



**CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO ELECTRONEUMÁTICO PARA LA
FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS**

SILVIA JULIANA CÁCERES ORTIZ

KAREN LISSETH PORRAS RUBIO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2015



**CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO ELECTRONEUMÁTICO PARA LA
FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS**

SILVIA JULIANA CÁCERES ORTIZ

KAREN LISSETH PORRAS RUBIO

Trabajo de Grado para obtener título de Ingeniera de Petróleos

DIRECTOR

M.Sc. HERNANDO BUENDIA LOMBANA

QUIMICO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

*A Dios por darme la vida y permitir la realización de este
proyecto.*

*A mis padres, quienes sacrificaron su futuro y dieron todo de
ellos para que llegara este momento, los amo.*

Karen Lisseth Porras Rubio

*A Dios quien hizo posible este enorme logro, a mis padres,
hermanos e Iván quienes me apoyaron en todo este proceso.*

Silvia Juliana Cáceres Ortiz

AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto de grado expresan sus sinceros agradecimientos a:

M. Sc. Hernando Buendia Lombana que como el director de este proyecto nos orientó, respaldó y acompañó en todo momento y así guiándonos de la mejor manera para alcanzar el éxito tan anhelado. Nos enseñó a dar valor agregado a nuestro proyecto, y siempre nos respaldó para seguir adelante.

M. Sc. Luis Felipe Carrillo, quien dio su opinión, nos respaldó y orientó en muchos procesos llevados a cabo en el laboratorio.

El personal profesional del laboratorio de análisis petrofísicos y daño a la formación del Parque Tecnológico de Guatiguará: Luz Dary Peña, Loribeth Atala Buendía, John Fredy Badillo, Mauricio Álvarez, Jenny Rodríguez, Freddy, Jonathan, Javier y Andrés con quienes siempre contamos con su colaboración y disposición para ayudarnos a sacar adelante este proyecto.

A los ingenieros Juan Carlos Lizcano y Robert Padrón, por darnos la idea para plantear este proyecto, además de guiarnos, aconsejarnos y la paciencia que nos brindaron.

Al tecnólogo electromecánico Elver Porras Ortega quien contribuyó para la construcción del equipo de este proyecto.

M. Sc. Olga Patricia Ortiz por ayudarnos con el proceso para obtener el presupuesto del proyecto, y sus consejos por medio del grupo de investigación GMPH.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	23
1. OBJETIVOS.....	25
2. MARCO DE REFERENCIA.....	26
2.1 NEUMÁTICA	26
2.1.1 Electro-neumática..	26
2.1.1.1 Componentes Principales.:	27
2.1.2 Conceptos Básicos de Mecánica de Fluidos (Principio Físico)..	28
2.1.2.1 Presión.....	28
2.1.2.2 Caudal.....	28
2.1.3 Principio físico de la neumática..	29
2.1.3.1 Ley de los gases Perfectos	29
2.1.3.2 Pérdida de carga..	30
2.1.3.3 Pérdidas de Carga en singularidades (accesorios)..	35
2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	38
2.2.2 Objetivo de un diseño experimental.	38
2.2.3 Procedimiento recomendado para realizar un diseño experimental.	39
2.3 ROCAS CON MEDIOS POROSOS HOMOGÉNEOS	39
2.3.1 Areniscas de Berea..	40
2.3.2 Dolomitas de Baker..	41

2.4 DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA DE UNA ROCA	42
2.4.1 Propiedades de las rocas sedimentarias necesarias para realizar la descripción litológica.....	43
2.4.1.1 Tamaño.....	43
2.4.1.2 Selección o calibrado..	44
2.4.1.3 Forma de las partículas.....	45
2.4.1.4 Fábrica de los granos.....	46
2.5 FUNDAMENTOS PETROFÍSICOS	48
2.5.1 Porosidad.....	48
2.5.2 Permeabilidad.	49
2.6 ANTECEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS	50
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO ELECTRO-NEUMÁTICO PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS	54
3.1 GENERALIDADES.....	54
3.2 DISEÑO DEL EQUIPO	54
3.2.1 Condiciones de un diseño	54
3.2.2 Diseño del Equipo.....	56
3.2.. Descripción de las unidades.....	57
3.2.3.1 Unidad I: Generación de energía Neumática.....	58
3.2.3.2 Unidad II: Regulación y dirección del aire.	61
3.2.3.3 Unidad III: Compresión Mecánica	67
3.3. PRINCIPIO FÍSICO	70
3.3.1 Presión.....	70
3.3.2 Ley de Boyle-Mariotte..	71

3.3.3 Pérdidas de Carga..	73
3.4 FUNCIONAMIENTO.....	76
3.4.1 Accionamiento.....	77
3.4.2 Reposo.....	77
3.5 PROCEDIMIENTO	78
3.5.1 Diagrama del Procedimiento.	83
3.6 MANTENIMIENTO	84
3.6.1 Unidad 1: Generación de Energía Neumática..	84
3.6.1.1 Compresor.....	85
3.6.2 Unidad 2: Regulación y dirección del aire..	87
3.6.2.1 Válvula reguladora de presión..	87
3.6.2.2 Válvula reguladora de caudal.....	88
3.6.2.3 Manómetro.....	88
3.6.2.4 Electroválvula Direccional..	88
3.6.2.5 Válvula de bola.	89
3.6.3 Unidad 3: Compresión Mecánica.....	89
3.6.3.1 Actuador Neumático.	90
3.6.3.2 Moldes.....	91
3.7 CUIDADOS Y PRECAUCIONES.....	91
4. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS CON EL EQUIPO “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”	93
4.1 PRUEBAS REALIZADAS.....	93

4.1.1 Materiales necesarios para la preparación de la mezcla de núcleos sintéticos.....	94
4.1.2 Prueba para la determinación de la relación resina – endurecedor..	97
4.1.3 Prueba para el cambio de volumen de solución epóxica..	101
4.1.4 Diseño experimental de prueba..	105
4.1.4.1 Fabricación de las muestras según del diseño experimental.	106
4.1.5 Prueba de curado.....	109
4.2 PROCEDIMIENTO PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS.....	112
4.2.1 Procedimiento para la elaboración de la mezcla.....	112
4.2.2 Procedimiento de curado y extracción de la muestra	118
4.3 METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS CONOCIENDO LAS PROPIEDADES PETROSIFICAS A PARTIR DEL EQUIPO “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”	120
5. FABRICACIÓN DE NÚCLEOS SINTÉTICOS POR MEDIO DEL SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS.....	123
5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO.....	123
5.2 MANTENIMIENTO PARA EL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”	125
5.3 PROCEDIMIENTO PARA LA COMPRESIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS POR MEDIO DEL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”	125
5.3.1 Estado del Equipo (Observaciones previas)	126
5.3.2 Operación de equipo.....	126

5.4	MANTENIMIENTO PARA EL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”	129
5.5	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”	130
5.5.1	Fabricación de las muestras según del diseño experimental.	131
5.6	METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS A PARTIR DEL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NUCLEOS NO CONSOLIDADOS”	134
5.6.1	Ecuaciones para la formulación generadas por medio de Statgraphics Centurion.	134
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	139
6.1	FORMULACIÓN “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”	139
6.2	FORMULACIÓN “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”	141
6.3	COMPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES A 100 PSI	145
7.	CONCLUSIONES	151
8.	RECOMENDACIONES	152
	BIBLIOGRAFÍA	153
	ANEXOS	155

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de Moody	35
Figura 2. Diagrama de un proceso	38
Figura 3. Muestra de un núcleo de Berea	41
Figura 4. Tamaño de las partículas de la roca	44
Figura 5. Selección o calibrado de las partículas	45
Figura 6. Redondez de una partícula	46
Figura 7. Fabrica de los granos	46
Figura 8. Mangas de Caucho	52
Figura 9. Equipo de desplazamiento con muestra sintética	52
Figura 10. Montaje para la construcción de núcleos sintéticos con torquímetro.	53
Figura 11. Unidades del equipo	57
Figura 12. Compresor y símbolo.....	59
Figura 13. Partes del compresor.....	61
Figura 14. Válvula reguladora de presión y símbolo.	63
Figura 15. Válvula Reguladora de Caudal y símbolo.	64
Figura 16. Manómetro y símbolo.	65
Figura 17. Electroválvula direccional.....	66
Figura 18. Válvula de Bola y símbolo.....	67
Figura 19. Actuador Neumático y símbolo.	68
Figura 20. Moldes	70
Figura 21. Grafica de las Unidades acopladas	77
Figura 22. Diagrama de las Unidades Acopladas-Reposo.....	78
Figura 23. Equipo construido e instalado	79
Figura 24. Encendido del compresor (tanque vacío y lleno)	80

Figura 25. Encendido del equipo	80
Figura 26. Encendido del equipo y presión regulada	81
Figura 27. Paso del aire.....	82
Figura 28. Acople del molde al equipo.....	82
Figura 29. Encendido y compresión de la muestra	83
Figura 30. Muestra extraída del molde	83
Figura 31. Procedimiento para uso del equipo	84
Figura 32. Válvula de Drenaje (Purga).....	85
Figura 33. Mantenimiento del Compresor (Filtro y nivel de aceite)	86
Figura 34. Unidad de compresión.....	91
Figura 35. Arena Mal seleccionada	95
Figura 36. Arenas con buena y mala selección.....	95
Figura 37. Caolín blanco	96
Figura 38. Solución epóxica (resina – endurecedor)	97
Figura 39. Correlación de la relación epóxica/masa de mezcla en función del % de caolín	98
Figura 40. Muestras sintéticas con diferentes relaciones de solución epóxica con mayor cantidad de Resina	99
Figura 41. Muestras sintéticas con diferentes relaciones de solución epóxica mayor cantidad de Endurecedor	100
Figura 42. Muestra sintética E 31 fracturada	101
Figura 43. Muestras sintéticas construidas para verificar consolidación	102
Figura 44. Correlación de la relación epóxica/masa de mezcla en función del % de caolín (Modificado).....	102
Figura 45. Muestras sintéticas construidas para verificar consolidación	103
Figura 46. Prueba Solución Epóxica	104
Figura 47. Correlación de 1cc de solución epóxica/masa de mezcla vs porcentaje de caolín blanco (Modificada 2)	104
Figura 48. Atributos del diseño factorial multinivel	105

Figura 49. Libro de datos.....	106
Figura 50. Muestras fabricadas según diseño experimental. “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”	107
Figura 51. Muestras deformadas	108
Figura 52. Muestra D1 no deformada	108
Figura 53. Correlación de la relación epóxica/masa de mezcla en función del % de caolín (Modificación Final)	109
Figura 54. Mezclas con igual composición en masa recién fabricada.....	110
Figura 55. Mezcla de plug después de 6 horas.....	110
Figura 56. Volumen epóxico después de 6 horas	111
Figura 57. Tamizador de arena	112
Figura 58. Arena fina y caolín blanco pesado en la balanza.....	114
Figura 59. Mezcla de arena fina y caolín blanco	114
Figura 60. Mezcla de resina y endurecedor	115
Figura 61. Mezcla de arena y caolín en solución epóxica	116
Figura 62. Mezcla en molde de acero	117
Figura 63. Compresión de la muestra	117
Figura 64. Extracción de la muestra por medio del torquímetro	118
Figura 65. Núcleo sintético desplazado	119
Figura 66. Extraccion total del núcleo sintético	119
Figura 67. Muestras fabricadas para la formulación.....	120
Figura 68. Formulación para la fabricación de medios porosos sintéticos por medio del equipo "ELECTRONEUMATIC SINTHETIC CORE"	121
Figura 69. Equipo de Núcleos no consolidados	124
Figura 70. Apertura de las válvulas	127
Figura 71. Bombeo de líquido	127
Figura 72. Despresurizar el equipo.....	128
Figura 73. Bombeo para levantamiento del pistón.....	128
Figura 74. Núcleo sintético fabricado por el equipo “Sistema de Montaje Núcleos No Consolidados”	129

Figura 75. Libro de datos 130

Figura 76. Malla generada por el programa 131

Figura 77. Muestras fabricadas según diseño experimental. “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS” 132

Figura 78. Prueba de Repetibilidad. “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS” 133

Figura 79. Malla con los datos de las muestras fabricadas..... 135

Figura 80. Ecuación generada por Statgraphics Centurion-Porosidad 135

Figura 81.Ecuación generada por Statgraphics Centurion-Permeabilidad..... 136

Figura 82. Formulación Porosidad..... 137

Figura 83. Formulación Permeabilidad 138

Figura 84.Formulación “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE” 139

Figura 85.Formulación Porosidad 142

Figura 86. Formulación Permeabilidad 142

Figura 87. Formulación a 700 psi. 143

Figura 88. Formulación “Sistema De Montaje De Nucleos No Consolidados” a 100 psi..... 145

Figura 89. Comparacion de formulaciones a 100 psi 146

Figura 90. Comparación de las muestras fabricadas a 100 psi..... 147

Figura 91. Muestras Fabricadas. 150

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rugosidad absoluta de materiales	33
Tabla 2. Valores del coeficiente K en pérdidas singulares	36
Tabla 3. Características del compresor RANGER	60
Tabla 4. Características de la válvula de drenaje	62
Tabla 5. Características de la electroválvula direccional.....	65
Tabla 6. Características Generales del Actuador neumático (Comercial).....	69
Tabla 7. Características Generales del Actuador neumático (Físico)	69
Tabla 8. Cálculo de Fuerza	71
Tabla 9. Datos para cálculos de la ley de Boyle-Mariotte	72
Tabla 10. Cálculo de volumen de consumo de aire por ciclo	72
Tabla 11. Datos para cálculos de pérdidas de carga.....	73
Tabla 12. Datos para calcular pérdidas por la ecuación de Renouard	75
Tabla 13. Calculo de Perdidas de Presión en el equipo.....	76
Tabla 14. Solución de problemas del compresor	87
Tabla 15. Cantidad de Resina- Endurecedor Primera Prueba	99
Tabla 16. Cantidad de Resina- Endurecedor Segunda Prueba	100
Tabla 17. Muestras fabricadas a partir de la correlación modificada presentada en la figura 44	103
Tabla 18. Resultados “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”	107
Tabla 19. Resultados de las Propiedades de las muestras	121
Tabla 20. Resultados “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”	132
Tabla 21. Comparación de los resultados con su respectiva repetibilidad.....	134

Tabla 22. Porcentaje de Error Repetividad de las muestras“ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”140

Tabla 23.Porcentaje de Error Repetividad de las muestras “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”144

Tabla 24.Desviación de error de las ecuaciones arrojadas por el diseño experimental y las muestras fabricadas con “Electroneumatic Synthetic Core” ...147

Tabla 25. Porcentaje de error de las muestras fabricadas con diferentes equipos.148

Tabla 26. Porcentaje de error de las muestras fabricadas por el equipo “Sistema De Montaje De Núcleos No Consolidados”con respecto a los datos de la ecuación dadas por el diseño experimental 149

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. PROCEDIMIENTO PARA EL USO CORRECTO DEL SOFTWARE “STATGRAPHICS CENTURION”	155
ANEXO B. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA POROSIDAD.....	165
ANEXO C. PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD	171
ANEXO D. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS A PARTIR DE LAS ECUACIONES DE STATGRAPHICS CENTURION.....	174

RESUMEN

TITULO: CONSTRUCCION DE EQUIPO ELECTRONEUMATICO PARA LA FABRICACION DE MEDIOS POROSOS SINTETICOS*

AUTORES: Silvia Juliana Cáceres Ortiz y Karen Lisseth Porras Rubio**

PALABRAS CLAVES: Núcleos Sintéticos, Equipo electro-neumático, Diseño experimental, laboratorio, metodología, neumática.

DESCRIPCIÓN

La fabricación de medios porosos sintéticos se ha convertido en un método indispensable y de uso constante para el desarrollo de proyectos de investigación en laboratorio, con el fin de evitar el uso de núcleos nativos, ya que este es un proceso de gran inversión, planeación y difícil acceso. Por esto es necesario fabricar muestras sintéticas controlando todas las variables, por lo que este proyecto se basó principalmente en controlar la variable compactación y poder construir plugs sintéticos que son ideales para reducir costos, se pueden afectar sin problema alguno y principalmente, se pueden fabricar con propiedades petrofísicas similares al yacimiento de estudio.

Este proyecto de investigación se centra en la construcción de un equipo electro-neumático, que permita generar una compresión precisa a la muestra sintética y poder realizar una metodología estandarizada a partir de las variables principales a estudiar, presión y composición, por medio de la cual se puedan fabricar medios porosos sintéticos con porosidad y permeabilidad conocida.

Basados en metodologías realizadas anteriormente para fines investigativos, se tuvieron en cuenta parámetros principales como la composición de la muestra y la presión aplicada, para la cual se diseña y construye un equipo electro-neumático accionado con aire para comprimir las muestras de roca de manera homogénea. Se obtiene una formulación que permite fabricar muestras sintéticas con rangos de permeabilidad de 40 a 470 mD y porosidades de 23 a 33 % aproximadamente, usando una presión de 100 psi, confirmando los resultados al validarlos con un equipo de principio hidráulico, en donde la diferencia oscila entre 3,4% y 6,7% para la porosidad y permeabilidad respectivamente

Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: M.Sc. Hernando Buendía Lombana.

ABSTRACT

TITLE: CONSTRUCTION OF AN ELECTROPNEUMATIC EQUIPMENT FOR MANUFACTURING OF A SYNTHETIC POROUS MEDIA*

AUTHOR: Silvia Juliana Cáceres Ortiz y Karen Lisseth Porras Rubio**

KEYWORDS: Synthetic core, electro-pneumatic equipment, experimental design, laboratory methodology, pneumatics.

DESCRIPTION

The manufacture of synthetic porous media has become an indispensable and constant use for the development of research projects in the laboratory, desirable to avoid the use of native core method, as this is a great investment process, planning and difficult access. Therefore it is necessary to manufacture synthetic samples controlling all variables, so this project was based mainly on compaction control variable and to build synthetic plugs that are ideal to reduce costs, can be affected without any problems and foremost, they can be manufactured with Similar to the field of study petrophysical properties ..

This research project focuses on the construction of an electro - pneumatic equipment, allowing generates a precise compression to the synthetic plug and to perform a standardized methodology based on the main variables to study, (pressure and composition). Through this methodology synthetic plugs with known porosity and permeability could be made successfully.

Based on methodologies previously performed for research purposes, based in parameters such as the composition of the sample and the applied pressure for which it is designed and built an electro - pneumatic equipment operated with air to compress the rock samples homogenously. It was obtained a formulation that allows to manufacture synthetic samples with permeability ranges of 40-470 mD and porosity of approximately 23-33 %, using a pressure of 100 psi, this being confirmed by validating results with an equipment of hydraulic principle, where the difference is between 3.4 % and 6.7 % for porosity and permeability respectively.

* Bachelorthesis.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Directora: Olga Patricia Ortiz Cancino. Codirector: Rubén Castro García

INTRODUCCIÓN

El uso de muestras sintéticas para el desarrollo de proyectos de investigación en el laboratorio, se ha convertido en una necesidad para evitar el uso constante de núcleos nativos obtenidos de yacimiento. Al fabricar estas muestras surge la necesidad de construir una herramienta que ejerza una compresión uniforme en ellas. Este proyecto consiste en el diseño y la construcción de un equipo electro-neumático para fabricar medios porosos sintéticos homogéneos.

La ciencia principal aplicada al equipo es la Neumática, la cual por medio de componentes neumáticos y eléctricos, se circula aire para cumplir el objetivo del equipo¹, el cual consiste en ejercer la misma presión en cada muestra no consolidada. Debido a que los procedimientos anteriores para fabricar muestras sintéticas no controlaban la compresión aplicada a la muestra, se implementó el equipo como solución para que la presión sea controlable, y las muestras puedan ser fabricadas por diferentes personas, y así obtener las mismas propiedades. Por esta razón, esta herramienta, será de uso fundamental para la fabricación de plugs sintéticos, debido a que es un mecanismo útil, necesario, duradero y seguro.

En las muestras sintéticas se desea cumplir con la homogeneidad que poseen los núcleos de las rocas de Berea ubicadas en Ohio, USA. Estas muestras son muy usadas en la industria de hidrocarburos, debido a su composición y uniformidad, además de que sus propiedades petrofísicas son similares a la de los yacimientos de petróleo. Estas rocas están compuestas principalmente por Cuarzo (80-95%) y cementados por Sílice².

Estas rocas de Berea presentan un rango de permeabilidad de 114 a 1168 mD y de porosidad de 19.04 a 26.10%.³ Debido a sus altos costos de importación es necesario fabricar muestras sintéticas en el laboratorio. Por esta razón se realizó

¹AMPUDIA ECHEVERRY, Danilo. "Neumática- Primera Parte". Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería. p. 2

²CHURCHER, P. L., et al. Rock properties of Berea sandstone, Baker dolomite, and Indiana limestone. *SPE*, 1991, vol. 21044, p. 433.

³CHURCHER, P. L., et al. Rock properties of Berea sandstone, Baker dolomite, and Indiana limestone. *SPE*, 1991, vol. 21044, p. 435

una formulación confiable y repetible con un amplio rango de permeabilidad y porosidad similares a las Bereas.

Para esta formulación se tomó en cuenta las variables como el porcentaje de caolín y la presión ejercida sobre la muestra para conocer el dato de la propiedad petrofísica a la cual se necesita fabricar el plug sintético, y darle uso en los laboratorios, para simular núcleos nativos y poder realizar los apropiados análisis para obtener resultados óptimos aplicables a campo.

1. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Construir un equipo electro-neumático y diseñar una metodología para la fabricación de medios porosos sintéticos con diferentes tipos de porosidad y permeabilidad para simulación de yacimientos homogéneos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica sobre las metodologías y procedimientos para la obtención y construcción de medios porosos homogéneos, y propiedades petrofísicas a estudiar.
- Construir equipo electro-neumático el cual, al ser accionado por aire, pueda comprimir la muestra con una presión exacta.
- Realizar un diseño experimental en el que se variaran principalmente la compresibilidad y composición, las cuales generaran cambios en las propiedades petrofísicas, y esto se realizara por medio del respectivo procedimiento para la construcción de medios porosos homogéneos.
- Obtener las propiedades petrofísicas por medio de equipos de laboratorio a partir de los medios porosos homogéneos construidos.
- Realizar la formulación para la fabricación de medios porosos homogéneos, obtenidos a partir de la medición de las propiedades petrofísicas de los núcleos construidos.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 NEUMÁTICA

La Neumática se refiere a la tecnología que usa como medio de accionamiento el aire comprimido⁴. La energía utilizada es guiada a través de una línea y utilizada por medio de motores, actuadores, válvulas u otros elementos de trabajo, para realizar una determinada función, en el caso de este proyecto, comprimir una mezcla con el fin de fabricar medios porosos sintéticos.

La neumática abarca todo conjunto de técnicas para transmitir energía, su control y su regulación, ya sea usada para el mando de fuerzas o movimientos que controlan los equipos por medio de aire comprimido.

También se debe saber, que la neumática no es la única tecnología que se usa para realizar las funciones descritas anteriormente, pues estos sistemas también pueden ser mecanismos, hidráulicos, neumáticos y eléctricos⁵. Debido a esto, se seleccionara un sistema adecuado para el diseño del equipo, que cumpla respectivamente con la función principal y el objetivo principal, que es controlar la compresión generada en la muestra, y además muestre precisión, regularidad y repetividad al realizar el trabajo y respectivamente, automatizar el equipo, de esta manera disminuir la influencia de la mano del hombre en el trabajo.

2.1.1 Electro-neumática. La Electro-neumática es la aplicación donde dos importantes ramas como la neumática y la electricidad se unen para realizar la automatización de los equipos.⁶

⁴AMPUDIA ECHEVERRY, Danilo. "Neumática- Primera Parte". Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería. p. 2

⁵MAYORGA NOGALES, Edgar Xavier. "Automatización Neumática". SMC Latina. 2005. p. 4

⁶LLADONOSA, Vincent. "Circuitos Básicos de Electro neumática". Prácticas de Automatismo. Alfaomega-Marcombo Editores.1993. P 11.

Es importante conocer que componentes son necesarios para elaborar una excelente conexión y poder realizar el trabajo requerido. Cada componente cumple una tarea determinada en el proceso y transmisión de señales.

Dentro de los elementos de un sistema electro-neumático es importante reconocer la cadena de mando para elaborar un correcto esquema de conexiones. Cada uno de los elementos de la cadena de mando cumple una tarea determinada en el procesamiento y la transmisión de señales. La eficacia de esta estructuración de un sistema en bloques de funciones se ha comprobado en las siguientes tareas:

- Disposición de los elementos en el esquema de conexionado
- Especificación del tamaño nominal, la corriente nominal y la tensión nominal de los componentes eléctricos (bobinas, etc.)
- Estructura y puesta en marcha del mando.
- Identificación de los componentes al efectuar trabajos de mantenimiento.

2.1.1.1 Componentes Principales. Los Componentes principales que conforman un equipo electro-neumático son:⁷

- Contactos eléctricos NA/NC
- Sensores
- Pulsadores e interruptores
- Electroválvula 3/2 5/2 4/2 vías
- Cilindros de simple efecto
- Cilindros de doble efecto
- Válvulas lógicas y de secuencia
- Temporizadores
- Relés
- Fuente de energía (Compresores)

⁷ GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P 17-48.

2.1.2 Conceptos Básicos de Mecánica de Fluidos (Principio Físico). Antes de estudiar elementos neumáticos, fue preferible estudiar conceptos básicos de la mecánica de fluidos para entender con claridad lo que se estudio acerca de la neumática. De esta manera las magnitudes que más se utilizan son: la presión y el caudal. También es necesario conocer las propiedades del aire que es la energía con la que se accionan los elementos neumáticos, y las leyes que rigen los gases perfectos, entre otros conceptos encontrados.

2.1.2.1 Presión. La presión ejercida por un fluido en una superficie es igual a la fuerza sobre el área.

Ecuación 1. Presión

$$P = \frac{F}{A}$$

P: Presión [psi]

F: Fuerza [lb fuerza]

A: Área [in²]

2.1.2.2 Caudal. Cantidad de fluido que atraviesa una sección dada por unidad de tiempo. La sección dada se puede expresar en unidad de masa o volumen.

El caudal másico y el caudal volumétrico están relacionados a través de la densidad del fluido, que en el caso de los gases es variable con la presión y la temperatura.⁸

Ecuación 2. Caudal

$$q = v \cdot A = V/t$$

q: Caudal [ft³/s]

A: Área [ft²]

⁸AMPUDIA ECHEVERRY, Danilo. "Neumática- Primera Parte". Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería. P. 10

v : Velocidad [ft/s]

V : Volumen [ft^3]

t : tiempo [s]

2.1.3 Principio físico de la neumática. A continuación se hará una descripción de los principios físicos que rigen la neumática.

2.1.3.1 Ley de los gases Perfectos: Las características esenciales del estado gaseoso son:

- La presión de un gas en equilibrio es la misma en todos los puntos de la masa.
- La densidad de un gas depende de su presión y temperatura.
- La masa de un gas presenta una resistencia prácticamente nula a los esfuerzos de corte.

Se nombraran a continuación las leyes que rigen los gases perfectos, esto para seleccionar más adelante el comportamiento que tiene el aire dentro del equipo a construir.⁹

- **Ley de Boyle-Mariotte.** A temperatura constante, el producto de la presión que está sometido un gas por el volumen que ocupa se mantiene constante. La presión y el volumen son inversamente proporcionales.

Ecuación 3. Ley de Boyle-Mariotte

$$P_1V_1 = P_2V_2 = P_3V_3 = cte.$$

V1, V2, V3: Volumen. [ft^3]

⁹ GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P. 11.

P1, P2, P3: Presión. [psi]

2.1.3.2 Pérdida de carga. Toda la presión a la salida del compresor no se puede utilizar, debido a que al paso del aire por las paredes de la tubería se produce rozamiento por donde circula hasta que llega al consumo del aire, en este caso al actuador neumático, más los efectos de estrangulamientos que se originan en las válvulas de paso, los cambios de dirección en el flujo en los codos, todo ello repercute en pérdidas a través de un aumento en la temperatura del aire que se transforma finalmente en una pérdida de presión estática en el flujo¹⁰.

Para calcular perdidas de aire en el equipo, se utiliza la ecuación de Bernoulli, esta se expresa de la siguiente forma:

Ecuación 4. Ecuación de Bernoulli

$$Z_1 + \frac{144P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2g} - h_1 = Z_2 + \frac{144P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2g}$$

g : Aceleración de la gravedad. [ft³]

Z : Altura geométrica en la dirección de la gravedad en la sección. [ft]

P : Presión a lo largo de la línea de corriente. [psi]

ρ: Densidad del aire. [lb/ft³]

v : Velocidad del fluido. [ft/s]

h₁: Pérdida de carga. [ft]

Las pérdidas de carga son igual a la suma de las pérdidas en tubería y las pérdidas por accesorios.

¹⁰GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P 34.

Ecuación 5. Perdidas de carga

$$h_l = h_f + h_m$$

h_f : Perdidas por tubería [ft]

h_m : Perdidas por accesorios [ft]

Para calcular las perdidas en tubería se tiene la ecuación de Darcy-Weisbach¹¹

Ecuación 6. Ecuación de Darcy-Weisbach

$$h = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

h : Pérdida de carga debida a la fricción. [ft]

f : Factor de fricción de Darcy

L : Longitud de tubería [ft]

D : Diámetro [ft]

v : Velocidad del aire [ft/s]

g : aceleración de la gravedad [32ft/s²]

De la anterior expresión todos los parámetros son conocidos salvo el factor de fricción (f). En efecto, la velocidad del aire por la tubería (v) está relacionada con el caudal o flujo de aire (Q), que es un dato conocido proveniente del consumo necesario de cada punto de suministro.

Ecuación 7. Flujo de aire

$$Q = v \cdot A$$

Q : Es el caudal volumétrico o flujo de aire [ft³/s]

v : Es la velocidad del aire en el interior de la tubería [ft/s]

A : Es el área de la sección interna de la tubería ($\pi \cdot D^2 / 4$) [ft²]

¹¹GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999.

En el equipo se utilizaron válvulas reguladoras de caudal, el valor de este caudal se encuentra en el rango de 13-30 ft/s, que es el recomendado para el uso de esta ecuación. Por lo que conocido el caudal (Q) necesario para el consumo y tomando una velocidad de circulación en ese intervalo, se obtiene de la expresión anterior el diámetro interior de la tubería (D). Por lo tanto es el factor de fricción (f), la gran incógnita a calcular¹².

El factor de fricción (f), es un parámetro adimensional que depende del número de Reynolds (R_e) del fluido (en este caso, del aire) y de la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_r).

Ecuación 8. Factor de fricción

$$f = f(R_e, \epsilon_r)$$

Donde el número de Reynolds (R_e) viene expresado por la siguiente formulación:

Ecuación 93. Número de Reynolds

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

ρ : Densidad del fluido, en este caso del aire [$\rho_{\text{aire}} = 0.07 \text{ lb/ft}^3$ a 25 °C].

v : Velocidad del aire en el interior de la tubería [ft/s].

D : Diámetro interior de la tubería [in].

μ : Viscosidad dinámica del fluido, en este caso del aire [$\mu_{\text{aire}} = 1,17 \cdot 10^{-5} \text{ lb/ft}\cdot\text{s}$]

Por otro lado, la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_r) está dada en función de la rugosidad absoluta (K) del material del que está fabricada la tubería y de su diámetro interior (D) de acuerdo a la siguiente expresión¹³:

¹²GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999.

¹³GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999.

Ecuación 40. Rugosidad relativa de la tubería

$$\varepsilon r = \frac{K}{D}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de rugosidad absoluta para distintos materiales:

Tabla 1. Rugosidad absoluta de materiales

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	K (mm)	Material	K (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Fuente: Modificada GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999.

Por otro lado, en el transporte de fluidos por el interior de tuberías, y el aire es un fluido, existen dos régimen: laminar y turbulento. Para cada fluido, y para una sección de tubería, a una temperatura determinada, existe una velocidad crítica (v_c) por debajo de la cual el régimen es laminar¹⁴. Este valor crítico que marca la transición entre los dos regímenes, el laminar y el turbulento, se

¹⁴GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999.

corresponde con un $R_e = 2300$, aunque en la práctica, entre 2000 y 4000 la situación es bastante imprecisa. Por lo tanto, en función del valor del número de Reynolds (R_e) se tiene que:

- $R_e < 2000$: Régimen laminar.
 - $2000 < R_e < 4000$: Zona crítica o de transición.
 - $R_e > 4000$: Régimen turbulento.
-
- **Factor de Fricción.** Este concepto es importante conocerlo, porque la expresión para calcular el factor de fricción (f) es distinta según si el régimen es laminar o turbulento. Así se tiene que
-
- **Régimen laminar.** En este caso el factor de fricción (f) depende únicamente del número de Reynolds a través de la ecuación de Poiseuille:

Ecuación 51. Ecuación de Poiseuille

$$f = \frac{64}{R_e}$$

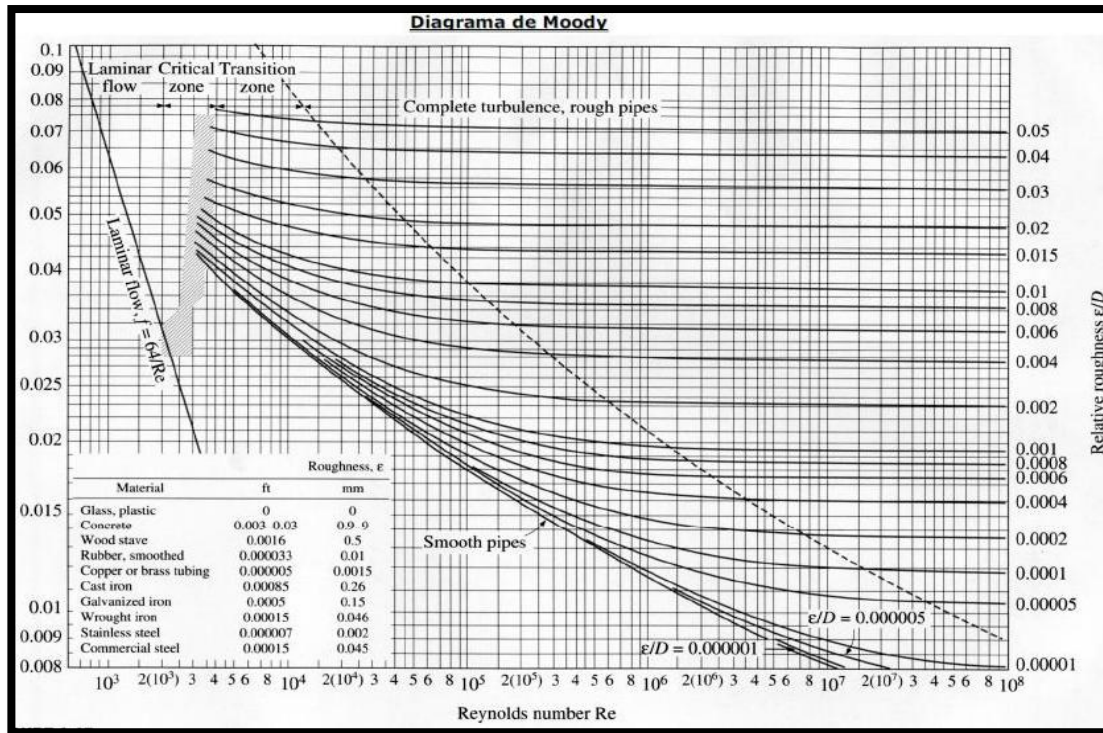
Expresión sencilla de aplicar para calcular el factor de fricción (f) en función del Reynolds (R_e)¹⁵.

- **Régimen turbulento.** Para el régimen turbulento este cálculo ya no es tan inmediato dado que el factor de fricción (f) depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa de la tubería. En este caso existen diversas formulaciones que pueden ser utilizadas para el cálculo del factor de fricción. Afortunadamente, además de estas expresiones existen representaciones gráficas y ábacos empíricos que nos permiten calcular fácilmente el factor de fricción (f). Uno de ellos es el Diagrama de Moody que es la representación gráfica en escala doblemente logarítmica del factor de

¹⁵GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999.

fricción (f) en función del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad relativa de la tubería (K/D)¹⁶, según se representa en la figura 1:

Figura 1.Diagrama de Moody



Fuente: GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999.

2.1.3.3 Pérdidas de Carga en singularidades (accesorios). Además de las pérdidas de carga por rozamiento, se producen otro tipo de pérdidas que se originan en puntos singulares de las tuberías (cambios de dirección, codos, juntas, entre otras.) y que se deben a fenómenos de turbulencia. La suma de estas pérdidas de carga accidentales o localizadas más las pérdidas por rozamiento dan las pérdidas de carga totales.

Salvo casos excepcionales, las pérdidas de carga localizadas sólo se pueden determinar de forma experimental, y puesto que son debidas a una disipación de

¹⁶GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999.

energía motivada por las turbulencias, pueden expresarse en función de la altura cinética corregida mediante un coeficiente empírico (K):¹⁷

Ecuación 12. Pérdida de carga o energía

$$h_m = K * \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

h: pérdida de carga o de energía [ft]

K: coeficiente empírico

v: velocidad media del flujo [ft/s]

g: Aceleración de la gravedad [ft/s²]

El coeficiente "K" depende del tipo de singularidad y de la velocidad media en el interior de la tubería. En la siguiente tabla se resumen los valores aproximados de "K" para cálculos rápidos:¹⁸

Tabla 2. Valores del coeficiente K en pérdidas singulares

VALORES DEL COEFICIENTE K EN PÉRDIDAS SINGULARES		
ACCIDENTE	K	L/D
Válvula esférica (totalmente abierta)	10	350
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5	175
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2,5	-
Válvula de retención (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0,2	13
Válvula de compuerta (abierta 3/4)	1,15	35

¹⁷ LOPEZ SOPEÑA, José Emilio. "Manual de instalaciones de GLP (CEPSA)".2011.p. 98

¹⁸ LOPEZ SOPEÑA, José Emilio. "Manual de instalaciones de GLP (CEPSA)".2011. p. 178

Válvula de compuerta (abierta 1/2)	5,6	160
Válvula de compuerta (abierta 1/4)	24	900
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-	40
T por salida lateral	1,80	67
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0,90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0,75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0,60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0,45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0,40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0,35	-

Fuente: López Sopena, José Emilio. Manual de instalaciones de GLP (CEPSA), p 98.

2.1.3.4 Conducción de Gases con presiones medias. El diámetro de una tubería para conducción de gas se escoge en función de la densidad del gas, la caída de presión admisible y la velocidad de circulación de gas. La presión del gas en el interior de una tubería por la que circula va disminuyendo por efecto de la fricción con las paredes. Para el cálculo de la pérdida de carga se emplean las llamadas fórmulas de Renouard que permiten hallar la caída de presión entre dos puntos en función de la densidad, el diámetro de la tubería, el caudal y la longitud. Para presiones medias ($0,05 \text{ bar} < P < 5 \text{ bar}$) la fórmula de Renouard se manejó con unidades SI, y se presenta en la ecuación 13:

Ecuación 13. Ecuación de Renouard

$$P_A^2 - P_B^2 = 51,5 * d_c L_c \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}}$$

d_c : Densidad corregida del gas [kg/m^3]

L_c : Longitud de un tramo recto de conducción en [m].

Q : Caudal en [m^3/h].

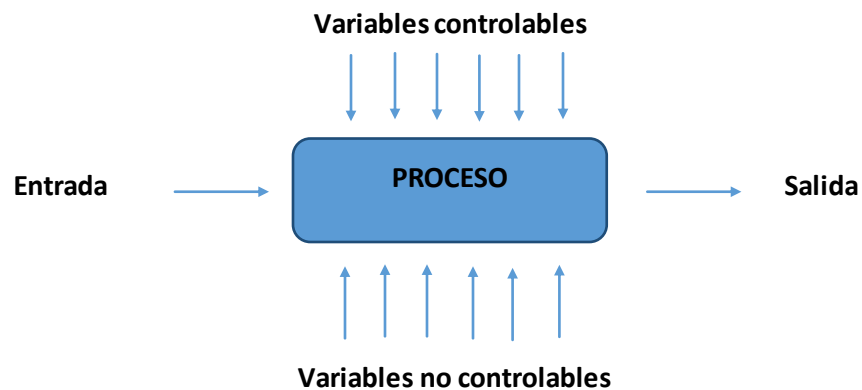
D : Diámetro interior en [mm].

2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

En todo proceso de investigación, la experimentación es fundamental para obtener información válida que permita desarrollar nuevos productos y procesos¹⁹, que aporten al desarrollo técnico y científico. El cual tiene como objetivo conocer cuáles son las variables más influyentes en la respuesta de salida. A continuación en la figura 2 se muestra un diagrama típico de un proceso experimental.

2.2.2 Objetivo de un diseño experimental. Un proceso productivo se puede representar por medio de la figura 2:

Figura 2. Diagrama de un proceso



Fuente: Modificado de Douglas C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments", Arizona State University, 2001.

En la figura 2 se muestra que en cualquier proceso de experimentación se transforma una entrada en una salida con varias respuestas observadas, las cuales son afectadas directa o indirectamente por, las variables controlables las cuales durante el proceso pueden ser manipuladas o cambiadas para llegar a una

¹⁹ALARCÓN GÓMEZ, Leonardo Andrés. CAVANZO BALCAZAR, Emilio Andrés. "Estudio experimental de procesos de inyección continua de vapor el equipo de desplazamiento radial con medios porosos homogéneos". 2013. p.28

respuesta, y por las variables no controlables las cuales como su nombre lo indica, no se pueden controlar durante el desarrollo del experimento.

Las respuestas de un proceso que se traducen como la salida de este, lo son todo en la experimentación y son el principal objetivo de un proceso experimental.

2.2.3 Procedimiento recomendado para realizar un diseño experimental. Para realizar un diseño experimental confiable se debe seguir el siguiente procedimiento propuesto por Montgomery (1991)²⁰.

- a) Planteamiento del problema
- b) Elección de factores y niveles
- c) Selección de la variable de respuesta
- d) Selección del diseño experimental
- e) Monitoreo del experimento
- f) Análisis de resultados
- g) Conclusiones y recomendaciones

2.3 ROCAS CON MEDIOS POROSOS HOMOGÉNEOS

Existen rocas homogéneas únicas provenientes de los Estados Unidos, siendo las más utilizadas en Colombia por su parecido con las propiedades y composición de los yacimientos de hidrocarburos colombianos. Estas rocas homogéneas, están conformadas por areniscas y carbonatos, las cuales son usadas en la industria petrolera como medios porosos estándar. Los datos obtenidos para determinar la homogeneidad de estas rocas, fueron probados mediante experimentos, en donde

²⁰MONTGOMERY, Douglas C. "Design and analysis of experiments". John Wiley & Sons, 2008.p. 13-17

también se realizaron comparaciones con núcleos de yacimiento, llegando a la conclusión de que sus propiedades son similares a las de yacimientos de hidrocarburos.

A continuación se realiza una breve descripción de los tres tipos de rocas homogéneas existentes.

2.3.1 Areniscas de Berea. Las areniscas de Berea se encuentran ubicadas en la región Nor-central de Ohio.

Estas rocas están caracterizadas por ser homogéneas debido a su composición y uniformidad, dividida en dos unidades. La unidad inferior conocida como “Orange Berea” se caracteriza porque está compuesta por roca de grano grueso y por poseer mala selección en sus granos. La unidad superior (Upper Unit) por poseer grano fino y una buena selección en sus granos, con un rango de tamaño de grano de 70 a 400 μm , esta es la más usada en la industria del petróleo para hacer pruebas con núcleos en los laboratorios.

La composición de la Upper Unit es de Cuarzo (85 -90%), Feldespato (3-6%), cementado por sílice, Dolomita (1-2%), Arcillas (6-8%) y trazos de sulfuro de hierro²¹. En la figura 3 se observan una de las muestras de estas rocas de Berea.

²³CHURCHER, P. L., et al. "Rock properties of Berea sandstone, Baker dolomite, and Indiana limestone". *SPE*, 1991, vol. 21044, p. 433

Figura 3.Muestra de un núcleo de Berea



Fuente: Laboratorio de petrofísica y daño a la formación. Guatiguará, Piedecuesta.

Según estudios las Rocas de Berea poseen en la unidad superior “Upper Unit” un rango de permeabilidad de 114 a 1168 mD y un rango de porosidad de 19.04 a 26.10%. En la unidad menor “Orange Berea” presenta un rango de permeabilidad de 1272 a 2520 mD, y un rango de porosidad de 25 a 26.11%.²²

2.3.2 Dolomitas de Baker. Es una dolomita carbonizada que se formó en una zona de baja profundidad situado en el mar interior de una zona poco profunda durante el tiempo Silúrico Medio.

Hay dos tipos distintos de Dolomita de Baker que están disponibles, la dolomita “Dark Buff Coloured” presenta un tamaño de grano de aproximadamente 180 μm y la dolomita “Light Buff Coloured” de grano fino (75 μm). La dolomita de Baker era extraída por J. E. Baker Company en Millersville, Ohio. Esta sección de la mina fue posteriormente adquirida por Steetle y Resources Ltd., Ohio Lime Company y la sección de la mina que contenía estas unidades de roca fue abandonada²³.

²⁴CHURCHER, P. L., et al. “Rock properties of Berea sandstone, Baker dolomite, and Indiana limestone”. *SPE*, 1991, vol. 21044, p. 435.

²³CHURCHER, P. L., et al. “Rock properties of Berea sandstone, Baker dolomite, and Indiana limestone”. *SPE*, 1991, vol. 21044, p.432-434.

Están compuestas principalmente por Dolomita y los resultados obtenidos al realizarle pruebas a este tipo de roca, indicaron que había trazos de Illita, Cuarzo y Clorita.

Las rocas de Baker presentan un rango de porosidad de 19.11 a 24.74 % y un rango de permeabilidad de 173 a 201 mD.²⁴

2.3.3 Calizas de Indiana. También conocida como las calizas de Salem, se formaron en el mar interior de una zona poco profunda durante el tiempo Mississipico.

La roca es una caliza con granos cementados formados de los fragmentos de fósiles (principalmente briozoos, equinodermos, foraminíferos, braquiópodos y moluscos) y partículas de carbonato de calcio de forma concéntrica laminares nombrados oolitas. Las rocas encontradas en el yacimiento pueden ser divididas en dos grupos, la caliza menor “Grey Coloured” y la caliza mayor “Buff Coloured”, la caliza menor presenta una baja permeabilidad a comparación de la caliza mayor. La caliza mayor presenta una buena porosidad y permeabilidad. Ambas rocas son extraídas por el Instituto Indiana de América Inc. Un estudio de muestras de las Calizas de Indiana, presentaron rangos de porosidades de 12.10 a 21.10 % y un rango de permeabilidades de 4 a 57 mD.²⁵

2.4 DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA DE UNA ROCA

La descripción litológica es una técnica geológica necesaria para estudiar detalladamente una roca de acuerdo a su procedencia, su composición y propiedades texturales de las partículas que contiene una roca.

Esta técnica permite una descripción amplia de las características geológicas, físicas y mineralógicas de la roca, teniendo en cuenta el tipo de roca a estudiar.

²⁴CHURCHER, P. L., et al. “Rock properties of Berea sandstone, Baker dolomite, and Indiana limestone”. *SPE*, 1991, vol. 21044, p. 436.

²⁵CHURCHER, P. L., et al. “Rock properties of Berea sandstone, Baker dolomite, and Indiana limestone”. *SPE*, 1991, vol. 21044, p. 432-436.

2.4.1 Propiedades de las rocas sedimentarias necesarias para realizar la descripción litológica. Los sedimentos que posteriormente forman la roca, tienen un proceso para llegar a formar las rocas sedimentarias. Estos sedimentos durante su transporte y formación le dan a estos ciertas características que hacen particular a cada roca.

Al formarse las rocas sedimentarias después de haber pasado por todo un proceso, llegan a poseer sus propias características las cuales están basadas en las partículas que componen la roca, su tamaño, su origen y su orientación y distribución dentro de la roca.

A continuación se dará una breve descripción de las principales características que conforman las rocas sedimentarias necesarias para realizar una detallada descripción litológica.

2.4.1.1 Tamaño. El tamaño de las partículas que conforman una roca depende principalmente de la distancia recorrida, desde su lugar de origen hasta su depositación; si la distancia que estas recorrieron es mayor, el tamaño de las partículas será menor y si esta es menor, el tamaño de las partículas será mayor.

Las partículas que conforman las rocas sedimentarias se agrupan según su tamaño en tres familias:

- Gravas (partículas con diámetro mayor a 2 mm)
- Arenas (partículas con diámetro entre 1/16 mm y 2mm)
- Lodos (partículas con diámetro menor a 1/16 mm)

En la figura 4 se observan los diferentes tamaños de grano, los cuales se encuentran distribuidos en las tres familias anteriormente mencionadas.

Figura 4. Tamaño de las partículas de la roca



Fuente: BUENDIALOMBANA, Hernando. "Descripción litológica". Presentación análisis petrofísicos. 2010

Dependiendo del tamaño de las partículas que predominan la roca se denominan como muy finas, finas o gruesas y se generan los conglomerados, areniscas o lodolitas²⁶. Existen varios tipos de escalas para determinar el tamaño de grano de una partícula, entre las cuales una de las más destacadas es "la escala de WENTWORTH". El tamaño de una partícula no se puede definir con precisión a menos que esta sea completamente esférica y regular. Existen varios métodos que permiten determinar el tamaño de grano, entre más irregular sean las partículas más discrepancia habrá en las medidas.

2.4.1.2 Selección o calibrado. La selección o calibrado es la agrupación de las partículas del mismo tamaño o la variación de este que conforman la roca. El grado de selección es el reflejo de la energía de depositación, en la cual los sedimentos fueron transportados y según su densidad o tamaño se depositaron y agruparon, este proceso es conocido como selección o sorteo, siendo una propiedad de la roca, importante para una descripción litológica.

En la figura 5 se observa la selección de las partículas cuando estas se encuentran agrupadas y según la uniformidad de su tamaño se definen desde muy bien seleccionadas hasta muy pobremente seleccionadas.

²⁶BUENDIALOMBANA, Hernando. "Descripción litológica". Presentación análisis petrofísicos. 2010.

Figura 5. Selección o calibrado de las partículas



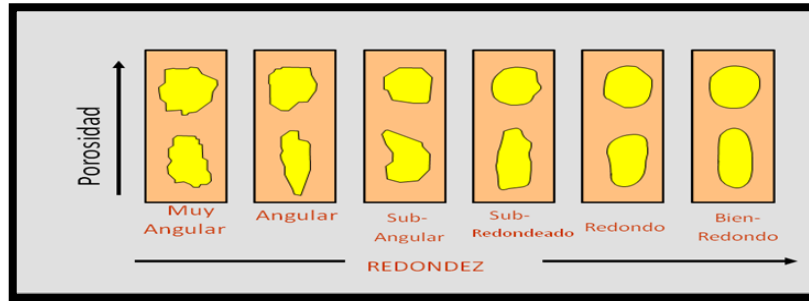
Fuente: BUENDIA LOMBANA, Hernando. "Descripción litológica". Presentación análisis petrofísicos. 2010.

2.4.1.3 Forma de las partículas. La forma de las partículas está relacionada principalmente con dos factores: la esfericidad y redondez.

- **Esfericidad:** Es una medida de que tan cerca se encuentra el grano a la forma de una esfera, existen dos medidas, la de alta esfericidad y baja esfericidad. Para obtener esta medida de manera cualitativa en una lámina delgada se cuenta con un marco de comparación ya establecido, de donde podemos determinar una esfericidad alta y baja.
- **Redondez:** La redondez hace referencia a la angulosidad de las partículas y las esquinas o bordes que están presentando, los cuales se forman por el movimiento e impacto con las demás partículas. Existen seis clases de redondez: muy angular, angular, sub-angular, sub-redondeada, redondeada y muy redondeada, como se muestra en la figura 6²⁷.

²⁷BUENDIALOMBANA, Hernando. "Descripción litológica". Presentación análisis petrofísicos. 2010.

Figura 6. Redondez de una partícula

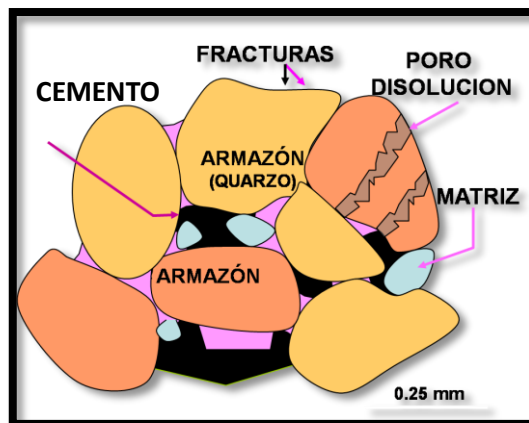


Fuente: BUENDIA LOMBANA, Hernando. "Descripción litológica". Presentación análisis petrofísicos. 2010.

La redondez como se observa en la figura 6 es un factor que afecta la porosidad, entre más redondeada sea la partículas mayor será su porosidad.

2.4.1.4 Fábrica de los granos. La fábrica se refiere a la relación espacial entre la matriz y los granos en una roca sedimentaria como se observa en la figura 7. En la fábrica intervienen los conceptos de empaquetamiento, armazón, matriz y cemento²⁸.

Figura 7. Fabrica de los granos



Fuente: BUENDIA LOMBANA, Hernando. "Descripción litológica". Presentación análisis petrofísicos. 2010.

²⁸BUENDIALOMBANA, Hernando. "Descripción litológica". Presentación análisis petrofísicos. 2010.

- **Empaquetamiento:** Se define como la proporción de espacios vacíos o rellenos por cemento o fracción arcillosa fina existentes entre los granos. Esta característica controla en parte la porosidad de la roca y la distribución del tamaño de poro, aspectos que son esenciales al evaluar el transporte de un fluido por medio del sistema poroso de las rocas.

- **Almacenamiento:** El almacenamiento de una roca sedimentaria son las partículas de mayor tamaño y determina si la roca es:
 - Grava soportada

 - Arena soportada
 - Bio-soportadas

- **Matriz:** La matriz de una roca es el material de menor tamaño que se encuentra en los espacios dejados por el almacenamiento ya sea de arena o grava²⁹. La matriz de una roca depende principalmente de su almacenamiento y puede ser:
 - Arenosa
 - Lodosa
 - Arena-lodosa
 - Arena-gravosa
 - Grava-arena-lodosa (caso muy especial y se da solo para materiales de tamaño muy grueso)

- **Cemento:** Es el material que se precipita químicamente en los poros dejados por el almacenamiento. El cemento es el encargado de unir los granos, evitando que estos se separen y permiten que la roca se haga más fuerte.

²⁹ BUENDIALOMBANA, Hernando. "Descripción litológica". Presentación análisis petrofísicos. 2010.

2.5 FUNDAMENTOS PETROFÍSICOS

La petrofísica es el estudio de las relaciones en las propiedades físicas texturales y químicas que tiene la roca y los fluidos que estas contienen, basado principalmente en el análisis de corazones o registros de pozo.

Los parámetros principales a estudiar para evaluar una formación, son, la porosidad (ϕ), permeabilidad (K), y la saturación de agua S_w ³⁰. Para interés de esta investigación se estudiarán principalmente los dos primeros parámetros mencionados debido a que son los más influyentes al fabricar medios porosos sintéticos.

2.5.1 Porosidad. La porosidad denotada como (ϕ), es la capacidad que tiene la roca para almacenar fluidos, tales como, agua, aceite y gas. Las porosidades se clasifican de acuerdo al ordenamiento físico del material que encierra un poro y a la distribución y forma de los poros³¹.

Matemáticamente se define como el volumen poroso sobre el volumen total de la roca. La unidad de medida es el porcentaje.

Ecuación 14. Porosidad

$$\phi = \frac{V_p}{V_t}, [\%]$$

ϕ : Porosidad (%)

V_p : Volumen poroso

V_t : Volumen total

³⁰CASTILLO MARTÍNEZ, Aldemar. RÍOS SIERRA, Julio Rodolfo. "Caracterización petrofísica a partir de núcleos de perforación y registro de pozo para las areniscas de la formación mugrosa del campo colorado bloques I Y II". Tesis de pregrado. 2008.p 19

³¹CASTILLO MARTÍNEZ, Aldemar. RÍOS SIERRA, Julio Rodolfo. "Caracterización petrofísica a partir de núcleos de perforación y registro de pozo para las areniscas de la formación mugrosa del campo colorado bloques I Y II". Tesis de pregrado, p 19, 2008

La porosidad de una roca puede ser afectada por varios factores, reduciendo así la capacidad de almacenamiento de fluidos. Los factores principales que afectan esta propiedad son:

- Tipo de empaque
- Presencia de material cementante
- Geometría y distribución del tamaño de los granos
- Presión de las capas suprayacentes

2.5.2 Permeabilidad. La permeabilidad es la capacidad que tiene la roca para permitir el flujo de fluidos por el medio poroso. Esta depende del tamaño y forma del grano y de la comunicación de los poros. La unidad de medida es el Darcy³².

Esta medida puede ser calculada por medio de los núcleos de roca en el laboratorio y puede ser también calcula por la ecuación 15, asumiendo flujo laminar y que solo un fluido fluye por el medio poroso, conociéndose también como la permeabilidad absoluta, la cual se midió con el fin de realizar la formulación para la fabricación de los medios porosos sintéticos:

Ecuación 15. Ley de Darcy

$$K = \frac{Q}{A} \mu \frac{dL}{dp}, [mD]$$

$\frac{Q}{A}$: Volumen de flujo por unidad de área

μ : Viscosidad del fluido

$\frac{dL}{dp}$: Gradiente de presión en la dirección del flujo

A diferencia de la porosidad, la permeabilidad depende fuertemente del tamaño de grano de la roca. Un tamaño de grano mayor y poros grandes normalmente

³²CASTILLO MARTÍNEZ, Aldemar. RÍOS SIERRA, Julio Rodolfo. "Caracterización petrofísica a partir de núcleos de perforación y registro de pozo para las areniscas de la formación mugrosa del campo colorado bloques I Y II". Tesis de pregrado, p 22, 2008

poseen altas permeabilidades, mientras que rocas un grano más fino y camino de flujo tortuoso, presentan bajas permeabilidades.

2.6 ANTECEDENTES DE LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS

En la industria del petróleo es de gran importancia realizar estudios a formaciones con el fin de encontrar que tan viable o no son los yacimientos para la explotación de hidrocarburos, donde se requieren de muestras de roca, las cuales son obtenidas por medio del corazonamiento, estas son preservados y transportados para sus respectivos análisis en el laboratorio. Este es un proceso costoso y tedioso, por lo cual surge la necesidad de crear núcleos sintéticos, los cuales son construidos en el laboratorio con propiedades petrofísicas conocidas. La forma en que se han construido, ha venido evolucionando con el tiempo, para obtener más exactitud en su fabricación. A continuación se presentan algunos de los experimentos que se han desarrollado con el fin de encontrar soluciones a proyectos de investigación, siendo los plugs sintéticos la forma más viable para llevarlos a cabo.

2.6.1 Métodos para la fabricación de medios porosos sintéticos. La extracción de núcleos ha sido necesaria para las investigaciones de las propiedades petrofísicas en el laboratorio, ya que sin estos sería imposible llevar a cabo proyectos de ingeniería.³³ Debido a que el corazonamiento es un proceso de gran inversión y de una buena planeación, además es difícil tener acceso a los corazones del yacimiento, debido a que no se corazonan todos los pozos y son muy custodiados por el estado, por esto surge la necesidad de fabricar núcleos sintéticos en laboratorio con propiedades conocidas.

El primer método utilizado para la fabricación de núcleos sintéticos, fue debido a FERNANDEZ & CELIS, quienes en el 2012 realizaron un estudio de desplazamiento radial con medios porosos estratificados, en la Universidad

³³ RP40, A. P. I. "Recommended practices for core analysis". *Feb*, 1998, p 5.

Industrial de Santander, debido a que no se contaba con la inversión de núcleos nativos, dando paso al desarrollo de una metodología para crear núcleos sintéticos, la cual consistía en comprimir la masa del núcleo en un cilindro de material PVC, de forma manual³⁴. Este método se hacía de manera experimental, tantas veces, hasta llegar a las propiedades del núcleo deseada. La falencia de este método radicaba en la fuerza aplicada al cilindro de material de PVC, ya que este se expande, modificando el diámetro del núcleo, lo que consecuentemente afectaría la medición de las propiedades en el laboratorio, también, la compresión del núcleo manualmente, hacía notar que la medida era inexacta, debido a que si dos personas generan el mismo número de golpes, la compresión que se realice, no va a ser la misma.

ALARCON & CAVANZO en el 2012 realizaron pruebas con la metodología anteriormente descrita en el 2013, en un proyecto de investigación para realizar una prueba de desplazamiento radial en medios porosos homogéneos³⁵, en donde la compresión tampoco fue controlada, dando como resultado datos con un porcentaje de error considerable.

LOPERA, MEJIA & ZAPATA de la Universidad Nacional de Colombia, en el 2013 fabricaron muestras sintéticas por medio de arena de tamaños de grano conocidos saturados con salmuera de tal manera que no hubiera aire entre los granos que se comprimían dentro de una manga de caucho (Figura 8). Se observó una relación entre el tamaño de los granos, la permeabilidad absoluta y espacio poroso obtenido por medio de la bomba de desplazamiento (Figura 9), debido a que no se podía extraer de la manga, pues el núcleo se deforma, ya que no fue usado

³⁴FERNÁNDEZ DE CASTRO ROVIRA, Omar David. CELIS APARICIO, Laura Andrea. "Estudio experimental de procesos de inyección de agua en el equipo de desplazamiento radial con medios porosos estratificados". 2012. p 51.

³⁵ ALARCÓN, Andrés, CAVANZO, Emilio. "Estudio experimental de procesos de inyección continua de vapor el equipo de desplazamiento radial con medios porosos homogéneos", tesis de pregrado, 2013.

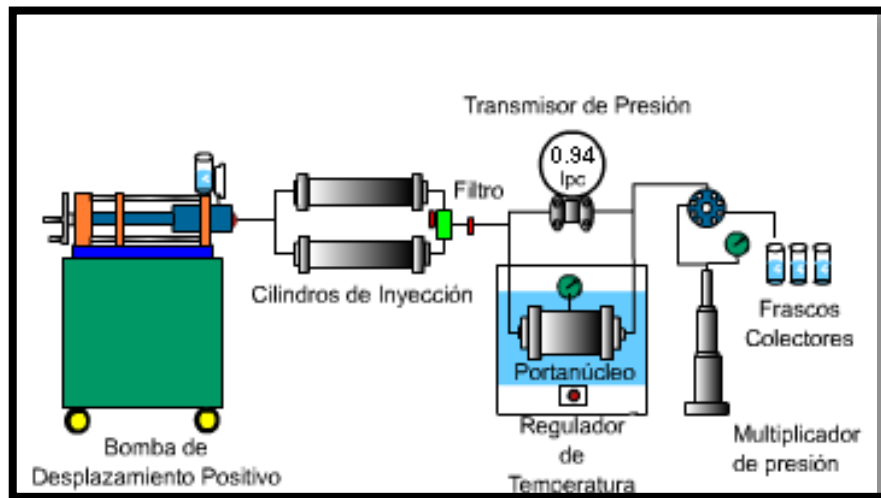
material cementante³⁶. De esta manera se fabricaban las muestras sintéticas, pero en la actualidad no poseen o no se conoce una formulación en la cual, conociendo las propiedades petrofísicas de un yacimiento, puedan construir tales muestras sintéticas.

Figura 8.Mangas de Caucho



Fuente: S. Lopera, F. Zapata, V. Mejía “Construcción de medios porosos artificiales para desplazamientos en medios porosos”. Artículo técnico. 2013.

Figura 9.Equipo de desplazamiento con muestra sintética



Fuente: S. Lopera, F. Zapata, V. Mejía “Construcción de medios porosos artificiales para desplazamientos en medios porosos”. Artículo técnico. 2013.

³⁶S. LOPERA, V. MEJÍA, F. ZAPATA. “Construcción de medios porosos artificiales para desplazamientos en medios porosos”. Universidad Nacional de Colombia-Ecopetrol. Artículo. 2013.

LIZCANO & PADRÓN, en el año 2014 realizaron un proyecto de investigación que constaba en la depositación de asfáltenos en un crudo colombiano, se implementó una herramienta para generar la compresión de manera más exacta en la construcción de muestras sintéticas, por medio de un torquímetro como se puede observar en la figura 10³⁷. La medida se basaba en el torque aplicado a la muestra para llegar a cierta compresión. Este experimento, dio como resultado una exactitud en la compresión de las muestras, el cual no fue estandarizado para varios rangos debido a que este proyecto requería llegar a un único valor de permeabilidad.

Figura 10. Montaje para la construcción de núcleos sintéticos con torquímetro.



Fuente: Padrón García, Robert Eduardo. Lizcano Niño, Juan Carlos. "Evaluación del efecto de la depositación de asfáltenos en el medio poroso a condiciones dinámicas para un crudo Colombiano". Tesis de pregrado. 2014.

³⁷LIZCANO NIÑO, Juan Carlos. PADRON GARCÍA, Robert Eduardo. "Evaluación del efecto de la depositación de asfáltenos en el medio poroso a condiciones dinámicas para un crudo colombiano". 2014.

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO ELECTRO-NEUMÁTICO PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS

3.1 GENERALIDADES

El diseño de un equipo en su esencia, significa transformar una idea en un equipo útil. Diseñar es formular un plan que satisfaga una necesidad específica para resolver un problema.

Teniendo esto en cuenta, el equipo se diseñó con base a la necesidad que se tiene en los laboratorios para ejercer presión controlable a muestras de roca sintética, que posteriormente se utilizan en pruebas de laboratorio.

Se necesitó de conocimientos de Neumática y elementos mecánicos mencionados anteriormente, y en el diseño se mencionan cuales fueron requeridos para este equipo en cuestión.

3.2 DISEÑO DEL EQUIPO

En el diseño del equipo se especifica lo que se debe tener en cuenta para realizar un equipo neumático, los elementos a usar y la función que debe cumplir para realizar un trabajo final.

3.2.1 Condiciones de un diseño. El diseño debe cumplir con el siguiente fin:

- **Funcional:** El producto diseñado debe cumplir con su necesidad propuesta y con las expectativas del cliente. La funcionalidad del equipo es generar presión a una mezcla usada para la fabricación de medios porosos sintéticos.

- **Seguro:** El producto diseñado no debe ser peligroso para el usuario, los transeúntes o la propiedad circundante. Los peligros que no se pueden eliminar con el diseño se resuelven con protección; si eso no es posible, se deben proporcionar instrucciones adecuadas o advertencias. El equipo se diseñó de tal manera que se evitara todo tipo de riesgo, que se podría generar al manipularlo.
- **Económico:** No solo se debe proyectar hacia una solución físicamente posible, sino hacia una de las soluciones seguramente comprendidas en el sector de máxima conveniencia técnico -económica. El equipo funciona con elementos básicos de la neumática, además de su tamaño pequeño, es muy económico conseguir sus partes para la construcción.
- **Confiable:** La confiabilidad es la probabilidad condicional de que, a un nivel de confianza dado el producto realizará su función propuesta en forma satisfactoria, o sin falla, durante un lapso de vida dado. La confiabilidad del equipo se basa en las partes instaladas para su funcionamiento, cada una de estas partes tienen garantía de alta durabilidad, en otras palabras es confiable y con una vida útil medianamente larga.
- **Competitivo:** El producto del diseño es un contendiente en el mercado. Este equipo es innovador, pues al ser poco manual y más automático, será muy apetecido por los interesados en la fabricación de medios porosos sintéticos.
- **Útil:** El producto del diseño está de acuerdo con el usuario, y se acomoda al tamaño, resistencia, postura, alcance, fuerza, potencia y control humano. La utilidad de este equipo se refleja mayormente en las instalaciones de los laboratorios, pues es donde más se necesitan los medios porosos sintéticos.

- **Se puede fabricar:** El producto del diseño se reduce a un número mínimo de partes que resulta adecuado para la producción en masa, y estas partes deben estar bajo control de adquisición. Este equipo se puede fabricar, debido a su bajo costo y a su gran utilidad, puesto lo hace rentable.
- **Se puede comercializar:** El producto del diseño se puede comprar y se dispone de servicio posventa de repuestos y mantenimiento. Si se puede comercializar, pero por el momento será una prueba piloto en los laboratorios del Parque Tecnológico de Guatiguará- Sede UIS.³⁸

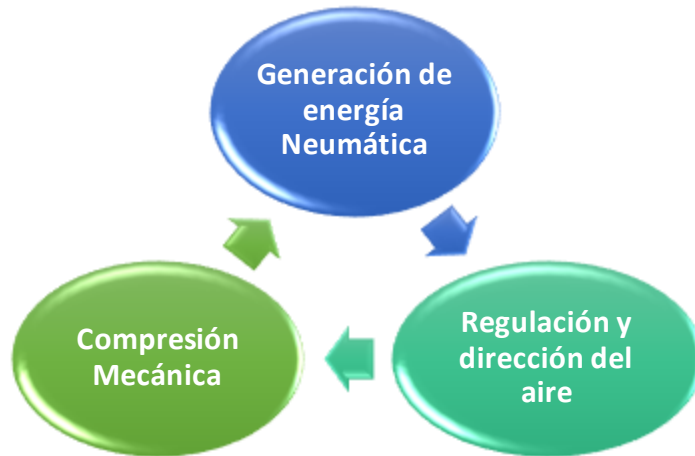
El equipo cumple con los puntos mencionados anteriormente, y tomando en cuenta esto se procede con diseño.

3.2.2 Diseño del Equipo. El equipo “Electroneumatic Syntetic Core” se conforma por tres unidades que son las siguientes:

- Unidad I: Generación de energía Neumática
- Unidad II: Regulación y dirección del aire
- Unidad III: Compresión Mecánica

³⁸MATTOLINI, Migue Ángel. “Catedra: Elementos de Máquinas y Equipos Industriales”. U.T.N. Facultad Regional Mendoza. 2010. p 3.

Figura 11. Unidades del equipo



Cada una de estas unidades cumple con una tarea específica, y contiene los elementos neumáticos, eléctricos y mecánicos principales para el funcionamiento necesario para cumplir la tarea en específica a realizar.

La Unidad I trata de la generación de energía. Esta unidad se diseñó de tal manera que el aire que se almacena y se comprime se pueda usar como fuente de energía y llevarlo al sistema para cumplir con la tarea específica que es accionar la unidad tres de tal manera que se genere la presión en la muestra.

En la Unidad II se diseñó un circuito para que el aire que entra al sistema se regule a una presión medida observable y se pueda direccionar el aire para que se expanda o se contraiga el accionado de compresión mecánica.

La Unidad III se diseñó de tal manera que el aire que se regula, sea convertido en energía mecánica y genere presión a una muestra de mezcla que se usa para fabricar de medios porosos sintéticos.

3.2.3 Descripción de las unidades. En esta sección se hablara de cada unidad mencionada en el diseño del equipo, y se detalla cada uno de los elementos

usados para la construcción del equipo y también el por qué se seleccionó y su funcionamiento.

En la neumática existen muchos elementos para conformar un equipo que funcione de manera correcta para un oficio específico. La idea principal para el funcionamiento de este equipo, es generar una presión de tal manera que se pueda controlar una de las variables usadas para la fabricación de medios porosos sintéticos.

Como se mencionó anteriormente hay muchos componentes que conforman un equipo neumático, y el equipo construido tiene elementos básicos. Las unidades y sus respectivos elementos se describen a continuación:

3.2.3.1 Unidad I: Generación de energía Neumática. En esta unidad se trata de la generación energía neumática, en otras palabras la obtención de energía por medio de una unidad compresora y almacenadora de aire. Para realizar esto usamos un compresor de aire que a continuación se describe:

- **Compresor:** La función de un compresor es aspirar aire a presión atmosférica y comprimirlo a una presión más elevada.³⁹

Como sabemos hay muchos tipos de compresores por ejemplo:

- Compresores de pistón
- Compresores rotativos
- Compresores centrífugos

Cada uno de estos compresores se emplean dependiendo al trabajo al cual se van a aplicar, para este proyecto se anticipó trabajar con una presión máxima de 100 psi, debido a pruebas realizadas, presentadas en el capítulo 4. Se utilizó un

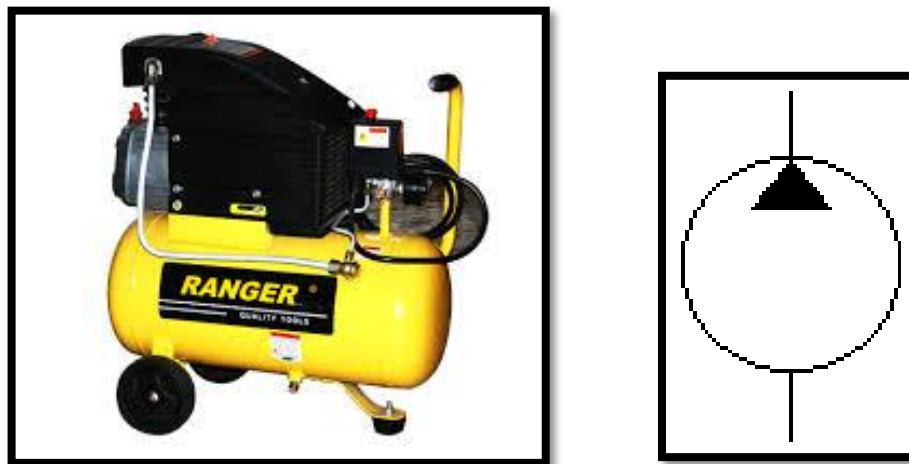
³⁹GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P 33.

compresor rotativo el cual trabaja con presiones menores que un compresor de pistón pero mayor que uno centrifugo.

El compresor empleado es tipo paleta y está constituido con un rotor en el cual van colocadas las paletas y el cuerpo del roto modifican su volumen, se produce la aspiración y mientras reduce el volumen, se produce el suministro de presión. Comercialmente el compresor adquirido tiene un tanque de almacenamiento, un filtro, regulador de presión y lubricador, todo incorporado en el mismo compresor, de tal manera que se habla de las especificaciones que el fabricante proporciona para la debida operación del compresor.

Para este proyecto se usó un compresor con las siguientes características:

Figura 12. Compresor y símbolo.



Fuente: Catálogo Online AFM Compresores S.A.

Tabla 3. Características del compresor RANGER

CARACTERÍSTICA	
Referencia	MPFL24
Código	1148002
Motor	2 HP- 1500 W
Capacidad del Tanque	6.6 gal -25 Litros
Cabezote (Bomba)	Lubricado por aceite mando directo
Presión	115 psi- 8 bar
Caudal	206 litros/min-8.2 Cfm

Fuente: Suministrado por el proveedor del producto.

- **Especificaciones del compresor:**

- **Conexión Eléctrica –Fusible:** El fusible en el enchufe debe ser sustituido por uno de la misma capacidad (13 amperios) y esta sustitución debe ser aprobada por ASTA a BS1362.

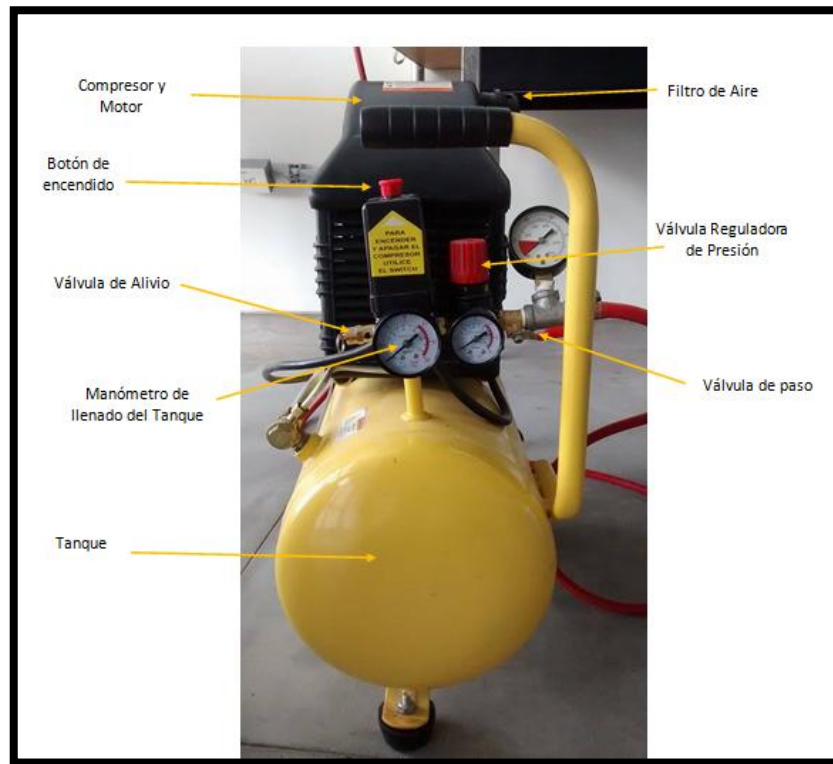
Es muy recomendable que la máquina está conectada a la red eléctrica a través de un dispositivo de corriente residual (RCD)

Si tiene alguna duda, consulte a un electricista calificado. NO intente repararlo usted mismo.⁴⁰

- **Partes de Identificación del compresor:** En la siguiente imagen se presentan todas las partes que presenta el compresor RANGER.

⁴⁰RANGER COMPANY. “Manual de Operación de Compresor de Aire Ranger MPFL24”. 2010

Figura 13. Partes del compresor



3.2.3.2 Unidad II: Regulación y dirección del aire. La unidad II está conformada con el circuito completo, que regula la presión y se la lleva al actuador neumático, el cual va a ejercer la presión sobre la muestra. También se va a direccionar el aire, indicando el estado del actuador (accionado/reposo). Las partes que conforman este circuito se describen a continuación.

- **Válvula Reguladora de Presión:** Los reguladores de presión tienen la misión de mantener constante la presión de trabajo con independencia de las variaciones de presión en el circuito en general.⁴¹ La presión de entrada (100 psi) es siempre mayor que la presión de salida (Regulable).

⁴¹GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P 42.

Al aumentar la presión de salida, la membrana se mueve venciendo la fuerza del muelle, por lo que la sección de paso en la válvula varía de modo continuo o se cierra por completo, regulándose la presión de salida a través del caudal que circula. Al consumirse aire, desciende la presión y la fuerza del muelle hace que se abra la válvula. La regulación de la presión de salida implica un constante abrir y cerrar la válvula.

Existen dos tipos de reguladores:

- De tres vías, con escape.
- De dos vías, sin escape.

En este proyecto se usó una válvula reguladora de presión de dos vías sin escape con manómetro, pues la idea principal del uso del equipo, es regular la presión que se aplica a la muestra a comprimir. Esta válvula se acciona levantando la parte superior del regulador hasta que se vea una franja naranjada, con esto se retira el seguro y se puede regular la presión a la presión de trabajo.

La válvula reguladora de presión tiene las especificaciones presentadas en la tabla 4:

Tabla 4. Características de la válvula de drenaje

CARACTERÍSTICA	
Modelo	AR2000-02
Calificación Flow	550
Bore Joint Pipe	G1 / 4
Rango de presión ajustable	0.05-0.85MPa
Max. Presión ajustable	1.0MPa
Resistencia a la presión asegurada operativo	1.5MPa
Rango de temperatura	5-60C
Tipo de válvula	Con rebosadero

Fuente: Suministrado por el proveedor del producto.

Figura 14. Válvula reguladora de presión y símbolo.



Fuente: Catálogo de Festo 2010.

- **Válvula Reguladora de Caudal:** Las válvulas reguladoras de caudal se usan principalmente para reducir o aumentar la velocidad en la que se transporta el aire por el circuito neumático.⁴²

Estas válvulas se dividen en dos grupos:

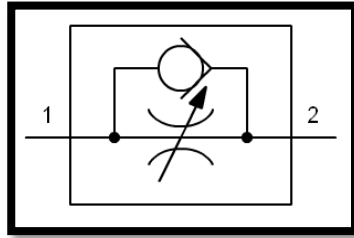
- Reguladores unidireccionales
- Reguladores bidireccionales

Para este proyecto se usaron dos válvulas reguladoras unidireccionales una de ellas regula el aire que sale de la electroválvula hacia el actuador neumático, la otra válvula regula el aire que va hacia el escape de la electroválvula.

Las válvulas unidireccionales permite la libre circulación del aire en un sentido, y en el contrario intercalan una estrangulación que fija el caudal del aire una vez determinada la presión.⁴³

⁴²GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P 65.

Figura 15. Válvula Reguladora de Caudal y símbolo.

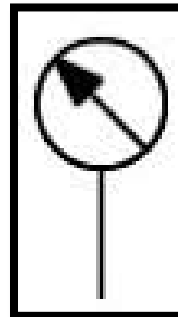


Fuente: Tecnoedu-Componentes neumáticos.

- **Manómetro:** El manómetro es un instrumento medidor de presión de fluidos contenidos en recipientes cerrados, en este caso aire.⁴⁴

El manómetro utilizado es un tipo Bourdon con Glicerina para evitar oscilación de la aguja al momento de medir. Tiene una escala de 0 a 100 psi. Y una rosca de entrada de 1/8 de pulgada.

Figura 16. Manómetro y símbolo.



- **Electroválvula Direccional:** La combinación de electricidad y neumática se usan frecuentemente en maquina e instalaciones. En este caso se usó una electroválvula direccional para hacer de manera automática por medio de un interruptor el accionamiento del equipo.

⁴³ GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P. 65

⁴⁴ GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P 52.

Las electroválvulas son usadas dependiendo a posición y vías a las cuales se van a distribuir. Se entiende por vía el número máximo de conductos que pueden interconectarse a través del distribuidor. El número de posiciones es el de conexiones diferentes que pueden obtenerse de manera estable entre las vías del distribuidor. Para este proyecto se escogió un distribuidor electro-neumático de 5/2 es decir cinco vías y dos posiciones.

Los distribuidores electro-neumáticos de 5/2 son de accionamiento servo pilotado eléctrico. La fuerza de accionamiento eléctrico para la inversión de la válvula piloto puede ser así muy pequeña, y la inversión propiamente considerada de la válvula principal se realiza por la presión de trabajo procedente del sistema neumático.⁴⁵

La electroválvula direccional tiene las siguientes características:

Tabla 5. Características de la electroválvula direccional

CARACTERÍSTICAS	
No Modelo	4V 100-400
Conexión	Rosca
Tipo	Accionado por Piloto
Uso	Control de Flujo
Presión	Presión Ordinaria
Actuador	Neumático
Distribuidor	5 vías y 2 posiciones
Marca	AirTop HLPC
Estándar	CE, SGS
Origen	Ningbo Zhejiag

Fuente: Suministrado por el proveedor del producto

⁴⁵ LLADONOSA, Vincent. "Circuitos Básicos de Electro neumática". Prácticas de Automatismo. Alfaomega-Marcombo Editores.1993. P 15.

Figura 17. Electroválvula direccional



Fuente: Catálogo online Direct Industry.

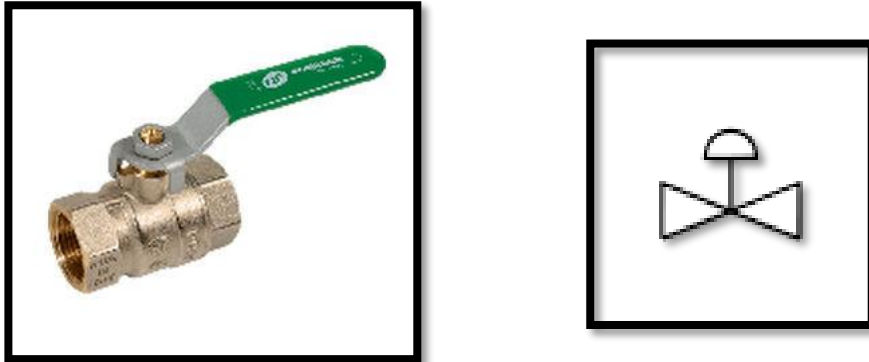
- **Válvula de Bola:** Una válvula de bola, conocida también como de "esfera", es un mecanismo de llave de paso que sirve para regular el flujo de un fluido canalizado y se caracteriza porque el mecanismo regulador situado en el interior tiene forma de esfera perforada.⁴⁶

Se abre mediante el giro del eje unido a la esfera o *bola* perforada, de tal forma que permite el paso del fluido cuando está alineada la perforación con la entrada y la salida de la válvula. Cuando la válvula está cerrada, el agujero estará perpendicular a la entrada y a la salida. La posición de la manilla de actuación indica el estado de la válvula (abierta o cerrada).

La válvula de bola usada en el proyecto es una de $\frac{1}{4}$ de pulgada y es usada para abrir el paso del aire hacia la unidad de compresión de la muestra.

⁴⁶GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P 38.

Figura 18. Válvula de Bola y símbolo.



Fuente: Spirax Sarco Catalogo General-Autores.

3.2.3.3 Unidad 3: Compresión Mecánica

- **Actuador neumático:** Los actuadores neumáticos son, por regla general, los elementos que realizan un trabajo. Su función es la de transformar la energía neumática en trabajo mecánico de movimiento rectilíneo, que consta de carrera de avance y carrera de retroceso.⁴⁷

Generalmente el actuador neumático está constituido por un tubo circular cerrado en los dos extremos mediante dos tapas, entre las cuales se desliza un pistón que separa dos cámaras. Al pistón va unido un vástago que, saliendo a través de una o ambas tapas, permite utilizar la fuerza desarrollada por el actuador en virtud de la presión del fluido al actuar sobre las superficies del pistón.

Existen varios tipos de actuadores neumáticos, pero según la forma como se realiza el retroceso del vástago se dividen en dos grupos:

- Actuador de simple efecto

⁴⁷ GUILLEN SALVADOR, Antonio. "Introducción a la Neumática". Alfaomega Grupo Editor S.A., México D.F. 1999. P. 31.

- Actuador de doble efecto

Para facilitar el trabajo en este proyecto, se usó un actuador neumático de doble efecto, pues por medio de la válvula electro-neumática, se puede direccionar el aire de tal manera que pueda entrar por la parte superior e inferior del actuador neumático generando la acción en las dos cámaras del actuador neumático.

El actuador neumático escogido para el trabajo es Cilindro normalizado DNU-PPV FESTO de doble efecto con un diámetro de 32 mm y una fuerza de 125 N, tiene de 30 mm de carrera del pistón, tiene amortiguación regulable para las dos cámaras y la norma que lo rige es la ISO 15552.⁴⁸

Figura 19. Actuador Neumático y símbolo.



Fuente: Catalogo de FESTO 2004-Autores.

⁴⁸ FESTO. "Datos Básicos Cilindros Neumáticos". Página WEB.

Tabla 6. Características Generales del Actuador neumático (Comercial)

CARACTERÍSTICAS	
Referencia	DNU-32-25-PPV-A
Fluido	Aire comprimido filtrado
Función	Cilindro de embolo circular
Presión de funcionamiento	8 bar
Material	Fundición de aluminio Si 12; Camisa del cilindro: Aluminio anodizado; Vástago: X20 Cr 13; Juntas: Poliuretano.

Fuente: Suministrado por el proveedor del producto.

Tabla 7. Características Generales del Actuador neumático (Físico)

Ø Pistón <i>mm</i>	Ø Vástago <i>mm</i>	Carreras estándar <i>mm</i>	Fuerza de avance <i>Kp.</i>	Fuerza de retroceso <i>Kp</i>	Consumo por ciclo en <i>cm³/mm</i>
32	12	25, 40, 50, 80	46,2	39,3	14

Fuente: Suministrado por el proveedor del producto.

- **Moldes:** Para la unidad tres fue necesario fabricar moldes que fueran reutilizables y que soportaran temperaturas de hasta 120 °. Además que cumplieran con la norma API RP 40.

La norma API RP 40 dice que el diámetro del núcleo debe ser entre 1 y 1.5 Pulgadas y que el largo de la muestra debe ser 1.5 veces mayor al diámetro.⁴⁹

De esta manera se fabricaron moldes de acero inoxidable, con un diámetro interno de 1.5 pulgadas y una longitud de 3.15 pulgadas.

⁴⁹ RP40, A. P. I. "Recommended practices for core analysis". Feb, 1998.

Figura 20. Moldes



3.3 PRINCIPIO FÍSICO

Como se enuncio en el marco de referencia, la neumática es regida por varias leyes, para enunciar el principio físico del equipo, se halla la fuerza a la cual trabaja el equipo para cada presión usada en el diseño experimental, el volumen de aire usado para cada trabajo y las pérdidas de carga en todo el sistema.

3.3.1 Presión. Para la ecuación 1 se despeja la fuerza.

Ecuación 16. Fuerza

$$F = P \cdot A, [\text{Lb fuerza}]$$

De donde el área es igual a:

Ecuación 17. Área del cilindro

$$A = 2\pi \frac{d^2}{4}, [\text{in}^2]$$

El diámetro que se usa como superficie que ejerce la presión, es del cilindro de acero inoxidable que se encuentra ensamblado al actuador neumático. El diámetro usado para ejercer la presión es de 1.5 pulgadas.

Por lo tanto el área es igual a:

$$A = 2\pi \frac{1.5^2}{4} = 3.53 \text{ in}^2$$

Tabla 8. Cálculo de Fuerza

Presión [psi]	Fuerza [Lb fuerza]
50	176,5
70	247,1
90	317,7
100	353

3.3.2 Ley de Boyle-Mariotte. Debido a que la temperatura es constante en todo el equipo, y no hay cambios de temperatura en la temperatura, se aplica la ley de Boyle-Mariotte, dada por la ecuación 4.

Con esta ley se puede calcular el volumen de aire usado en cada trabajo conociendo el volumen del tanque y la presión de entrada al equipo.

Los datos para este cálculo se convirtieron al sistema de unidad inglesa con lo que se obtuvo, la presión inicial del equipo es igual a 115 psi que se regula al salir del tanque y el actuador neumático tiene un consumo de $0.012 \frac{ft^3}{in}$ por ciclo, es decir que por cada pulgada que recorre hay $0.012 ft^3$ de consumo, la carrera que recorre el pistón es de 1.18 in y a una presión de 115 psi recorre toda la carrera, en otras palabras.

Tabla 9. Datos para cálculos de la ley de Boyle-Mariotte

Presión [psi]	Carrera [in]	Volumen [ft ³]
115	1.18	0.015

Con la ley de Boyle-Mariotte se calculó el volumen de aire que se consume con las presiones a la cual se trabajó y el recorrido que hace el actuador neumático con este volumen, con la temperatura constante, y se obtuvo:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$115 * 0.015 = 100 * V_2$$

$$115 * 0.015 = 90 * V_2$$

$$115 * 0.015 = 70 * V_2$$

$$115 * 0.015 = 50 * V_2$$

Tabla 10. Cálculo de volumen de consumo de aire por ciclo

Presión [psi]	Volumen [ft ³]	Carrera [in]	Consumo por ciclo $\left[\frac{ft^3}{in} \right]$
100	0,013	1,02	0.012
90	0,0117	0,92	0.012
70	0,00913	0,72	0.012
50	0,00652	0,51	0.012

3.3.3 Pérdidas de Carga. Es necesario calcular las pérdidas de aire que tenemos en todo el sistema neumático, y que la pérdida no supere el 0,1 bar de la carga de aire que está alimentando el equipo, como se mencionó en el capítulo anterior. De esta manera se calculó las pérdidas de la siguiente forma.

Primero se deben realizar los cálculos de la pérdida de carga, desde el compresor hasta la entrada del equipo, para este cálculo se usara la ecuación de Bernoulli (ecuación 10) y Darcy-Weisbach (ecuación 12).

Los datos conocidos para hacer los cálculos son:

Tabla 11. Datos para cálculos de pérdidas de carga

Datos		Valor	Unidad
Caudal	Q	0.12	ft^3/s
Densidad del Aire	D	0.075	lb/ft^3
Viscosidad del Aire	M	1.17E-5	Lb/ft.s
Gravedad	G	32	ft/s^2
Longitud	L	3.94	ft
Diámetro	D	0,05	ft

Con estos datos se calcula las pérdidas desde el compresor con una presión de $P_1=115$ psi hasta la entrada del equipo, en otras palabras se debe encontrar la presión a la entrada del equipo que será P_2 .

Primero se calcula el área:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0,05)^2}{4} = 1.96 \times 10^{-3} ft^2$$

Velocidad:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,12}{1.96 \times 10^{-3}} = 6.12 \frac{ft}{s}$$

Numero de Reynolds:

$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{0.75 * 6.12 * 0,05}{1.17E - 5} = 19615$$

El aire por ser un gas se encuentra en Régimen turbulento.

La rugosidad relativa de la tubería por ser de un material plástico tiene como coeficiente de rugosidad absoluta de $K=0,0015$ mm, y se convierte el diámetro a mm ($0.05 \text{ ft} = 15\text{mm}$), con estos datos se puede calcular:

$$\varepsilon_r = \frac{K}{D} = \frac{0,0015}{15} = 0,0001$$

Conociendo ε_r y R_e se entra a la gráfica de Moody (figura 1-1) y se halla el coeficiente de fricción.

Dando un valor de $f (R_e, \varepsilon_r) = 0,026$

Con esto se halla la pérdida de carga con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} = 0,026 * \frac{3.94}{0,05} * \frac{6.12^2}{2 * 32} = 12 \text{ ft}$$

Con este dato se puede usar la ecuación de Bernoulli sabiendo que la altura de P_2 es igual a $Z_2 = 0,85 \text{ ft}$, la velocidad se mantiene constante en todo el tramo, la presión $P_2 = 115 \text{ psi}$, y al no haber accesorios en este tramo $h_l = h_f$, entonces la ecuación 1-10:

$$Z_1 + \frac{144P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2g} - h_l = Z_2 + \frac{144P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Se reduce a:

$$\frac{144P_1}{\rho_1} - h_l = Z_2 + \frac{144P_2}{\rho_2}$$

De donde:

$$P_2 = \frac{\left(\frac{144P_1}{\rho_1} - h_l - Z_2\right)}{144} * 0.075 = \frac{\left(\frac{144 * 115}{0.075} - 12 - 0,85\right)}{144} * 0.075$$

$$P_2 = 111,24 \text{ psi.}$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 115 - 111,24 = 4,68 \text{ psi.}$$

Para las pérdidas en el circuito del equipo para calcular las pérdidas se usó la ecuación de Renouard, se manejaron en SI debido a la ecuación encontrada y se convirtieron los resultados al Sistema Ingles, se calculó dependiendo a las presiones de trabajo, y se obtuvo:

$$P_A^2 - P_B^2 = 51,5 * d_c L_c \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}}$$

Conociendo los siguientes datos:

Tabla 12. Datos para calcular pérdidas por la ecuación de Renouard

Datos		Valor	Unidad
Densidad del aire	Dc	1,18	km/m3
Longitud de tubería	Lc	1,5	m
Diámetro tubería	D	6	Mm

La ecuación de Renouard se puede dejar dependiente del caudal, y varía con la presión de trabajo, como se puede ver en la expresión:

$$P_A^2 - P_B^2 = 51,5 * 1,18 * 1,5 * \frac{Q^{1,82}}{6^{4,82}}$$

Reemplazando con los datos podemos obtener los datos de la tabla y consecutivamente, las pérdidas de aire en el circuito del equipo.

Tabla 13. Calculo de Perdidas de Presión en el equipo

Psi	P_A	$P_A^2 - P_B^2$	P_B	Psi	ΔP	Psi
	Bar		Bar		Bar	
100	6,89	1,151	6,806	98,78	0,084	1,22
90	6,205	0,949	6,128	88,898	0,077	1,102
70	4,8	0,601	4,737	69,9371	0,063	0,0629
50	3,44	0,325	3,392	49,31	0,048	0,69

Al hacer los cálculos, se observan que las pérdidas en las tuberías son pequeñas y no superan el 0,1 bar de pérdida de presión del aire en las líneas, de esta manera se comprueba la eficiencia del equipo en el momento de aplicar presión sobre la muestra sintética de roca.

3.4 FUNCIONAMIENTO

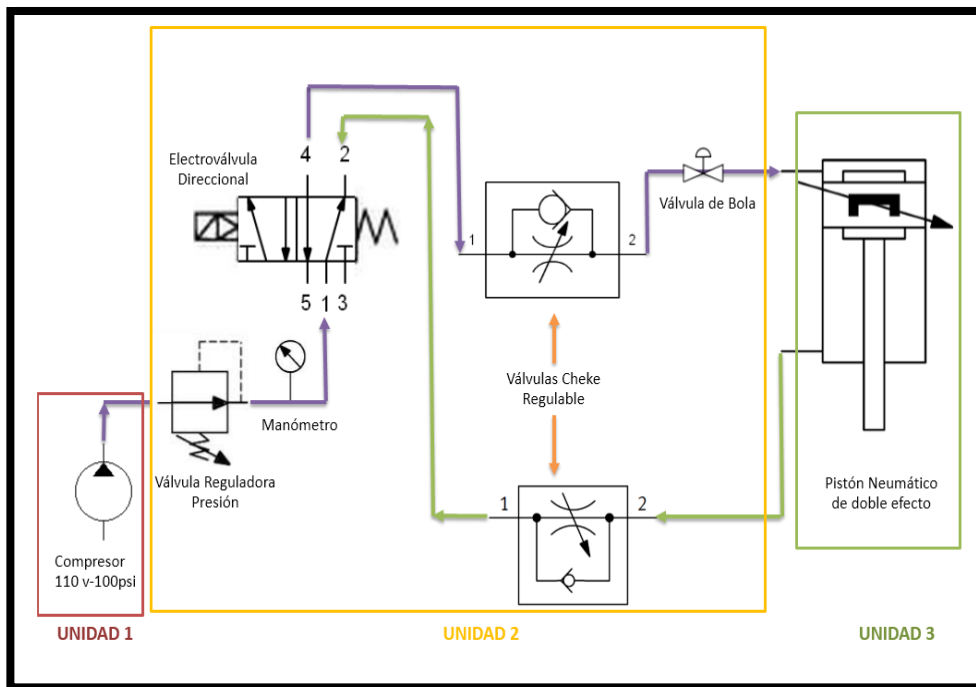
El funcionamiento de este equipo, empieza con el encendido del compresor el cual eleva la presión hasta un máximo de 115psi. Este aire es llevado al circuito electro neumático, el cual se encuentra con una válvula reguladora la cual se puede ajustar a la presión requerida para comprimir la muestra a fabricar. Esta presión se puede leer en el manómetro que se encuentra incorporado en el circuito. Luego que se regula la presión, el aire se direcciona hacia la electroválvula direccional, la cual abre paso hacia la unidad de compresión de la muestra conformada por un amortiguador.

Este se acciona al entrar el aire y se expande comprimiendo la muestra que se encuentra en el molde. Se debe dejar un tiempo, hasta que la presión se estabilice en el circuito. Después de comprimir, se debe accionar la válvula direccional de manera que re direcciona el aire por otra vía de la válvula, cambiándole el sentido al circuito, haciendo que el aire levante el amortiguador y se contraiga.

El equipo funciona en dos estados: Accionamiento y Reposo.

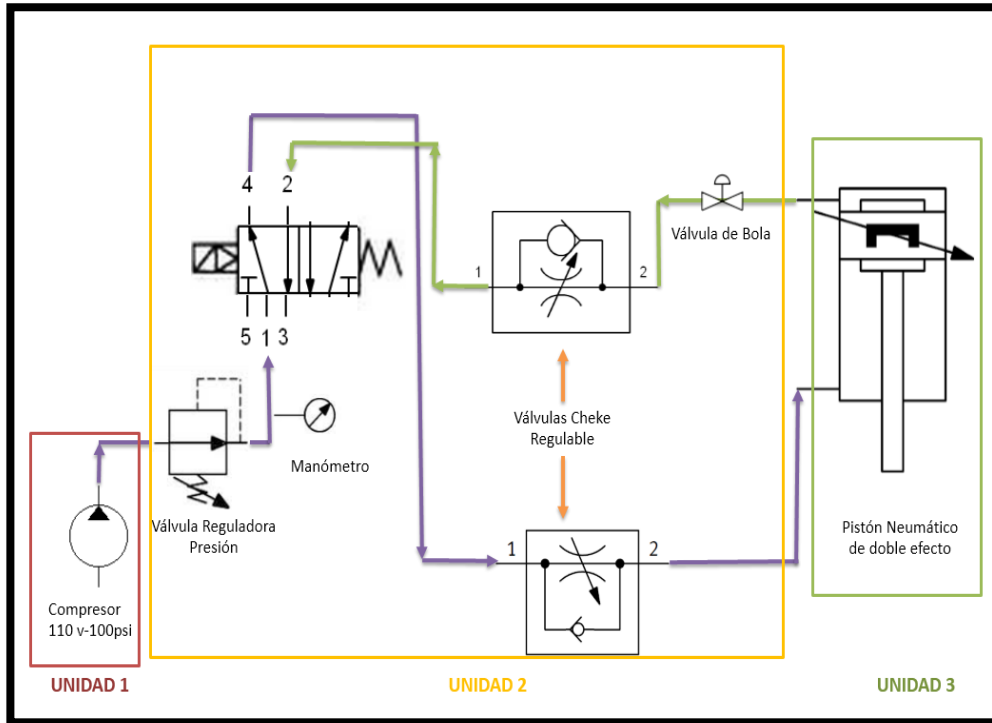
3.4.1 Accionamiento. El accionamiento es el estado en el cual el interruptor se encuentra en ON, este le indica a la electroválvula que se posicione en la vía 1-2 para que direccione el aire hacia el actuador neumático que va a realizar la compresión de la muestra, se puede observar en la figura 21 en la dirección del aire indicado por la flecha. El aire que se encuentra dentro del actuador es desplazado por la parte inferior del actuador al momento de la entrada de aire por la parte superior, este volumen de aire va hacia la válvula de alivio ubicada en la vía 4-5 de la electroválvula.

Figura 21. Grafica de las Unidades acopladas



3.4.2 Reposo. El reposo es el estado en el cual el actuador regresa a su estado inicial. Esto sucede cuando el interruptor se apaga pero el aire sigue circulando en el circuito, es decir al apagar el interruptor, la electroválvula cambia la dirección de aire por la vía 1-4, como se puede observar en la figura 22, donde el aire ingresa al actuador por la parte inferior del actuador, y saliendo por la parte superior hacia la válvula de alivio ubicada en la vía 2-3 en la electroválvula.

Figura 22. Diagrama de las Unidades Acopladas-Reposo



En las gráficas se ilustran cada uno de los componentes que conforman cada unidad y que anteriormente se especificó su funcionamiento. También se observa el circuito que recorre el aire para generar la presión final que cumple con la tarea específica de aplicar la presión para completar el procedimiento de la fabricación de medios porosos sintéticos.

3.5 PROCEDIMIENTO

Como producto final se entrega el equipo construido e instalado en los laboratorios del Parque Tecnológico de Guatiguará y se ilustra en la figura 23. A continuación se describe el procedimiento a seguir de manera segura y eficiente para el manejo del equipo.

Figura 23. Equipo construido e instalado



a. Chequeo previo:

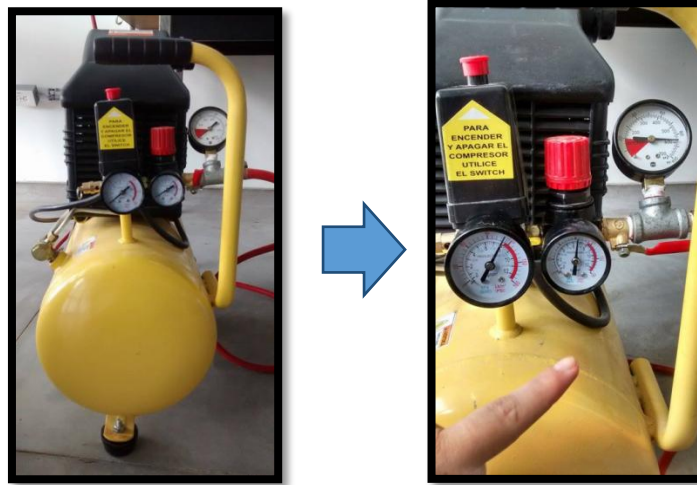
- Se debe conectar a la corriente alterna de 120v el compresor y el equipo.
- El equipo debe estar en estado de reposo (OFF)
- La válvula de bola que da paso al amortiguador debe estar cerrada.

b. Encendido del Compresor:

Se debe revisar que el tanque del compresor este lleno, para esto se observa el manómetro que tiene incorporado el compresor y que indica la cantidad de aire almacenado en él. Si se encuentra vacío, se procede a levantar el botón rojo que se encuentra encima del presostato. Esto se debe hacer con la válvula de paso cerrada.

También se debe verificar que la válvula reguladora que se encuentra en el compresor siempre este a 115 psi, debido a que se usara la máxima presión que pueda generar el compresor. Después del llenado, se procede a abrir la válvula de paso para dejar llegar el aire al equipo.

Figura 24. Encendido del compresor (tanque vacío y lleno)



c. Encendido del equipo:

El equipo debe pasar del estado de reposo (OFF) al estado de operación, previo a eso debe estar cerrada la válvula de bola para que no se accione el amortiguador.

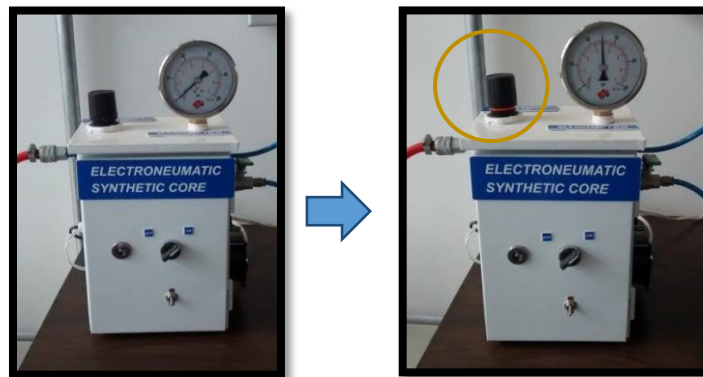
Figura 25. Encendido del equipo



d. Regular Presión:

El aire llega a una presión de 111 psi antes de la válvula reguladora, de esta forma se debe regular la presión que va a pasar por equipo y a la cual se desea comprimir la muestra. Para regular la presión se debe quitar el seguro de la válvula, alzado la tapa de modo que se vea una orilla naranja y así la válvula se deja regular a mayor presión hacia la derecha y a menor presión hacia la izquierda.

Figura 26. Encendido del equipo y presión regulada



e. Regresar al estado de reposo:

Se debe poner el equipo en estado de reposo y encenderlo de nuevo, para corroborar si la presión que se escogió se mantiene en la lectura del manómetro. Si la presión se mantiene se deja en estado de reposo.

f. Se abre la válvula de bola:

Para que el aire circule en todo el circuito del equipo, se debe abrir la válvula de bola, pero se debe hacer en el estado de reposo del equipo

Figura 27. Paso del aire



g. Introducir molde con mezcla:

Se debe poner el molde con la mezcla (previamente preparada) para hacer la muestra sintética, en el soporte debajo del amortiguador.

Figura 28. Acople del molde al equipo



h. Encendido y compresión:

Al encender el equipo nuevamente, se acciona el pistón, comprimiendo la mezcla depositada en el molde.

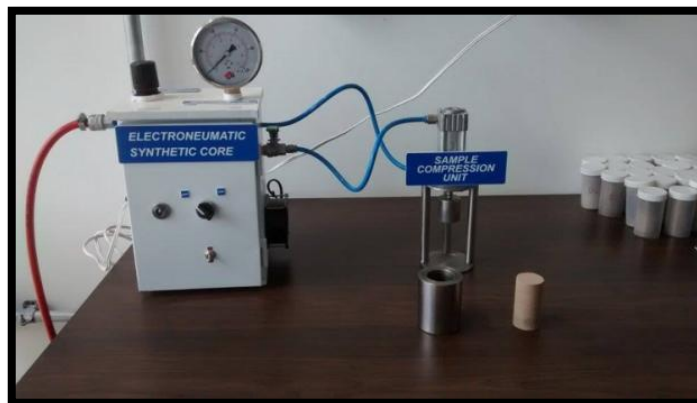
Figura 29. Encendido y compresión de la muestra



i. Retirar molde y tiempo de curado.

Después de la compresión la muestra se retira del equipo, y es llevada al horno para un tiempo de curado de 6 horas, luego se retira y se deja al ambiente un día completo. Después de este tiempo cumplido se pasa a la extracción de la muestra del molde.

Figura 30. Muestra extraída del molde



3.5.1 Diagrama del Procedimiento. A continuación se presenta en un diagrama el procedimiento para el uso del equipo resumidamente.

Figura 31. Procedimiento para uso del equipo



3.6 MANTENIMIENTO

El equipo se le debe realizar un mantenimiento específico a cada unidad por separado, de esta manera se hacen las debidas recomendaciones para la realización de un mantenimiento óptimo y seguro para que el funcionamiento del equipo sea eficiente en todo momento.

3.6.1 Unidad 1: Generación de Energía Neumática. A continuación se dará una breve descripción del mantenimiento de los generadores de energía neumática.

3.6.1.1 Compresor. Antes de realizar cualquiera de este trabajo de servicio, siempre desconecte la máquina de la red eléctrica, vacíe el depósito de aire y, si es necesario, deje que la máquina se enfríe antes de comenzar el trabajo.

- **Diario:** Antes de usarlo, siempre abra la válvula de drenaje para asegurarse de que cualquier condensado, que se haya acumulado, se drena.

Figura 32. Válvula de Drenaje (Purga)



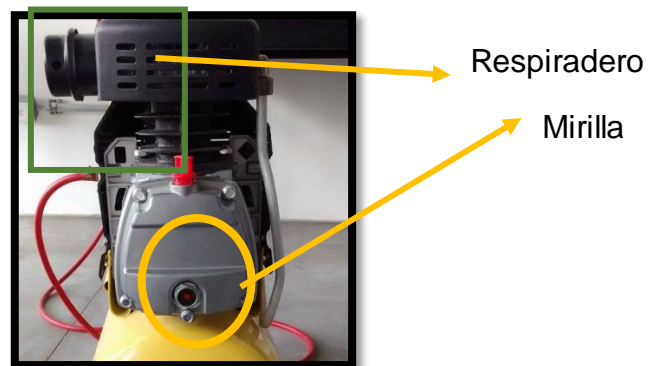
- **Mensual:** Es importante mantener el compresor limpio, con la ayuda de un pequeño cepillo limpiador y de vacío suave. En particular, el filtro de entrada de aire debe ser inspeccionado al menos mensualmente, y más a menudo en condiciones de mucho polvo, por lo que siempre se mantiene libre de las partículas de suciedad, que si no se limpian lejos afectará el rendimiento de la máquina.

Para limpiar el filtro de entrada de aire, primero retire la cubierta que tiene un cierre de bayoneta - gire en sentido anti horario la tapa y quite, luego oprima con cuidado el elemento de papel con su titular - se muestra en la figura 33. Limpie la carcasa del filtro completo con un paño o un cepillo.

Si el filtro está obstruido o mal ennegrecido, debe ser reemplazado. No es posible lavar el filtro.

Compruebe el nivel de aceite, que debe ser a medio camino a través de la mirilla, como se muestra en la figura 33. Retire el respiradero y recargue con el aceite del compresor Clarke (SAE40), usando un embudo. Al reemplazar el respiradero, desenrosque la tapa y compruebe el filtro para la limpieza, como se muestra en la figura 33. Si está muy contaminado, debe ser reemplazado, de lo contrario, puede lavarse suavemente con agua y jabón, enjuagarse y secarse antes.

Figura 4. Mantenimiento del Compresor (Filtro y nivel de aceite)



- **Solución de problemas:** Con el uso considerado, el compresor debe proporcionarle servicio largo y sin problemas. Las revisiones de rutina deben realizarse tanto en el suministro eléctrico, así como en todas las líneas y conexiones de aire comprimido. Si aparece algún fallo, se debe llamar a un técnico.

Tabla 14. Solución de problemas del compresor

PROBLEMA	CAUSA PROBABLE	SOLUCIÓN
El compresor se detiene y no se iniciará de nuevo	<ul style="list-style-type: none"> • Malas conexiones • Interruptor magneto térmico se ha disparado • Bobinas del motor quemadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verifique las conexiones eléctricas. • Limpie y apriete según sea necesario. • Apague y espere 5 minutos antes de encenderlo.
El compresor no llega a la carga y se recalienta fácilmente.	Junta de la culata soplada o válvula rota.	Espera a que el compresor se enfríe, desmontar la cabeza y reemplace los componentes rotos. Limpie cuidadosamente todas las superficies de sellado antes a montar el- bling.
Compresor no arranca.	Depósito de aire cargado	<ul style="list-style-type: none"> • Abrir el grifo de drenaje para eliminar el aire.

Fuente: Suministrado por el proveedor.

3.6.2 Unidad 2: Regulación y dirección del aire. Para el mantenimiento de la unidad dos, se deben tener listo las especificaciones de cada uno de los elementos, además tener en cuenta el mantenimiento de cada uno de los elementos por separado, para que el equipo siga funcionando en óptimas condiciones.

3.6.2.1 Válvula reguladora de presión. Para saber que la válvula este regulando adecuadamente, se debe encender el equipo, regular a la presión

deseada, apagar el equipo y encenderlo de nuevo. Si la válvula no está en la presión deseada, se regula de nuevo y se repite el procedimiento. Si a la tercera vez de aplicar el procedimiento no regula la presión, la válvula tiene alguna fuga o daño interno.

Para Reemplazar la válvula reguladora se debe quitar la rosca que la sujeta a la carcasa del equipo, liberando la válvula por la parte interna del equipo. Se instala la nueva válvula, con las mismas especificaciones de la manera como se retiró la anterior.

3.6.2.2 Válvula reguladora de caudal. La válvula ha sido regulada de tal forma que al paso del aire por la válvula sea constante el caudal, a dicha presión, por todo el sistema. Esta válvula no debe manipularse, ni cambiarse de este estado.

Si llega a presentar daño o mal funcionamiento, debe ser reemplazada, para realizar esto, debe desprenderse el tablero que se encuentra sujeto en la parte interna de la carcasa del equipo, se desconectan las mangueras de los racores, se remueven los tornillos y se retira la válvula defectuosa y se sustituye por la nueva con las mismas especificaciones a la anterior.

3.6.2.3 Manómetro. Al usar el manómetro se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La temperatura del lugar debe ser estable, como se usa en el laboratorio y la temperatura debe ser constante por el trabajo que se hace.
- En caso de daño, debe ser reemplazado por uno con las mismas condiciones.

3.6.2.4 Electroválvula Direccional. Al usar la electroválvula direccional hay factores que deben tener en cuenta.

- La parte eléctrica de una electroválvula tiene funcionamiento por medio de una bobina, si esta bobina se llega a quemar o a desgastar, debe ser reemplazada, si no se encuentra o no se tiene a la mano el repuesto. La electroválvula posee un botón de color rojo al lado de la bobina, la cual puede realizar el trabajo de la electroválvula manualmente. Solo se debe mantener el botón para hacer el cambio de dirección, en otras palabras funcionaria neumáticamente.
- Si la electroválvula se encuentra en óptimas condiciones, no debe ser manipulada directamente, debe ser accionada mediante el interruptor instalado en la parte externa de la carcasa del equipo.
- En caso de daño de la válvula, por escape o no cambia la dirección del aire. Debe ser reemplazada por una electroválvula con las mismas características.

3.6.2.5 Válvula de bola. Al usar la válvula de bola se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La válvula de bola instalada da el paso del aire hacia el actuador neumático, de tal manera que la válvula está en continuo cambio de estado (abierta o cerrada).
- Esta válvula se puede desgastar con la manipulación continua, si esto llega a pasar, debe ser reemplazada inmediatamente, antes de seguir trabajando con el equipo.

3.6.3 Unidad 3: Compresión Mecánica. La unidad de compresión mecánica debe estar en constante mantenimiento, debido a que es el punto donde se realiza el trabajo, y debe mantenerse limpio, organizado y funcional.

3.6.3.1 Actuador Neumático. El mantenimiento recomendado para el actuador neumático es:

- Limpiarlo de los residuos de material para fabricar medios porosos al momento de finalizar la compresión del material.
- Al momento que se le encuentren fuga al actuador debe ser reemplazado por uno nuevo, pero debe cumplir las mismas especificaciones del que se encuentra actualmente en el equipo, pues la base que lo sostiene esta adecuado para esas dimensiones. Por esta razón se puede desensamblar y reemplazar el actuador neumático con uno nuevo y seguir trabajando el equipo en las mismas condiciones.
- Si se va a reemplazar el actuador, lo primero que se debe retirar es la pesa de acero que se encuentra ensamblada al actuador, la cual ejerce la presión a la muestra Figura 34. Esta se retira con una llave de tubo pequeña y una llave #14. Después de retirar la pesa, se desatornilla de la base con una llave de Bristol y se procede a reemplazar el actuador. (Verificar que el actuador sea de las mismas especificaciones).

Figura 5. Unidad de compresión



3.6.3.2 Moldes. Después de la extracción de la muestra, los moldes siempre quedan con residuos de arena y solución epóxica, por esta razón se recomienda limpiar inmediatamente con un poco de aceite mineral y retirarlo con una toalla limpia.

Nota: No usar los moldes sin limpiar, pues se puede alterar la muestra con los residuos del material anterior.

3.7 CUIDADOS Y PRECAUCIONES

Para hacer un buen uso del equipo y evitar cualquier tipo de accidente se deben tener en cuenta lo siguiente:

- Usar guantes y gafas en la manipulación del equipo.
- Es preferible usar tapa oídos, pues el ruido que produce el compresor al momento de llenar el tanque de aire, puede llegar a ser muy ruidoso y peligroso para los oídos.

- Se debe limpiar tanto el equipo como los moldes, después de su manipulación, para evitar el pegue de material residual usado para la fabricación de medios porosos sintéticos.
- Se debe ser precavido al momento de cambiar el aceite en el compresor, pues se debe mantener aceite lubricante a la mano antes de que se acabe o se deseche el aceite que contiene el compresor.
- La purga al compresor se debe hacer diario, para evitar la corrosión en el compresor o el mal funcionamiento del equipo.

4. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS CON EL EQUIPO “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”

En el presente capítulo se analizarán todas las pruebas realizadas que se tuvieron en cuenta previamente para la fabricación de medios porosos sintéticos y hacer uso del diseño experimental. Que en este caso fue necesaria la utilización de la herramienta Statgraphics Centurion XVII-Academic License, versión 17.1.02, disponible en la Universidad Industrial de Santander sede parque tecnológico de Guatiguará, la cual permite generar el modo en que se debe construir cada muestra, teniendo en cuenta las principales variables a estudiar, siendo estas la composición de la muestra y la presión aplicada a esta.

Las pruebas realizadas se basaron principalmente en el procedimiento para la preparación de la mezcla obtenida para construir plugs sintéticos en los trabajos de grado realizados por el grupo de recobro mejorado en los años 2012 y 2013 en los cuales se estudiaron la inyección de agua y de vapor respectivamente, en el equipo de desplazamiento radial en medios porosos estratificados y homogéneos.

Para la fabricación de medios porosos sintéticos por medio del equipo construido y explicado detalladamente en el capítulo 3, se realizaron algunos cambios en el procedimiento de la preparación de la mezcla al hacer pruebas experimentalmente para asegurar principalmente la consistencia y homogeneidad de la muestra, y así obtener la formulación que permita construir núcleos sintéticos homogéneos con mayor exactitud.

4.1 PRUEBAS REALIZADAS

Antes de hacer la descripción de las pruebas realizadas experimentalmente en el laboratorio, se debe conocer los materiales necesarios para construir medios porosos sintéticos y tener claro el concepto de lo que es un núcleo sintético.

4.1.1 Materiales necesarios para la preparación de la mezcla de núcleos sintéticos. Los núcleos sintéticos son muestras de rocas realizadas en el laboratorio con materiales específicos que simulan los componentes reales de un núcleo nativo y dimensiones ya establecidas por norma en donde el diámetro del núcleo debe ser de una pulgada o de pulgada y media (1" - 1.5"), y la longitud del núcleo debe ser uno y medio veces mayor al diámetro, esto con el fin de garantizar la representatividad de las mediciones.

Para realizar la mezcla de una muestra sintética, se usan los siguientes materiales: arena; caolín blanco, que simula la arcilla de una roca y la solución epóxica conocida como "gemelos", debido a que contiene un envase con resina y otro con endurecedor en igual cantidad, esta solución representa el cemento de la roca el cual permite la unión de los granos presentes en la muestra.

A continuación se presentan los materiales seleccionados para fabricación de muestras sintéticas.

- **Selección de Arena:** Para seleccionar el tipo de arena a usar en las muestras, los factores más influyentes fueron la facilidad en que se puede obtener y la economía de esta.

Principalmente se pretendía comprar arena prefabricada con tamaños de grano específicos de 50 y 100 mesh para la elaboración del proyecto, pero debido a los altos costos de un kilo de arena el cual se encuentra alrededor del millón de pesos se descartó este tipo de arena. Por este motivo se encontraron las opciones de arena de río o arena de peña. Se escogió la arena de peña debido a que es menos sucia y contiene una mejor selección de sus granos.

Para tener una idea de que tan factible es este tipo de arena proveniente de una peña ubicada en Girón- Santander, la cual pasó por la malla 50, Para conocer la cantidad de arena obtenida de 1000 gramos de arena NO seleccionada, al pasarla por la malla Mesh 50.

Como se puede observar en la figura 36, de 1000 gramos de arena NO seleccionada se obtiene alrededor de 425,72 gramos, lo que confirma que se puede recuperar más del 40% de la arena, llegando a ser muy económico y factible para el proyecto.

Figura 35. Arena Mal seleccionada



Figura 36. Arenas con buena y mala selección



- **Caolín:** Para la selección del caolín se tuvo en cuenta el usado en el trabajo de grado “Evaluación del efecto de la depositación de asfáltenos en el medio poroso a condiciones dinámicas para un crudo colombiano”⁵⁰, en el cual se hizo uso de los núcleos sintéticos por medio de la metodología realizada por el grupo de recobro mejorado.

En este proyecto se usó un tipo de caolín blanco marca FARAON distribuido en Colombia, el cual presenta una excelente selección, como se puede observar

LIZCANO NIÑO, Juan Carlos. PADRON GARCÍA, Robert Eduardo. “Evaluación del efecto de la depositación de asfáltenos en el medio poroso a condiciones dinámicas para un crudo colombiano”. 2014. p 94.

en la figura 37 y fue el seleccionado para realizar las muestras de este proyecto. Debido a que el caolín es similar al talco, no se tamiza.

Figura 37. Caolín blanco



- **Solución Epóxica.** La solución epóxica usada para la fabricación de los núcleos sintéticos de este proyecto fue la usada en el proyecto de grado “Evaluación del efecto de la depositación de asfáltenos en el medio poroso a condiciones dinámicas para un crudo colombiano”⁵¹, la cual es fabricada en Medellín – Colombia, soporta hasta 150 °C de temperatura, lo cual permite hacer uso del horno para el secado rápido de las muestras sintéticas.

En la figura 38 se pueden observar la resina y endurecedor necesarios para la unión de los granos que conforman la mezcla del núcleo sintético.

⁵¹ LIZCANO NIÑO, Juan Carlos. PADRON GARCÍA, Robert Eduardo. “Evaluación del efecto de la depositación de asfáltenos en el medio poroso a condiciones dinámicas para un crudo colombiano”. 2014. p 92.

Figura 38. Solución epóxica (resina – endurecedor)



4.1.2 Prueba para la determinación de la relación resina – endurecedor. En esta prueba principalmente se quería evaluar la cantidad de resina y endurecedor a usar, es decir en qué cantidad se debe agregar cada líquido.

Para la realización de esta prueba se construyeron seis muestras sintéticas incluidas la repetividad, basadas en el trabajo de grado “Evaluación del efecto de la depositación de asfáltenos en el medio poroso a condiciones dinámicas para un crudo colombiano”⁵², en el cual se realizó un cambio en la relación de la solución epóxica al trabajo realizado por el grupo de recobro mejorado⁵³, en donde el líquido dominante es la resina. El cambio se realizó en esta relación, en donde el líquido dominante usado es el endurecedor, el cual a partir de pruebas realizadas en el proyecto anteriormente mencionado llegó a la conclusión que la consistencia de la muestra era mejor cuando el líquido en mayor cantidad es el endurecedor. Para verificar cual era la mejor opción, se realizaron dos pruebas diferentes.

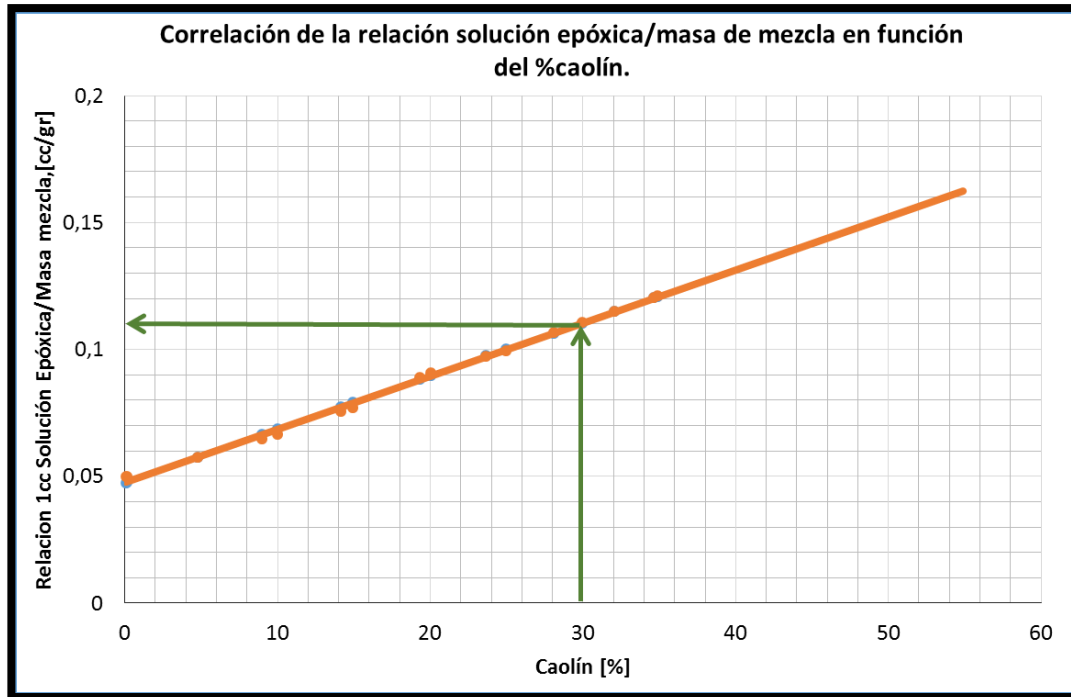
En la primera prueba se realizaron seis muestras en la cual se usaron 140 gr de masa de las cual el 30% era Caolín y el restante arena, la presión ejercida sobre las muestras fue de 50 psi. Como se observa en la figura 39, se lee la relación de 1cc de solución epóxica/masa de la mezcla, obteniendo así el volumen total de

⁵² LIZCANO NIÑO, Juan Carlos. PADRON GARCÍA, Robert Eduardo. “Evaluación del efecto de la depositación de asfáltenos en el medio poroso a condiciones dinámicas para un crudo colombiano”. 2014. p 94.

⁵³ FERNÁNDEZ DE CASTRO ROVIRA, Omar David. CELIS APARICIO, Laura Andrea. “Estudio experimental de procesos de inyección de agua en el equipo de desplazamiento radial con medios porosos estratificados”. 2012.p 51

solución epóxica, para este caso 15,4 ml de solución, para las muestras realizadas se varió la cantidad de endurecedor y resina a agregar, empleando siempre la misma cantidad de volumen total de solución

Figura 39. Correlación de la relación epóxica/masa de mezcla en función del % de caolín



Fuente: modificado de Alarcón, Andrés. Cavanzo, Emilio. "Estudio experimental de procesos de inyección continua de vapor el equipo de desplazamiento radial con medios porosos homogéneos", tesis de pregrado, 2013. p. 57.

En esta prueba se aplicó en mayor cantidad de Resina, y se varió la relación de Resina- Endurecedor de tres formas diferentes: 3 a 1, 2.5 a 1, 2 a 1. Para cada las muestras se obtuvieron las siguiente distribución de volúmenes (Tabla 15). Los resultados de la prueba se pueden observar en la figura 40.

Tabla 15. Cantidad de Resina- Endurecedor Primera Prueba

Muestra	Resina [ml]	Endurecedor [ml]
3-1	11,55	3,85
2.5-1	11	4.4
2-1	10.27	5.13

Figura 40. Muestras sintéticas con diferentes relaciones de solución epóxica con mayor cantidad de Resina



Como se puede observar la mayoría de muestras son muy sensible a la fractura, y no resisten presión mayores, ejercidas por los equipos del laboratorio. También se observó que a mayor cantidad de resina, menor es la consolidación en la muestra. De esta manera se prosigue con la segunda prueba.

Para la segunda prueba se dispuso de las mismas condiciones para las muestras anteriores a diferencia que se usó mayor cantidad de Endurecedor en la mezcla, con tres relaciones de solución diferentes, 3 a 1, 2,5 a 1, 2 a 1 y evaluar la mejor consistencia de la muestra y dar el uso adecuado de los líquidos que conforman la solución. Los volúmenes para cada muestra se encuentran en la tabla 16.

Tabla 16. Cantidad de Resina- Endurecedor Segunda Prueba

Muestra	Endurecedor [ml]	Resina [ml]
3-1	11,55	3,85
2.5-1	11	4.4
2-1	10.27	5.13

Los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 41.

Figura 41. Muestras sintéticas con diferentes relaciones de solución epóxica mayor cantidad de Endurecedor



Como se puede observar, las muestras que mejor consolidación presentaron, fueron la E 3-1, la E 3-2, E2.5-1 y E2.5-2, las cuales contenían una relación 3 a 1 y 2.5 a 1 de solución epóxica, por lo cual se decide aplicar la relación de 2.5 a 1, pues se observa la misma consistencia y se busca economizar los materiales para fabricar las posteriores muestras.

4.1.3 Prueba para el cambio de volumen de solución epóxica. Como se pudo observar en la figura 41, las muestras E 2.5-1 y E 2.5-2 presentaron una buena consolidación a comparación con las muestras de menor cantidad de endurecedor, pero al aplicar una fuerza con los dedos a estas muestras, se fracturaron como se observa en la figura 42. Dando por cierto, que debido a que el equipo usado para comprimir las muestras maneja bajas presiones, se debe aumentar la cantidad de volumen de solución epóxica dependiendo de las presiones a manejar.

Se fabricaron cuatro muestras para observar cuál de estas presentaba mejor consistencia. Las muestras V1.1 y V1.2 se fabricaron al modificar la figura 39, aumentando la relación a 0.055 cuando el caolín es 0% y las muestras V2.1 y V2.2 se fabricaron al modificar la figura 39 aumentando la relación a 0.065 cuando el caolín es 0%, como se muestra en la figura 43. Se observó que al aumentar el volumen de solución epóxica, mejora la consistencia de la muestra. De esta manera se modificó la gráfica, presentada en la figura 39 para obtener el volumen de solución epóxica donde se aumenta la relación a 0.065 cuando el caolín es 0%, con el cual se obtiene un mayor volumen de solución para aplicar a la muestra. Mostrado en la figura 44.

Figura 42. Muestra sintética E 31 fracturada



Figura 43. Muestras sintéticas construidas para verificar consolidación

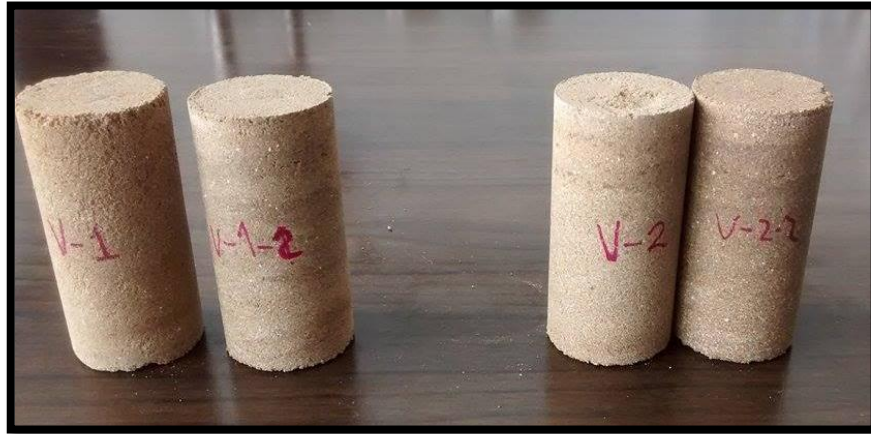
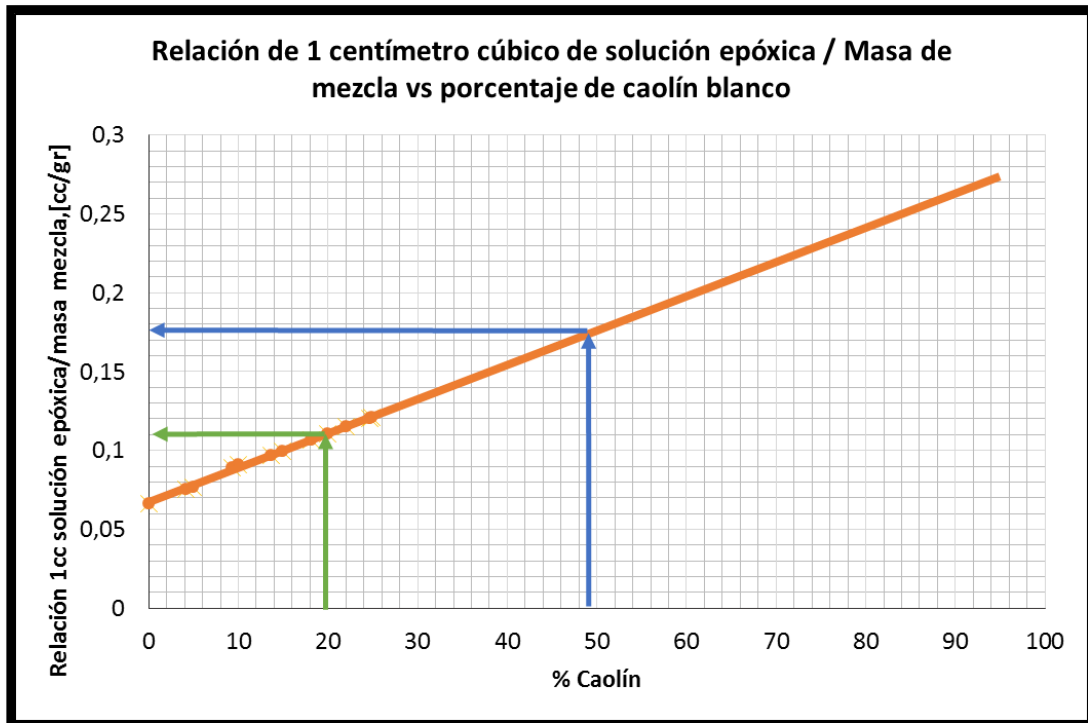


Figura 44. Correlación de la relación epóxica/masa de mezcla en función del % de caolín (Modificado)



A partir de la gráfica modificada presentada en la figura 44, se fabricaron varias muestras con un total de masa de 140 gr, para verificar que el volumen fuera el

correcto al momento de aplicarlo a la muestra. De esta manera en la figura 46 se observan tres de estas muestras y en la tabla 17 se observa su formulación.

Tabla 17. Muestras fabricadas a partir de la correlación modificada presentada en la figura 44.

Muestra	Caolín [%]	Presión [psi]	Relación leída en la (figura 3-10)	Volumen de Solución Epóxica [ml]
V3-1	50	50	0.175	22.75
V5-1	20	50	0.11	14.3
V6-1	50	50	0.175	22.75

Con la gráfica modificada se observó que el volumen mayor a 40% de caolín, se excedía dejando la masa de mezcla muy húmeda (figura 45), dejando las muestras como se observa en la figura 46, con muchos grumos, porosa y deforme (muestra V3-1).

Figura 45. Muestras sintéticas construidas para verificar consolidación



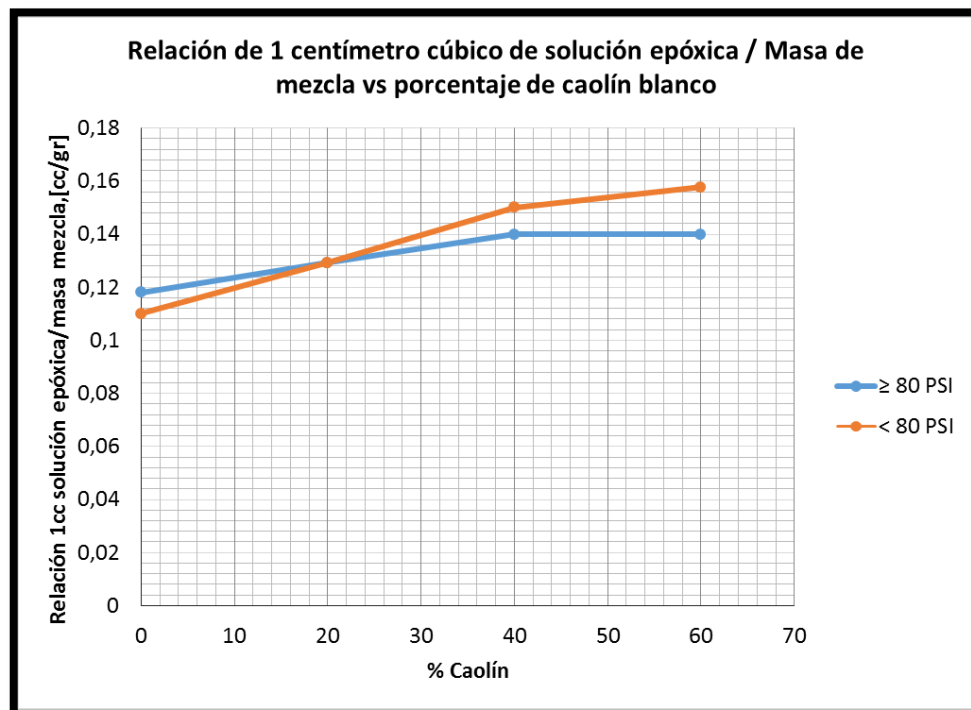
Al aplicar los volúmenes de la figura 44 a presiones por debajo de 80 psi, estas se fracturaban o quedan muy secas, de tal manera que se les aumento poco a poco el volumen de tal manera que fueran consistentes y soportaran una presión aplicada manualmente a la muestra, de esta manera se modificó el grafico nueva

mente para presiones por debajo de 80 psi y por encima de este, dejando como resultado la gráfica que se observa en la figura 47.

Figura 46. Prueba Solución Epóxica



Figura 47. Correlación de 1cc de solución epóxica/masa de mezcla vs porcentaje de caolín blanco (Modificada 2)



Para leer los datos de la figura 47, a presiones menores de 80 psi se leen de la línea naranja y por encima de 80% se lee en la línea azul, dando por visto que un porcentaje de caolín mayor a 40, la relación es contante.

4.1.4 Diseño experimental de prueba. El diseño experimental se realizó por medio del programa Statgraphics Centurion XVII-Academic License, versión 17.1.02 disponible en la Universidad Industrial de Santander sede Parque Tecnológico de Guatiguará.

Este programa requiere de ciertas variables proporcionadas por el usuario. La primera condición es seleccionar el tipo de diseño. El diseño es un multinivel factorial 3^2 , en donde el numero 3 indica los niveles a trabajar y el 2 las dos variables de entrada (Caolín y Presión). Para reducir el porcentaje de error en los experimentos se debe realizar una réplica por cada muestra, para un total de 18 muestras como se muestra en la figura 48 basada en los datos ingresados al programa. El procedimiento para el manejo del programa se presenta en el ANEXO A. En la figura 49 se puede observar la malla generada en el programa para fabricar las muestras aleatoriamente, de tal manera que se genere menor incertidumbre en los experimentos.

Figura 48. Atributos del diseño factorial multinivel

STATGRAPHICS Centurion - StatFolio sin título

Archivo Editar Definir Medir Analizar Mejorar Controlar Pronósticos SnapStats!! Herramientas Ver Ventana Ayuda

Libro de Datos StatAdvisor StatGallery StatReporter Comentarios del StatFolk Atributos de Diseño Fact

Atributos de Diseño Factorial Multinivel

Atributos de Diseño Factorial Multinivel
 Clase de diseño: Factorial Multilevel
 Nombre del archivo: <Sin Título>

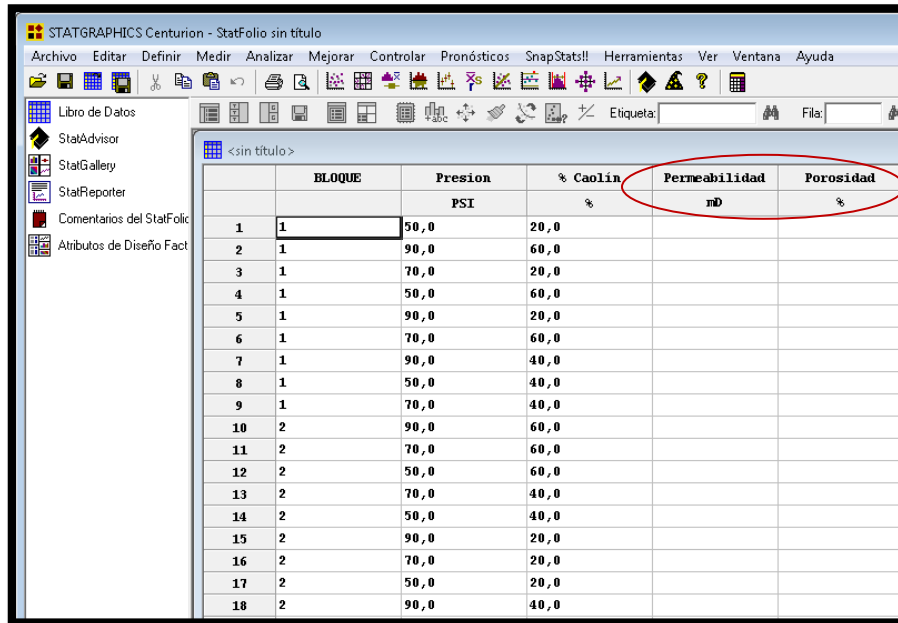
Diseño Base
 Número de factores experimentales: 2
 Número de bloques: 2
 Número de respuestas: 2
 Número de corridas: 18
 Grados de libertad para el error: 11
 Aleatorizar: Sí

Factores	Eajo	Alto	Niveles	Unidades
Presion	50,0	90,0	3	PSI
% Caolin	20,0	60,0	3	%

Respuestas	Unidades
Permeabilidad	mD
Porosidad	%

El StatAdvisor
 Usted ha creado un diseño factorial multinivel que consiste de 18 corridas. El diseño deberá ser corrido en 2 bloques. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado. Esto aportará protección contra el efecto de variables ocultas.

Figura 49. Libro de datos



	BLOQUE	Presion PSI	% Caolin %	Permeabilidad mD	Porosidad %
1	1	50,0	20,0		
2	1	90,0	60,0		
3	1	70,0	20,0		
4	1	50,0	60,0		
5	1	90,0	20,0		
6	1	70,0	60,0		
7	1	90,0	40,0		
8	1	50,0	40,0		
9	1	70,0	40,0		
10	2	90,0	60,0		
11	2	70,0	60,0		
12	2	50,0	60,0		
13	2	70,0	40,0		
14	2	50,0	40,0		
15	2	90,0	20,0		
16	2	70,0	20,0		
17	2	50,0	20,0		
18	2	90,0	40,0		

4.1.4.1 Fabricación de las muestras según del diseño experimental.

Según el diseño experimental se fabricaron 18 muestras teniendo en cuenta el procedimiento detallado en el numeral 4.2 del presente capítulo, haciendo uso de la figura 47, variando la cantidad de Caolín y la presión ejercida sobre la muestra y se puede observar en la figura 50.

A las muestras fabricadas se les realizó la medida de porosidad y permeabilidad, con el fin de realizar una formulación, para fabricar las muestras conociendo estas propiedades, Tabla 18. La porosidad de las muestras fue medida por medio del porosímetro de Boyle y la permeabilidad por medio del permeámetro CORE PET basado en la ley de darcy, el procedimiento para la determinación de las propiedades se presenta en el ANEXO B Y C, respectivamente.

Figura 50. Muestras fabricadas según diseño experimental. “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”



Tabla 18. Resultados “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”

Muestra	Caolín [%]	Presión [psi]	Volumen de Solución Epóxica [ml]	Porosidad [%]	Permeabilidad [mD]
D.1	60	90	18,2	24,03	1,3268
D.1-1	60	90	18,2	25,77	1,016
D.2	60	50	20,5	25,39	12,7597
D.2-1	60	50	20,5	26,20	13,119
D.3	40	70	19,2	25,13	5,784
D.3-1	40	70	19,2	26,10	2,02
D.4	20	50	16,8	27,98	57,6953
D.4-1	20	50	16,8	28,42	30,59
D.5	60	70	20,5	28,58	6,43
D.5-1	60	70	20,5	28,07	4,3
D.6	40	90	18,2	30,34	1,4
D.6-1	40	90	18,2	26,16	0,38
D.7	20	70	16,8	27,38	52,55
D.7-1	20	70	16,8	27,37	33,16
D.8	40	50	19,5	29,21	7,9
D.8-1	40	50	19,5	29,26	4,5
D.9	20	90	16,8	30,04	43,31
D.9-1	20	90	16,8	30,14	47,8179

Al medir las permeabilidades se debe aplicar una presión de confinamiento de aproximadamente 700 psi, una vez medida la permeabilidad de las muestras sintéticas, se extrajeron permeámetro y se observó una deformación en cada una de las muestras, excepto en las de mayor presión (90 psi), figura 51.

Figura 51. Muestras deformadas



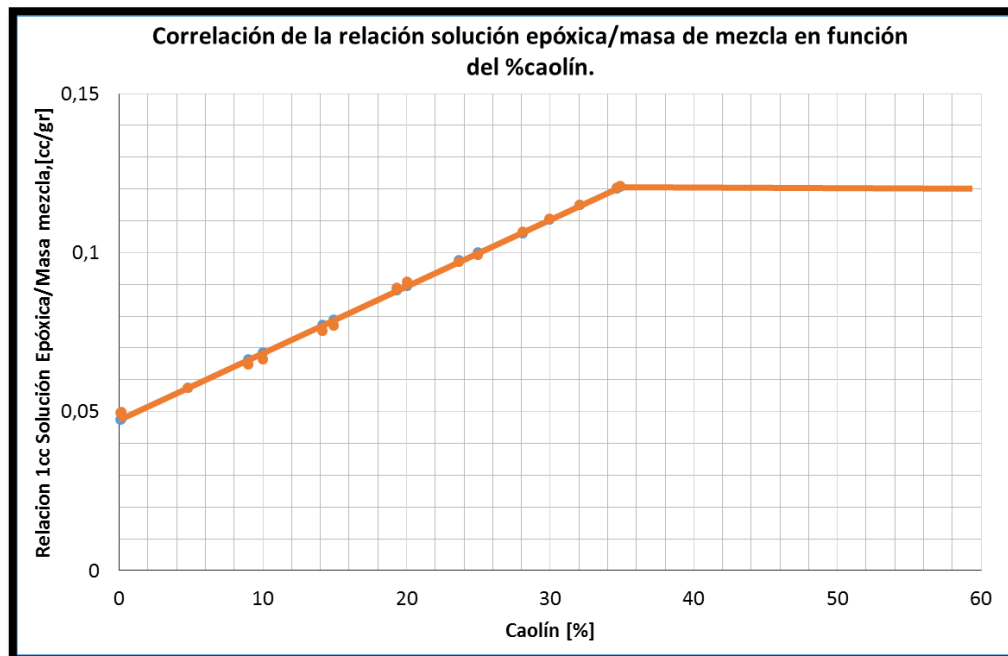
La deformación fue ocasionada por el alto volumen de solución epóxica aplicada a las muestras debido a que el equipo presenta bajas presiones. De esta manera se descartan las presiones por debajo de 90 psi debido a que las muestras requieren de mayor volumen de solución epóxica. Por otro lado, se observa que las que tiene mayor presión tienen menor volumen de esta solución y muestran una mejor consistencia (figura 52).

Figura 52. Muestra D1 no deformada



Se observa que para el uso del equipo “Electroneumatic Synthetic Core”, se debe usar su máxima capacidad de presión para la fabricación de muestras sintéticas, usando la Figura 53, donde por razones mencionadas en el numeral 4.1.3, se excede el volumen con mayor cantidad de caolín, de esta manera se deja constante este valor para %Caolín mayor a 40%. Al analizar las medidas de las propiedades petrofísicas, se decide disminuir el tamaño de grano (<100 mesh), para encontrar permeabilidades menores a las ya fabricadas.

Figura 53. Correlación de la relación epóxica/masa de mezcla en función del % de caolín (Modificación Final)



4.1.5 Prueba de curado. Para el curado de la muestra se hicieron dos pruebas buscando la mejor alternativa para que el secado de la muestra se realice en el menor tiempo posible.

Para verificar que las muestras secaban a 80 °C, y la solución epóxica también, se realizó una prueba que consistía en fabricar dos mezclas para construir un plug

sintético con las mismas características de porcentaje de caolín, arena y volumen epóxico, y por otra parte se agregó a un tubo de ensayo, la misma cantidad de volumen epóxico (endurecedor - resina) que se agregó a cada mezcla, para realizar una comparación del secado a temperatura ambiente y el secado a 80 °C, tanto para la mezcla del plug como para el líquido constituido por resina y endurecedor, como se puede ver en la figura 54.

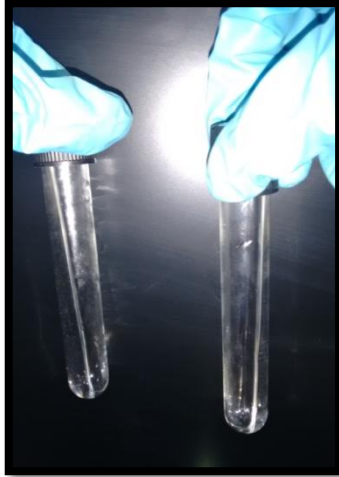
Figura 54. Mezclas con igual composición en masa recién fabricada



Figura 55. Mezcla de plug después de 6 horas



Figura 56. Volumen epóxico después de 6 horas



Como se puede observar en la figura 55 la mezcla después de seis horas a temperatura ambiente se muestra un poco más oscura en comparación a la muestra secada al horno a 80°C, debido a que aún estaba húmeda, ya que no ha cumplido con los cinco días de curado, confirmando que una muestra puede ser llevada al horno a dicha temperatura y secar muy bien después de seis horas.

En la figura 56, se presentan los tubos de ensayo con el volumen epóxico (resina – endurecedor), después de seis horas de secado, la muestra a la izquierda a temperatura ambiente y la de la derecha a 80°C, presentaron un buen secado bajo distintas condiciones, para lo cual se concluye que se puede hacer uso del horno para minimizar el mayor tiempo posible de preparación de una muestra.

A partir de las pruebas realizadas si el laboratorio cuenta con un horno, se deben llevar las muestras a 80 °C por seis horas y para asegurar el secado se recomienda dejarlas al ambiente durante 12 horas.

4.2 PROCEDIMIENTO PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS

A continuación se presenta un paso a paso para fabricar núcleos sintéticos por medio del equipo electro-neumático construido para la compresión de muestras sintéticas. Este procedimiento se presenta después de haber realizado pruebas como se presentan en el numeral 4.1 del presente capítulo.

4.2.1 Procedimiento para la elaboración de la mezcla.

a. Tamizar la arena

Debido a que la arena presenta una gran variedad en el tamaño de grano, debe pasarse por el tamiz para obtener el tamaño deseado, en este caso la arena se pasó por la malla 100-200, Como se puede observar en la figura 57, obteniendo granos de este tamaño y menores a este, con el fin de lograr reducir las propiedades petrofísicas, ya que la compactación que genera el equipo es mínima.

Figura 57. Tamizador de arena



b. Pesar la arena y el caolín

Una vez la arena tamizada se debe pesar la cantidad deseada de arena y caolín, obteniendo el total de la masa para construir el núcleo sintético, la cual debe ser máxima de 130 gr en total, para evitar pérdidas de mezcla en la compactación, ya que es la capacidad máxima del molde.

La cantidad de arena y caolín a pesar, depende principalmente del porcentaje de caolín deseado, el cual será el principal reductor de la permeabilidad y porosidad, junto con la presión ejercida por el equipo.

La cantidad de arena fina y caolín, es calculada de la siguiente manera. Según el porcentaje de caolín deseado, se calcula el porcentaje de arena fina.

Ecuación 18. Porcentaje de arena

$$\% \text{Arena fina} = 100\% - \% \text{Caolín}$$

Con los porcentajes de arena y caolín definidos, se procede a calcular la masa en gramos de cada uno, se recomienda un máximo de 130 gr en total para obtener un núcleo sintético de más o menos 7 de longitud o mayor y 1 ½ de diámetro, aunque la longitud puede variar dependiendo de la presión ejercida.

Ecuación 19. Masa de arena fina

$$\text{Masa arena fina (gramos)} = \text{Masa total} \times \% \text{Arena fina}$$

Ecuación 20. Masa de caolín blanco

$$\text{Masa de caolín (gramos)} = \text{Masa total} \times \% \text{Caolín}$$

Una vez conocida la cantidad de masa de arena fina y caolín blanco, se procede a pesar en la balanza como se muestra en la figura 58.

Figura 58. Arena fina y caolín blanco pesado en la balanza



Una vez pesadas la arena y el caolín se mezclan ambos productos como se muestra en la figura 59 hasta que esté totalmente homogénea.

Figura 59. Mezcla de arena fina y caolín blanco



c. Cantidad de solución epóxica

Conociendo el porcentaje de caolín blanco a agregar y la presión deseada, se procede a leer en la figura 53 la relación de solución epóxica.

Una vez leída la relación se pasa a calcular el volumen de solución epóxica a agregar en la mezcla, por medio de la ecuación 21.

Ecuación 21. Volumen de solución epóxica

$$\text{ml de solución epóxica} = \frac{1 \text{ ml de solución epóxica}}{\text{masa de la mezcla}} \times \text{masa de la mezcla}$$

Conociendo el volumen de solución epóxica se procede a calcular la cantidad de endurecedor y de resina, por medio de las siguientes ecuaciones.

Ecuación 22. Volumen de resina

$$\text{ml de resina} = \frac{\text{ml solución epóxica}}{3.5}$$

Ecuación 23. Volumen de endurecedor

$$\text{ml de endurecedor} = \text{ml de resina} \times 2.5$$

Una vez conocido el volumen de resina y de endurecedor se mezclan ambos líquidos, durante 5 minutos, para asegurar la homogeneidad del volumen epóxico, como se muestra en la figura 60.

Figura 60. Mezcla de resina y endurecedor



Al tener la mezcla de ambos líquidos homogénea se procede a mezclar el volumen epóxico con la mezcla de arena y caolín, se recomienda mezclar seco en líquido como se muestra en la figura 61.

Figura 61. Mezcla de arena y caolín en solución epóxica



La mezcla debe quedar lo más homogénea posible para evitar granos de solución epóxica que lleguen a afectar las propiedades de la muestra. Este proceso no debe demorar más de 15 minutos, debido a que la mezcla empieza a secarse, dificultando la homogeneidad.

d. Introducir la mezcla al molde

Al tener la mezcla totalmente homogénea se procede a introducir al molde poco a poco, agregando una cantidad de aproximadamente 30 gr comprimiendo la arena ingresada por medio de una barra de aluminio del mismo diámetro del molde, hasta agregarla completamente para que la arena quede distribuida uniformemente en el molde y luego se proceder a llevarlo al equipo para iniciar la compresión de la muestra a la presión deseada, como se muestra en la figura 62.

Figura 62. Mezcla en molde de acero



El molde debe ser marcado con el nombre de la muestra y se procede a comprimir en el equipo electro-neumático a la presión deseada, como se muestra en la figura 63, siguiendo el procedimiento presentado detalladamente en el numeral 3.5, teniendo en cuenta las precauciones y recomendaciones de uso.

Figura 63. Compresión de la muestra



La muestra se debe comprimir por ambos lados, con una duración de 10 a 15 minutos aproximadamente por cada lado para asegurar una compresión eficaz de la muestra.

4.2.2 Procedimiento de curado y extracción de la muestra

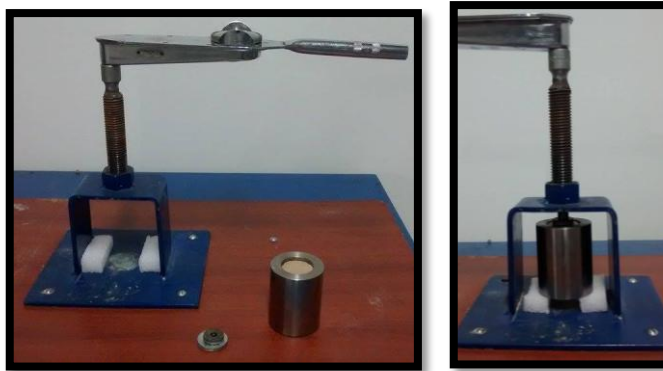
a. Curado de la muestra

Se determinó el secado de las muestras de un tiempo de 5 días a temperatura ambiente, girando la muestra cada 20 minutos, durante 12 horas. Si se dispone del horno, se lleva la muestra a 80 °C durante 6 horas y 12 horas a temperatura ambiente, girándola cada 20 minutos el tiempo en que la muestra permanece en el horno.

b. Extracción de la muestra

La extracción de la muestra se realiza mediante el uso de un torquímetro, por desplazamiento como se muestra en la figura 64, se debe poner una base en la parte inferior para que permita la elevación del molde y así el desplazamiento de la muestra.

Figura 64. Extracción de la muestra por medio del torquímetro



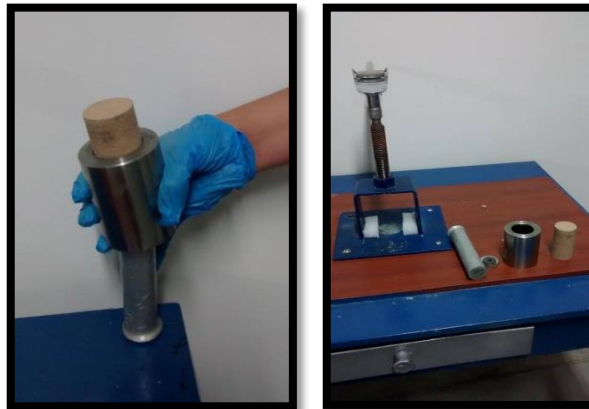
Se aplica una fuerza a la muestra por medio del torquímetro, hasta el momento en que el núcleo sintético es desplazado como se muestra en la figura 65.

Figura 65. Núcleo sintético desplazado



Una vez desplazado el núcleo sintético, se retira el molde junto con la muestra del torquímetro, el cual no está completamente extraído del molde, por lo tanto se procede a desplazar por medio de un objeto consistente del mismo diámetro de la muestra, para ejercer una mínima presión que permita el desplazamiento total de la muestra y por ende su completa extracción, como se observa en la figura 66.

Figura 66. Extracción total del núcleo sintético



4.3 METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS CONOCIENDO LAS PROPIEDADES PETROSIFICAS A PARTIR DEL EQUIPO “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”

A partir de los resultados obtenidos por medio del diseño experimental, se decide realizar muestras con presión constante de 100 psi, siendo la máxima capacidad a la cual el equipo trabaja. Debido a que al fabricar muestras por debajo de 100 psi y con el volumen leído en la figura 53, las muestras se fracturan, y al aplicar un volumen mayor estas se deformaban si se fabricaban a presiones por debajo de los 90 psi. Por esta razón se fabricaron 6 muestras variando la cantidad de caolín en la mezcla y con una presión constante de 100 psi. Estas muestras se fabricaron siguiendo el procedimiento propuesto en el numeral 4.2. Se puede observar en la figura 67.

Figura 67. Muestras fabricadas para la formulación.



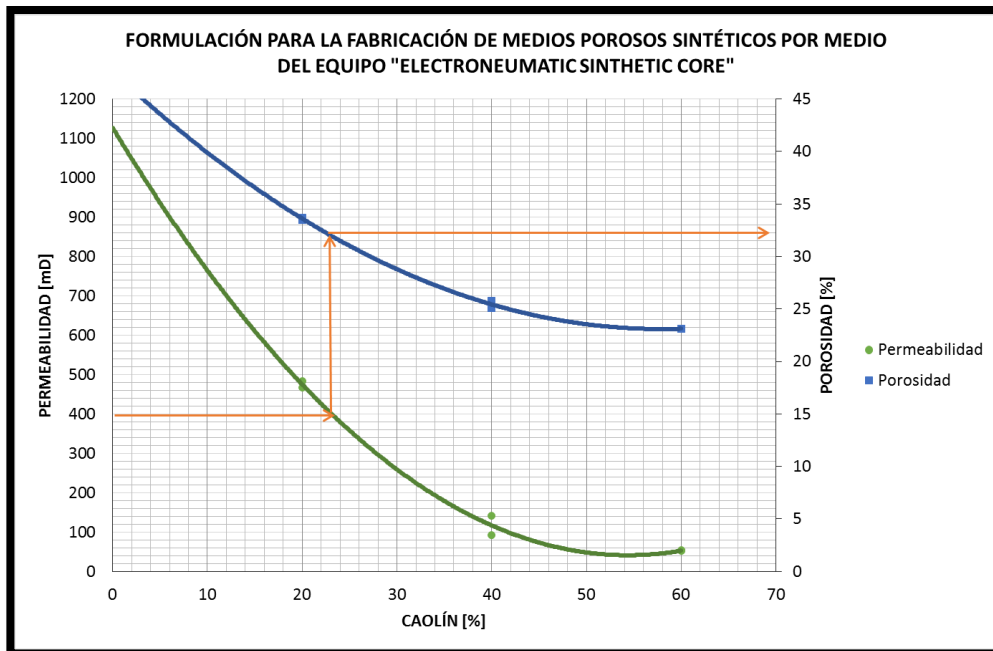
Estas muestras presentan excelente consolidación, resistieron la presión de confinamiento de 800 psi, y no se deformación, los resultados se pueden observar en la tabla 19.

Tabla 19. Resultados de las Propiedades de las muestras

Muestra	Caolín [%]	Presión [psi]	Porosidad [%]	Permeabilidad [mD]
N1	60	100	23,11	53,25
N1.1	60	100	23,12	52,11
N2	40	100	25,76	92,41
N2.1	40	100	25,11	141,386
N3	20	100	33,71	482,819
N3.1	20	100	33,51	467,468

A Partir de los resultados, se construyó una gráfica para fabricar muestras, conociendo la permeabilidad y porosidad, para saber la composición que las muestras deben tener para fabricarlas y obtener estas especificaciones (Figura 68).

Figura 68. Formulación para la fabricación de medios porosos sintéticos promedio del equipo "ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE"



Para hacer uso de la gráfica se debe conocer el dato de la propiedad petrofísica a la cual se quiere fabricar el plug sintético, por ejemplo, si se conoce una permeabilidad de 400 mD, se puede decir que se debe aplicar un porcentaje de caolín de 21, 5 % a la mezcla y se obtendrá una porosidad de aproximadamente 36%.

Como se puede observar en la figura 68, los rangos de permeabilidad son mayores a 40 mD, por lo cual se hizo uso del equipo “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”, el cual ejerce mayores presiones a las muestras, permitiendo así llegar a menores permeabilidades, este proceso se puede observar en el CAPÍTULO 5.

5. FABRICACIÓN DE NÚCLEOS SINTÉTICOS POR MEDIO DEL SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS

Este capítulo trata específicamente del equipo que lleva por nombre “Sistema de Montaje de Núcleos No Consolidados”. Este equipo fue diseñado y fabricado para los laboratorios instalados en la Sede de la Universidad Industrial de Santander ubicados en Guatiguará, el cual tiene un sistema que permite alcanzar altas presiones y junto con las demás variables permita alcanzar permeabilidades y porosidades bajas, similares a las de los yacimientos no convencionales.

Debido a que el equipo “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE” fue diseñado para trabajar a bajas presiones, se realizó una metodología para fabricar muestras sintéticas a mayores presiones y generar una formulación a partir de este equipo, que permita construir plugs sintéticos con bajas permeabilidades y porosidades.

5.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

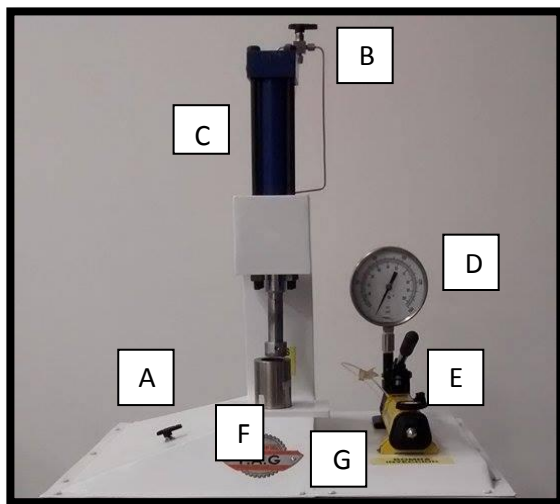
El equipo se fundamenta en la hidráulica, su principio es desplazar líquido hidráulico a través del circuito de tal manera que genere el desplazamiento del cilindro hidráulico y comprima la muestra depositada en los moldes.

Este equipo consta principalmente de dos válvulas de paso, la válvula 1 indica la dirección en la cual el líquido se va a dirigir para desplazar el pistón en el cilindro, la válvula 2 da paso del líquido hidráulico que va desde la bomba hasta la válvula 1. Posee un Cilindro hidráulico que produce un movimiento vertical del pistón hacia abajo, que ejerce la presión sobre la muestra, y hacia arriba para retirar el molde. La bomba hidráulica manual produce el desplazamiento del líquido, la cual soporta hasta 10.000 psi, pero el circuito está diseñado para soportar hasta una presión de 3.000 psi. El equipo posee un manómetro Bourdon que permite la

lectura de la presión que se va a trabajar. Para llegar a esta presión se debe estabilizar la aguja bombeando poco a poco.

Para trabajar en este equipo primero se debe abrir la válvula 1 y 2 para que de paso al líquido hidráulico a la parte superior del cilindro hidráulico, lo que produce el movimiento del pistón hacia abajo a medida que se bombea manualmente la bomba, el pistón empieza a descender aproximadamente a una presión de 100 psi constante, de tal manera que si se quiere ejercer presión debe sumarse esta presión a la presión deseada. Si se requiere volver al estado inicial del pistón, se debe invertir la válvula 1 y 2, y bombear manualmente hasta que ascienda a su posición de inicial.

Figura 69. Equipo de Núcleos no consolidados



- A. Válvula 1
- B. Válvula 2
- C. Cilindro Hidráulico
- D. Manómetro
- E. Bomba Hidráulica
- F. Molde
- G. Mesa

5.2 MANTENIMIENTO PARA EL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”

Como este equipo fue diseñado y entregado por contratistas, el mantenimiento se les refiere a ellos por garantía durante un año.

El mantenimiento que debe tener el operador del equipo durante este tiempo es el siguiente:

- Mantener la bomba hidráulica con suficiente líquido para bombear a través del circuito del equipo, pues sin la cantidad necesaria el equipo se llenaría de aire, lo cual podría ocasionar daños en el sistema.
- Mantener Limpio el pistón después de ejercer la presión sobre la muestra, y continuar con el trabajo a realizar.
- Mantener la mesa limpia y protegida, pues al realizar presiones tan altas, esta puede deformarse, debido a esto se debe poner un paño blando debajo del molde, para protegerlo.

5.3 PROCEDIMIENTO PARA LA COMPRESIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTETICOS POR MEDIO DEL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”

Para fabricar muestras sintéticas con el equipo “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”, se hizo a partir de la formulación realizada con el equipo “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”, con la que se trabajó con una única presión (100 psi). Se inicia con esta presión y por encima de esta el estudio para fabricar medios porosos sintéticos con porosidades y permeabilidades menores a las ya fabricadas.

El procedimiento para realizar la mezcla que conforma el plug sintético debe seguir exactamente el mismo procedimiento presentado en el numeral 4.2, debido a que en el diseño experimental realizado para la nueva formulación, se varió únicamente el rango de presión a aplicar a la muestra, para lo cual a continuación se presenta el procedimiento para la compresión de la muestra a partir del equipo “Sistema de Montaje de Núcleos No Consolidados”.

5.3.1 Estado del Equipo (Observaciones previas)

- Las válvulas 1 y 2 deben estar cerradas antes empezar operar el equipo y cerrarlas al terminar el procedimiento.
- Se debe despresurizar el manómetro en cada cambio de las válvulas.
- El pistón del cilindro hidráulico debe estar en su estado de reposo/inicial antes de ser usado.

5.3.2 Operación de equipo.

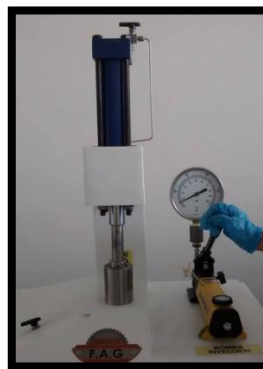
- a. Se deben abrir las válvulas 1 y 2 hacia la derecha, lo cual deja el paso al fluido hidráulico para el llenado del cilindro. Figura 70 y 71.

Figura 70. Apertura de las válvulas



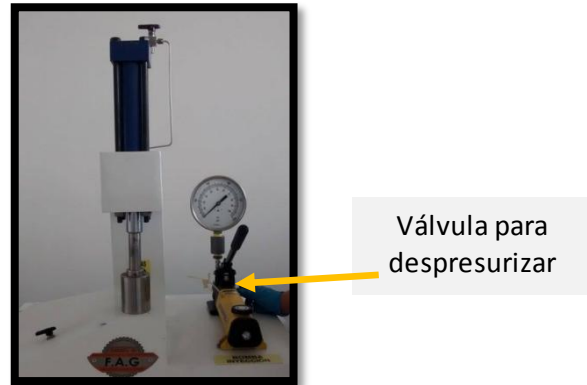
- b. Ubicar el molde con la muestra de núcleo no consolidado, debajo del pistón del cilindro hidráulico. Figura 71.
- c. Empezar a bombear de tal manera que el pistón baje a una presión constante (+/- 100 psi), cuando tenga contacto con la muestra empezar a aumentar la presión hasta la presión deseada.

Figura 71. Bombeo de líquido



- d. Después de bombear a la presión deseada, se despresuriza el manómetro desde la válvula, ubicada en la bomba hidráulica, Figura 72.

Figura 72. Despresurizar el equipo



- e. Se debe posicionar las válvulas 1 y 2 a la izquierda para que el pistón regrese a su estado inicial, Figura 73.
- f. Se bombea hasta que el pistón se encuentre en su estado inicial nuevamente, y se vuelve a despresurizar el manómetro.

Figura 73. Bombeo para levantamiento del pistón



- g. Se retira el molde y se lleva a tiempo de curado, especificado en el numeral 4.2.2.

Figura 74. Núcleo sintético fabricado por el equipo “Sistema de Montaje Núcleos No Consolidados”.



5.4 MANTENIMIENTO PARA EL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”

Como este equipo fue diseñado y entregado por contratistas, el mantenimiento se les refiere a ellos por garantía durante un año.

El mantenimiento que debe tener el operador del equipo durante este tiempo es el siguiente:

- Mantener la bomba hidráulica con suficiente líquido para bombear a través del circuito del equipo, pues sin la cantidad necesaria el equipo se llenaría de aire, lo cual podría ocasionar daños en el sistema.
- Mantener Limpio el pistón después de ejercer la presión sobre la muestra, y continuar con el trabajo a realizar.

- Mantener la mesa limpia y protegida, pues al realizar presiones tan altas, esta puede deformarse, debido a esto se debe poner un paño blando debajo del molde, para protegerlo.

5.5 DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”

Para el diseño experimental se utilizó el programa Statgraphics Centurion XVII-Academic License, versión 17.1.02 disponible en la Universidad Industrial de Santander sede Parque Tecnológico de Guatiguará, para la realización de la malla de datos y conocer la cantidad de muestras necesarias para proceder con la formulación.

Este programa requiere de ciertas variables proporcionadas por el usuario. La primera condición es seleccionar el tipo de diseño, el diseño es un multinivel factorial 3^2 , en donde el numero 3 indica los niveles a trabajar y el 2 las dos variables de entrada (Caolín y Presión). Para reducir el %Error en los experimentos se debe realizar una réplica por cada muestra, para un total de 18 muestras como se muestra en la figura 75 basada en los datos ingresados al programa. El procedimiento para el manejo del programa se presenta en el ANEXO A. En la figura 76 se puede observar la malla generada en el programa para fabricar las muestras aleatoriamente, de tal manera que se genere menor incertidumbre en los experimentos.

Figura 75. Libro de datos

STATGRAPHICS Centurion - StatFolio sin título

Archivo Editar Definir Medir Analizar Mejorar Controlar Pronósticos SnapStats! Herramientas Ver Ventana Ayuda

Libro de Datos StatAdvisor StatGallery StatReporter Comentarios del StatFolio Atributos de Diseño Fact

Atributos de Diseño Factorial Multinivel

Atributos de Diseño Factorial Multinivel

Clase de diseño: Factorial Multinivel
Nombre del archivo: <Sin Título>

Diseño Base

Número de factores experimentales: 2
Número de bloques: 2
Número de respuestas: 2
Número de corridas: 18
Grados de libertad para el error: 11
Aleatorizar: Sí

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Presión	100,0	1200,0	3	PSI
Caolín	20,0	60,0	3	%

Respuestas	Unidades
Permeabilidad	mD
Porosidad	%

El StatAdvisor

Usted ha creado un diseño factorial multinivel que consiste de 18 corridas. El diseño deberá ser corrido en 2 bloques. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado. Esto aportará protección contra el efecto de variables ocultas.

- a. El programa genera la malla para introducir los datos de respuesta obtenidos en los procedimientos del laboratorio y proceder con la formulación.

Figura 76. Malla generada por el programa

	BLOQUE	Presión PSI	Caolín %	Permeabilidad mD	Porosidad %
1	1	650,0	60,0		
2	1	100,0	20,0		
3	1	1200,0	40,0		
4	1	1200,0	20,0		
5	1	650,0	40,0		
6	1	100,0	40,0		
7	1	650,0	20,0		
8	1	100,0	60,0		
9	1	1200,0	60,0		
10	2	650,0	20,0		
11	2	100,0	40,0		
12	2	1200,0	60,0		
13	2	100,0	20,0		
14	2	1200,0	20,0		
15	2	1200,0	40,0		
16	2	650,0	40,0		
17	2	100,0	60,0		
18	2	650,0	60,0		

5.5.1 Fabricación de las muestras según del diseño experimental. Según el diseño experimental se fabricaron 18 muestras teniendo en cuenta el procedimiento detallado en el numeral 4.2 pero haciendo uso del equipo de “Sistema de Montaje de Núcleos No Consolidados”, variando la cantidad de Caolín y la presión ejercida sobre la muestra y se puede observar en la figura 77.

A las muestras se les realizó la medida de porosidad y permeabilidad, con el fin de realizar una formulación, para fabricar las muestras sintéticas conociendo estas propiedades, Tabla 20.

Figura 77. Muestras fabricadas según diseño experimental. “SISTEMA DE MONTAJE DE NUCLEOS NO CONSOLIDADOS”



Tabla 20. Resultados “SISTEMA DE MONTAJE DE NUCLEOS NO CONSOLIDADOS”

Muestra	Caolín [%]	Presión [psi]	Diámetro [cm]	Longitud [cm]	Porosidad [%]	Permeabilidad [mD]
B1	20	100	3,810	7,44	33,112	468.871
B1.1	20	100	3,804	7,316	32,966	448,55
B2	20	650	3,810	6,81	27,899	106,4436
B2.1	20	650	3,805	6,57	27,952	188,027
B3	20	1200	3,812	6,33	21,707	26,3138
B3.1	20	1200	3,810	6,35	21,794	28,1905
B4	40	100	3,796	6,67	24,349	104,19
B4.1	40	100	3,780	6,9	24,708	102,464

B5	40	650	3,792	6,58	21,756	95,2375
B5.1	40	650	3,770	6,667	21,826	73,5008
B6	40	1200	3,810	5,93	11,628	0,4538
B6.1	40	1200	3,807	5,825	11,563	0,08703
B7	60	100	3,795	5,76	22,599	39,84
B7.1	60	100	3,770	6,848	21,233	43,87
B8	60	650	3,802	6,13	13,761	0,7938
B8.1	60	650	3,797	6,248	13,429	0,725
B9	60	1200	3,806	5,8	9,764	0,107
B9.1	60	1200	3,797	5,634	8,916	0,0888

Para asegurar la repetibilidad en la formulación se hicieron tres muestras más un mes después de fabricar las 18 muestras, de tal manera, que al fabricar muestras en diferentes tiempo con la misma formulación, las medidas de estas muestras estén en el rango de las que se fabricaron primero.

Figura 78. Prueba de Repetibilidad. “SISTEMA DE MONTAJE DE NUCLEOS NO CONSOLIDADOS”



Tabla 21. Comparación de los resultados con su respectiva repetibilidad

Muestra	Caolín [%]	Presión [psi]	Diámetro [cm]	Longitud [cm]	Porosidad [%]	Permeabilidad [mD]
B4	40	100	3,796	6,67	24,349	104,19
B4.1	40	100	3,780	6,9	24,708	102,464
B4.2	40	100	3,760	7,45	24,468	105,93
B6	40	1200	3,810	5,93	11,628	0,4538
B6.1	40	1200	3,807	5,825	11,563	0,08703
B6.2	40	1200	3,810	5,93	11,352	0,13
B8	60	650	3,802	6,13	13,761	0,7938
B8.1	60	650	3,797	6,248	13,429	0,725
B8.2	60	650	3,810	6,36	13,287	0,83

5.6 METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE MEDIOS POROSOS SINTÉTICOS A PARTIR DEL EQUIPO “SISTEMA DE MONTAJE DE NUCLEOS NO CONSOLIDADOS”

Para realizar la formulación para la fabricación de medios porosos sintéticos, se usó el software Statgraphics Centurion XV, versión 15.2.05 disponible en la Universidad Industrial de Santander sede Parque Tecnológico de Guatiguará, (Anexo A), donde introduciendo los datos obtenidos de permeabilidad y porosidad, a partir de las muestras fabricadas, se genera una ecuación que permite calcular las proporciones necesarias a introducir en la mezcla y fabricar núcleos con determinada propiedad petrofísica.

5.6.1 Ecuaciones para la formulación generadas por medio de Statgraphics Centurion. Para generar estas ecuaciones se debe seguir el procedimiento llevado en el anexo A y a continuación se presentan los resultados obtenidos en el proceso.

a. Se introduce los datos a la malla generada por el software. Figura 79.

Figura 79. Malla con los datos de las muestras fabricadas.

	BLOQUE	PRESSION	%CAOLÍN	PERMEABILIDAD	POROSIDAD
		PSI	%	mD	%
1	1	100,0	20,0	467,468	33,112
2	2	100,0	20,0	448,55	32,966
3	1	650,0	20,0	106,4436	27,899
4	2	650,0	20,0	188,027	27,952
5	1	1200,0	20,0	26,3138	21,707
6	2	1200,0	20,0	28,1905	21,794
7	1	100,0	40,0	104,19	24,349
8	2	100,0	40,0	105,93	24,708
9	1	650,0	40,0	95,2375	21,756
10	2	650,0	40,0	73,5008	21,826
11	1	1200,0	40,0	0,4538	11,628
12	2	1200,0	40,0	0,08703	11,563
13	1	100,0	60,0	39,84	22,599
14	2	100,0	60,0	43,87	21,233
15	1	650,0	60,0	0,7938	13,761
16	2	650,0	60,0	0,83	13,429
17	1	1200,0	60,0	0,107	9,764
18	2	1200,0	60,0	0,0888	8,916
19					

b. Siguiendo los pasos del Anexo A, se llega a la ecuación a la cual calcular la formulación requerida. El programa genera una ecuación por cada variable de respuesta.

La ecuación para la porosidad se puede observar en la figura 80 y se detalla en la ecuación 24, en la cual se varía el caolín y la presión aplicada sobre la muestra. Para permeabilidad se observa en la figura 81.

Figura 80. Ecuación generada por Statgraphics Centurion-Porosidad

STATGRAPHICS Centurion - Formulación NS.sgp

Analizar Experimento - POROSIDAD

Analizar Experimento - POROSIDAD

Nombre del archivo: E:\Tesis - Metodología Nucleos\Diseño experimental\Formulación NS.sfx

Efecto	Estimado	Error Estad.	V.I.F.
promedio	19,7998	0,77943	
A.PRESION+bloque	-12,2658	0,833822	1,0
B.%CAOLIN+bloque	-12,6213	0,833822	1,0
AA=bloque	-1,4845	1,47886	1,0
AB=bloque	-0,64375	1,04371	1,0

Coefficiente	Estimado
constante	45,6957
A.PRESION	-0,00679047
B.%CAOLIN	-0,687713
AA	-0,00000245372
AB	-0,0000292614
BB	0,00489

El StatAdvisor

Esta ventana despliega la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es

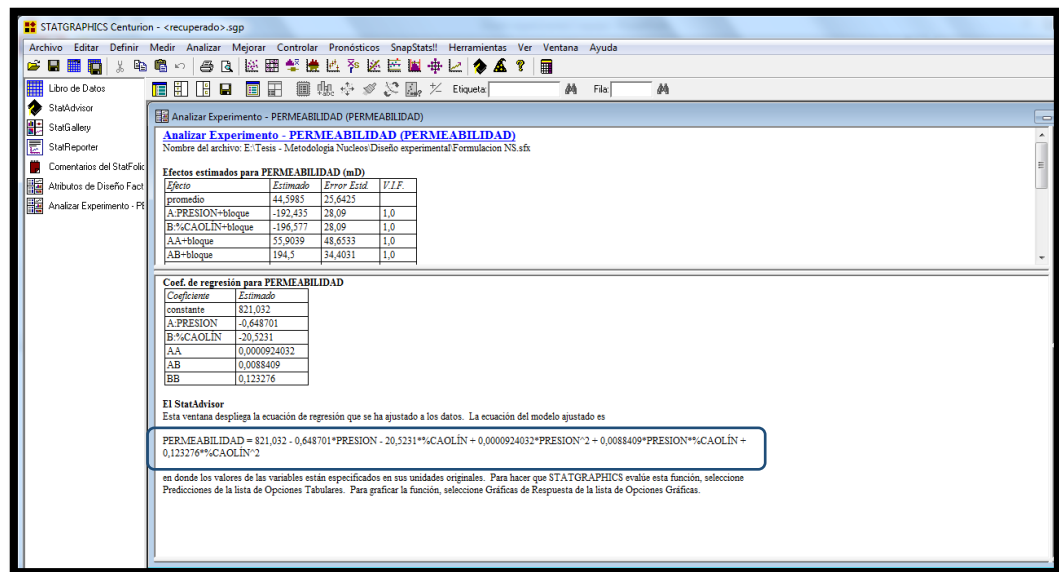
$$\text{POROSIDAD} = 45,6957 - 0,00679047 * \text{PRESION} - 0,687713 * \% \text{CAOLIN} - 0,00000245372 * \text{PRESION}^2 - 0,0000292614 * \text{PRESION} * \% \text{CAOLIN} + 0,00489 * \% \text{CAOLIN}^2$$

en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales. Para hacer que STATGRAPHICS evalúe esta función, seleccione Predicciones de la lista de Opciones Tabulares. Para graficar la función, seleccione Gráficas de Respuesta de la lista de Opciones Gráficas.

Ecuación 24. Formulación- Porosidad (\emptyset).

$$\emptyset = 45,6957 - (0,00679047 * Presión) - (0,687713 * \%Caolín) - (0,00000245372 * (Presión^2)) - (0,0000292614 * Presión * \%Caolín) + (0,00489 * (\%Caolín^2))$$

Figura 81. Ecuación generada por Statgraphics Centurion-Permeabilidad



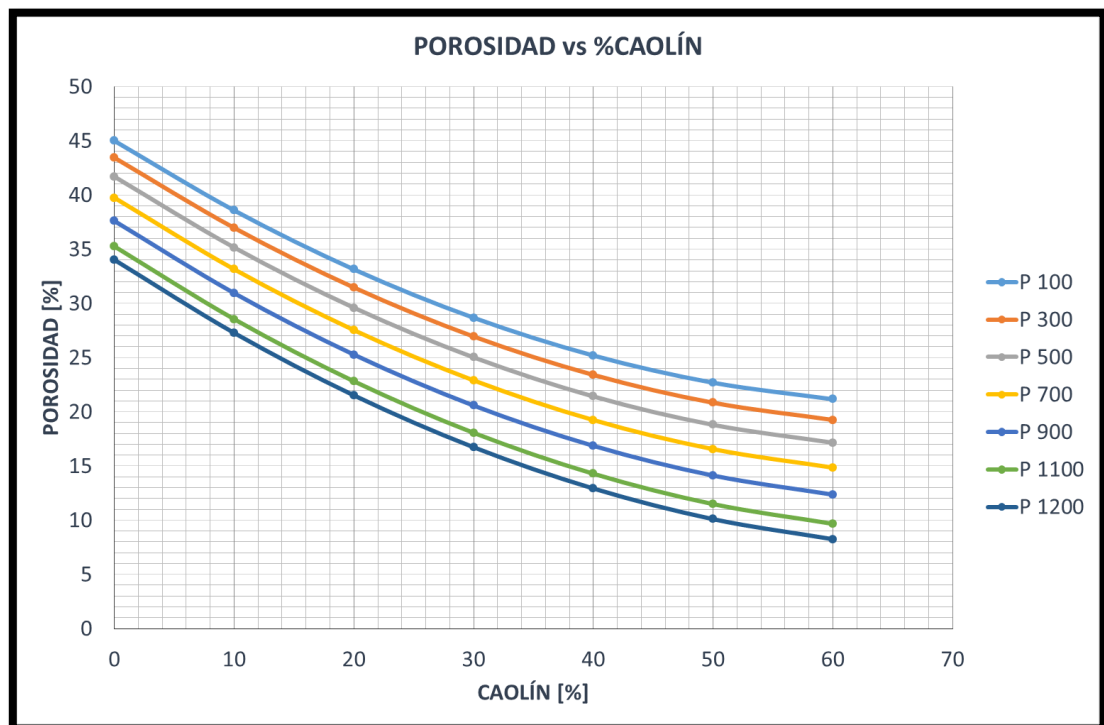
Ecuación 25. Formulación-Permeabilidad (K)

$$K = 821,032 - (0,648701 * Presión) - (20,5231 * \%Caolín) + (0,0000924032 * (Presión^2)) + (0,0088409 * Presión * \%Caolín) + (0,123276 * (\%Caolín^2))$$

5.6.2 Formulación por medio de graficas de lectura. A partir de las ecuaciones, se calcularon diferentes valores a las diferentes variables posibles, y así poder realizar un gráfico general, con valores requeridos para fabricar medios porosos sintéticos a una propiedad petrofísica determinada. Los cálculos se pueden observar en el anexo D.

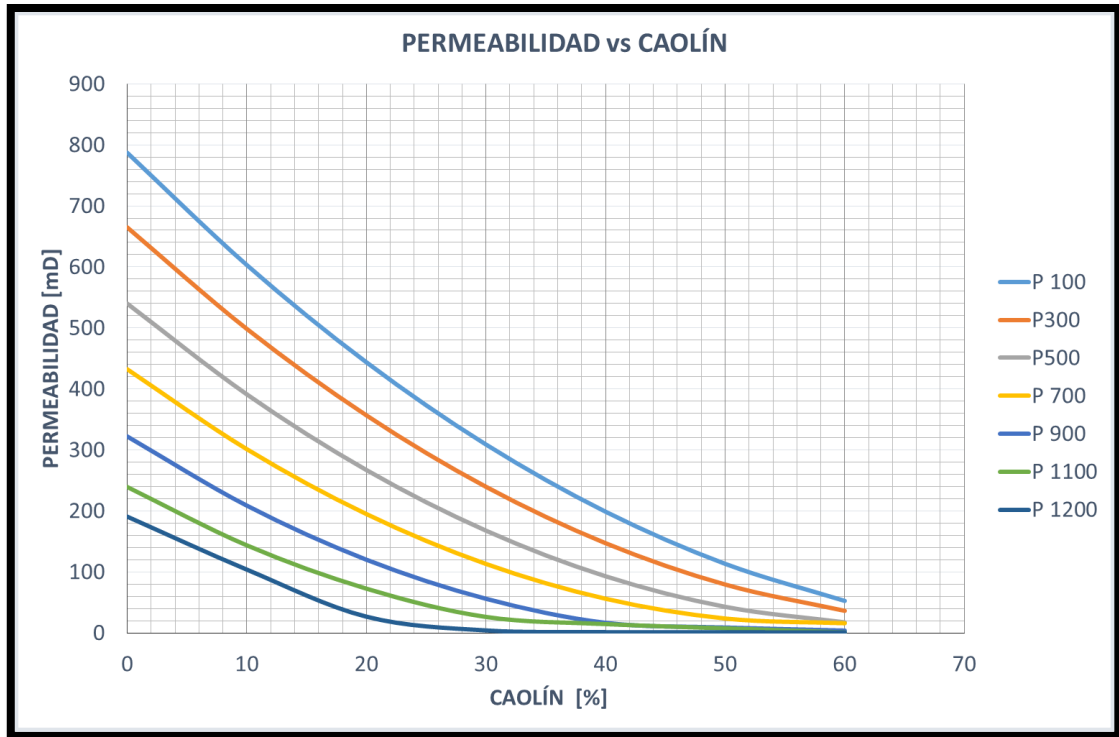
a. Grafica para la lectura a partir de la porosidad

Figura 82. Formulación Porosidad



b. Grafico para la lectura a partir de la permeabilidad

Figura 83. Formulación Permeabilidad



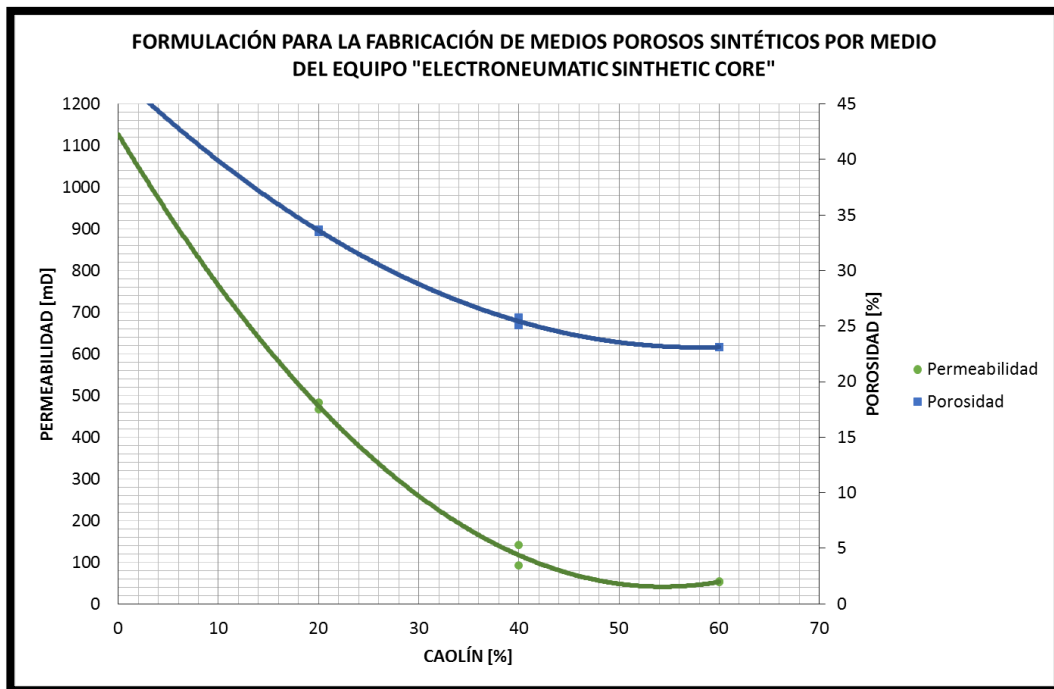
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se hará el respectivo análisis de manera conjunta para todos los resultados obtenidos en el proceso que se llevó a cabo en el proyecto, con el objetivo de observar sus comportamientos y realizar una comparación entre los dos equipos usados para fabricar medios porosos sintéticos.

6.1 FORMULACIÓN “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”

En la figura 84 se puede observar la formulación para la fabricación de medios porosos sintéticos, realizada a partir de los experimentos presentados en el capítulo 4.

Figura 84. Formulación “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”



En la figura 84 se puede observar que a medida que aumenta el material arcilloso en el plug sintético (caolín), hay una reducción en las propiedades petrofísicas

estudiadas (permeabilidad y porosidad), ya que ocupa el espacio poroso de la muestra sintética.

Debido a que la formulación fue realizada con una presión constante de 100 psi, se puede notar que la mínima permeabilidad y porosidad que puede alcanzar una muestra sintética fabricada por el equipo es de aproximadamente 40 mD y 22 % respectivamente, bajo las condiciones presentadas en el capítulo 4, se determina que la formulación realizada para este equipo se pueden fabricar muestras con rangos de permeabilidades de 40 a 1200 mD y porosidades de 22 a 42 %, aproximadamente.

Por otra parte, ya que el equipo tiene una mínima pérdida del fluido, el cual se transporta a través de la tubería como se muestra en el capítulo 3, se puede asegurar que la presión que se aplica a las muestras es la establecida por el operador si se tiene en cuenta las pérdidas de presión calculadas, las cuales son muy mínimas asegurando la presión aplicada para fabricar las muestras sintéticas.

Además se calculó el porcentaje de error entre las muestras fabricadas como repetibilidad, para observar el error en los resultados de porosidad y permeabilidad al fabricar dos muestras con las mismas condiciones. (Tabla 22).

Tabla 22. Porcentaje de Error Repetividad de las muestras “ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE”

Muestra	Caolín	Porosidad	Permeabilidad	Error Porosidad	Error Permeabilidad
N1	60	23,11	53,25	0,04	2,14
N1.1	60	23,12	52,11		
N2	40	25,76	92,41	2,58	34,63
N2.1	40	25,11	141,386		
N3	20	33,71	482,819	0,59	3,18
N3.1	20	33,51	467,468		

Se observa que el porcentaje de error es mínimo para la mayoría de las muestras, las excepciones se pueden dar por no mezclar de una forma adecuada el material para fabricar cada plug sintético, las condiciones ambientales las que se exponen cada muestra después de fabricadas o el mal uso del equipo, entre otras.

6.2 FORMULACIÓN “SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS”

Esta formulación se basó principalmente en un diseño experimental por medio de un software que genere unas ecuaciones, a partir de los datos introducidos en el que provenía de muestras fabricadas en el laboratorio.

En la figura 85 y 86 se pueden observar las formulaciones para porosidad y permeabilidad respectivamente y los rangos alcanzados bajo las condiciones en que las muestras se realizaron.

Por otra parte se presentan el porcentaje de error al realizar la formulación por medio del diseño experimental, la repetibilidad que estas presentaron y las posibles causas de la desviación en la fabricación de dos muestras idénticas en composición y compresibilidad.

Figura 85. Formulación Porosidad

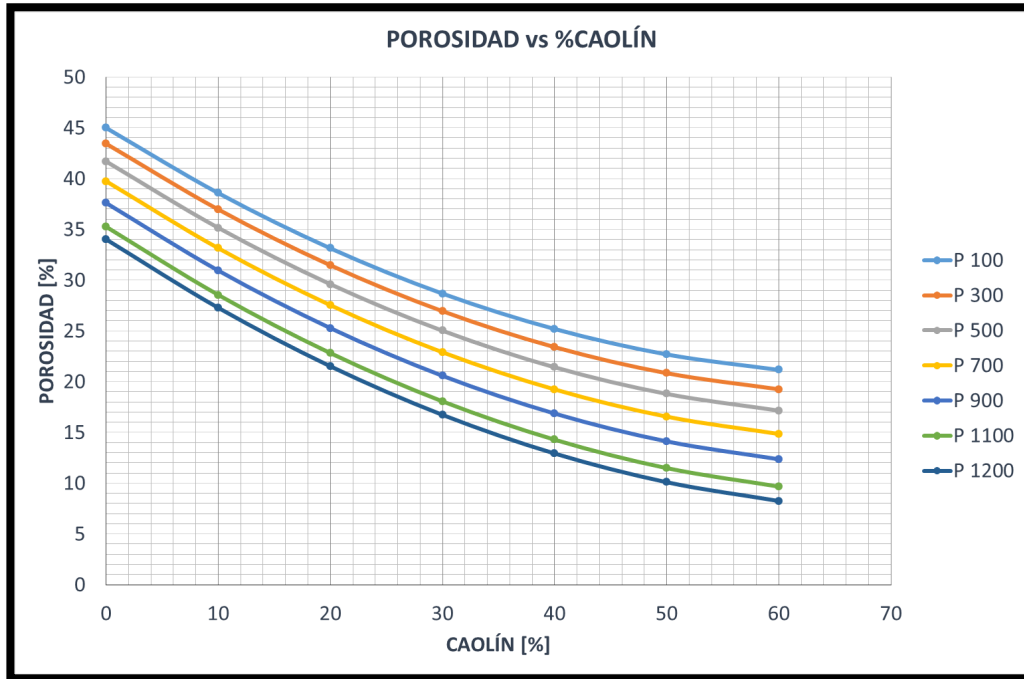
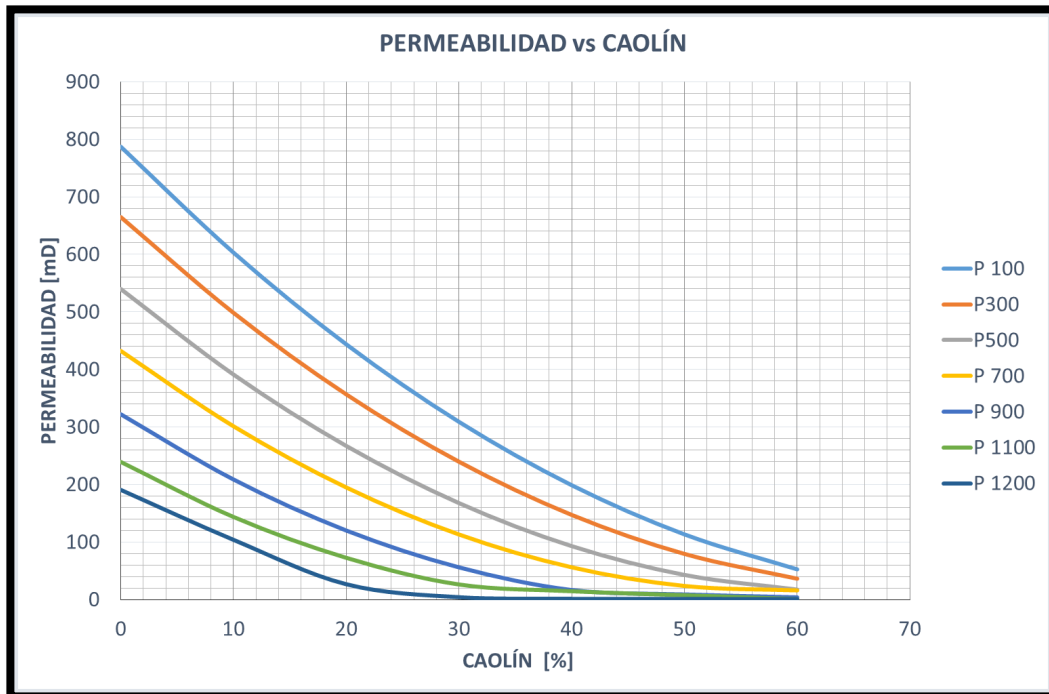
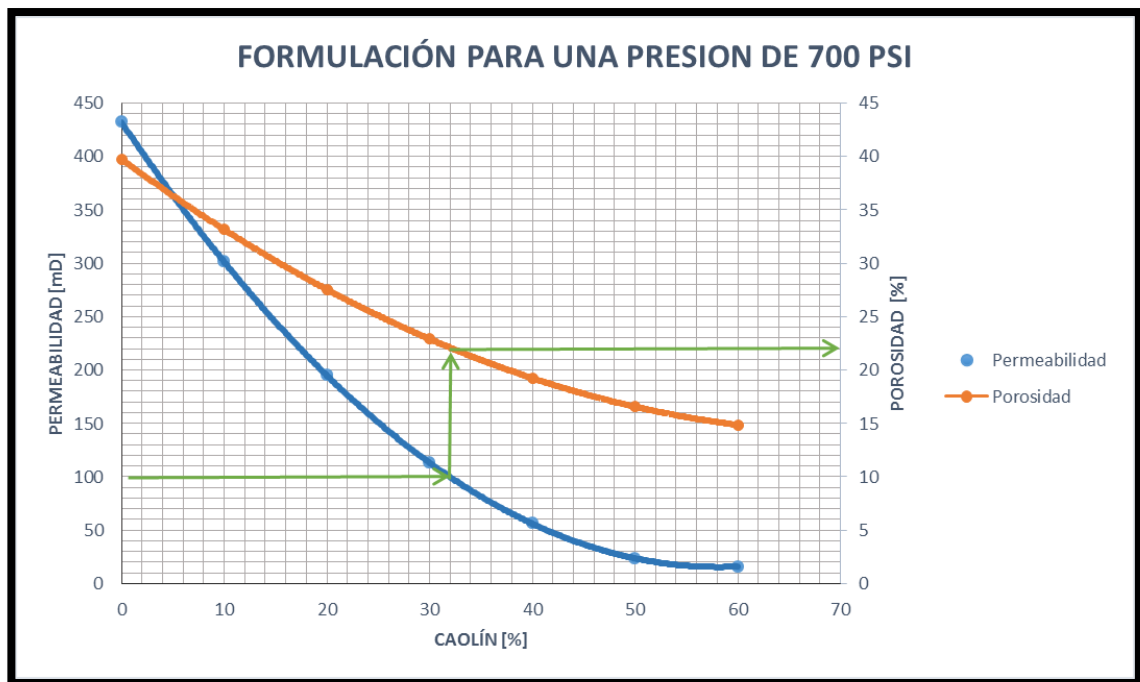


Figura 86. Formulación Permeabilidad



En las graficas presentadas en las figuras 85 y 86, se conoce que cantidades de caolín y presión se requieren para fabricar muestras sinteticas conociendo la porosidad y la permeabilidad. En donde se observa que a mayor presión ejercida se reduce en gran cantidad la permeabilidad y porosidad, lo cual es directamente proporcional a la cantidad de caolin agregado a la muestra.

Figura 87. Formulación a 700 psi.



Para observar más detalladamente la formulación se extrajeron las curvas de permeabilidad y porosidad a 700 psi como ejemplo, en donde, si se requiere una permeabilidad de 100 mD, se debe agregar a la mezcla un 29% de caolín y se obtendrá una porosidad de 23 %, como se observa en la figura 87.

Para asegurar el buen funcionamiento del equipo, se calculó el porcentaje de error entre las muestras fabricadas con su respectiva repetibilidad. (Tabla 23).

Tabla 23. Porcentaje de Error Repetividad de las muestras “SISTEMA DE MONTAJE DE NUCLEOS NO CONSOLIDADOS”

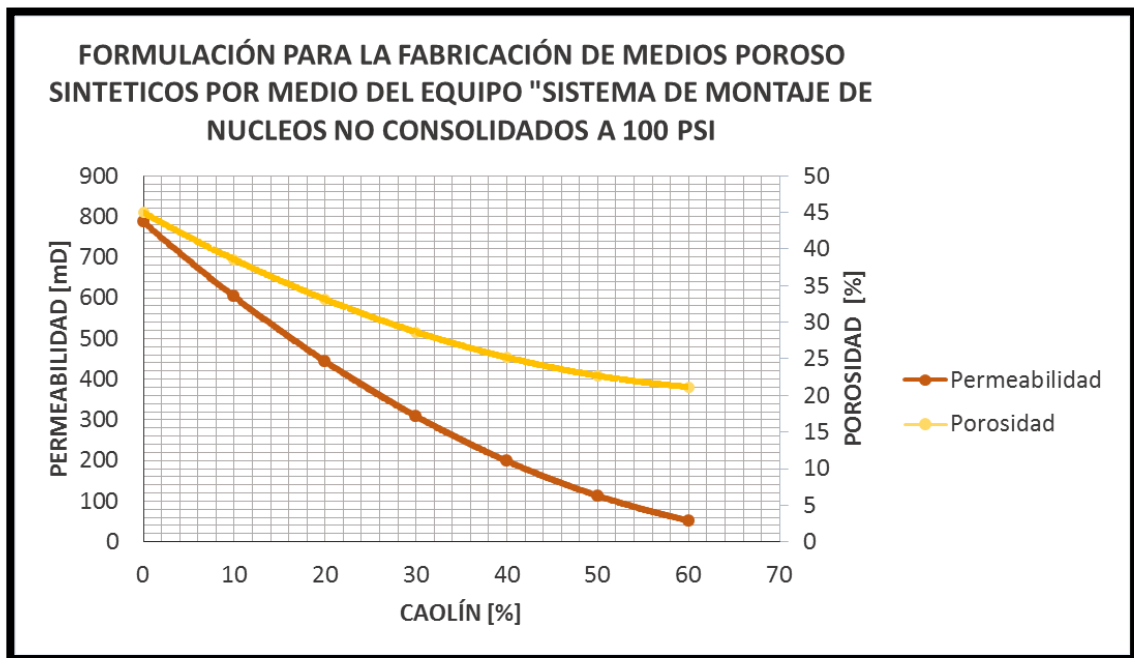
Muestra	Caolín [%]	Porosidad [%]	Permeabilidad [mD]	Error Porosidad[%]	Error Permeabilidad [%]
B1	20	33,1	468,9	0,44	4,33
B1.1	20	33,0	448,6		
B1	20	33,112	469	0,44	4,53
B1.1	20	32,966	448,55		
B2	20	27,899	106,4436	0,19	43,39
B2.1	20	27,952	188,027		
B3	20	21,707	26,3138	0,40	7,13
B3.1	20	21,794	28,1905		
B4	40	24,349	104,19	1,47	1,66
B4.1	40	24,708	102,464		
B5	40	21,756	95,2375	0,32	22,82
B5.1	40	21,826	73,5008		
B6	40	11,628	0,4538	0,56	80,82
B6.1	40	11,563	0,08703		
B7	60	22,599	39,84	6,04	10,12
B7.1	60	21,233	43,87		
B8	60	13,761	0,7938	2,41	8,67
B8.1	60	13,429	0,725		
B9	60	9,764	0,107	8,68	17,01
B9.1	60	8,916	0,0888		

La desviación de error de la mayoría de las muestras es muy baja, lo que puede concluir que hay buen funcionamiento en el equipo al ejercer la presión. Las excepciones se deben posiblemente a la falta de cuidado al realizar el mezclado de la muestra o un descuido del operador al aplicar la presión con el equipo, debido a que hay que tener un gran cuidado al estabilizar la presión o por las pérdidas de presión en las líneas de flujo, las cuales se desconocen, entre otras.

6.3 COMPARACIÓN DE LAS FORMULACIONES A 100 PSI

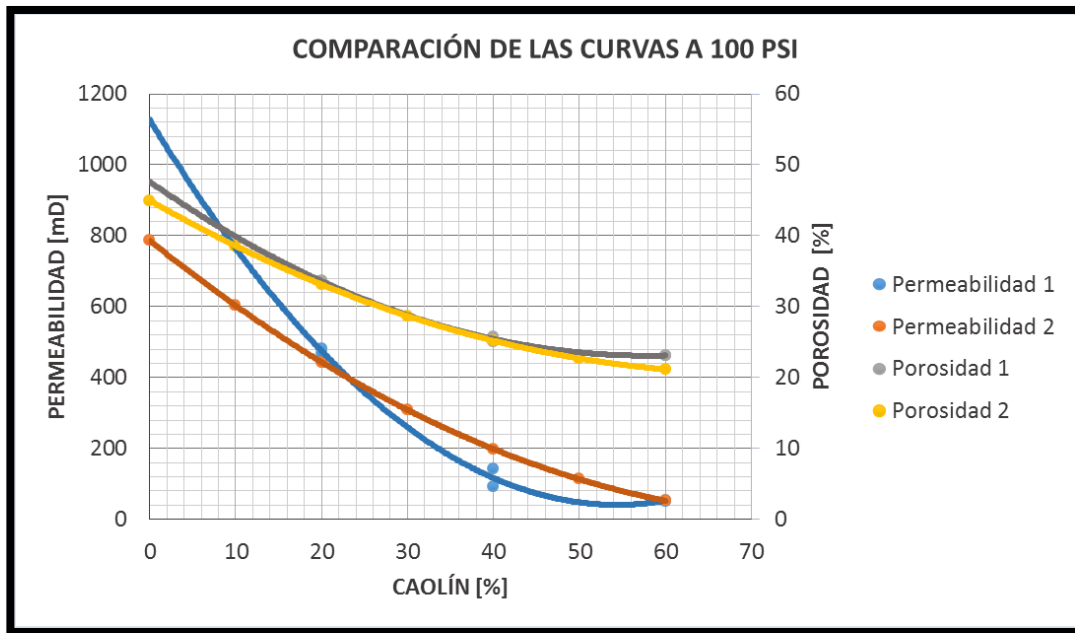
Debido a que se hicieron dos formulaciones a la misma presión, es necesario comparar el comportamiento de ambas curvas. En la figura 84 se puede observar la realizada mediante el equipo "ELECTRONEUMATIC SYNTHETIC CORE" y en la figura 88 las fabricadas por medio de "SISTEMA DE MONTAJE DE NÚCLEOS NO CONSOLIDADOS".

Figura 88. Formulación "Sistema De Montaje De Nucleos No Consolidados" a 100 psi.



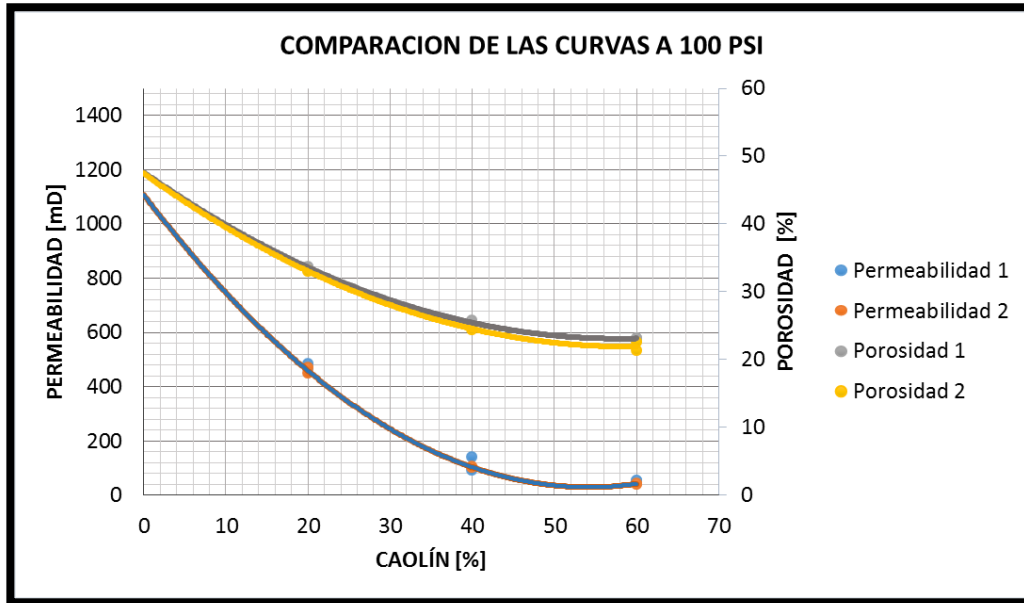
A simple vista ambas formulación poseen el mismo comportamiento, de esta manera se optó por sobreponerlas y observar detalladamente su comportamiento entre sí. Figura 89.

Figura 89. Comparacion de formulaciones a 100 psi



Se puede notar que el comportamiento de la porosidad a la misma presión en diferentes equipos, son muy similares, pero en la permeabilidad, difiere un poco, debido a que se está comparando con los datos obtenidos a partir de ecuaciones dadas por el diseño experimental. De esta forma se realizó una comparación con las muestras fabricadas en ambos equipos (figura 90), y se detalla que las curvas son casi congruentes y poseen el mismo comportamiento.

Figura 90. Comparación de las muestras fabricadas a 100 psi.



Al observar este comportamiento se realizan cálculos de desviación de error entre las muestras fabricadas por cada equipo y los datos que entregan las diferentes fórmulas. Tabla 24 y 25.

Tabla 24. Desviación de error de las ecuaciones arrojadas por el diseño experimental y las muestras fabricadas con “Electroneumatic Synthetic Core”

Muestras	Muestras			Promedio Resultado		Error Relativo	
	Caolín [%]	Ø [%]	K [mD]	Ø [%]	K [mD]	Ø [%]	K [%]
C1	60	21,158	52,539	21,16	52,54	9,25	0,27
N1	60	23,11	53,25				
N1.1	60	23,12	52,11				
C2	40	25,191	198,767	25,19	198,77	0,97	41,19
N2	40	25,76	92,41				
N2.1	40	25,11	141,386				
C3	20	33,135	443,616	33,14	443,62	1,43	7,11
N3	20	33,71	482,819				
N3.1	20	33,51	467,468				

Como se puede observar en la tabla 24 el porcentaje de desviación entre las dos formulaciones a una presión de 100 psi realizada por distintos equipos, la desviación que presenta principalmente en la permeabilidad es debido a que como se puede observar en la figura 90, la curva de permeabilidad 1, está basada en una correlación basada en el diseño experimental presentado en el capítulo 4, el cual varía tanto la composición de la muestra como la presión aplicada a esta, mientras que la curva de permeabilidad 2 realizada a partir de las muestras fabricadas por el equipo “Electroneumatic Synthetic Core”, se basa únicamente en los datos obtenidos por estos experimentos para generar la tendencia de la curva, ya que maneja una presión constante.

Tabla 25. Porcentaje de error de las muestras fabricadas con diferentes equipos.

Muestras	Muestras			Promedio Resultado		Error Relativo	
	Caolín [%]	Ø [%]	K [mD]	Ø [%]	K [mD]	Ø [%]	K [%]
B7	60	22,6	39,8	21,92	41,86	5,47	20,55
B7.1	60	21,2	43,9				
N1	60	23,11	53,25				
N1.1	60	23,12	52,11	23,12	52,68	3,70	13,13
B4	40	24,3	104,2	24,53	103,33		
B4.1	40	24,7	102,5				
N2	40	25,76	92,41	25,44	116,90	1,73	3,58
N2.1	40	25,11	141,38				
B1	20	33,1	468,9	33,04	458,71		
B1.1	20	33,0	448,6				
N3	20	33,71	482,82	33,61	475,14	1,73	3,58
N3.1	20	33,51	467,47				

En la tabla 25 se puede observar el porcentaje de error arrojado al comparar las curvas a 100 psi de la figura 90 a partir de las muestras fabricadas y medidas experimentalmente, en donde se puede comprobar que ambos equipo trabajan a la presión aplicada, ya que como se observa en la figura 90, tanto las curvas de

permeabilidad y porosidad para ambos equipo tiene la misma tendencia y al sobreponerlas, se muestran muy similares, por lo que se puede hacer uso de ambos equipo si se quiere llegar a las propiedades arrojadas por la formulación a 100 psi. Se debe aclarar que los resultados en porcentaje de error, varían debido a que ambos equipos tienen un principio físico diferente, por lo que lo que los resultados no van a ser exactamente los mismos.

Tabla 26. Porcentaje de error de las muestras fabricadas por el equipo “Sistema De Montaje De Núcleos No Consolidados” con respecto a los datos de la ecuación dadas por el diseño experimental

Muestra	Muestras			Promedio Resultado		Error Relativo	
	Caolín [%]	Ø [%]	K [mD]	Ø [%]	K [mD]	Ø [%]	K [%]
C1	60	21,16	52,539	21,16	52,54	3,58	20,34
B7	60	22,6	39,8	21,92	41,86		
B7.1	60	21,2	43,9				
C2	40	25,19	198,77	25,19	198,77	2,63	92,37
B4	40	24,3	104,2	24,53	103,33		
B4.1	40	24,7	102,5				
C3	20	33,14	443,62	33,14	443,62	0,29	3,40
B1	20	33,1	468,9	33,04	458,71		
B1.1	20	33,0	448,6				

Como se observa en la tabla 26, las muestras C1, C2 y C3 son los datos arrojados por la correlación del diseño experimental (Anexo D) y las demás son los datos obtenidos a partir de la medición de las muestras fabricadas por el mismo equipo “Sistema De Montaje De Núcleos No Consolidados”. El porcentaje de error arrojado entre estos datos esta dado porque el programa que arroja la correlación, tiene en cuenta todas las variables para crear un ecuación a partir de los datos ingresados y realizados por experimentos, y así generar la mejor tendencia.

El porcentaje de error es mayor al calcularlas con las ecuaciones, debido a que estas obedecen a una regresión que el software genera. El error entre los datos de las muestras fabricadas a la misma presión con diferente equipo es menor debido a las condiciones en que se fabricaron, lo importante es tener en cuenta que la presión ejercida sea la misma. No importando con qué equipo se fabriquen.

6.4 MUESTRAS FABRICADAS

Para el proyecto se fabricaron un total de 120 muestras, con las cuales se analizaron cada una de las pruebas requeridas para obtener los resultados que se presentan como conclusión de la investigación.

En la figura 91 se pueden observar la mayoría de estas muestras, dado que las primeras muestras se fracturaron y se desecharon, estas se observan en el numeral 3.1.

Figura 91. Muestras Fabricadas.



7. CONCLUSIONES

- ❖ A partir del diseño y construcción del equipo electro-neumático se logró estandarizar una formulación que permite fabricar muestras sintéticas confiables conociendo el porcentaje de caolín que se agrega y la presión aplicada a esta, y obtener las propiedades deseadas.
- ❖ El diseño y construcción del equipo electro-neumático, demostró ser eficiente al fabricar muestras sintéticas asegurando la repetibilidad y reproducibilidad en el proceso.
- ❖ Muestras fabricadas a partir de los 100 psi presentan excelente consolidación, resistiendo presiones de confinamiento, lo cual es necesario para estudios posteriores.
- ❖ Al fabricar muestras sintéticas compuestas por tamaño de arena de 100-200 mesh, caolín y presión de 100 psi, se pueden fabricar plugs sintéticos con rangos de porosidad de 21 a 33 % y rangos de permeabilidad de 40 y 470 mD aproximadamente.
- ❖ La metodología a la cual se llegó con este proceso de investigación experimental, demostró poder fabricar muestras sintéticas accesibles para cualquier estudio en laboratorio, debido a que es un proceso de corto tiempo y de una mínima inversión.
- ❖ Al fabricar muestras sintéticas a presiones inferiores a los 100 psi, presentan una mala consolidación con facilidad de fracturarse, por lo cual es necesario descartar dichas presiones.

8. RECOMENDACIONES

- ❖ Construir un equipo electro-neumático con mayor capacidad de alimentación de aire para generar mayores presiones, con el mismo principio automático, con el fin de buscar propiedades petrofísicas menores.
- ❖ Realizar una formulación variando el tamaño de grano con el fin de observar la variación que tiene esta, sobre la formulación realizada en este proyecto.
- ❖ Investigar nuevas tecnologías para encontrar una mejor forma de mezclar la masa que conforma la muestra sintética, de tal manera que sea uniforme en toda su estructura.
- ❖ Realizar estudios de tomografía y SEM (microscopía electrónica de barrido) a las muestras sintéticas, para hacer una investigación más profunda de los plugs internamente y así confirmar la homogeneidad en toda su estructura.

BIBLIOGRAFÍA

ALARCÓN GÓMEZ, Leonardo Andrés. CAVANZO BALCAZAR, Emilio Andrés. Estudio experimental de procesos de inyección continua de vapor el equipo de desplazamiento radial con medios porosos homogéneos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2013. 176 p.

AMPUDIA ECHEVERRY, Danilo. Neumática- Primera Parte. Cali: Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería, 2000. 198 p.

CASTILLO MARTÍNEZ, Aldemar. RÍOS SIERRA, Julio Rodolfo. Caracterización petrofísica a partir de núcleos de perforación y registro de pozo para las areniscas de la formación mugrosa del campo colorado bloques I Y II. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2008. 116 p.

CHURCHER, P. L. FRENCH, P. R., SHAW J. C., &SCHRAMM, L. L. Rock properties of Berea sandstone, Baker dolomite, and Indiana limestone. En: SPE. Febrero, 1991, vol. 21044.

FERNÁNDEZ DE CASTRO ROVIRA, Omar David. CELIS APARICIO, Laura Andrea. Estudio experimental de procesos de inyección de agua en el equipo de desplazamiento radial con medios porosos estratificados. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2012. 162 p.

GUILLEN SALVADOR, Antonio. Introducción a la Neumática. México D.F: Alfaomega Grupo Editor S.A., 1999. 172 p.

LIZCANO NIÑO, Juan Carlos. PADRON GARCÍA, Robert Eduardo. Evaluación del efecto de la depositación de asfáltenos en el medio poroso a condiciones dinámicas para un crudo colombiano. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014. 173 p.

LLADONOSA, Vincent. Circuitos Básicos de Electro neumática - Prácticas de Automatismo. México D.F: Alfaomega-Marcombo Editores, 1993. 134p.

LOPEZ SOPEÑA, José Emilio. Manual de instalaciones de GLP. Madrid: CEPESA, ELF GAS, S.A, 2011. 299 p.

MATTOLINI, Migue Ángel. Cátedra: Elementos de Máquinas y Equipos Industriales. Mendoza: Universidad tecnológica Nacional. 2010. 156 p.

MAYORGA NOGALES, Edgar Xavier. Automatización Neumática. Buenos Aires: SMC Latina, 2005. 203 p.

MONTGOMERY, Douglas C. Design and analysis of experiments. USA: John Wiley & Sons, 2008.509 p.

PARIS DE FERRER MAGDALENA. Fundamentos de ingeniería de yacimientos. Maracaibo: La autora, 2009. 561 p.

RANGER COMPANY. Manual de Operación de Compresor de Aire Ranger MPFL24. Bogotá: Ranger Company, 2010.122 p.

RP40, A. P. I. Recommended practices for core analysis. American PetroleumInstitute,1998. 236 p.

S. LOPERA, V. MEJÍA, F. ZAPATA. Construcción de medios porosos artificiales para desplazamientos en medios porosos. En: ACIPET. Noviembre, 2013.

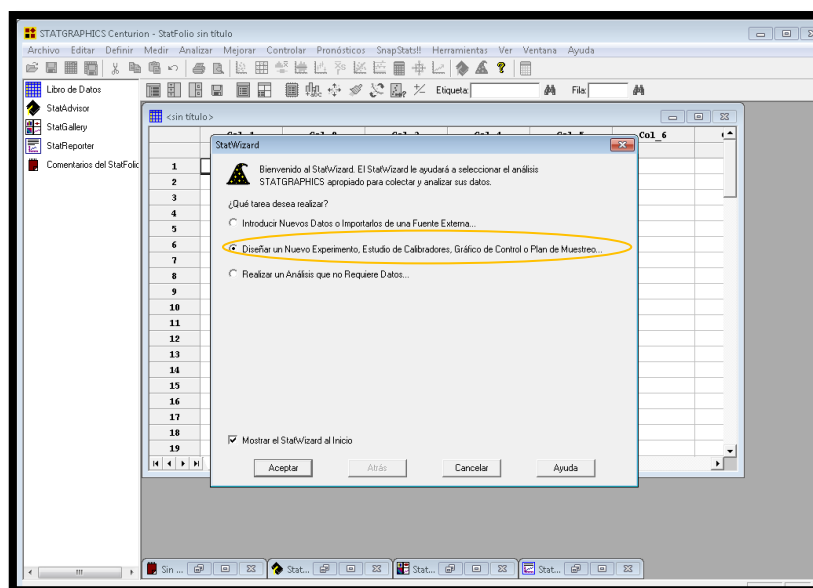
ANEXOS

ANEXO A. PROCEDIMIENTO PARA EL USO CORRECTO DEL SOFTWARE “STATGRAPHICS CENTURION”

Procedimiento para realizar un diseño experimental por medio del programa Statgraphics Centurion XVII- Academic License, versión 17.1.02 disponible en la Universidad Industrial de Santander sede Parque Tecnológico de Guatiguará

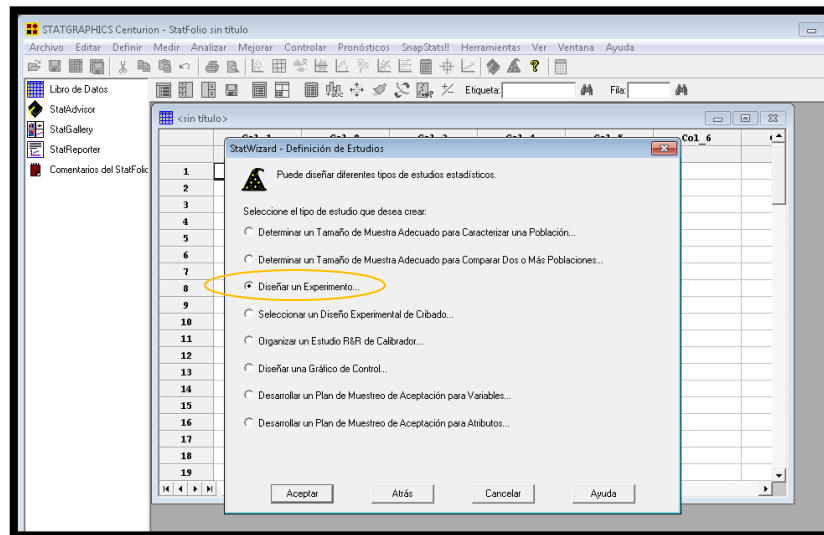
- a. Al abrir el programa se selecciona la opción de nuevo diseño como se observa en la imagen y Aceptar.

Figura A-1. Pantalla inicial del programa



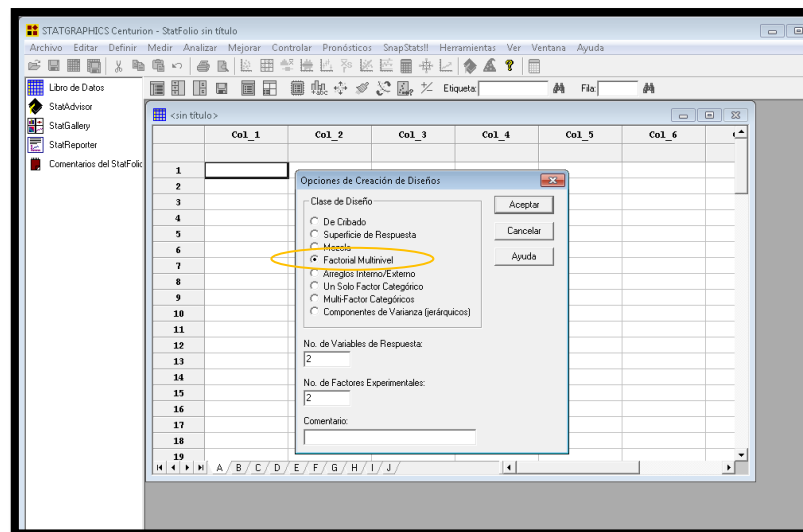
- b. Luego se da la opción en Diseñar un Experimento.

Figura A-2. Definición de estudios



- c. El diseño a realizar es un Factorial multinivel, pues el objetivo del diseño es realizar una formulación, basados en las diferentes resultados obtenidos al interactuar las variables entre sí.

Figura A-3. Creación de diseños



- d. Se introducen las variables en el diseño, las variables a utilizar son la Presión y el Porcentaje de Caolín, de esta forma estas dos variables se introducen en el programa con el valor mínimo y máximo al cual se va a trabajar.

Figura A-4. Definición del factor presión

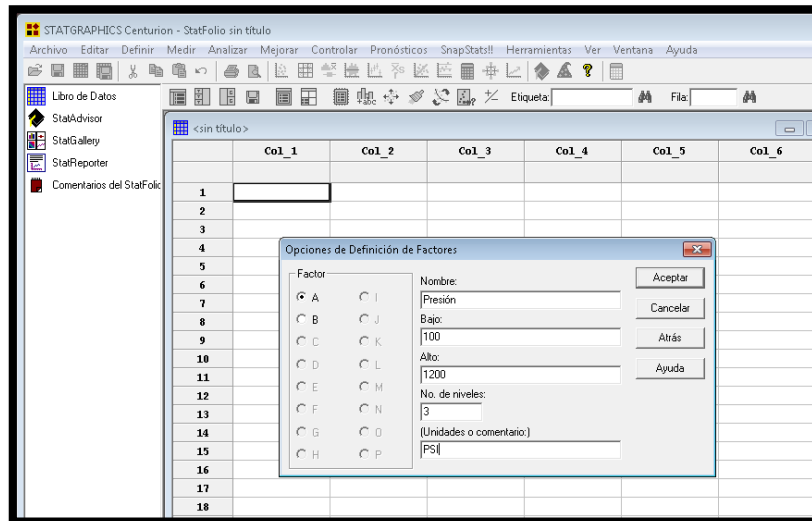
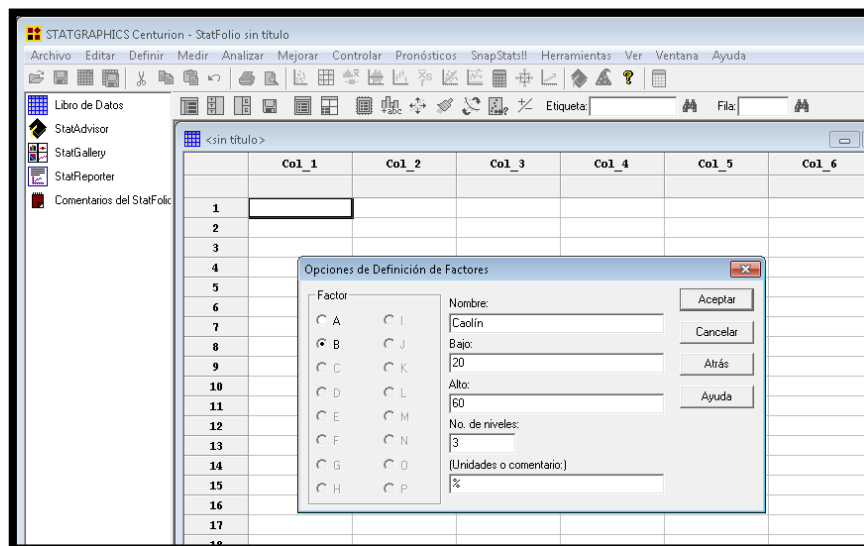


Figura A-5. Definición del factor caolín



- e. Se deben definir las respuestas o los valores que se obtendrán en el laboratorio e introducirlos en el diseño para proceder con la formulación. Los valores que se buscan son la Permeabilidad y la Porosidad. Estos se definen de la siguiente manera:

Figura A-6. Definición de la variable de respuesta (permeabilidad)

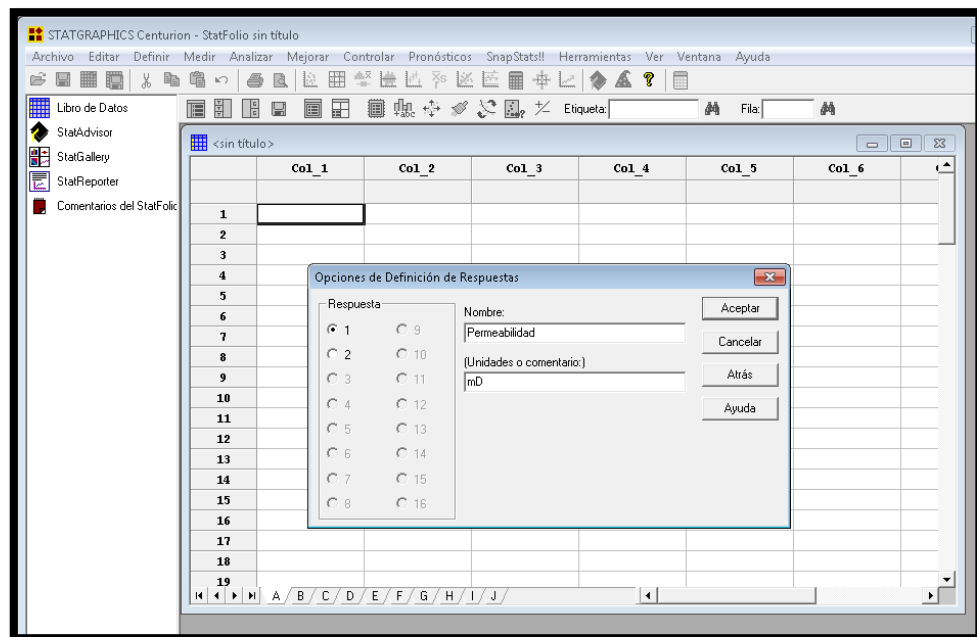
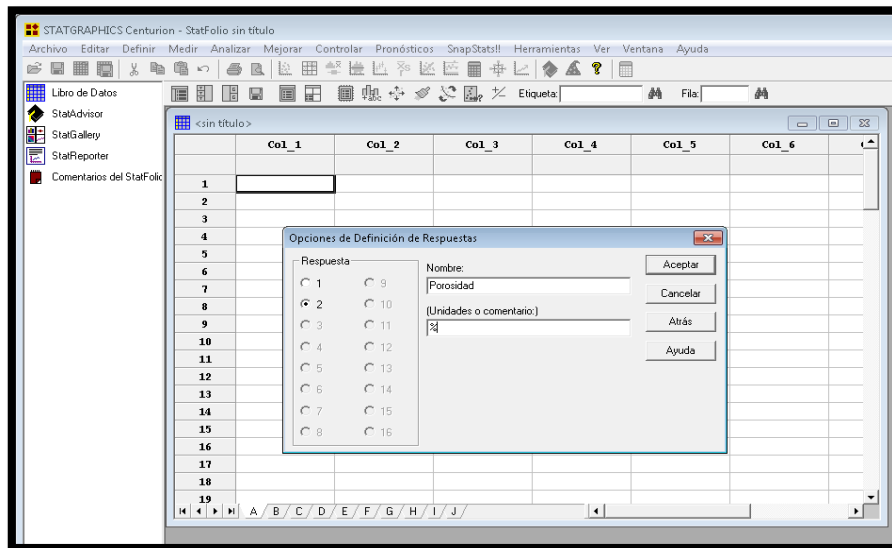
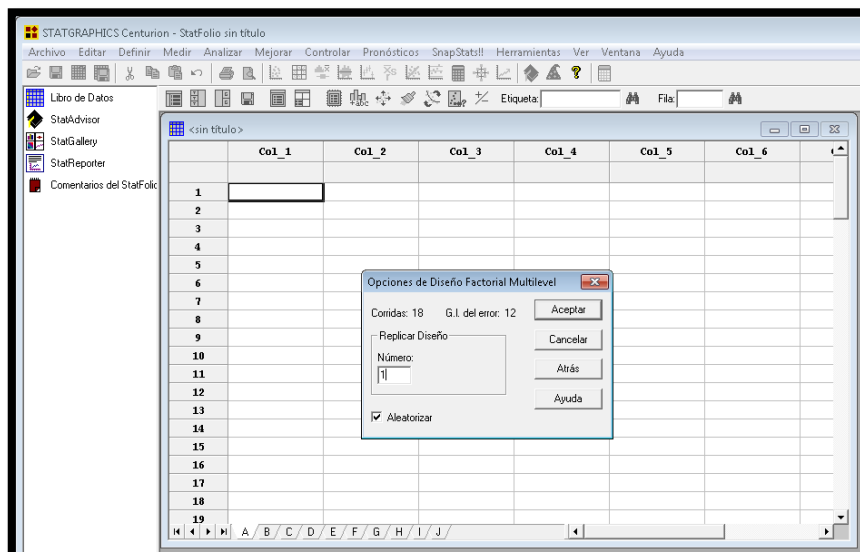


Figura A-7. Definición de la variable de respuesta (porosidad)



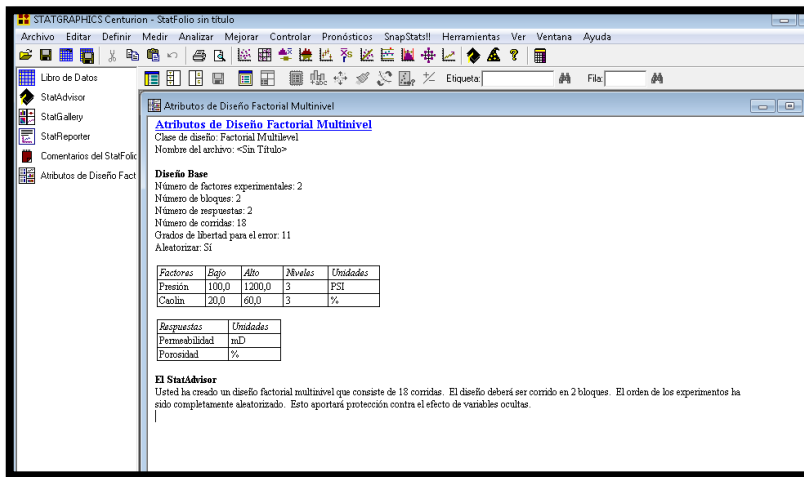
- f. Para que el diseño tenga mayor certeza se debe realizar una réplica de la muestra que se va a realizar.

Figura A-8. Opciones de diseño factorial multinivel



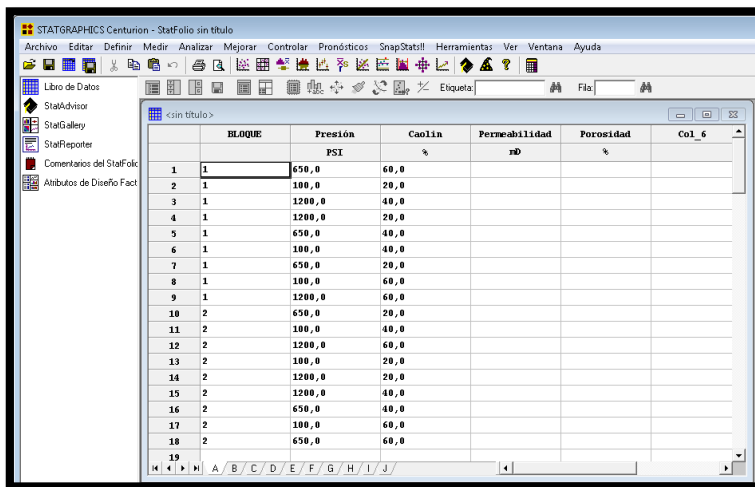
- g. El resultado del diseño no dice que el número de muestras a realizar son 18, con las especificaciones dadas.

Figura A-9. Libro de datos



h. El programa nos da la malla para introducir los datos de respuesta obtenidos en los procedimientos del laboratorio y proceder con la formulación.

Figura A-10. Malla generada por el programa



i. Se introducen en la malla los datos obtenidos después de medir las propiedades de los núcleos fabricados.

Figura A-11. Malla con datos

	BLOQUE	PRESION PSI	CADLÍN	PERMEABILIDAD mD	POROSIDAD
1	1	100,0	20,0	467,468	33,112
2	2	100,0	20,0	448,55	32,966
3	1	650,0	20,0	106,4436	27,899
4	2	650,0	20,0	188,027	27,952
5	1	1200,0	20,0	26,3138	21,707
6	2	1200,0	20,0	28,1905	21,794
7	1	100,0	40,0	104,19	24,349
8	2	100,0	40,0	105,93	24,708
9	1	650,0	40,0	95,2375	21,756
10	2	650,0	40,0	73,5008	21,826
11	1	1200,0	40,0	0,4538	11,628
12	2	1200,0	40,0	0,08703	11,563
13	1	100,0	60,0	39,84	22,599
14	2	100,0	60,0	43,87	21,233
15	1	650,0	60,0	0,7938	13,761
16	2	650,0	60,0	0,83	13,429
17	1	1200,0	60,0	0,107	9,764
18	2	1200,0	60,0	0,0888	8,916
19					
20					

- j. Se debe analizar en diseño en el software para generar el error de desviación y el comportamiento de los datos entre ellos.

Figura A-12. Analisis del Diseño

	BLOQUE	PRESION PSI	CADLÍN	PERMEABILIDAD mD	POROSIDAD
1	1	100,0	20,0	448,55	32,966
2	2	100,0	20,0	106,4436	27,899
3	1	650,0	20,0	188,027	27,952
4	2	650,0	20,0	26,3138	21,707
5	1	1200,0	20,0	28,1905	21,794
6	2	1200,0	20,0	104,19	24,349
7	1	100,0	40,0	105,93	24,708
8	2	100,0	40,0	95,2375	21,756
9	1	650,0	40,0	73,5008	21,826
10	2	650,0	40,0	0,4538	11,628
11	1	1200,0	40,0	0,08703	11,563
12	2	1200,0	40,0	39,84	22,599
13	1	100,0	60,0	43,87	21,233
14	2	100,0	60,0	0,7938	13,761
15	1	650,0	60,0	0,83	13,429
16	2	650,0	60,0	0,107	9,764
17	1	1200,0	60,0	0,0888	8,916
18	2	1200,0	60,0		
19					

- k. Después de generar la desviación se debe hacer una regresión en los datos para obtener la ecuación que modelara la formulación necesaria para fabricar plugs sintéticos.

Figura A-13. Resultados del Análisis del Diseño Permeabilidad

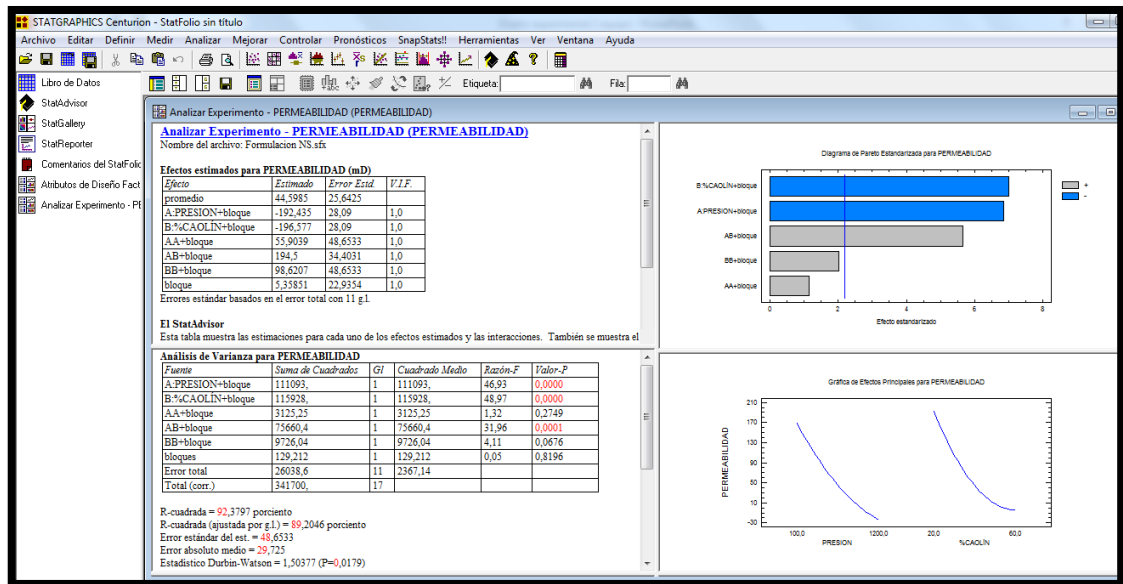
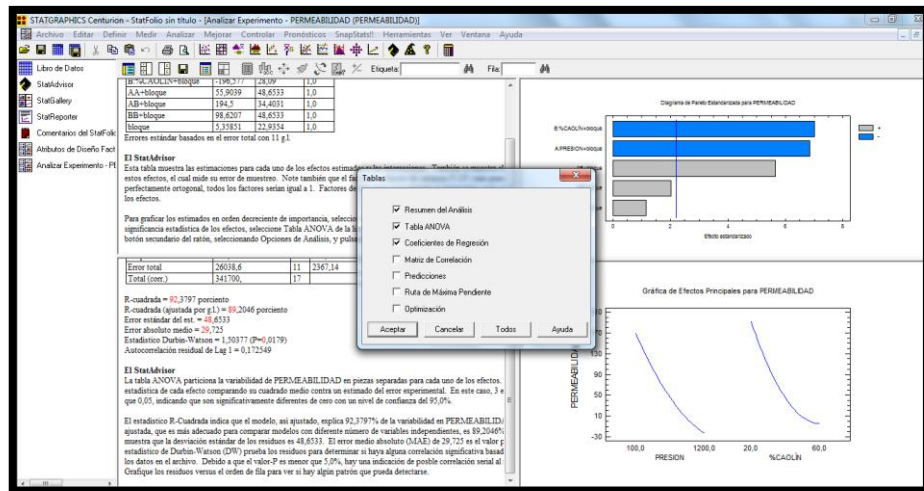
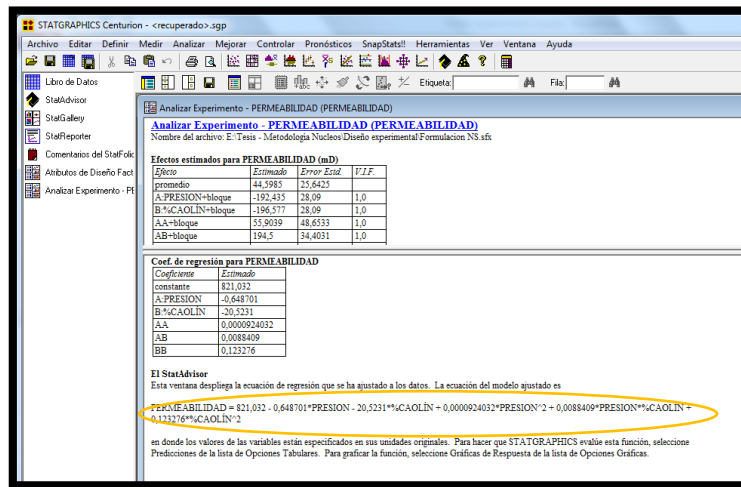


Figura A-14. Regresión del Diseño Permeabilidad



- I. Para cada variable de salida se genera una ecuación, en este caso hay una para porosidad y otra para permeabilidad. La primera en generarse es la primera variable de salida en este caso la permeabilidad.

Figura A-15. Ecuación de Formulación para Permeabilidad



- m. Para la ecuación de porosidad se debe analizar el diseño con la variable de porosidad y se corre el software. Y se realiza la regresión para así obtener la ecuación para la porosidad.

Figura A-16. Analisis Diseño Porosidad

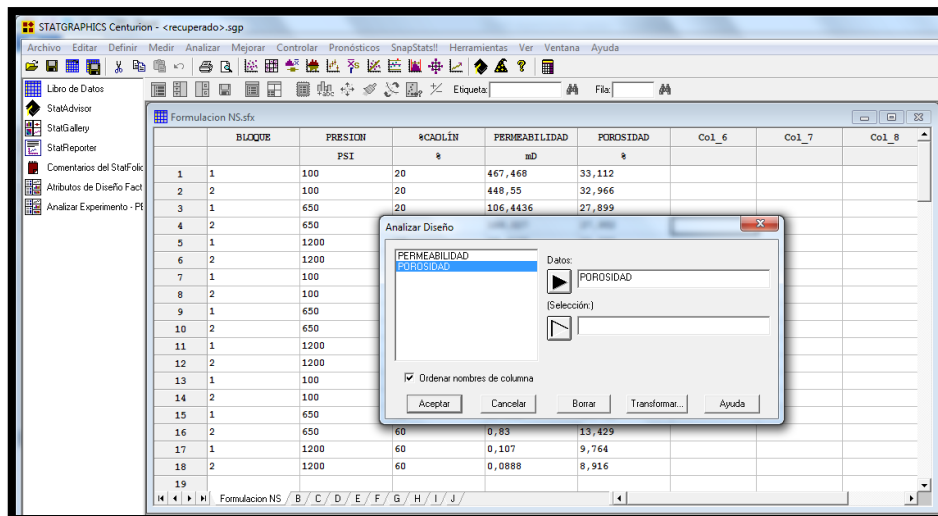


Figura A-17. Resultados del Analisis Diseño Porosidad

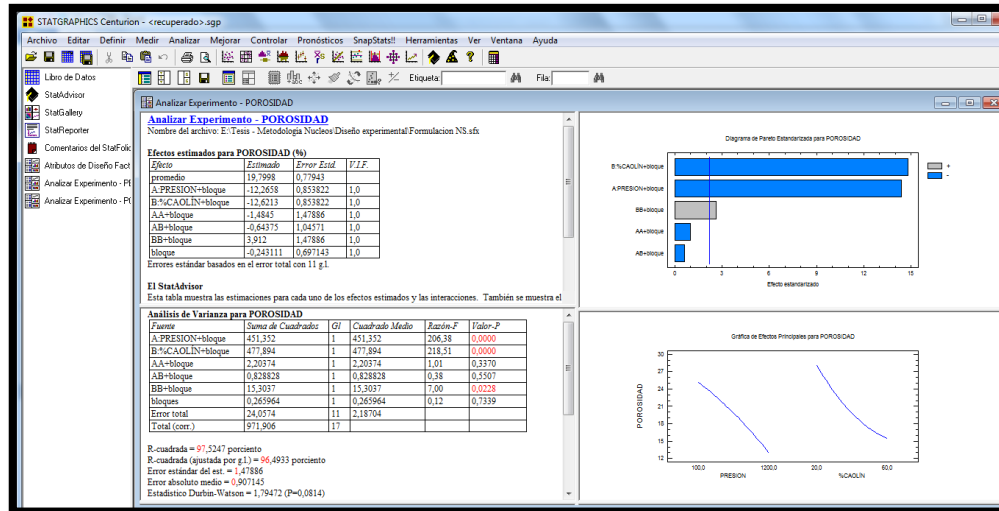
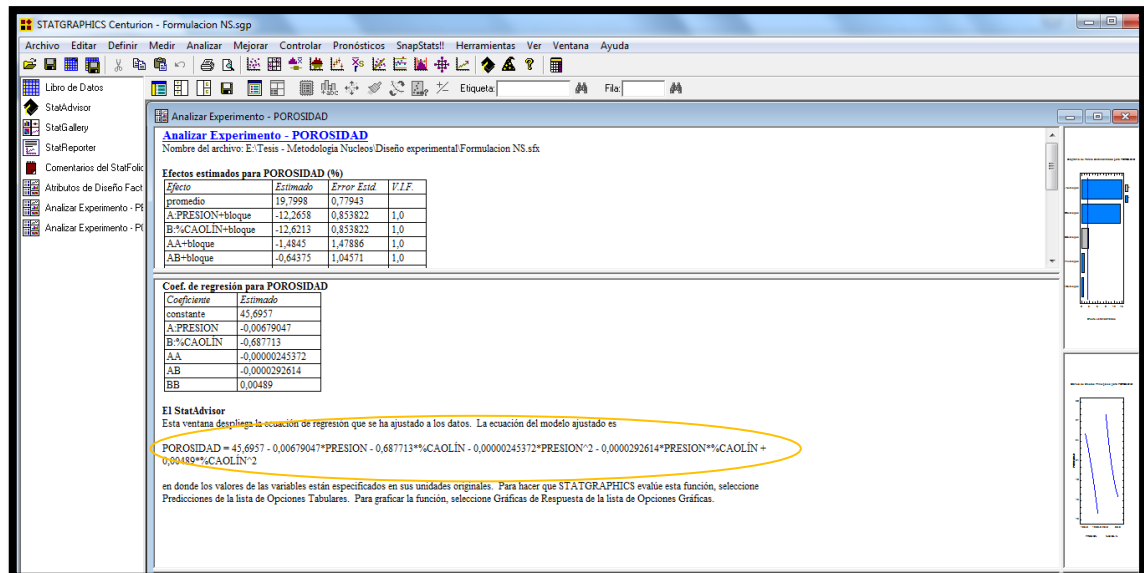


Figura A-18. Ecuación de Formulación para Porosidad



ANEXO B. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DE LA POROSIDAD

Para obtener la porosidad de una muestra por medio del porosímetro de Boyle, se debe hacer una serie de cálculos para su obtención final. A continuación se presenta el procedimiento por el cual se obtuvieron las porosidades de las 18 muestras sintéticas.⁵⁴

a). Prueba de fugas.

Es necesario hacer prueba de fugas al equipo cada vez que se va a ser uso de este, para tener seguridad en la medición.

- i. Se aplica vacío a todo el sistema incluyendo la celda de referencia y Matrix Cup.
- ii. Se cierra la válvula de vacío, y monitorear la presión en el transductor de presión digital. Esperar dos minutos, si no presenta variación en la presión, se asume que el equipo no tiene fugas.

b). Determinar el volumen de conexiones (V_2).

- i. Se colocan todos los discos de volumen conocido dentro del **matrix cup** respectivo, en este caso los de 1,5", debido a que este es el diámetro de las muestras sintéticas a medir.
- ii. Se aplica vacío al sistema, colocando la válvula en la posición **vacuum** y la válvula en **matrix cup**, se enciende la bomba de vacío. Una vez estabilizada la lectura en el transductor, se registra como la presión de vacío (P_v).
- iii. Se cierra la válvula del matrix cup (**off**), válvula de vacío (**off**) y se apaga la bomba de vacío.
- iv. Se da uso al regulador de Helio (permite la entrada de 80 psi).

⁵⁴RP40, A. P. I. "Recommended practices for core analysis". Feb, 1998.

- v. Se da la entrada de Helio a las líneas y a la celda de referencia, colocando las válvulas en posición: 1) **Helium**, 2) en **On**. y asegurar que 3) esté en **off**. Una vez se estabiliza la lectura en el transductor, se obtiene la presión inicial (P_i).
- vi. Se cierra la válvula de entrada de Helio, en **off**. Esperando que se estabilice la temperatura y la presión.
- vii. Se Abre la válvula del matriz cup y se permite que la presión se equilibre. obteniendo la presión final (P_f) una vez estabilizada.
- viii. Una vez obtenido la P_f se retira todo el helio del sistema para realizar los cálculos necesarios para determinar V_2 , haciendo uso de la siguiente ecuación.

Ecuación 30. Volumen de conexiones V_2

$$V_2 = \frac{(P_i - P_f) * (V_1 + V_3)}{P_f - P_v}$$

P_i = Presión inicial

P_f = Presión final

P_v = Presión de vacío

V_1 = Celda de referencia = 40.66 cc

V_3 = Vol. Conexiones internas = 7.70 cc

c). Prueba de control de calidad

Se determinó la porosidad a una muestra patrón (muestra con porosidad conocida), en este caso a la muestra (216B12C):

- i. Se introduce la muestra patrón en el matrix cup (1.5"). El espacio vacío se llena con discos de volumen conocido.
- ii. Se registran los discos no utilizados en el formato F004 (Figura B-1).
- iii. Se monta la celda (matrix cup) con la muestra en la base de las celdas (ajustar tornillo superior).

- iv. Se realizan los mismos pasos para la determinación del V_2 del numeral ii al viii, registrando los datos para determinar la propiedad de la muestra patrón.
- v. Se retira la muestra
- vi. Se verifica los datos obtenidos, determinado la porosidad, la cual debe coincidir con los datos ya establecidos.

La muestra 216B12C verifico que el equipo se encontraba en buen estado, por lo que se prosigió al cálculo de porosidad de las muestras sintéticas.

d). Montaje de muestras sintéticas al porosímetro.

- i. Se introduce la muestra sintética en el matrix cup (1.5"). El espacio vacío se llena con discos de volumen conocido.
- ii. Se registran los discos no utilizados en el formato F004 (Figura B-1).
- iii. Se monta la celda (matrix cup) con la muestra en la base de las celdas (ajustar tornillo superior).
- iv. Se realizan los mismo pasos para la determinación del V_2 , del numeral i al viii, registrando los datos para determinar la propiedad de cada muestra sintética (realizando este proceso dos veces por cada muestra).
- v. Se retira la muestra y se realiza el montaje de la siguiente, siguiendo el paso a paso para obtener los datos necesarios para el cálculo de la porosidad de cada muestra.

e). Cálculos para determinar las porosidades de las muestras sintéticas.

- i. Antes de montar cada muestra al porosímetro de Boyle, se debe medir el diámetro y longitud de cada una y determinar el volumen total de cada muestra sintética, determinado mediante la siguiente ecuación.

Ecuación B-1. Volumen total de la muestra

$$V_T = \frac{L * D^2 * \pi}{4}$$

V_T = volumen total de la muestra, (cm³).

L = longitud de la muestra, (cm).

D = diámetro de la muestra, (cm).

- ii. Se calcula la variable X , la cual corresponde al espacio vacío en la cámara, se determina por medio de la ecuación ()

Ecuación B-2. Espacios vacíos en la cámara

$$X = \frac{(P_i * P_f) * (V_1 + V_3) + V_2 * (P_v - P_f)}{P_f - P_v}$$

P_i = Presión inicial de la muestra

P_f = Presión final de la muestra

P_v = Presión de vacío de la muestra

V_1 = Celda de referencia = 40.66 cm³.

V_3 = Vol. Conexiones internas = 7.70 cm³.

- iii. Se calcula el volumen de granos dependiente del volumen de discos no usados, el cual fue registrado en el formato F004 para cada muestra.

Ecuación B-3. Volumen de granos

$$V_g = V_{DNU} - X$$

V_g = volumen de grano de la muestra, (cm³).

V_{DNU} = volumen de discos no usados de la muestra, (cm³).

X = Espacios vacíos en la cámara.

- iv. Finalmente una vez calculadas las variables anteriormente descritas, se procede a determinar la porosidad para cada muestra, por medio de la siguiente ecuación ().

Ecuación B-4. Porosidad


$$\emptyset = \left[1 - \frac{V_g}{V_T} \right]$$

\emptyset = porosidad de la muestra, (%).

V_g = volumen de grano de la muestra, (cm³).

V_T = volumen total de la muestra, (cm³).

Figura B-1. Formato F004 para registrar los datos de porosidad proporcionada por el laboratorio del parque tecnológico de Guatimar.

		ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS LABORATORIO DE ANALISIS PETROFISICOS		FORMATOS F004	
PRUEBA DE POROSIDAD (Pocosión de Boyle)		01-11-2010 VERSIONES		Págs. 1 de 2	
POZO: _____		POZO/PROYECTO: _____			
Dia: _____	Mes: _____	Año: _____	Hora: _____		
FECHA DE LA PRUEBA					
DIMENSIONES DE MUESTRAS					
MUESTRA					
PROFUNDIDAD					
LONGITUD. (cm)					
DIAMETRO. (cm)					
AREA. (cm ²)					
VOLUMEN TOTAL. (cm ³)					
PRESIONES Y TEMPERATURA					
PRESION DE VACIO. (PSIG)					
PRESION INICIAL. (PSIG)					
PRESION FINAL. (PSIG)					
TEMPERATURA					
X (cm ³)					
		DATOS PARA CALCULAR V _g			
V ₁	40.66 cm ³				
V ₂	7.7 cm ³				
PRESION DE VACIO. (PSIG)					
PRESION INICIAL. (PSIG)					
PRESION FINAL. (PSIG)					
TEMPERATURA					
VOLUMEN DE CONEXIONES ENTERRAS. V _e (cm ³)					
		DISCO NO. 1" 1.5"			
1	14.314	43.293			
2	11.337	28.980			
3	6.462	21.760			
4	6.434	7.262			
5	4.889				
6	1.739				
TOTAL	45.185	101.295			
CALCULO DE POROSIDAD					
		$V_{muestra} = \pi \cdot r^2 \cdot L$			
		$X = \frac{V_1(P_2 - P_1) + (V_1 + V_2)(P_1 - P_2)}{(P_2 - P_1)}$			
		$V_g = V_{DNV} - X$			
		$\phi = \left[1 - \frac{V_g}{V_muestra} \right]$			
		$V_2 = \frac{[P_1(V_1 + V_2)] - [P_2(V_1 + V_2)]}{P_1 - P_2}$			
ELABORADO POR: _____		VERIFICADOR POR: _____			
LABORÓ Laboratorio		REVISÓ Y APROBÓ Director del Laboratorio		COPIA CONTROLADA SI X= <input type="checkbox"/> NO = <input type="checkbox"/>	

Fuente: Instalaciones del Parque Tecnológico de Guatimar Universidad Industrial de Santander-Laboratorio de Petrofísica.

ANEXO C .PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD

Para medir las permeabilidades de las 18 muestras sintéticas construidas se hizo uso del permeámetro “CORE PET”, a continuación se presenta el procedimiento para obtener las permeabilidades de los núcleos.⁵⁵

a). Encendido del permeámetro

- i. Encender el computador asociado al permeámetro.
- ii. Encender el permeámetro conectándolo a la corriente eléctrica, y con el switch localizado en la parte superior izquierda del panel.
- iii. Iniciar el software de permeabilidad y cargar los datos de la muestra solicitados por el software.
- iv. Asegurar que el conector rápido que lleva el nitrógeno al equipo está conectado.
- v. Abrir la válvula del cilindro de nitrógeno y ajustar el regulador de salida del cilindro entre 80 y 100 psi
- vi. Con el regulador del equipo ajustar 100 psi.
- vii. Registrar los datos F005 (Figura C-1).

b). Montaje de la muestra

- i. Abrir la válvula manual para baja presión y asegurar que la de alta presión esté cerrada.
- ii. Mueva la válvula de overburden a la posición vacuum. Realizar vacío verificando el ingreso de la muestra.
- iii. Cerrar la válvula de baja presión. Apagar la bomba de vacío, y cargar la muestra por el extremo inferior del portamuestras.

⁵⁵RP40, A. P. I. “Recommended practices for core analysis”. Feb, 1998.

- iv. Armar nuevamente el portamuestras. Abrir la válvula de baja presión. Mover la válvula de overburden a la posición pressure. Encender la bomba de vacío hasta una presión de treinta libras.
- v. Cerrar la válvula de baja presión y abrir la válvula manual de alta presión. Llevar a la presión de sobrecarga deseada con la bomba manual.
- vi. Cerrar la válvula.

c). Control de calidad del permeámetro “CORE PET”.

Se determina la permeabilidad a una muestra patrón (Permeabilidad conocida) de manera que se verifique el estado del equipo, en este caso fue usada la muestra 216B12C. Obteniendo resultados óptimos, por lo cual se procede a la medición de las muestras sintéticas.


d). Medición de la permeabilidad

- i. Seleccionar en el software si es permeabilidad al aire o Klinkenberg, para este caso se selección permeabilidad al aire.
- ii. Revisar el comportamiento de la muestra.
- iii. Registrar los datos obtenidos en el formato (F005), (Figura C-1).
- iv. Se aconseja medir dos o más veces la permeabilidad de una misma muestra para asegurar la medición.

e). Descarga de la muestra

- i. Abrir la válvula de alta presión. Permitir el paso del aceite de confinamiento en la bomba manual para aliviar la presión.
- ii. Abrir la válvula manual para bajar la presión y asegurarse que la de alta presión esté cerrada.
- iii. Mover la válvula de overburden a la posición vacuum. Hacer vacío por dos minutos.
- iv. Cerrar la válvula de baja presión. Apagar la bomba de vacío. Sacar la muestra por el extremo inferior del portamuestras.

Figura C-1. Formato F005 para registrar los datos de la permeabilidad proporcionado por el laboratorio del parque tecnológico de Guatiguará.

		ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS LABORATORIO DE ANÁLISIS PETROFÍSICOS		FORMATOS	
		PRUEBA DE PERMEABILIDADES K_a Y K_m (PERMEÁMETRO CORE PET)		01-11-2010 VERSIONES	F005 Página 1 de 1
FECHA DE LA PRUEBA		PROYECTO O POZO			
Día	Mes	Año	Hora		
DATOS INICIALES					
Pozo					
Muestra					
Profundidad (ft)					
DIMENSIONES DE LA MUESTRA					
LONGITUD (cm)					
DIÁMETRO (cm)					
VARIABLES					
% APERTURA					
MEDIDOR DE FLUJO (HIGH/ LOW)					
T_{ps}					
PRESIÓN CONFINAMIENTO (psi)					
PERMEABILIDAD ABSOLUTA (mD)					
PERMEABILIDAD KLINKENBERG (mD)					
ELABORADO POR: _____ FIRMA: _____		VERIFICADO POR: _____ FIRMA: _____			
ELABORÓ	REVISÓ Y APROBÓ	COPIA CONTROLADA		SI	NO
Laboratorio	Director del Laboratorio			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fuente: Instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará Universidad Industrial de Santander-Laboratorio de Petrofísica.

ANEXO D.RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS A PARTIR DE LAS ECUACIONES DE STATGRAPHICS CENTURION

Presión	Caolín	Permeabilidad	Porosidad
100	20	443,616	33,135
100	30	308,864	28,674
100	40	198,767	25,191
100	50	113,325	22,685
100	60	52,539	21,158

300	20	356,632	31,464
300	30	239,561	26,944
300	40	147,146	23,402
300	50	79,386	20,838
300	60	36,282	19,252

500	20	267,040	29,596
500	30	167,651	25,018
500	40	92,918	21,417
500	50	42,840	18,795
500	60	17,417	17,150

700	20	194,840	27,532
700	30	113,133	22,895
700	40	56,082	19,236
700	50	23,685	16,555
700	60	15,944	14,852

900	20	120,032	25,272
900	30	56,007	20,576
900	40	16,638	16,859
900	50	8,923	14,119
900	60	3,864	12,358

1100	20	72,617	22,815
1100	30	26,274	18,061
1100	40	14,586	14,285
1100	50	7,553	11,487
1100	60	0,846	9,667

1200	20	26,68	21,513
1200	30	4,179	16,730
1200	40	1,332	12,925
1200	50	1,140	10,097
1200	60	0,704	8,248