la prueba de permeabilidad de rocas para éste tipo de medio poroso, se presentan en la figura de permeabilidad obtenida por los operarios del laboratorio de mecánica de rocas del ICP.

Es muy importante resaltar que los puntos que se encuentran por fuera del cúmulo de datos, corresponden a los cambios de operación de las bombas ISCO, en donde se registran caídas en la presión de salida de la bomba y de ésta forma se presenta resultados erróneos como los que se pueden observar en la siguiente figura.

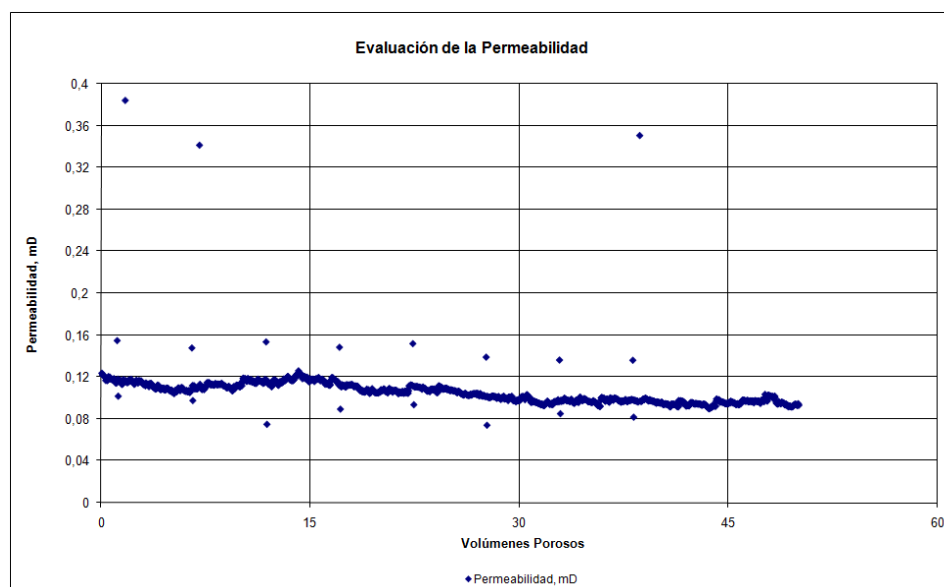


Figura 56. Permeabilidad vs. Volúmenes Porosos; BERE A X1. Fuente [Autor]

Ahora bien, los datos de presión diferencial, flujo y volumen que se tienen en el laboratorio, se procesan con el software elaborado y se obtiene la siguiente figura para 10 Volúmenes porosos.

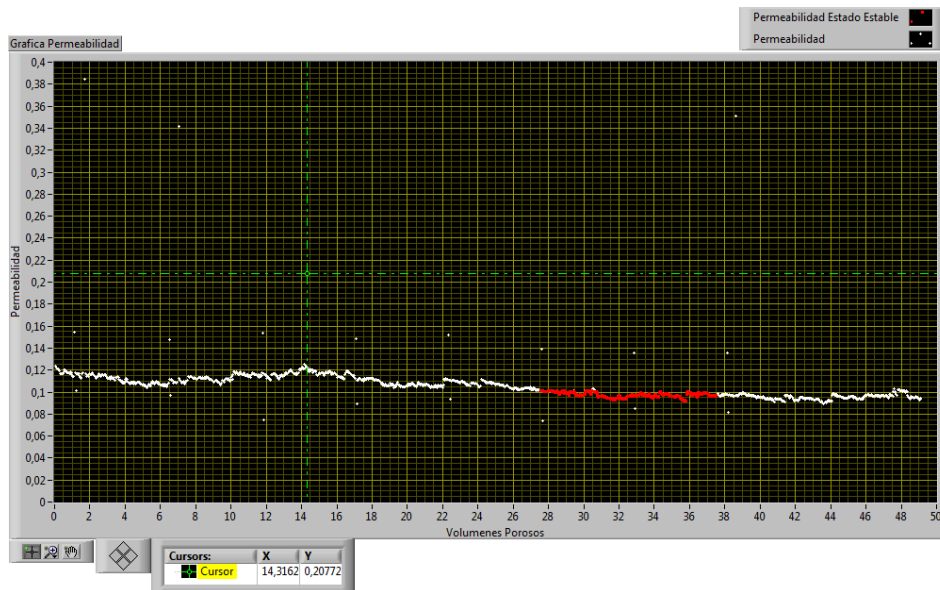


Figura 57. Permeabilidad vs. Volúmenes Porosos; BERE A X1, Prueba simulada. Fuente [Autor]

El software se diseñó para seleccionar al final de cada prueba, una serie de puntos que se mantengan estables durante un rango de volúmenes porosos determinado por el usuario, dibujándolos de color rojo para diferenciarlos de los demás y de ésta forma ayudar al operario en hallar la permeabilidad de la roca.

5.1.2. Berea X2:

Los datos manejados en ésta prueba, donde se utilizó salmuera con viscosidad = 1cp y una presión constante de entrada de 1000 psi, se muestran en la figura 58.

La muestra utilizada en éste ensayo tiene las siguientes características:

- Diámetro = 38mm.
- Longitud = 72,24mm.
- Porosidad = 17.8%.

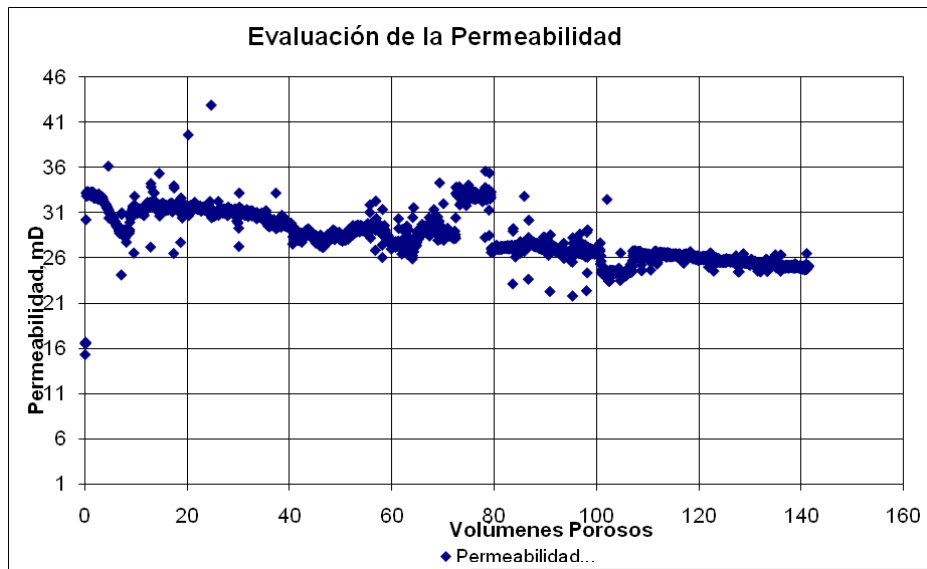


Figura 58. Permeabilidad vs Volúmenes Porosos; BERE A X2. Fuente [Autor]

A continuación se presenta la gráfica obtenida con el software diseñado, para una región de estabilización de 30 Volúmenes porosos.

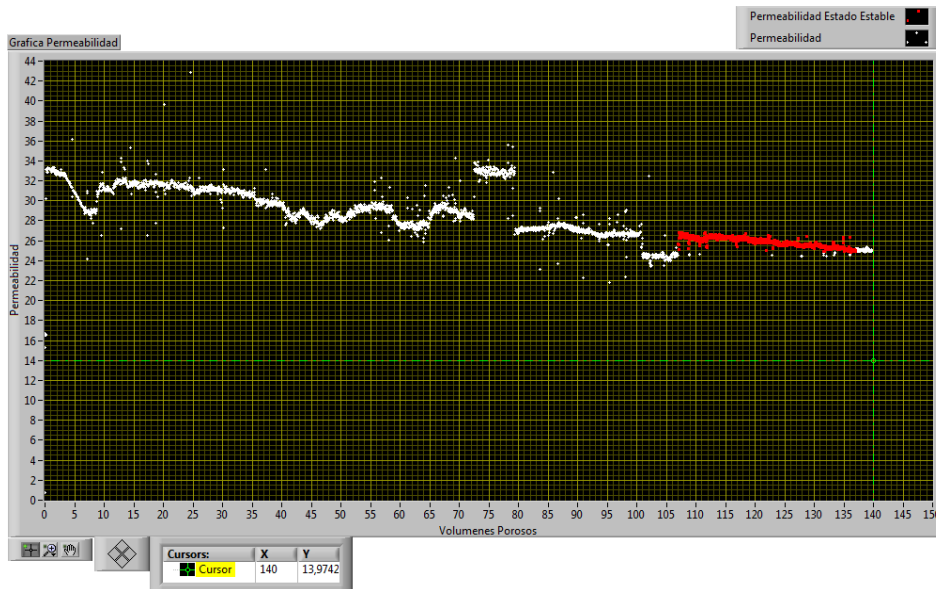


Figura 59. Permeabilidad vs Volúmenes Porosos; BERE A X2, Prueba simulada. Fuente [Autor]

5.1.3. Berea X3:

Los datos utilizados en ésta prueba, donde se implementó salmuera con viscosidad = 1cp y un diferencial de presión constante de 3000 psi, se presentan en la figura60. La muestra utilizada en éste ensayo tiene las siguientes características:

- Diámetro = 38mm.
- Longitud = 72,24mm.
- Porosidad = 17.8%.

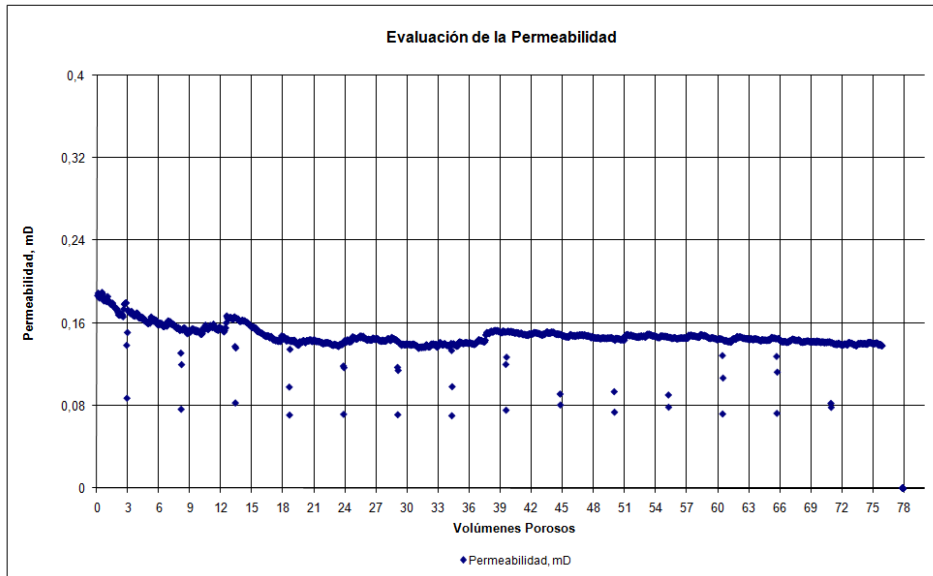


Figura 60. Permeabilidad vs Volúmenes Porosos; BERE A X3. Fuente [Autor]

Al simular los datos con el software diseñado en éste proyecto, se produjo la figura que se muestra a continuación.

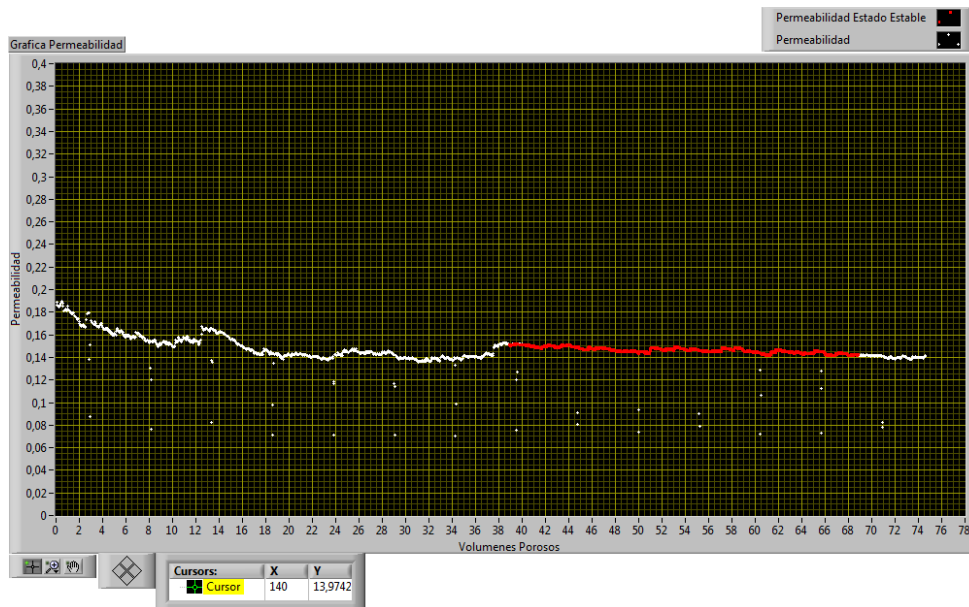


Figura 61. Permeabilidad vs Volúmenes Porosos; BERE A X2, prueba simulada. Fuente [Autor]

5.1.4. Berea X4:

A continuación se presenta la figura de permeabilidad vs. Volúmenes porosos para el ensayo de permeabilidad de la roca Berea X4. Los datos observados se consiguieron para un líquido de 1cp de viscosidad, un diferencial de presión constante de 3000psi y con las siguientes características de la muestra:

- Diámetro = 38mm.
- Longitud = 72,24mm.
- Porosidad = 17.8%.

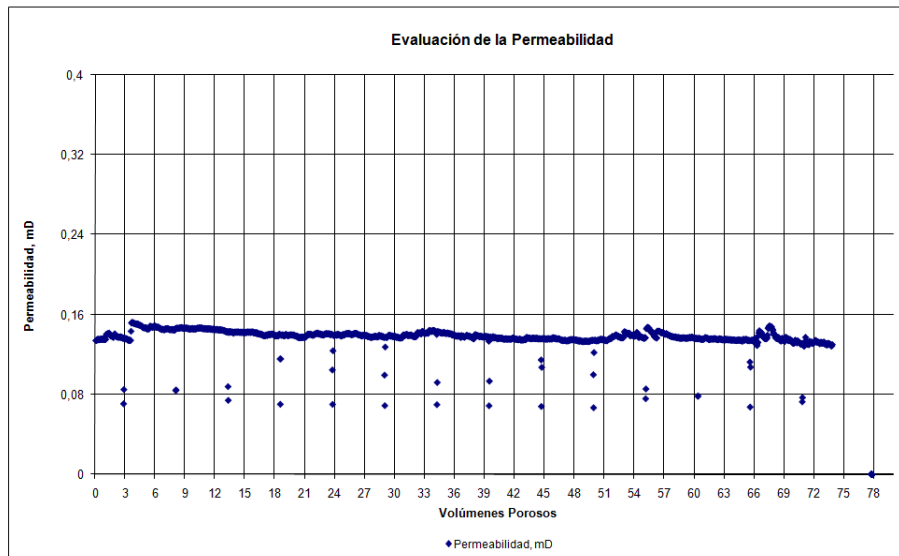


Figura 62. Permeabilidad vs Volúmenes Porosos; BERE A X4. Fuente [Autor]

Con los datos anteriores se obtiene la siguiente figura para 15 volúmenes porosos.

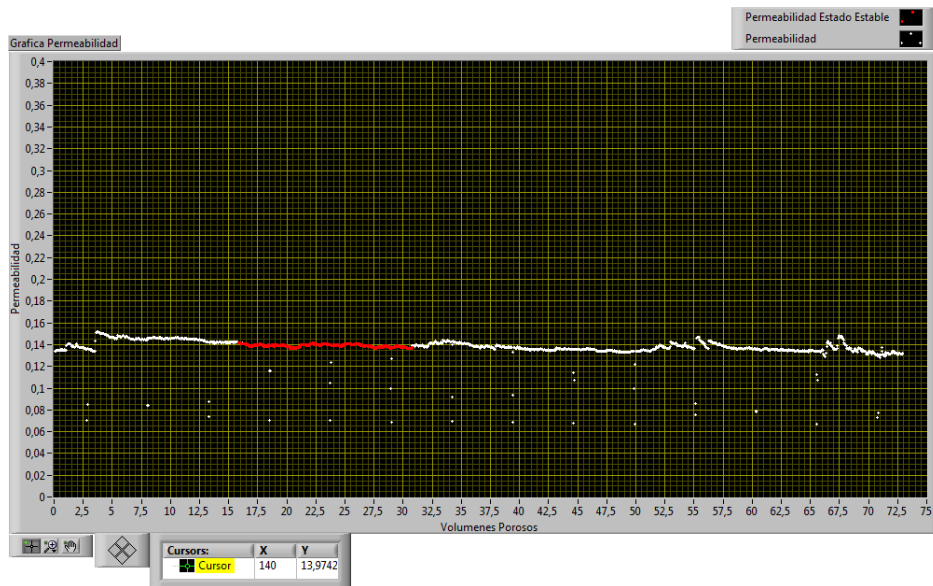


Figura 63. Permeabilidad vs Volúmenes Porosos; BERE A X4, prueba simulada. Fuente [Autor]

5.1.5. Berea X5:

Con los datos manejados en ésta prueba se obtuvo la figura 64, donde se utilizó salmuera con viscosidad = 1cp; y un diferencial de presión constante de 3000 psi. La muestra utilizada en éste ensayo tiene las siguientes características:

- Diámetro = 38mm.
- Longitud = 72,24mm.
- Porosidad = 17.8%.

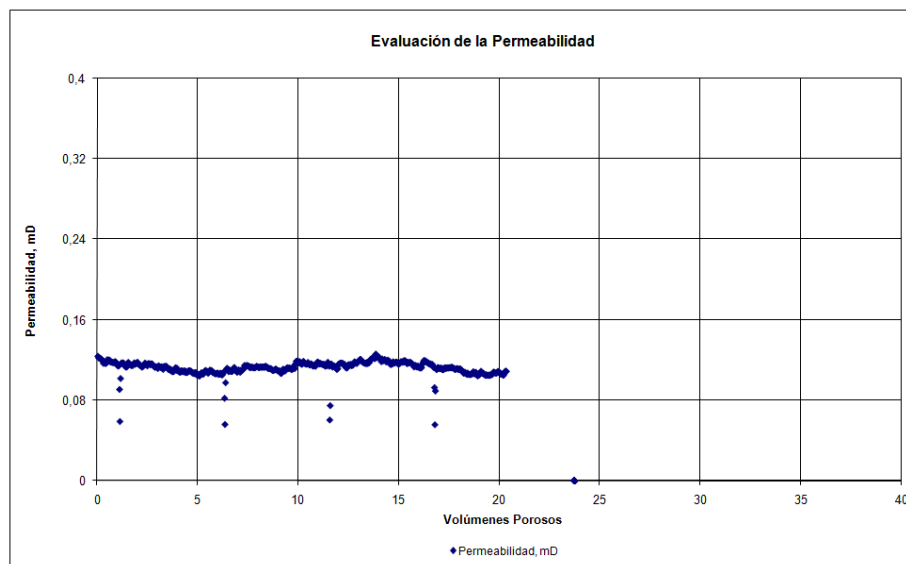


Figura 64. Permeabilidad vs Volúmenes Porosos; BERE A X5. Fuente [Autor]

Utilizando los datos del ensayo en el software diseñado, se obtuvo la siguiente gráfica para 5 volúmenes porosos.

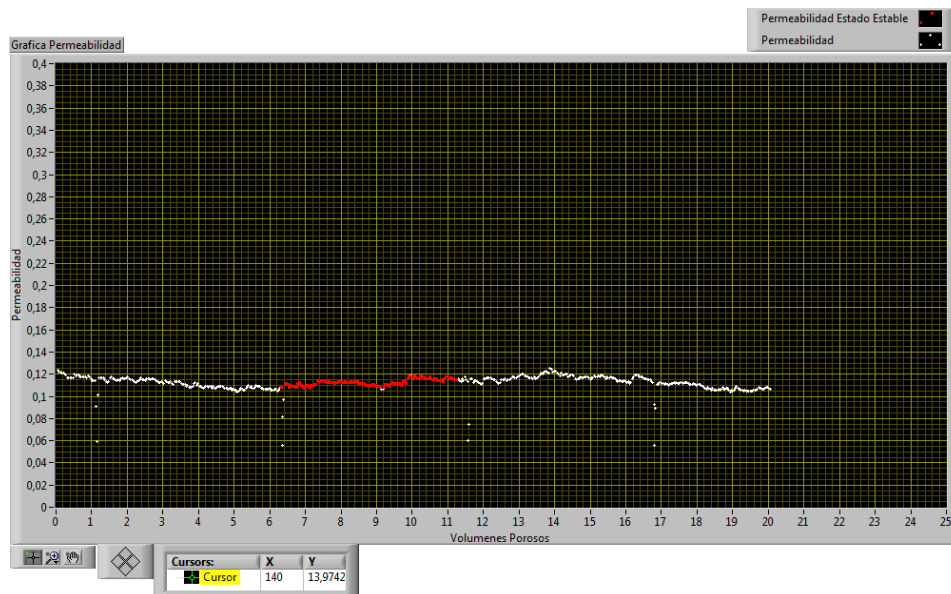


Figura 65. Permeabilidad vs Volúmenes Porosos; BEREAX5, prueba simulada. Fuente [Autor]

5.2. Prueba sistema de automatización:

Para validar el funcionamiento del sistema de automatización elaborado para el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, se realizó un ensayo de permeabilidad para una muestra de roca Berea XX con las siguientes propiedades:

- Diámetro: 37.3mm.
- Longitud: 72.2mm.
- Porosidad: 17.3%.

Este ensayo se realizó con un flujo constante de salmuera a 1ml/min, a una presión de confinamiento de 800psi. El tiempo de duración de la prueba fue de 4 horas y se registraron los datos en un archivo .txt en el disco duro.

En la figura 66 se puede observar la gráfica obtenida para 20 volúmenes porosos de rango de estabilización (color rojo).

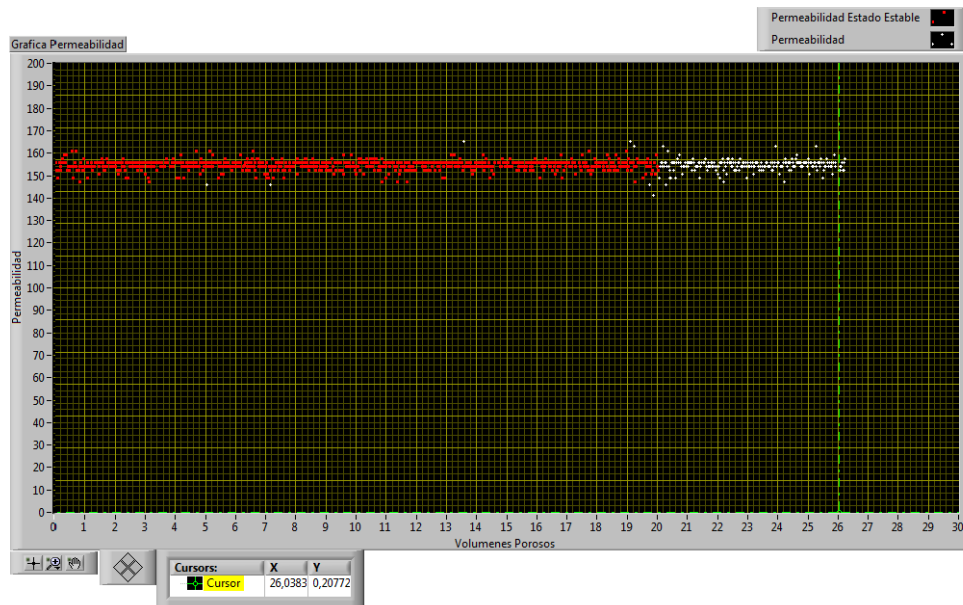


Figura 66. Permeabilidad vs. Volúmenes Porosos para la Berea XX. Fuente [Autor]

Los datos obtenidos fueron analizados por el personal del laboratorio y se concluyó que son acordes al diseño planteado para la prueba realizada, validando de ésta manera la automatización del ensayo de permeabilidad de rocas. En el anexo A se encuentran los datos obtenidos en esta prueba.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este sistema autónomo se diseñó con el fin de prestar un mejor servicio en el laboratorio de mecánica de rocas del ICP, para la realización de ensayos de permeabilidad de rocas, y de esta manera mejorar la seguridad y confiabilidad del mismo.

Los ensayos de permeabilidad pueden durar desde dos horas hasta tres meses, dependiendo del medio poroso involucrado en la prueba, es por esto que por medio de la supervisión del sistema a través de internet se podrán realizar más ensayos de permeabilidad durante un año.

Las pruebas realizadas permiten constatar el correcto funcionamiento del sistema autónomo, permitiendo corroborar la adecuada selección de instrumentación y el diseño del software realizado.

Si se desea en un futuro utilizar otras técnicas de medición de permeabilidad, se puede implementar el sistema de automatización instalado, realizando pequeños cambios en la lógica de programación para adecuarse al nuevo ensayo de permeabilidad.

Debido a la sencilla estructura del sistema autónomo y a la creación de varias partes en el software usado, el mantenimiento de los equipos se puede realizar de una manera óptima, y de ser necesario, reemplazar cualquier dispositivo, se podrá hacer fácilmente sin interferir con las características del sistema.

Gracias a la adecuada presentación de los resultados y al almacenamiento ordenado de los datos durante el ensayo de permeabilidad, se disminuyen los riesgos del personal presente en la prueba, ya que la supervisión del ensayo se puede realizar desde una oficina conjunta a través de Ethernet.

Si ocurre un accidente que desconecte los equipos del ensayo, se ha previsto el almacenamiento de los datos de la prueba cada cinco segundos en el disco duro del computador, y así mismo, luego de revisar que el sistema no presente fugas o daños en la instrumentación, se puede continuar con el ensayo desde el punto de permeabilidad en que se detuvo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **American Petroleum Institute**. Recommended Practices for Core Analysis. Segunda Edición. Washington D.C.: ILI; 1998. 237p.
- [2] **HEINEMANN**. Zoltán E. Fluid Flow in Porous Media. Primera Edición. Leoben: DI Johannes Pichelbauer; 2003. 190p.
- [3] **WIKIPEDIA ORGANITATION**. Roca Metamórfica. San Francisco; 2001. Disponible en: <http://es.mobile.wikipedia.org/transcode.php?go=Roca+metam%C3%B3rfica&PHPSESSID=4418fda4afca2862fe81a03360dac496>
- [4] **MTS Systems Corporation**. MTS Rock and Concrete Mechanics Testing Systems. Eden Prairie; 2004. 250p
- [5] **TELEDYNE ISCO**. D Series Pumps Installation and Operation Guide. Lincoln: Revision K; 2007. 260p
- [6] **SMAR INTERNATIONAL CORPORATION**. Smar LD301: Manual de Instrucciones, Operaciones y Mantenimiento. Sexta Edición. Houston; 2004. 68p.
- [7] **MEASUREMENT COMPUTING**. MiniLAB User's Guide. Octava Edición. 2006. 34p.
- [8] **HUDSON**, John A; **HARRISON** John P. Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Pinciples. Primera Edición. Amsterdam: Pergamon; 1997. 458p.
- [9] **AYAN**, Corsan; **HAFEZ**, Hafez; **HURST**, Sharon; **Kuchuk**, Fikri; **O'CALLAGHAN**, Aubrey; **PEFFER**, John; **POP**, Julian; **ZEYBEK**, Murat. Caracterización de la Permeabilidad con Probadores de Formación. Schlumberger Services; 2004. Disponible en [Internet]: www.slb.com/media/services/resources/oilfieldreview/spanish01/win01/p02_23.pdf
- [10] **AHMED**, Tarek. Reservoir Engineering. Segunda Edición. Bostón: Gulf Professional Publishing; 2001. 1211p.
- [11] **ALKHATHA'AMI**, Mohammad. Permeability, Porsosity and Skin Factor. Primera Edición. Riyadh; 2005. 27p.

[12] **TIAB**, Djebbar; **DONALDSON**, Erle C. Petrophysics. Segunda Edición. Bostón: Gulf Professional Publishing; 2004. 925p.

[13] **CARRILLO**, Luis Felipe; **BENAVIDES**, Carmen Cecilia; **REYES**, José Darío; **PACHÓN**, Zarith. Factibilidad de Inyección de Agua En Campos Petrolíferos. Revista Colombiana de Física. 2001; Vol. 33, No. 2: 475-478.

[14] **HONARPUOR**, Mehdi; **HARVEY**, A. Herbert; **KOEDERITZ**, Leonard. Relative Permeability of Petroleum Reservoirs. Primera Edición. Boca Raton: CRC Press. 141p.

[15] **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS**. Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurement. ASTM D 2664 – 04. 4p.

[16] **DAS**, Braja M. Advanced Soil Mechanics. Segunda Edición. New York: McGraw Hill; 1997. 502p.

[17] **ECOPETROL**, Procedimiento Técnico de Ensayo para Pruebas de Permeabilidad Triaxial, sin Aplicar Presión de Poro, Realizadas a Temperatura Ambiente (PTE 151.017). Primera Edición. Bucaramanga; 2006. 4p.

ANEXOS

ANEXO A. DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PERMEABILIDAD A LA BEREA XX.

Flujo	Volumen	ΔP
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,839844
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,839844
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,830078
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,830078
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,908203
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,878906

1	0,362	0,849609
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,888672
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,888672
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141

1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,888672
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,859375
1	0,75	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141

1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,263	0,869141
1	0,263	0,859375
1	0,263	0,830078
1	0,263	0,859375
1	0,263	0,878906
1	0,263	0,849609
1	0,263	0,869141
1	0,263	0,898437
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,810547
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,820312
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,908203
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,859375
1	1,55	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,888672
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,917969
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,888672
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,947266

1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,888672
1	0,362	0,839844
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,917969
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,830078
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,839844
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,839844
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,888672
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141

1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,75	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,869141

1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,820312
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,898437
1	0,362	0,878906
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,849609
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,869141
1	0,362	0,859375
1	0,362	0,888672
1	0,362	0,859375