



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 4 de junio de 2021

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Milton Ernesto Gómez Urbano, con C.C. No. 1082778943,

Dayro Emanuel Ramírez Trujillo, con C.C. No. 1082130096,

_____, con C.C. No. _____,

_____, con C.C. No. _____,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

titulado CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA EVALUAR LA EXPANSION DE LAS ARCILLAS

presentado y aprobado en el año 2021 como requisito para optar al título de INGENIEROS DE PETROLEOS;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Milton Ernesto Gómez u.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Milton Ernesto Gomez U.

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE: Dayro Emanuel Ramírez T.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Dayro Emanuel Ramirez T.

Firma:



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA EVALUAR LA EXPANSION DE LAS ARCILLAS

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
GOMEZ URBANO RAMIREZ TRUJILLO	MILTON ERNESTO DAYRO EMANUEL

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VARGAS CASTELLANOS	CONSTANZA

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
VARGAS CASTELLANOS	CONSTANZA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIEROS DE PETROLEOS

FACULTAD: INGENIERIA

PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERIA DE PETROLEOS

CIUDAD: NEIVA **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2021 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 134

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas__x__ Fotografías__ Grabaciones en discos__ Ilustraciones en general__x__ Grabados__
Láminas__ Litografías__ Mapas__ Música impresa__ Planos__ Retratos__ Sin ilustraciones__ Tablas
o Cuadros__x__



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Ninguno

MATERIAL ANEXO: -Carta de entrega del prototipo.

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria): Ninguno

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>arcillas</u>	<u>clays</u>	6. _____	_____
2. <u>Prototipo</u>	<u>Prototype</u>	7. _____	_____
3. <u>Hinchamiento osmótico</u>	<u>Osmotic swelling</u>	8. _____	_____
4. <u>Fluidos de perforación</u>	<u>drilling fluids</u>	9. _____	_____
5. _____	_____	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En esta tesis se propone el diseño, construcción y manual de uso de un prototipo que permita estudios experimentales metódicos de los efectos mecánicos relacionados con la succión osmótica en rocas arcillosas, según los estándares expuestos en la norma ASTM 4829.

En la parte inicial de diseño, se hace el análisis teórico de los factores que producen y/o afectan la reactividad de las arcillas expansivas, así como también, se hace una recopilación documental de los aparatos y procedimientos ya establecidos que puedan servir como referencia para el diseño y funcionamiento del prototipo. Como segunda parte, se utilizan softwares comerciales de diseño para diseñar cada una de las partes en modelado 2D y 3D, teniendo en cuenta también su ensamblaje.

Como tercera parte, según el uso que se le va a dar al prototipo, se estudian los materiales que son idóneos para soportar las exigencias de las pruebas que se realizan, posteriormente, se realiza la construcción del prototipo y prueba de ensamblaje.



Como parte última del presente documento, se hace una guía de ensamblaje, uso y manual de mantenimiento, además, de una guía de laboratorio que permita la utilización del equipo para prácticas de laboratorio, junto con el análisis y las conclusiones de los resultados obtenidos durante cada una de los procesos llevados a cabo.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This thesis proposes the design, construction and user manual of a prototype that allows methodical experimental studies of the mechanical effects related to osmotic suction in clay rocks, according to the standards set forth in the ASTM 4829 standard.

In the initial part of the design, a theoretical analysis is made of the factors that produce and / or affect the reactivity of expansive clays, as well as a documentary compilation of the devices and procedures already established that can serve as a reference for the design and operation of the prototype. As a second part, commercial design software is used to design each of the parts in 2D and 3D modeling, also taking into account their assembly.

As a third part, depending on the use that is going to be given to the prototype, the materials that are suitable to withstand the demands of the tests that are carried out are studied, later, the construction of the prototype and assembly test are carried out.

As the last part of this document, a guide for assembly, use and maintenance manual is made, as well as a laboratory guide that allows the use of the equipment for laboratory practices, together with the analysis and conclusions of the results obtained during each of the processes carried out.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Luis Humberto Orduz

Firma:

Nombre Jurado: Roberto Vargas Cuervo

Firma:

“CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA EVALUAR LA
EXPANSIÓN DE LAS ARCILLAS”

DAYRO EMANUEL RAMÍREZ TRUJILLO
MILTON ERNESTO GOMEZ URBANO

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA DE PETROLEOS
NEIVA, HUILA
2021

“CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA EVALUAR LA
EXPANSIÓN DE LAS ARCILLAS”

DAYRO EMANUEL RAMÍREZ TRUJILLO
MILTON ERNESTO GÓMEZ URBANO

Trabajo de grado presentado como requisito académico para optar al
título de ingeniero de petróleos.

Director

Msc. Constanza Vargas Castellanos
Docente de la Facultad de
Ingeniería programa ingeniería de
Petróleos Universidad
Surcolombiana

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA, HUILA
2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del director

Firma del evaluador

Firma del evaluador

Neiva, Huila

AGRADECIMIENTOS

Le brindamos nuestro agradecimiento a la profesora Constanza Vargas Castellanos por la atención prestada, su paciencia y las horas de trabajo que significó la realización del proyecto que se consigna en el presente documento.

A Don Efrén Mosquera, por su colaboración desinteresada en el laboratorio y por sus historias.

DEDICATORIA

Le dedicamos este trabajo ante todo a Dios por todas las bendiciones recibidas durante este proceso, a nuestros padres por su acompañamiento incondicional, a nuestros hermanos su apoyo pujante y a toda nuestra familia por brindarnos su ayuda cada vez que lo hemos necesitado.

Dayro Emanuel Ramírez Trujillo

Milton Ernesto Gómez Urbano

RESUMEN

En esta tesis se propone el diseño, construcción y manual de uso de un prototipo que permita estudios experimentales metódicos de los efectos mecánicos relacionados con la succión osmótica en rocas arcillosas, según los estándares expuestos en la norma ASTM 4829.

En la parte inicial de diseño, se hace el análisis teórico de los factores que producen y/o afectan la reactividad de las arcillas expansivas, así como también, se hace una recopilación documental de los aparatos y procedimientos ya establecidos que puedan servir como referencia para el diseño y funcionamiento del prototipo. Como segunda parte, se utilizan softwares comerciales de diseño para diseñar cada una de las partes en modelado 2D y 3D, teniendo en cuenta también su ensamblaje. Como tercera parte, según el uso que se le va a dar al prototipo, se estudian los materiales que son idóneos para soportar las exigencias de las pruebas que se realizan, posteriormente, se realiza la construcción del prototipo y prueba de ensamblaje.

Como parte última del presente documento, se hace una guía de ensamblaje, uso y manual de mantenimiento, además, de una guía de laboratorio que permita la utilización del equipo para prácticas de laboratorio, junto con el análisis y las conclusiones de los resultados obtenidos durante cada una de los procesos llevados a cabo.

ABSTRACT

This thesis proposes the design, construction and user manual of a prototype that allows methodical experimental studies of the mechanical effects related to osmotic suction in clay rocks, according to the standards set forth in the ASTM 4829 standard.

In the initial part of the design, a theoretical analysis is made of the factors that produce and / or affect the reactivity of expansive clays, as well as a documentary compilation of the devices and procedures already established that can serve as a reference for the design and operation of the prototype. As a second part, commercial design software is used to design each of the parts in 2D and 3D modeling, also taking into account their assembly.

As a third part, depending on the use that is going to be given to the prototype, the materials that are suitable to withstand the demands of the tests that are carried out are studied, later, the construction of the prototype and assembly test are carried out.

As the last part of this document, a guide for assembly, use and maintenance manual is made, as well as a laboratory guide that allows the use of the equipment for

laboratory practices, together with the analysis and conclusions of the results obtained during each of the processes carried out.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. OBJETIVOS.....	3
3.1 Objetivo General:.....	3
3.2 Objetivos Específicos:	3
4. MARCO TEÓRICO	4
4.1 LAS ARCILLAS.....	4
4.1.1 Características básicas.....	6
4.1.2 Composición y estructura química de las arcillas.	8
4.1.3 Mecanismos dinámicos de las arcillas: Hidratación Y Compactación.....	11
4.1.3.1 Cargas eléctricas y formación de Coloides.	12
4.1.3.2 <i>Formación de coloides.</i>	16
4.1.3.3 Efectos diagenéticos y de la compactación.....	19
4.1.4 El color y tipos de Arcillas.....	21
4.1.4.1 El color de las Arcillas.....	21
4.1.4.2 Tipos de arcilla.....	22
4.1.4.1 Los caolines.	22
4.1.4.2 Las esmesctitas.....	24
4.1.4.3 Las micas.	26
4.1.5 Mecanismos De Hidratación.....	26
4.1.5.1 Expansión cristalina.....	27
4.1.5.2 Expansión osmótica.	27
4.1.6 Efectos De La Compactación	28
4.2 RETOS DE LA PERFORACIÓN.....	33
4.2.1 La perforación de las arcillas, un reto geomecánica.	33
4.2.1.1 Mecánica De Rocas	33
4.2.2 Factores Que Afectan La Estabilidad Del Pozo.....	56
4.2.2.1 Características del lodo.....	56
4.2.2.2 Resistencia de la roca.....	58
4.2.3 Temperatura.....	59
5. MÉTODOS PARA MEDIR LA EXPANSIÓN DE ARCILLAS.....	61

5.1 Ensayo De Lambe	62
5.2 Ensayo De Expansión Libre.....	68
5.3 Ensayo De Consolidómetro.	68
6 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.	69
6.1 Bases De Diseño.	69
6.2 Diseño Del Equipo	70
6.2.1 Diseño general y esbozado del equipo.....	70
6.2.2 Selección de materiales.....	74
6.2.2.1 <i>Propiedades acero inoxidable.</i>	75
6.2.2.2 <i>Latón:</i>	77
6.2.3 Tabla de resumen de partes, materiales seleccionados y bondades del material conforme la función de la parte que compone.....	77
6.2.4 Diseño específico y dimensional de las partes.	79
6.2.4.1 <i>Molde o recinto de arcillas.</i>	80
6.2.4.2 <i>Base y marco metálico.</i>	82
6.2.4.3 <i>Consolidómetro.</i>	83
6.2.4.4 <i>Soporte micrómetro.</i>	84
6.2.4.5 <i>Tuercas.</i>	87
6.2.4.6 <i>Micrómetro.</i>	88
6.2.5 Partes complementarias.....	89
6.2.5.1 <i>Pisón o martillo compactador.</i>	89
6.2.5.2 <i>Balanza.</i>	90
6.2.5.3 <i>Horno de secado.</i>	90
6.2.5.4 <i>Tamices.</i>	90
6.2.5.5 <i>Mezcla de herramientas.</i>	90
6.3 VALORACIÓN ECONÓMICA	90
6.4 MONTAJE Y ENSAMBLADO DEL EQUIPO.....	91
5.4.1 Base y marco metálico.	91
6.4.1 Molde o recinto de arcillas-inferior.....	92
6.4.2 Primera Rocas porosa.	92
6.4.3 Molde o recinto de arcillas-Superior.	92
6.4.4 Tuercas.....	93
.....	93
6.4.5 Muestra y Roca porosa.....	94
6.4.6 Inundación de la muestra con lodo de perforación:	94
6.4.7 Consolidómetro.	94
6.4.8 Soporte del micrómetro.	95
6.4.9 Micrómetro:.....	95

7.	MANUAL DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO.	96
7.2	GUÍA DE LABORATORIO EXPANSIÓN DE ARCILLAS.	96
7.2.2	Objetivos del ensayo de expansión de arcillas.	96
7.2.3	Materiales y equipos:.....	96
7.2.4	preparación y compactación de la muestra de arcilla.	97
7.2.4.1	<i>Preparación de la muestra.</i>	97
7.2.4.2	<i>Compactación de la muestra de arcilla</i>	98
7.2.4.3	<i>Medidas de expansión de la arcilla expuesta a un lodo.</i>	98
7.3	Manual De Uso Y Mantenimiento Del Prototipo.....	100
7.3.2	Arme.	100
7.3.3	Desarme.	101
7.3.4	Limpieza.	101
7.3.5	Mantenimiento.	102
7.4	Ensayos Realizados	102
7.4.2	Preparación de las muestras.	102
7.4.3	Preparación de los fluidos.	103
7.4.3.1	Lodo Base agua, lodo base agua salada y Lodo Base aceite.	104
8.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS	107
8.2.1	Efectividad De La Medición De La Expansión De Las Arcillas Usando El Prototipo.	108
8.2.2	Ventajas del prototipo.	109
8.2.3	Desventajas del prototipo.	109
8.2.4	Ficha técnica del prototipo.	110
9.	ANEXOS.....	111
9.1	Carta De Entrega del Prototipo.	111
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	112
10.1	CONCLUSIONES	112
10.2	RECOMENDACIONES.	112
11.	BIBLIOGRAFÍA	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de formación de las lutitas.	6
Figura 2. La lutita está formada de láminas microscópicas de arcilla que se apilan formando una estructura parecida a una baraja de cartas.....	7
Figura 3. (a) Tetraedro de sílice-oxígeno (B) Octaedro de aluminio magnesio.....	8
Figura 4. a) Placa de sílice. b) Placa de gibbsita. C) Placa de sílice-gibbsita.	9
Figura 5. Estructura simbólica de la caolinita.....	10
Figura 6. Estructura simbólica de a) illita y b) montmorillonita.	10
Figura 7. Difusión de la doble capa e Iones alrededor de la partícula de arcilla. ...	13
Figura 8. Casos de la atracción de la molécula de agua en la arcilla.	14
Figura 9. Naturaleza dipolar del agua a) Disposición asimétrica de los átomos de hidrógeno. b) Dipolo.....	14
Figura 10. Partícula típica de caolinita (A) 10.000 por 1.000 armstrong y partícula típica de montmorillonita 1.000 por 10 Armstrong.....	15
Figura 11. Esfuerzos de hidratación en los planos estratificados.	16
Figura 12. Efecto Tyndall hace evidenciar la presencia de coloides.....	17
Figura 13. Micela coloidal rodeada por las cargas eléctricas.....	17
Figura 14. Iones positivos adsorbidos hacia las cargas electronegativas del coloide.	18
Figura 15. Iones positivos adsorbidos hacia las cargas electronegativas del coloide.	19
Figura 16. Familia de los caolines.....	22
Figura 17. Disposición y por tanto diferencia entre los caolines.	23
Figura 18. Estructura fundamental de los caolines.	24
Figura 19. Diferentes tipos de Esmectitas.	25
Figura 20. Composición general de la lámina de esmectita.....	25
Figura 21. Familia de las micas.	26
Figura 22. Curvas de compactación de los suelos arcillosos para dos energías de compactación distintas con sus correspondientes microfábricas.....	28
Figura 23. Correlación del contenido de humedad con peso específico y conductividad hidráulica (k) de un suelo arcilloso.....	30
Figura 24. Efecto de la compactación en el ensayo de compresibilidad unidimensional para suelos arcillosos con (a) baja presión de consolidación y (b) alta presión de consolidación.....	31
Figura 25. Ensayo de resistencia a compresión simple, relación tensión desviadora y deformación axial de tres muestras de suelo compactado arcilloso; A) Muestra seca, B) cerca de la humedad óptima y C) muestra húmeda de la curva de compactación (gráfico en la parte superior derecha).....	31
Figura 26. Naturaleza de la variación en el hinchamiento y la retracción de una arcilla expansiva.....	32
Figura 27. Compresión de un núcleo de Roca hasta el fallo.....	35
Figura 28. Compresión de un núcleo de roca con presión de confinamiento.	35
Figura 29. Tipos de esfuerzos.....	37

<i>Figura 30.</i> Diagramas esfuerzo-deformación unitaria, convencional y real, para un material dúctil.....	39
<i>Figura 31.</i> Cuerpo sometido a esfuerzo de corte.....	40
<i>Figura 32.</i> Cuerpo que sufre esfuerzo de tracción o compresión B) Cuerpo que sufre esfuerzo de compresión.....	41
<i>Figura 33.</i> Esfuerzos totales y efectivos. σ' :efectivo= σ (total)- μ	42
<i>Figura 34.</i> El esfuerzo efectivo es el que se da por el contacto entre los granos. La presión de poro es un esfuerzo que se da por el contacto entre el fluido con los granos. La presión de poro ayuda a soportar la sobrecarga.....	43
<i>Figura 35.</i> Diagrama esfuerzo vs deformación de un cuerpo sometido a compresión.	44
<i>Figura 36.</i> Relación de Poisson.	45
<i>Figura 37.</i> Esfuerzos a los que está sometida una formación de carbón.....	46
<i>Figura 38.</i> El elemento de la roca in situ se encuentra en equilibrio, provocado por la sobrecarga generada por las rocas vecinas. Esto genera una presión de confinamiento que impide que la roca se deforme.....	47
<i>Figura 39.</i> Al perforar se remueven fragmentos de roca y, por ende, el esfuerzo de soporte.....	48
<i>Figura 40.</i> La presión interna intenta separar en dos partes el tanque. La presión interna genera un esfuerzo de tensión tangencial en las paredes del recipiente...48	48
<i>Figura 41.</i> La presión interna intenta separar en dos partes el tanque. La presión interna genera un esfuerzo de tensión tangencial en las paredes del recipiente. Fuente: (Mitchell , 2001)	48
<i>Figura 42.</i> Al momento en que se remueve fragmentos de roca durante la perforación, los campos de esfuerzos se re-distribuyen al rededor del agujero como esfuerzos tangenciales.	49
<i>Figura 43.</i> A) Cuando las fuerzas horizontales son iguales, el esfuerzo tangencial es uniforme alrededor del agujero. B) Cuando los esfuerzos horizontales no son iguales, el esfuerzo tangencial no es uniforme en el agujero.	49
<i>Figura 44.</i> El esfuerzo tangencial es máximo en las paredes del agujero y se reduce a medida que se adentra a la formación, llegando a cero a una distancia de 3 veces el radio del agujero.	50
<i>Figura 45.</i> Regímenes de esfuerzos.	51
<i>Figura 46.</i> Agujero alterando las líneas de corriente de esfuerzos. El esfuerzo compresivo es mayor donde las líneas convergen y menor donde se separan.....	52
<i>Figura 47.</i> Líneas de corrientes de esfuerzos a la izquierda y curvas de nivel a la derecha. Las curvas de nivel representan la relación del esfuerzo máximo con el campo de esfuerzo máximo. En la mayoría de los casos el esfuerzo principal es el tangencial.	53
<i>Figura 48-</i> El agujero puede tomar forma elíptica debido a la vibración de la tubería. El esfuerzo tangencial puede ser menor que en el agujero circular si el es mayor campo de esfuerzos está alineado con el mayor eje.	54
<i>Figura 49.</i> Forma típica del círculo de Mohr.	55
<i>Figura 50.</i> La prueba de núcleos con presiones de confinamiento establece los rangos de esfuerzo aceptables.....	56

Figura 51. El esfuerzo radial provee a la roca una presión de confinamiento, lo que incrementa la resistencia aparente de la roca.....	57
Figura 52. La roca removida proveía esfuerzos, esfuerzos que son reemplazados por esfuerzos radiales y tangenciales.....	57
Figura 53. Relación entre esfuerzo radial y tangencial y su influencia en la fractura hidráulica.	57
Figura 54. Pesos típicos de lodo usados.	58
Figura 55. Gráfica profundidad vs penetración.	59
Figura 56. Un incremento en la temperatura reduce el esfuerzo radial y aumenta el tangencial, provocando inestabilidad del agujero. Un cambio pequeño de la temperatura mantendrá un agujero estable, no obstante, un gran diferencial de temperatura genera perdida de circulación.....	61
Figura 57. Índice de expansión Vs Cambio volumétrico potencia (CVP)	63
Figura 58. Aparato de Lambe.	63
Figura 59. Corte transversal esbozado del prototipo donde se pueden observar sus distintos componentes.	72
Figura 60.Efectos de la oxidación sobre el acero común (Izquierda) y acero inoxidable (Derecha).....	75
Figura 61. Vista de alzado sección superior del molde del prototipo.	80
Figura 62. Vista de planta sección superior del molde del prototipo.	80
Figura 63. Vista de planta sección inferior del prototipo.	81
Figura 64. Vista de alzado sección inferior del molde del prototipo.	82
Figura 65. Vista de planta base del prototipo.....	82
Figura 66. Vista de alzado de base y marco metálico del prototipo.	83
Figura 67. Consolidómetro visto desde un plano contra picado.....	83
Figura 68. Vista frontal cilindro vertical.	84
Figura 69. Vista superior de cilindro metálico vertical.	84
Figura 70. vista frontal de cilindro metálico horizontal.	85
Figura 71. Vista superior cilindro metálico horizontal.....	85
Figura 72. Vista frontal unión de soporte del micrómetro.....	86
Figura 73. Vista superior unión de soporte del micrómetro.....	86
Figura 74. Vista superior de las tuercas.....	87
Figura 75. Vista frontal tuercas.	87
Figura 76.(derecha) Partes externas del micrómetro.....	88
Figura 77. Partes internas del micrómetro.	88
Figura 78. Paso 1 base y marco metálico.....	91
Figura 79. Paso 2. Sección inferior del molde.....	92
Figura 80. Paso 3- Inserción primera piedra porosa.....	92
Figura 81. Paso 4- Recinto de arcillas sección superior.	93
Figura 82. Paso 5- Ajustar las tuercas.	93
Figura 83. Paso 6- Inserte muestra de arcilla y piedra porosa.....	94
Figura 84. paso 8-Inserción del consolidómetro.	94
Figura 85. Paso 9- Soporte del micrómetro.	95
Figura 86. Paso 10- Micrómetro.....	95

<i>Figura 87.</i> Muestra de arcilla de tipo bentonita siendo compactada por el apisonador.	102
<i>Figura 88.</i> arcilla organofílica después de ser compactada y recortada.	102
<i>Figura 89.</i> Arcilla organofílica siendo preparada para tarado y posterior secado para determinar su contenido de humedad.....	103
Figura 90. Ficha técnica del prototipo.....	110
Figura 102. Ficha técnica del prototipo.....	121

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Límites de tamaño de grano según diferentes organizaciones.	5
Tabla 2. Superficie específica y capacidad de intercambio catiónico para algunos minerales de arcilla.	12
Tabla 3. Numero de capas y humedad del suelo.....	65
Tabla 4. Comparación entre acero inoxidable 304 y 316.....	77
Tabla 5. Resumen de partes, materiales seleccionados y sus bondades.....	78
Tabla 6. Relación entre grado de expansión de arcillas reactivas y porcentaje de cambio de volumen.....	89
Tabla 7. Valoración económica del prototipo a fecha de 15/10/2020	90
Tabla 8. Resultados pruebas de laboratorio.	105

ANEXOS

Anexo 1. Carta De Entrega Del Prototipo.....	111
--	-----

INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de perforación de pozos se hace necesario atravesar formaciones litológicas que cuentan con una composición variable y características singulares, entre éstas se pueden encontrar las formaciones con contenido de arcilla reactiva, las cuales adquieren una gran relevancia pues según Mitchel¹ son potenciales promotores de problemas como embotamiento de la tubería de perforación, pérdida de la integridad del pozo y en el peor de los casos reventón o “Blowout”. Según Badillo y Amorocho² el incremento de costos al atravesar las formaciones arcillosas puede ser de entre un 10% y 15% del presupuesto base presentado para el proyecto, además de los riesgos a la salud y a la vida que esto conlleva, siendo de vital importancia realizar estudios que permitan determinar factores que ayuden a mitigar los sobrecostos a la hora de realizar la perforación y sobre todo, que ayuden a prevenir las lesiones o la pérdida de la vida a los trabajadores de la industria de los hidrocarburos.

En el presente documento se dispone un estudio teórico de los factores que promueven la expansión de las arcillas reactivas, analizando su comportamiento de la interacción arcilla-fluido para así, con la metodología adecuada, lograr proponer un diseño, construcción y prueba de un prototipo que ayude a predecir y analizar de manera práctica y rápida el comportamiento de la interacción roca-fluido.

¹ MITCHEL, John. Perforando sin problemas. The woodlands. Vol 1.

² Badillo , Juan , y Ricardo Amorocho P. «Influencia de la composición mineral de rocas arcillosas en la estabilidad de de rocas arcillosas en la estabilidad de pozos petroleros.» Boletín de Geología 34, nº 1 (06, 2012).

2. JUSTIFICACIÓN

En la perforación de pozos en la industria de los hidrocarburos se hace necesario atravesar e irrumpir en formaciones geológicas con propiedades y composiciones muy singulares y variadas. Este proceso es crítico, difícil y presenta muchos retos para la cuadrilla de perforación, uno de ellos es la distancia mínima entre la tubería de perforación y las paredes del agujero, pues cualquier alteración puede comprometer esta distancia, provocar embotellamiento de la tubería y en los peores casos la pérdida del agujero, siendo así, se debe poner principal atención a las formaciones que tienen más propensión a provocar estos embotellamientos y en este punto entran a colación las formaciones que tienen alto contenido de arcillas reactivas.

Este tipo de lutitas reaccionan al interactuar con agua de bajo contenido iónico, provocando un efecto mecánico derivado de la succión osmótica que se produce como consecuencia una expansión en la estructura de la roca o, en otras palabras, la expansión de las arcillas. Cuando se da este proceso, se compromete seriamente la integridad de la operación petrolera y también del pozo debido a que el diámetro del hueco que está siendo perforado disminuye y se pierde estabilidad en las paredes provocando derrumbes, embotamiento, pega de la tubería, entre otros. Con lo anterior dicho, el presente proyecto va enfocado a la construcción de un prototipo que permite identificar el papel de las interacciones del sistema roca-fluido, de la succión osmótica y los efectos mecánicos que sean desencadenados por los mismos. De igual manera, evaluar su desempeño y viabilidad práctica para la utilización investigativa y académica de la Universidad Surcolombiana y/u otros entes relacionados.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General:

Realizar el diseño y construcción de un prototipo que permita identificar el comportamiento de la expansión Roca-Fluido (Lodo Base Agua, base aceite y base agua salada).

3.2 Objetivos Específicos:

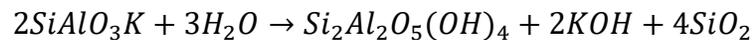
- Realizar la revisión documental para establecer un diseño para el prototipo de medición por presión de la expansión de las arcillas.
- Construir el prototipo de medición de la expansión de arcillas.
- Elaborar el manual de uso y mantenimiento del equipo.
- Realizar al menos 3 ensayos con diferentes arcillas y/o fluidos de perforación para corroborar la operación del equipo.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 LAS ARCILLAS.

Las arcillas al formar parte del grupo conocido como “rocas sedimentarias”, según Lopez³ deben su origen y formación en primera instancia a las acciones desintegrantes provocadas por factores medioambientales, procesos de meteorización y procesos de erosión que son sufridos por los macizos rocosos preexistentes con contenido de silicatos, siendo así, El suelo como lo conocemos tiene, a grosso modo, tres grupos rocosos básicos: Rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

En lo expuesto por Vicente H y Ruíz Martín⁴, en los ambientes sedimentarios los silicatos sufren diferentes tipos de alteraciones las cuales varían según su estructura, contenido de Aluminio o de las condiciones medioambientales, de esta manera y como resultado de la descomposición de la estructura inicial, se da a lugar a minerales estructuralmente más estables en las condiciones existentes en la superficie terrestre, siendo así los más característicos, pero no los únicos, los denominados como arcillas. Siendo más específicos y citando a Lopez⁵ la fuente primordial de las arcillas se encuentra en la transformación de los minerales silicatados como son las micas, los feldestpatos, anfíboles, piroxenos, etc. Tomando como ejemplo la ortosa (*Fórmula 1*) se descompone en una serie de etapas que pueden ser resumidas en la reacción global que se muestra a continuación.



Formula 1. Descomposición de la Ortosa.

En este proceso cuando una superficie se expone a procesos de erosión, se desintegra o deriva en partículas de diferentes tamaños denominados sedimentos, según Braja⁶, dependiendo del tamaño de la partícula de suelo estos se dividen en: gravas, arenas, limos y arcillas, obedeciendo a la organización por la que asigne su

³ Lopez, Y. Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera. Palmira, Valle: División de Investigaciones de la Universidad. Obtenido de Biblioteca digital Universidad Nacional de Colombia: http://www.bdigital.unal.edu.co/46132/2/9588095050_Part02.PDF, (17 de 08 de 2000).

⁴ Vicente Hidalgo, M. E., & Ruíz Martín, L. Servidor Web de Minerales. Obtenido de Clases minerales: http://greco.fmc.cie.uva.es/mineralogia/contenido/clases_miner8_6.html. (7 de 10 de 2020).

⁵ Lopez. Op Cit., P. 31

⁶ Braja M, D.Origen de los depósitos del suelo, tamaño de grano y forma. Mexico D.F : Learning. (2013). P. 1

clasificación granulométrica, estos también reciben tamaño y nombre. A continuación; se presenta una tabla de clasificación por diferentes organizaciones por su tamaño.

Tabla 1. Límites de tamaño de grano según diferentes organizaciones.

Nombre de la organización	Tamaño de grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	≥ 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	≤ 0.002
Departamento de agricultura de EU (USDA)	≥ 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	≤ 0.002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del transporte (AASHTO)	76 .2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	≤ 0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (Limos y arcillas ≤ 0.075)	

Fuente: Modificado de Braja⁷

Como describe Braja⁸, muchas de las propiedades físicas y químicas de los suelos son evaluadas por el tamaño de sus partículas, sin embargo, es importante aclarar que, si se basa en tamaño, partículas pequeñas que son definidas como arcillas, no son necesariamente minerales arcilla, ya que estos deben su origen a una fuente primaria de alteración de los minerales silicatados de aluminio, hierro y magnesio, como lo son los feldespatos, micas, anfíboles, piroxenos.

Mitchel⁹ habla del proceso de formación de la lutita (grupo al que pertenecen las arcillas), proceso que es dado en un medio marino, su composición son sedimentos finos de tamaño inferior a dos micras, que se precipitan progresivamente en el fondo

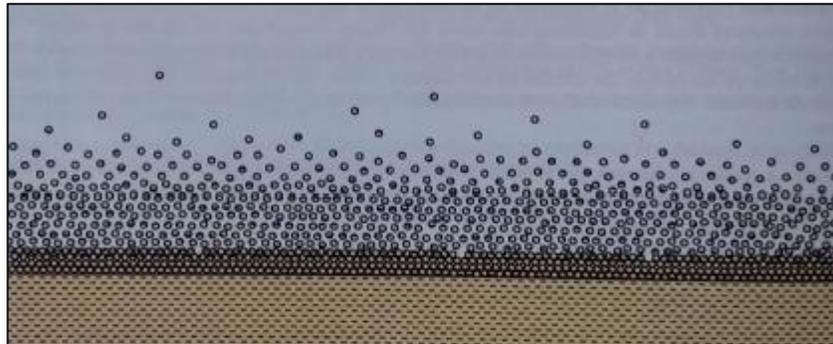
⁷ Braja M, Op Cit., P. 2

⁸ Ibid. P. 2

⁹ Mitchell, J. Perforando sin problemas. The woodlandas, Texas, Estados Unidos.: Drillbert engineerong INC. (2001). P 112

del océano para luego entrar en el proceso de diagénesis (El paso que sufre el sedimento para convertirse en roca sedimentaria mediante procesos de Compactación y consolidación), en el cuál, a la razón en que los primeros granos de la lutita son depositados en un principio, son rodeados por agua, sin embargo, según se vayan depositando una mayor cantidad de sedimentos (*Ver ilustración 1*) se comienza a evidenciar el proceso de la compactación donde se libera agua de la estructura porosa, los granos tienen un mayor empacamiento, las partículas ocupan una posición más estable y se reduce la porosidad y la permeabilidad.

Figura 1. Proceso de formación de las lutitas.



Fuente: (Mitchell , 2001)

4.1.1 Características básicas.

Una característica muy marcada de los minerales de arcilla y las lutitas es su porosidad y permeabilidad, donde recurriendo Oilfield Glossary¹⁰ “El porcentaje de volumen de poros o espacio poroso, o el volumen de roca que puede contener fluidos”, por otra parte, Oilfield Glossary¹¹ define que permeabilidad se describe como la medición de la capacidad de una roca para permitir el paso de los fluidos de tal manera que la permeabilidad se presenta como resultado de la interconexión del espacio poroso formando un pasaje por el cual el fluido pasa.

Mitchell¹² aduce que la lutita es la roca más porosa de todas las rocas sedimentarias, así mismo, normalmente es la que posee menos permeabilidad. Este fenómeno es debido a que está compuesta por granos demasiado pequeños y las conexiones entre los espacios porosos se vuelven muy pequeños durante el proceso de compactación siendo tal, que se vuelve casi impermeable y el agua ya

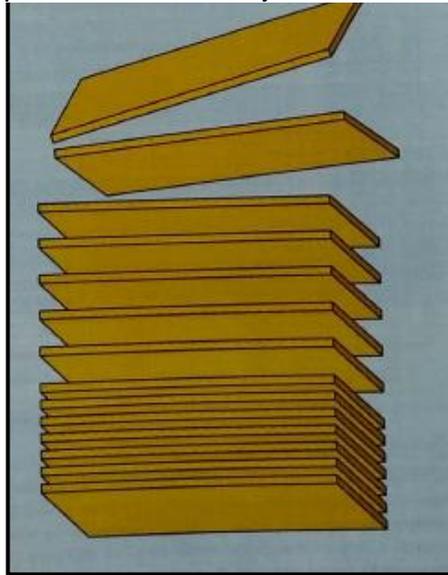
¹⁰ Oilfield Glossary. Oilfield Glossary en Español. Obtenido de <https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/p/porosity.aspx> , (12 de 03 de 2020).

¹¹ Oilfield Glossary. Oilfield Glossary en Español. Obtenido de <https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/p/permeability.aspx>. (12 de 03 de 2020).

¹² Mitchell, Op Cit., P 113

no puede pasar de un poro a otro. En su mayoría los sedimentos que conforman la lutita son partículas de mineral de arcilla, ya que, las arenas y sedimentos con un tamaño superior a limo se depositan en las riveras de los deltas provocando que solamente las partículas coloidales de tamaño arcilla se depositen en aguas más calmas. En algunos tipos de arcilla la unión entre las láminas cristalinas es más débil permitiendo que el agua penetre sin ningún esfuerzo, haciendo que las láminas se aparten. Hay ocasiones en que las láminas de arcilla continúan expandiéndose a tal punto, que ya no se encuentran asociadas entre ellas, este grado de expansión se conoce como dispersión. En gran mayoría, los componentes de la lutita son partículas de arcilla. Esto es principalmente porque las arenas y partículas de tamaño superior se depositan en las riveras de los deltas, dejando así que las partículas coloidales de tamaño arcilla se depositen en aguas más tranquilas. Las partículas de arcillas consisten en una mezcla de minerales que forman una estructura cristalina en forma de láminas planas similares a una mica. Al ir avanzando la deposición y compactación de la arcilla, estas estructuras cristalinas laminares crecen en forma de una larga cadena, orientándose una con otras formando una estructura parecida a una baraja de cartas (*Ver figura 2*). Dichas láminas son fuertes, no obstante, se separan fácilmente entre sí.

Figura 2. La lutita está formada de láminas microscópicas de arcilla que se apilan formando una estructura parecida a una baraja de cartas.



Fuente: (Mitchell , 2001)

Para Mitchell ¹³Otra característica importante y que se desglosará más adelante, es la relevancia que tiene para la resistencia y comportamiento de la lutita, la cantidad y tipo de fluido que se encuentra inmerso entre los espacios porosos. Por otra parte,

¹³ Ibid. P. 114

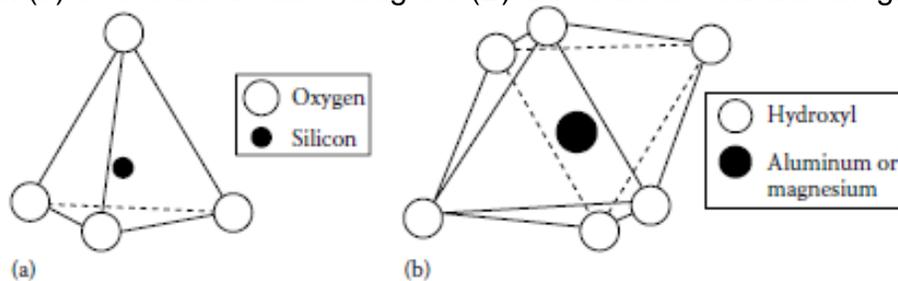
la lutita joven más cerca de la superficie tiende a ser suave y plástica, mientras la lutita más “vieja” y profunda comúnmente es más dura y frágil.

Las propiedades de cualquier arcilla dependen de los minerales que lo componen, siendo así, existen varios tipos de arcilla que generan diferentes tipos de lutitas. Los minerales arcillosos más comunes son: Smectitas, Illitas, Kaolinitas y Cloritas.

4.1.2 Composición y estructura química de las arcillas.

Braja¹⁴ expresa que, en la estructura cristalina de las arcillas, Comúnmente encontramos dos unidades cristalinas básicas en los minerales de arcilla: Un tetraedro de silicio y oxígeno, la cual, consta de cuatro átomos de oxígeno que rodean un átomo de silicio, como se muestra en la *figura 3(a)*. Por su parte, en la *figura 3(B)* se puede observar una unidad octaédrica que se encuentra conformada por seis unidades de Hidroxilo que rodean una unidad de aluminio (O magnesio). No obstante, los tetraedros son combinados para formar capas de silicio como se observa en la figura 4, debe notarse, que los tres átomos de oxígenos presentes en la base del tetraedro es compartida por los tetraedros circundantes (Ver figura 4(a)).

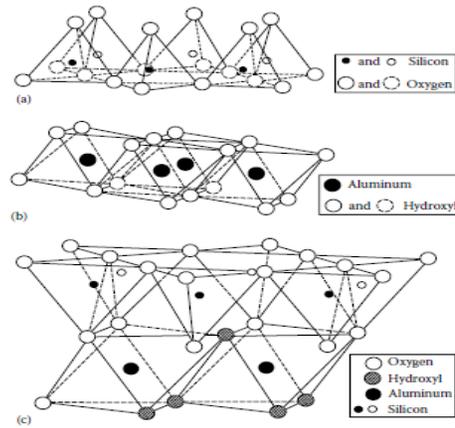
Figura 3. (a) Tetraedro de silice-oxígeno (B) Octaedro de aluminio magnesio.



Fuente: (Braja M., 2019)

¹⁴ Braja M., D. *Advanced Soil Mechanics*. Boca Ratón, FL: CRC Press. (2019), P 3

Figura 4. a) Placa de sílice. b) Placa de gibbsita. C) Placa de sílice-gibbsita.



Fuente: (Braja M., 2019)

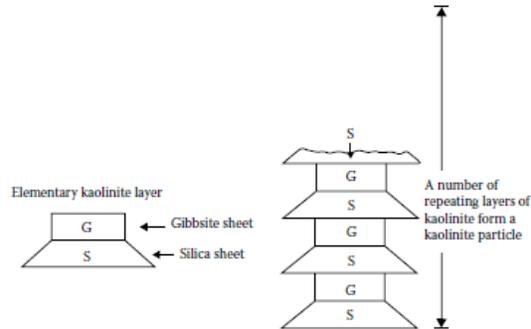
Braja¹⁵ indica que Cada átomo de silicio al contar con una valencia positiva de 4 está unido con 4 átomos de oxígeno, con una valencia positiva de 8, siendo así, cada oxígeno encontrado en la base del tetraedro es compartido por dos átomos de silicio, quedando de esa manera una carga negativa del átomo de oxígeno ubicado en la parte superior del tetraedro que debe ser compensada. Por otra parte, si lo que contamos es con la combinación de octaedros formados por aluminio, formamos placas de Gibbsita (Ver Figura 4(b)), por último, si los principales átomos metálicos de las unidades octaédricas son átomos de magnesio, las láminas son denominadas Brucita, donde es común que las placas u hojas de sílice se apilan sobre las hojas octaédricas, provocando así que los átomos de oxígeno reemplacen a los hidroxilos al intentar satisfacer sus enlaces de valencia. Esto se ve en la Figura 4 (C).

De igual manera, Braja¹⁶ instruye que algunos minerales de arcilla se ven dados por la repetición de láminas de dos capas, siendo que una lámina de dos capas es la unión entre una hoja de sílice y otra de gibbsita, o una combinación entre una hoja de sílice y brucita. Las capas mantienen esta unión gracias a los enlaces de hidrógeno y fuerzas de Valencia secundarias, entre los minerales de arcilla más importantes podemos encontrar la caolinita, la cual se utiliza como ejemplo para explicar lo anterior. (Ver Figura 5)

¹⁵ Ibid. P. 5

¹⁶ Ibid . P. 6

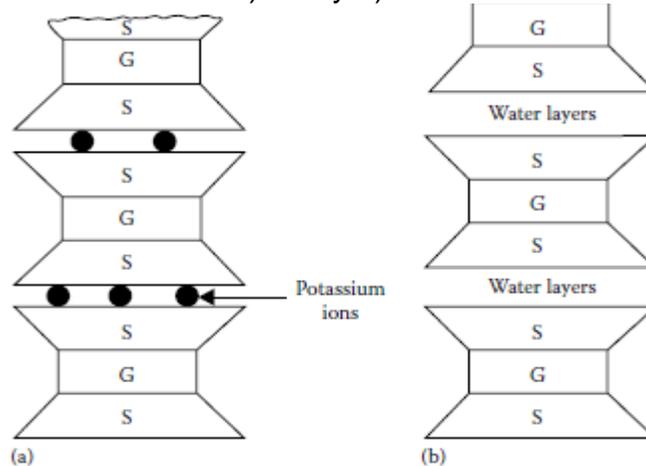
Figura 5. Estructura simbólica de la caolinita.



Fuente: (Braja M., 2019)

Así mismo, encontramos minerales de arcilla con tres capas como lo son la Illita y Montmorillonita (Figura 6). Una hoja de tres capas está conformada por un octaedro en el medio con una capa de sílice en su parte superior y otra en la parte inferior, siendo así que, si repetimos esta secuencia, obtenemos el mineral de arcilla. Las capas de illita son unidas por iones de potasio, donde las cargas negativas para equilibrar los iones de potasio provienen de la sustitución del aluminio por algo de silicio en las capas tetraédricas. Este tipo de sustitución donde un elemento reemplaza a otro sin cambiar la forma cristalina es conocido comúnmente como sustitución isomórfica. La montmorillonita tiene una estructura similar a la Illita, no obstante, en la montmorillonita no se encuentran iones de potasio, si no, que se atrae una capa de agua en los espacios entre las hojas de tres capas, para ilustrar lo anterior, se puede referir a la Figura 6.

Figura 6. Estructura simbólica de a) illita y b) montmorillonita.



Fuente: (Braja M., 2019)

4.1.3 Mecanismos dinámicos de las arcillas: Hidratación Y Compactación.

Según lo que expone Grim¹⁷ las arcillas pueden definirse como: “Aquellas partículas que desarrollan plasticidad cuando se mezcla con una cantidad limitada de agua”, lo que es un claro indicador de su reacción al interactuar con el agua.

Por su parte los autores Beltran¹⁸ y Dominguez & Schifter¹⁹ argumentan que no todas las arcillas tienen una fuerte reacción al entrar en contacto con el agua o algunos disolventes orgánicos, además, esta reactividad es típica y una de las propiedades características de las esmectitas (familia de las montmorillonitas en las que se ahondará posteriormente).

Según Beltran²⁰ las arcillas y las lutitas son estructuras complejas y fuertemente cargadas. La atracción entre las cargas de la molécula de agua y la carga electrostática de las laminillas de arcilla resulta en la hidratación de la arcilla, pues las láminas poseen una fuerte carga negativa en su superficie planar y cargas positivas a lo largo de sus bordes finos, cargas que provocan un balance entre la atracción electrostática catión-Lamina y la energía de hidratación del catión, provocando la separación de las láminas dando lugar a la expansión de la arcilla. Cuando este proceso ocurre, las fuerzas que predominan es la repulsión electrostática entre las láminas la cual contribuye al proceso de expansión, incluso, llegando a disociar completamente una lámina de las otras y aunque la hidratación y/o deshidratación es independiente al tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está fuertemente ligado a la naturaleza del catión interlaminar, por citar un ejemplo, Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de expansión, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectitas, dando como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si fuera el caso contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de expansión será mucho más reducida.

Por tal razón es de suma importancia hablar sobre la interacción de las cargas eléctricas presentes entre la interacción del mineral de arcilla y el agua, como se hará a continuación.

¹⁷ Grim. (1968). Mineralogía de la arcilla. Nueva York : McGraw-Hill Book Company.

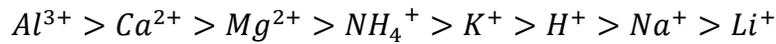
¹⁸ Beltran Martinez, R. (2009). DISEÑO GEOTÉCNICO Y ESTRUCTURAL DE UNA CIMENTACIÓN EN ARCILLA EXPANSIVA . México, DF.

¹⁹ Dominguez , J. M., & Schifter, I. (23 de 09 de 2020). Las arcillas: El barro noble . Obtenido de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec_6.html

²⁰ Beltran M, Op Cit., P. 8

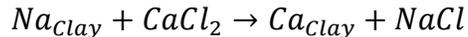
4.1.3.1 Cargas eléctricas y formación de Coloides.

En el texto de Braja²¹, este nos indica que las partículas de arcilla tienen una carga total de valor negativo, pues, aunque en un cristal ideal, las cargas positivas y negativas estarían equilibradas, la sustitución isomorfa y la ruptura de la continuidad dan como resultado una carga neta negativa en las caras de las placas de las partículas de arcilla (Aunque en ocasiones y en menor grado, también hay cargas positivas en los extremos). Para que se logre equilibrar la carga negativa, las partículas de arcilla atraen iones cargados positivamente de las sales en el agua de sus poros. Estos iones son conocidos como iones intercambiables. No obstante, algunos se sienten atraídos en mayor o menor grado que otros, como se muestra en la *fórmula 2*, pudiéndose organizar en una serie de términos según su afinidad por la atracción de la manera siguiente



Formula 2. Iones intercambiables.

Como se ve indicado en esta serie, los iones Al^{3+} pueden reemplazar a los iones Ca^{2+} y los iones Ca^{2+} pueden reemplazar a los iones Na^+ , este proceso es llamado normalmente como cambio catiónico, como se ilustra en la *fórmula 3*.



Formula 3. Interambio catiónico de una arcilla.

La capacidad de intercambio catiónico de una arcilla o por sus siglas en inglés CEC, es definido como la cantidad de iones intercambiables expresada en miliequivalente por 100g de arcilla seca. En la tabla 2 se pueden observar CEC para algunas arcillas.

Tabla 2. Superficie específica y capacidad de intercambio catiónico para algunos minerales de arcilla.

Mineral de arcilla	Superficie específica	Capacidad de intercambio catiónico (CEC) (Me/100g)
Caolinita	10-20	3
Illita	80-100	25
Montmorillonita	800	100
Chlorita	5-50	20
Vermiculita	5-400	150

²¹ Braja M, Op cit., P 7

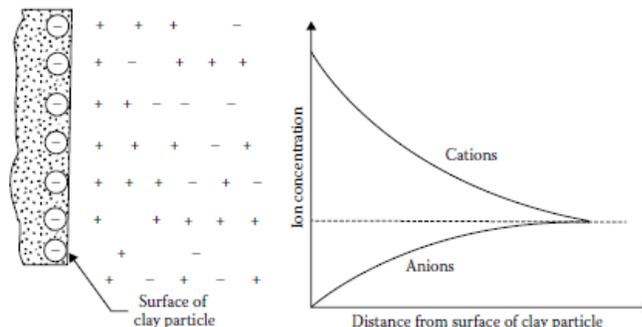
Halloysita (4H ₂ O)	40	12
Halloysita (2H ₂ O)	40	12

Fuente: (Braja M., 2019)

Braja²² también describe que Algunos cationes en exceso de los iones intercambiables y sus aniones asociados se encuentran precipitados en forma de sal sobre la superficie de las partículas de arcilla seca, al momento en el que entra en contacto con el agua, flotan alrededor de las partículas de arcilla, como se muestra en la *Figura 7*. Parte del comportamiento de las arcilla al entrar en contacto con agua se debe a la naturaleza dipolar del agua, ya que, en la molécula del agua los átomos de hidrógeno no se encuentran dispuestos simétricamente alrededor de los átomos de Oxígeno (*ver Figura 8*), por lo tanto la molécula de agua se comporta como una barra con cargas positivas y negativas en cada uno de los extremos existiendo así tres mecanismo por los cuales las moléculas de agua pueden ser atraídas eléctricamente hacia la superficie de las arcillas (*Ver Figura 9*)

- Atracción dada entre las caras cargadas negativamente en la partícula de arcilla y los extremos positivos de los dipolos.
- Atracción entre los cationes de la doble capa y los extremos cargados negativamente por los dipolos. Los cationes son atraídos por las caras negativamente cargadas de las partículas de arcilla.
- Que se compartan átomos de hidrógeno en las moléculas de agua mediante enlaces de hidrógeno entre los átomos de oxígeno de las partículas de arcilla y los átomos de oxígeno de las moléculas de agua.

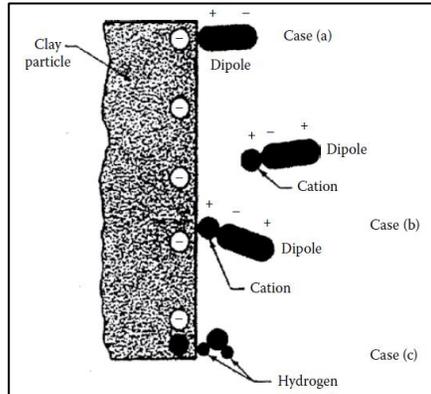
Figura 7. Difusión de la doble capa e Iones alrededor de la partícula de arcilla.



Fuente: (Braja M., 2019)

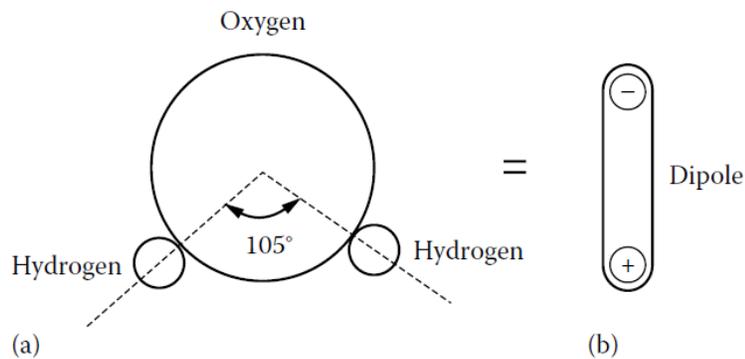
²² Ibid., P 9

Figura 8. Casos de la atracción de la molécula de agua en la arcilla.



Fuente: (Braja M., 2019)

Figura 9. Naturaleza dipolar del agua a) Disposición asimétrica de los átomos de hidrógeno. b) Dipolo.

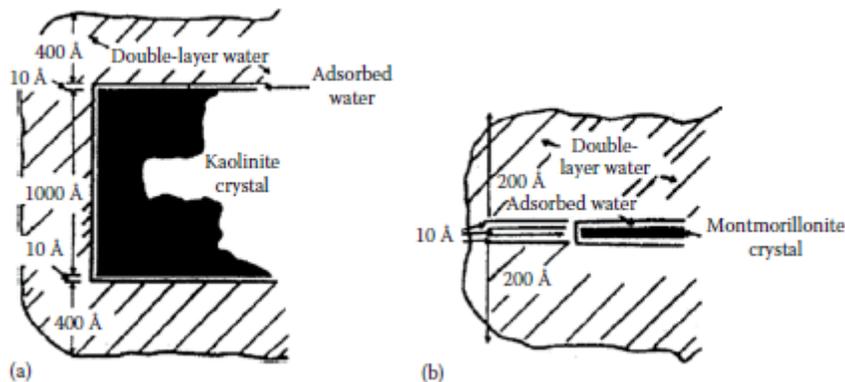


Fuente: (Braja M., 2019)

Braja²³ explica este comportamiento aduciendo que el agua que es atraída eléctricamente y que rodea las partículas de arcilla es conocida comúnmente como agua de doble capa. La plasticidad de los suelos arcillosos es debida a la existencia de agua de doble capa. En los cristales de caolinita y montmorillonita el espesor del agua de doble capa se muestra en la *Figura 10*. Debido a que la capa más interior de agua de doble capa se encuentra retenida fuertemente por las partículas de arcilla, se le denomina agua absorbida.

²³ Ibid., p. 9

Figura 10. Partícula típica de caolinita (A) 10.000 por 1.000 armstrong y partícula típica de montmorillonita 1.000 por 10 Armstrong.



Fuente: (Braja M., 2019)

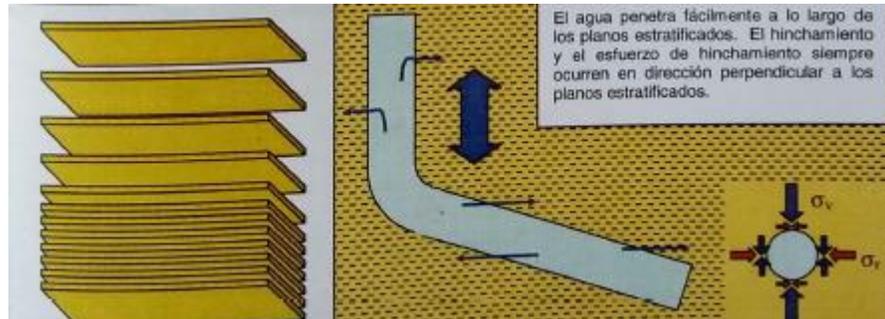
El agua al poder entrar y penetrar en los planos de estratificación provocados por el depósito estacional hace que estos sean planos de debilitamiento. Esta debilidad hace que la lutita posea una propiedad intrínseca conocida como resistencia anisotrópica, lo cual nos indica que la resistencia de la lutita es más fuerte en una dirección que en las direcciones ortogonales. La magnitud de la resistencia anisotrópica está ligada al grado y tipo de cementación de los estratos, por consiguiente, la resistencia anisotrópica es directamente proporcional a la resistencia relativa de la Roca.

Al estar las arcillas directamente ligadas al proceso de deposición de los sedimentos se deriva que las láminas de arcilla que forman la lutita, se encuentren en dirección paralela a los planos de estratificación en los que realizó la deposición, por tanto, los esfuerzos de hidratación provocados por la expansión de la arcilla a raíz de la irrupción del agua son perpendiculares a los planos de estratificación, el cual corresponde a un esfuerzo anisotrópico.

Para Mitchell²⁴, el papel que juegan estos planos de estratificación para la estabilidad del pozo durante la perforación se ven cohesionados a los esfuerzos in situ y la dirección e inclinación del agujero, ya que la lutita tiende a derrumbarse menos cuando los esfuerzos compresivos son aplicados perpendicularmente a los planos de estratificación (Ver figura 11).

²⁴ Mitchell. Op. Cit.,150

Figura 11. Esfuerzos de hidratación en los planos estratificados.



Fuente: (Mitchell , 2001)

4.1.3.2 Formación de coloides.

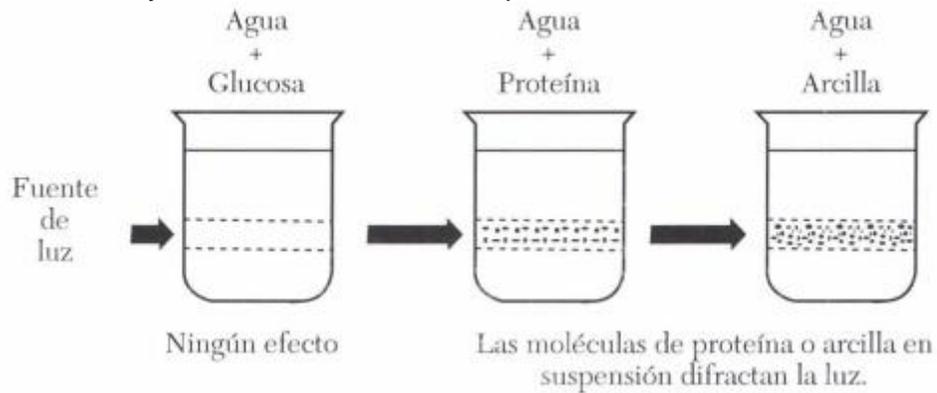
Según la descripción que da López²⁵, Un coloide es el resultante de la suspensión de partículas de una sustancia muy fina (Conocida como fase dispersa) en un medio de dispersión (también llamada como fase continua), a esta suspensión normalmente se le llama suspensión coloidal. En el suelo es común ver este tipo de suspensiones formando pequeños agregados que se encuentran reunidos y revestidos por una especie de Cola (De donde viene su nombre: Griego Kolla=Pegante y Eidos= en forma de) y determinan la estructura del suelo, cuya solidez y forma se ven directamente relacionados con la proporción de sus componentes constituyentes.

El mismo López²⁶ afirma que una de las diferencias entre una suspensión coloidal y una solución real es que una solución real no presenta el efecto Tyndall (Ver figura 12), el cual es la presencia de una dispersión de un haz luminoso debido a las partículas coloidales, que siempre son de un tamaño mayor a los iones que se presentan en una solución, además de que en la solución real al evaporarse el solvente los cristales disueltos (Sales u otros) vuelven de manera abrupta a un estado sólido.

²⁵ Lopez Y, Op. Cit., P 27

²⁶ Ibid, p. 27

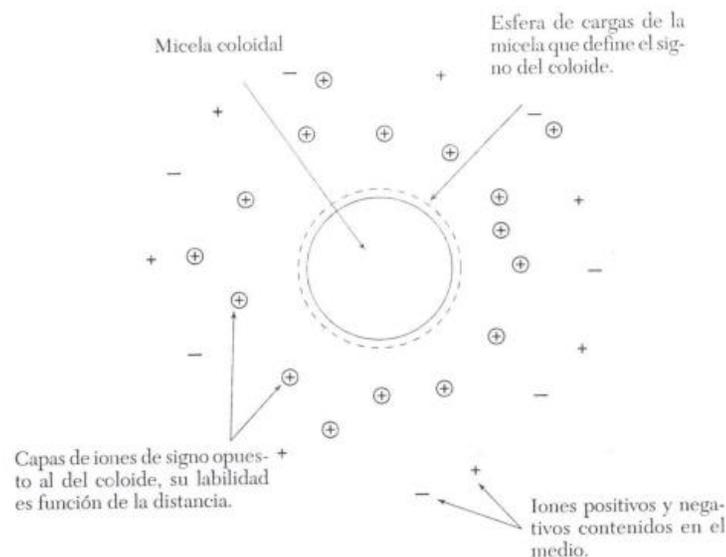
Figura 12. Efecto Tyndall hace evidenciar la presencia de coloides.



Fuente: (Lopez Y., 2000)

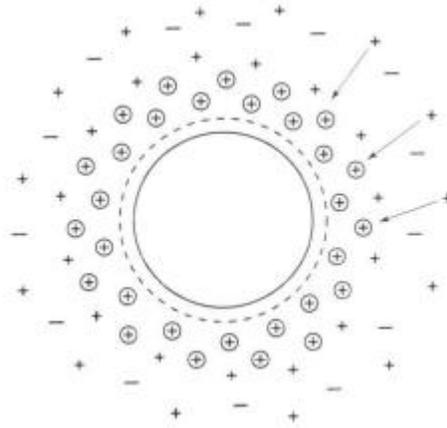
Los coloides comúnmente se presentan en dos condiciones: dispersos o floculados. Las micelas coloidales se encuentran circundados por una capa de cargas eléctricas de un mismo signo positivas en el caso de los coloides electropositivos como lo son los óxidos de hierro y óxidos de aluminio, a diferencia de negativos para los electronegativos como lo son para las arcillas (Ver Figura 13).

Figura 13. Micela coloidal rodeada por las cargas eléctricas.



Fuente: (Lopez Y., 2000)

Figura 14. Iones positivos adsorbidos hacia las cargas electronegativas del coloide.

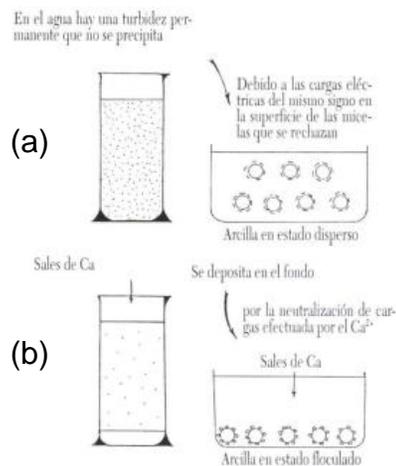


Fuente: (Lopez Y., 2000)

Al describir el momento de la floculación (tomando de ejemplo los coloides de signo negativo), Lopez²⁷ describe este en el momento en el que los iones positivos son adsorbidos debido al rechazo provocado por los iones positivos presentes en la fase continua (Líquido) en dirección a las cargas negativas del coloide, logrando así una neutralización (*Ver figura 14*). La dispersión puede ser nuevamente obtenida si los iones positivos se separan de las cargas negativas del coloide, es decir, la floculación es reversible. Para la arcilla y otros coloides electronegativos, los iones positivos pueden ser H^+ , los cationes metálicos Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ , además del catión NH_4^+ . En otras palabras, en el estado disperso la capa de iones que circundan las micro-células es débil ya que tiene poca densidad de iones, por tanto, todas las micro-células que poseen una carga electronegativa al no ser neutralizadas se repelen entre sí, distribuyéndose por todo el volumen del líquido sin que se presente una deposición (*Ver figura 15(a)*), en casi contrario, cuando en la suspensión coloidal se agrega un ácido o una sal que libera iones positivos, estos iones son adsorbidos hacia las micro-células, neutralizando las cargas negativas, formando una aglutinación y posterior precipitación (*Ver figura 15(b)*). Es importante aclarar que estos estados pueden ser reversibles, sin embargo, cuando se realiza por coacción y coagulación (Como en algunos casos para la fabricación de la cerámica) es irreversible.

²⁷ Ibid, P. 29

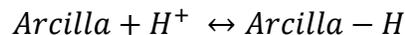
Figura 15. Iones positivos adsorbidos hacia las cargas electronegativas del coloide.



Fuente: (Lopez Y., 2000)

- Iones floculantes y dispersantes.

Como se habló anteriormente, los ácidos liberan iones H⁺ que causan la floculación (Ver fórmula 4), en contraste, las bases liberan iones OH⁻ que causan la dispersión. Se puede escribir que:



Formula 4. Iones Floculantes.

Algunos cationes monovalentes como Na⁺, K⁺ y NH⁴⁺, se encuentran rodeados por una capa de agua, por lo que tienen un poder floculante muy débil, pues debido a su estado hidratado la distancia de las micro-células aumenta. Por su parte los cationes Ca²⁺ y Mg²⁺ al ser divalentes, se encuentran rodeados por una capa de agua más delgada, produciendo así una floculación más potente en las arcillas.

4.1.3.3 Efectos diagenéticos y de la compactación.

Egger²⁸ describe el proceso de las rocas, donde indica que las reacciones físicas y químicas que tienen lugar luego del contacto de las rocas con el aire, agua, organismos vivos, aire, entre otros, provoca que estas rocas se destruyan gradualmente. Una vez que estos fragmentos son separados de su roca original quedan a merced de las acciones del aire, agua, glaciares y otros, que los

²⁸ Egger, A. E. (2005). Ciencias de la tierra. Washington D.C : Visionlearning en español.

transportan desde las montañas hasta los valles aluviales, los deltas y el lecho marino, donde paulatinamente decantan para posteriormente comenzar un proceso de compactación por el peso de las capas que se depositan posteriormente. Tarbuck & Lutgens²⁹ señalan que el sedimento experimenta enormes cambios que inician en el momento en el que es depositado hasta que se transforma en una roca sedimentaria, que posteriormente, es sujeta a un aumento gradual de presión y temperatura que lo transforma en una roca metamórfica. La palabra diagénesis (Dia: cambio; Genesis: Origen) es la manera en la que se llaman a todos los cambios físicos, químicos y biológicos que se dan luego de la deposición de los sedimentos, así como durante y después del proceso de la litificación. La diagénesis es promovida por el enterramiento, pues, a medida que los sedimentos avanzan en la profundidad de la tierra, la temperatura y la presión van aumentando progresivamente. Siendo así, la diagénesis tiene lugar en los primeros kilómetros de la corteza terrestre y con temperaturas normalmente inferiores a los 150°C-200°C, ya que, más allá de este umbral estipulado de una manera un poco "Arbitrario" ya aparecen signos de metamorfismo. La litificación (Lithos: Piedra; Fic: Hacer) se encuentra inmiscuido en el proceso de la diagénesis y hace referencia a los procesos que permiten que los sedimentos no consolidados se transformen en rocas sedimentarias sólidas. A grandes rasgos, los procesos que permiten la litificación son la compactación y la cementación. El cambio físico más habitual durante la diagénesis es la compactación, fenómeno que tiene explicación a medida que el sedimento se acumula con el paso del tiempo, el peso del material suprayacente comprime los sedimentos más profundos, haciéndolos más compactos y también, hace menor el espacio poroso entre los granos. Siendo específico en el caso de las arcillas, en el momento en el que son enterradas miles de metros bajo otras capas, el volumen de la arcilla alcanza valores de reducción de volumen de hasta un 40 por ciento, momento en el que al reducirse el espacio poroso se expulsa gran parte del agua que se encontraba contenida en estos sedimentos. Por esta razón y porque las arenas y granos de tamaño más "grueso" son solamente ligeramente compresibles, la compactación como proceso formador de roca juega un papel más relevante en las rocas sedimentarias de grano fino como las arcillas. El proceso que tiene más relevancia en la formación de rocas sedimentarias. Este es un proceso químico el cual involucra la precipitación de algunos minerales entre los granos ya sedimentados. Estos minerales cementantes son transportados en el agua ya sea en solución o en iones y mediante cambios fisicoquímicos se da la precipitación entre los granos sedimentados, llenando los espacios vacíos y uniendo los clastos y granos. Durante este proceso también se da una reducción de la porosidad.

²⁹ Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física. Madrid: Pearson Educación S.A. p 202

En lo señalado por Tarbuck & Lutgens³⁰ en el caso de las lutitas a medida que se acumula el limo y las arcillas lo hacen formando capas delgadas o láminas, con orientaciones al azar o, en otras palabras, un estado desordenado que provoca un gran espacio entre los poros que eventualmente se llena de agua, situación que cambia con el tiempo a medida que otros sedimentos son acumulados sobre la capa inicial haciendo que estas capas compresionadas adopten una alineación más paralela. Esta orientación paralela reduce considerablemente la porosidad, por consiguiente, también, la cantidad de agua contenida por la roca. Después de esta compactación a raíz de la presión, los espacios porosos no cuentan con intercomunicación entre ellos (Permeabilidad), no permitiendo la circulación de la solución que puede contener el material cementante, por este motivo, comúnmente al hablar de lutitas o arcillas nos referimos a formaciones débiles, poco cementadas y, por tanto, no muy bien litificadas. La incapacidad que poseen las arcillas para dejar que los fluidos circulen libremente, hace que en ocasiones estas forman una barrera al movimiento subsuperficial del agua y el petróleo, no dejando que los acuíferos superficiales se desplacen a capas más profundas y, en el caso del crudo, este se desplace hacia capas superiores o incluso, a la superficie.

4.1.4 El color y tipos de Arcillas

4.1.4.1 El color de las Arcillas.

Siguiendo los lineamientos de Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K ³¹En las arcillas el color es una de las propiedades físicas más fáciles de apreciar, presentando perfiles gama de colores que van desde el negro, pardo, pasando por ocre o ferruginosos, determinando la presencia de materiales oscuros hasta ferruginosos o mangánicos (ocres). El color es determinado por el estado de oxidación del hierro y el manganeso, Colores rojos, amarillos y pardos rojizos son característicos de condiciones bien oxidadas. Sombras tenues como grises y azules son indicativos de insuficiente oxígeno.

Como ejemplo, la arcilla roja comúnmente es generada en un depósito de tipo marino formado por materiales calcáreos y ferrígenos. La coloración rojiza es debido a los componentes de origen férrico.

³⁰ Ibid, p. 203

³¹ Ibid, p. 204

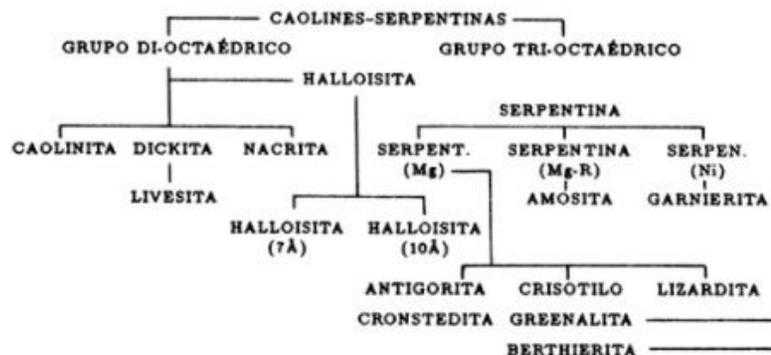
4.1.4.2 Tipos de arcilla.

Según Grim³², en las capas terrestres encontramos un gran número de distintos minerales de arcilla, generalmente clasificadas por su estructura como pueden ser Caolinita, halloysita, esmectita, illita, clorita, vermiculita, atapulgita-paligorskita-sepiolita y minerales de capas mixtas, no obstante, para fines prácticos se clasificará por familias según lo descrito por los autores Dominguez & Schifter³³.

4.1.4.1 Los caolines.

En este tipo de arcilla la unidad fundamental es la lámina de tetraedros conformada por silicio-oxígeno que se asocia con una lámina de octaedros formado de aluminio-oxígeno-ohidrido. No obstante, es común encontrar sustituciones del silicio por aluminio o del aluminio de la hoja octaédrica por otro elemento con una carga menor como puede ser el magnesio, y de esta manera, se da origen a todas las formas en las que se presenta el caolín.

Figura 16. Familia de los caolines.



Fuente: (Dominguez & Schifter, 2020)

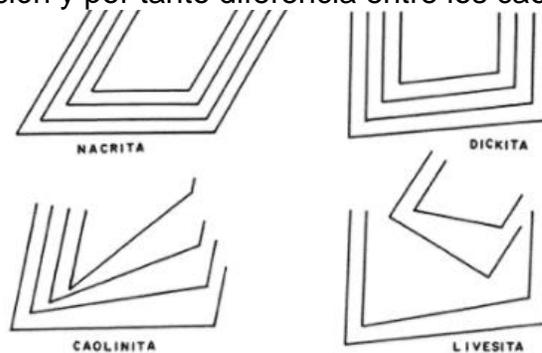
Para comenzar Dominguez & Schifter señalan que, en la primera división de la familia de los caolines, encontramos minerales como la halloysita, el alofano, la dickita y son aquellos minerales derivados de la caolinita y que comparten la misma composición química: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. La principal diferencia de los diferentes caolines se encuentra en su disposición en el “arreglo laminar” donde por ejemplo en la nacrita, la estructura se encuentra ordenada perfectamente teniendo bastante estabilidad, en el caso de la Dickita hay una mayor apertura de 6 a 7 grados mayor

³² Grim. (1968). Mineralogía de la arcilla. Nueva York : McGraw-Hill Book Company.

³³ Dominguez , J. M., & Schifter, I. Las arcillas: El barro noble . Obtenido de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec_6.html. (23 de 09 de 2020).

a un lado que a otro, en la caolinita este llega hasta 15 grados. La estructura más inestable la posee la livesita que presenta a un lado una abertura regular e irregular al otro. (Ver figura 17). Yendo por la otra bifurcación de la familia de los caolines encontramos la misma estructura laminar, sin embargo, cuenta con una sustitución del aluminio de la hoja octaédrica por otro catión como puede ser el hierro en sus formas Fe^{2+} o Fe^{3+} , o el magnesio Mg^{2+} . En este último caso, cuando es reemplazado el aluminio por el catión de magnesio las medidas de la hoja octaédrica se hacen menores que ocasiona que la forma externa de los cristales sea fibrosa. Este es el caso de los asbestos como el crisotilo y antigorita.

Figura 17. Disposición y por tanto diferencia entre los caolines.

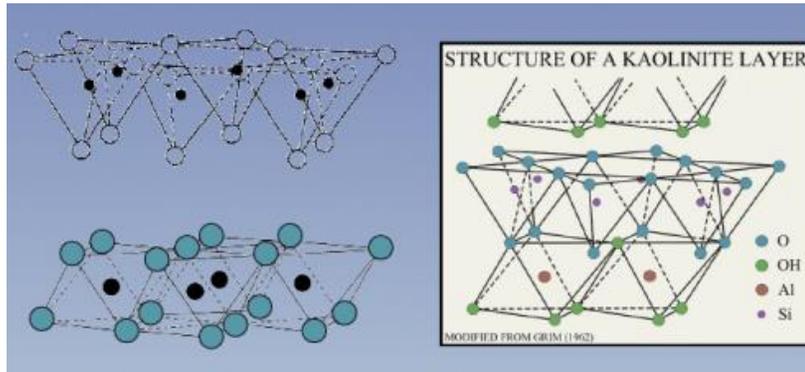


Fuente: (Dominguez & Schifter, 2020)

Según Arenivar Marroquín , Martínez Pérez, e Ivania Rivera³⁴ Una de las características principales de los caolines es que es una arcilla no expandible donde sus capas están unidas fuertemente por un enlace de hidrógeno, razón por la cual el agua no puede ingresar entre las capas. De igual manera los caolines poseen una capacidad de intercambio relativamente baja. Por último, se presenta a continuación (figura 18) la estructura fundamental de los caolines.

³⁴ ARENIVAR MARROQUÍN , B. A., MARTÍNEZ PÉREZ, G. C., & IVANIA RIVERA, L. (2012). EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE ARCILLAS NATURALES EXISTENTES EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN, USULUTÁN Y ELABORACIÓN DEL DIAGNÓSTICO DE SU COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DURANTE LA PERFORACIÓN DE POZOS GEOTÉRMICOS. . San Salvador .

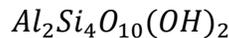
Figura 18. Estructura fundamental de los caolines.



Fuente: (ARENIVAR MARROQUÍN , MARTÍNEZ PÉREZ, & IVANIA RIVERA, 2012)

4.1.4.2 Las esmectitas.

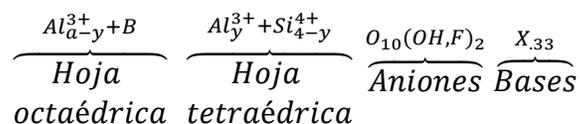
Concorde con la descripción Domínguez & Schifter³⁵, las esmectitas corresponden a la familia de las arcillas en cuya composición encontramos una hoja octaédrica encerrada entre dos capas tetraédricas, siendo su fórmula estructural (*Formula 5*) la siguiente:



Formula 5. Formula estructural esmectitas.

Debido a que la hoja tetraédrica se encuentra ocupada en su totalidad por átomos de silicio y la hoja octaédrica contiene aluminio, puede decirse que esta estructura es eléctricamente neutra, no obstante, como es ejemplificado en la *figura 19*, esta familia cuenta con numerosas ramificaciones composicionales donde, por citar algunos ejemplos, el aluminio reemplaza parcialmente al silicio en la capa tetraédrica, o el magnesio o el hierro sustituyen al aluminio en la capa octaédrica, entre otros. Estas diferencias composicionales provoca diferentes propiedades en cada uno de estos minerales de arcillas.

En la *figura 20* podremos encontrar la composición de las láminas tetraédrica-octaédrica-tetraédrica para las arcillas de la familia de las esmectitas, donde por nombrar una bastante importante es la montmorillonita, la cual sigue la siguiente composición química (*fórmula 6*):

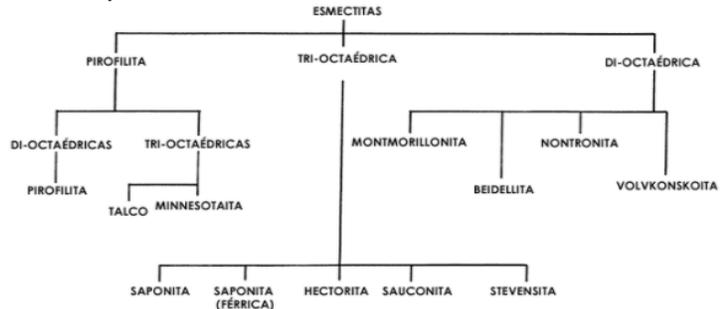


³⁵ Domínguez, J. M., & Schifter, Op. Cit.

$$B = Fe, Fe, Mg, Cr, Mn, Li$$

Formula 6. Composición hojas de las esmectitas.

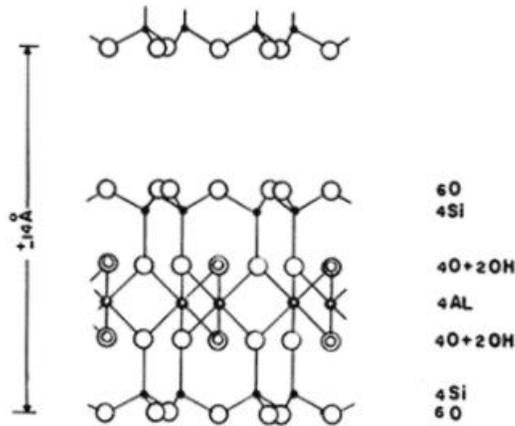
Figura 19. Diferentes tipos de Esmectitas.



Fuente: (Dominguez & Schifter, 2020)

Como se puede ver en la formula general de las esmectitas, las hojas tetraédricas están compuestas únicamente de aluminio y silicio, al contrario de la octaédrica que posee aluminio y otros cationes (b), denotando así, la amplia gama de esmectitas que podemos encontrar con cambiar el catión de la hoja octaédrica. Sin embargo, la sustitución del aluminio y el silicio por un catión menos cargado eléctricamente, provoca un desnivel de las cargas eléctricas y la aparición de algunas características muy marcadas de las esmectitas como lo es la capacidad de intercambio y absorción de moléculas polares como el agua y otros compuestos orgánicos como las aminas, provocando la expansión de la estructura laminar de las arcillas.

Figura 20. Composición general de la lámina de esmectita.



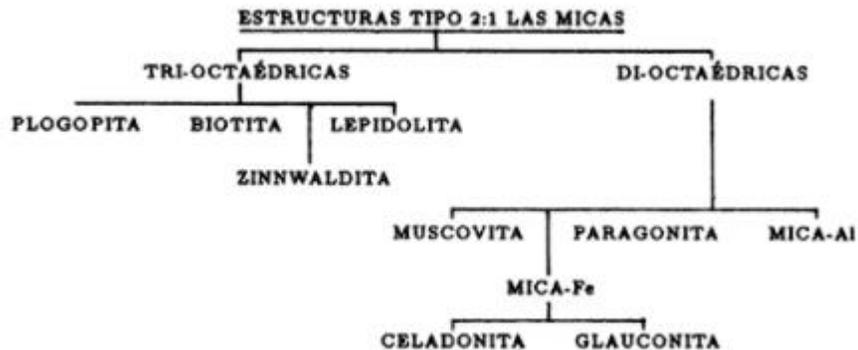
Fuente: (Dominguez & Schifter, 2020)

Debido a esta propiedad, Dominguez & Schifter explican que las montmorillonitas han encontrado un amplio espectro de aplicaciones como en la perforación petrolera hasta en el procesamiento de hidrocarburos derivados del petróleo.

4.1.4.3 Las micas.

Las micas son minerales que se encuentran inmersos en el grupo de las arcillas y poseen la misma estructura química de las esmectitas, con la singularidad del grado de sustitución y la naturaleza de los cationes presentes entre las láminas, ejemplo el potasio, haciendo que la carga eléctrica residual sea grande. Debido a esto, las láminas se unen a otras formando una estructura no se expanda, ni sus cationes sean intercambiable. Esta familia de las arcillas en contraste con la montmorillonita, la cual tiene posee una inestabilidad en las cargas ubicada en el centro de los octaedros, la carga residual de las micas se encuentra ubicada en la superficie de las hojas, específicamente en la hoja tetraédrica, provocando una unión fuerte entre los cationes interlaminares con las hojas, por lo que su estructura no se expande con facilidad. En la figura 21 se encuentra un pequeño resumen de la familia de las micas.

Figura 21. Familia de las micas.



Fuente: (Dominguez & Schifter, 2020)

4.1.5 Mecanismos De Hidratación

Varios autores han descrito estos mecanismos, entre ellos se incluyen Foster, Savins, & Waite³⁶, Norrish³⁷ y Zhang & Low³⁸, quienes dicen que en contacto con el agua, los cationes intercambiables presentes entre las láminas de arcilla intentan hidratarse, promoviendo así la separación de las láminas de arcilla. Los investigadores de manera muy general han demostrado que la expansión de las arcillas puede ocurrir de dos maneras diferentes: Expansión cristalina y expansión osmótica.

4.1.5.1 Expansión cristalina.

Este es una expansión de corto alcance y puede ocurrir en cualquier tipo de mineral arcilloso, según los estudios realizados por los autores Mooney, Keenan, & Wood³⁹ ocurre de manera muy poco perceptible, a través de la formación escalonada de láminas enteras o mezclas de hidratos de láminas enteras. Estas transiciones se comportan de una manera muy similar a las que ocurren a las transiciones de fase, pues, comúnmente varias moléculas de agua se pueden alinear para formar una estructura semejante al cristalina entre las láminas de arcilla, provocando un mayor distanciamiento entre lámina y lámina del mineral de arcilla, de esta manera estudios como los realizados por Cases et al.⁴⁰ señalan que las esmectitas pueden formar hidratos de hasta cuatro capas. Este tipo de expansión sigue las leyes de la termodinámica y busca un mínimo global en su potencial termodinámico según sus condiciones de presión, temperatura y potencial químico dado por el agua, de esta manera según lo experimentado por Boek, Coveney, & Skipper⁴¹, en ensayos y simulaciones, el espaciado común entre las láminas provocado por la expansión cristalina está entre los 9 a 20 Å.

4.1.5.2 Expansión osmótica.

³⁶ Foster, W. R., Savins, J. G., & Waite, J. M. (1954). Lattice expansion and rheological behavior relationships in water-montmorillonite systems. *Arcillas Clay Miner*, 296-316. doi:<https://doi.org/10.1346/CCMN.1954.0030124>

³⁷ Norrish, K. (1954). The swelling of montmorillonite. *Discussions of the Faraday Society*, 120-134. doi:10.1039/DF9541800120

³⁸ Zhang, Z. Z., & Low, P. F. (1989). Relation between the heat of immersion and the initial water content of Li-, Na-, and K-montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 461-472. doi:[https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(89\)80057-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(89)80057-8)

³⁹ Mooney, R. W., Keenan, A. G., & Wood, L. A. (1952). Adsorption of water vapor by montmorillonite. II. Effect of exchangeable ions and lattice swelling as measured by X-Ray diffraction. *Journal of the American Chemical Society*, 74(6), 1371. doi:10.1021/ja01126a002

⁴⁰ Cases, J. M., Bérend, I., Besson, G., Francois, M., Uriot, J. P., Thomas, F., & Poirier, J. E. (1992). Mechanism of Adsorption and Desorption of Water Vapor by Homoionic Montmorillonite. 1. The Sodium-Exchanged Form. *Langmuir*, 8(11), 2730-2739. doi:10.1021/la00047a025

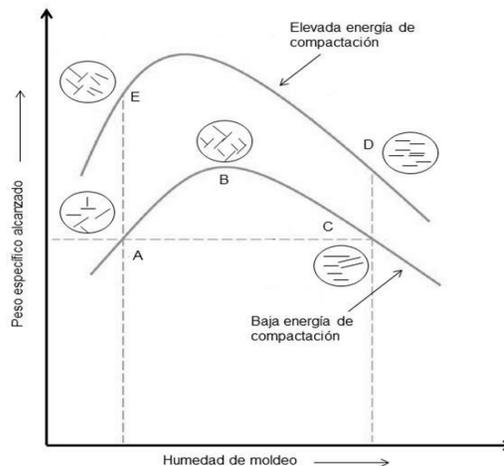
⁴¹ Boek, E. S., Coveney, P. V., & Skipper, N. T. (1995). Monte Carlo Molecular Modeling Studies of Hydrated Li-, Na-, and K-Smectites: Understanding the Role of Potassium as a Clay Swelling Inhibitor. *Journal of the American Chemical Society*, 117(50), 12608-12617. doi:10.1021/ja00155a025

La expansión osmótica es característica de algunos minerales arcillosos como las montmorillonitas, las cuales, poseen cationes intercambiables en sus capas intermedias, siendo así, siguiendo lo expuesto por Anderson et al.⁴² si la concentración de los cationes es más alta que en el agua del medio circundante, las moléculas de agua intentan llegar a un equilibrio químico debido a los cationes, penetrando entre las capas de arcilla. En comparación con la expansión cristalina, este tipo de expansión resulta en un volumen bastante mayor, espaciamientos típicos entre 20 a 130 Å. Esta tendencia a la expansión osmótica que poseen las esmectitas, en especial las que se encuentran saturadas con el ion Na⁺ es la principal causante de la inestabilidad con la que cuentan los depósitos de lutitas, las que, ahondando directamente en el ámbito de la perforación petrolera, potencialmente pueden conducir al colapso del pozo.

4.1.6 Efectos De La Compactación

Según los estudios realizados por Lambe⁴³ la compactación tiene un apreciable efecto en la microfábrica de los suelos y de la misma manera, en la compactación de la microfábrica de las arcillas, en la *figura 22* se ilustra los resultados obtenidos por Lambe.

Figura 22. Curvas de compactación de los suelos arcillosos para dos energías de compactación distintas con sus correspondientes microfábricas.



Fuente: (Lambe T. W., 1958)

⁴² Anderson, R. L., ratcliffe, I., Greenwell, H. C., Williams, P. A., Cliffe, S., & Coveney, P. V. (2010). Clay swelling — A challenge in the oilfield. *Earth-Science Reviews*, 98, p. 201-216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.11.003>

⁴³ Lambe, T. W. (1958). The Structure of Compacted Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 84(2), p. 1-34.

En el punto A que se encuentra en la *figura 22*, se puede observar que la arcilla es compactada con una humedad mínima, mostrando una microfábrica de aspecto floculado. Este comportamiento se genera cuando hay bajos contenidos de humedad ya que no es capaz de desarrollar una doble capa de iones alrededor de las partículas de arcilla y de esa manera, reduciendo la fuerza de repulsión entre las partículas de arcilla. Las fuerzas de repulsión reducidas, permiten una densidad menor y una distribución de las partículas floculadas, al irse incrementando el contenido de humedad y llegando al punto B, la doble capa de las partículas de arcilla presentan expansión, incrementando las fuerzas de repulsión entre capas, ofreciendo un menor grado de floculación y un valor mayor de densidad seca. Si se sigue por el mismo camino y se incrementa el contenido de humedad, en los intervalos B a C o en el punto D si miramos la línea de alta energía de compactación, se da un incremento continuo de la repulsión entre las partículas de arcillas, por tanto, un mayor grado de reorientación de las láminas de arcilla, resultando en una microfábrica relativamente dispersa. No obstante, y como hablamos anteriormente, al agregarse agua se disminuye la concentración de las partículas sólidas respecto al volumen.

Por otra parte, si nos dirigimos al punto E, donde la muestra tiene la misma humedad y una mayor energía de compactación, las partículas arcillosas se encontrarán más juntas por lo que el suelo tiene una mayor densidad seca. Los estudios realizados por Lambe⁴⁴ dieron postulaciones como que, en la curva de compactación con humedades superiores a las óptimas, las partículas de arcilla se disponen en posiciones subparalelas, las cuales son características de cuando la microfábrica se encuentra dispersa, En la sección donde las humedades son inferiores a las óptimas, se encuentran mayoritariamente las microfábricas “floculadas” en las que las partículas se disponen en configuración cara-borde, presentando en un inicio más inestabilidad en condiciones de humedad.

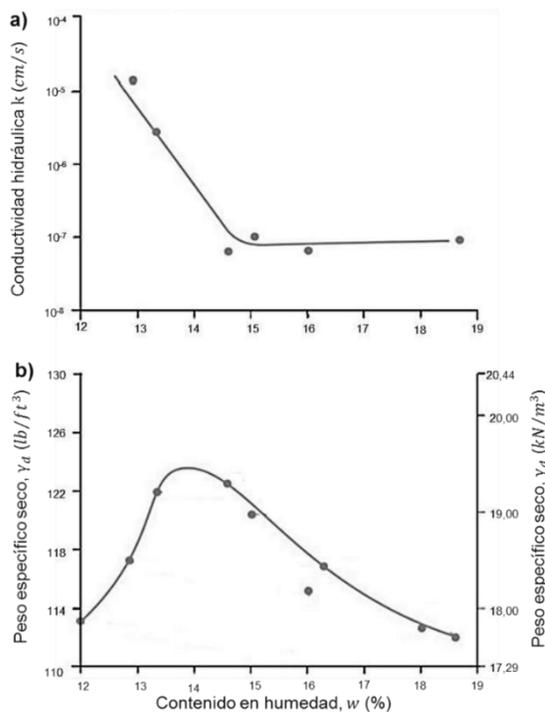
Según Gomez de Santos⁴⁵ La compactación tiene otros efectos sobre las partículas de arcilla, pues, reducen la porosidad y la densidad y, por lo tanto, modifica la permeabilidad, compresibilidad y la resistencia de los materiales. Tomando un enfoque en la parte de la permeabilidad (K) que es la facilidad con la que el agua o los fluidos circulan a través de los suelos. En la *figura 23b* se evidencia el comportamiento tras la compactación de un suelo fino y el correspondiente de la permeabilidad (*figura 23a*) que han sido obtenidas en ensayos en arcillas arenosas de Jamaica. Con la curva de compactación en relación con la permeabilidad se puede deducir que a medida que aumenta el contenido de humedad (w) disminuye

⁴⁴ Ibid. p. 1-34.

⁴⁵ Gomez de Santos , C. (2018). Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados respuesta a cargas estáticas y dinámicas. Madrid. P. 9

la permeabilidad (K) hasta el punto en el que llega a su valor mínimo de humedad (W_{opt}), luego de esto si se sigue aumentando el contenido de humedad, este ya no ejerce un efecto significativo sobre la permeabilidad. Se debe aclarar que este valor alto de permeabilidad en la sección del lado con poca humedad de la curva de compactación se debe a la orientación de las partículas de la arcilla flocladas que da como resultado una mayor porosidad.

Figura 23. Correlación del contenido de humedad con peso específico y conductividad hidráulica (k) de un suelo arcilloso.

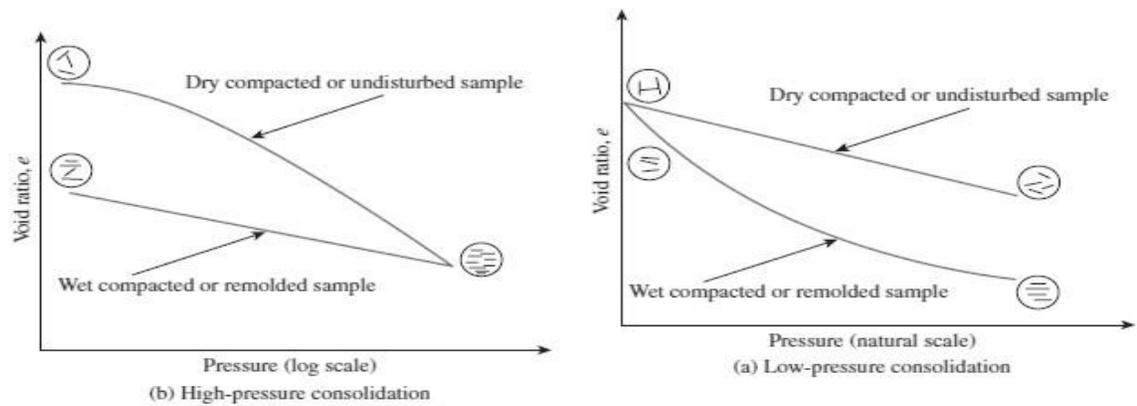


Fuente: (Lambe T. W., 1958)

En la figura 24 se observan las características de compresibilidad de suelos arcillosos que son compactados de manera seca y de manera húmeda en la curva de compactación. Se encuentran características marcadas, ya que con bajas presiones de consolidación, los suelos compactados de manera seca son menos compresibles que los suelos húmedos, algo que se ve evidenciada en la Ilustración 24.a, por su parte para altas presiones, la tendencia es radicalmente opuesta como se ilustra en la ilustración 24.b, un suelo compactado de manera seca es más compresible que un suelo compactado de manera húmeda, pues, la presión al ser consolidado tiende comúnmente orienta las láminas del mineral de arcilla de manera horizontal, reduciendo así la porosidad a la vez.

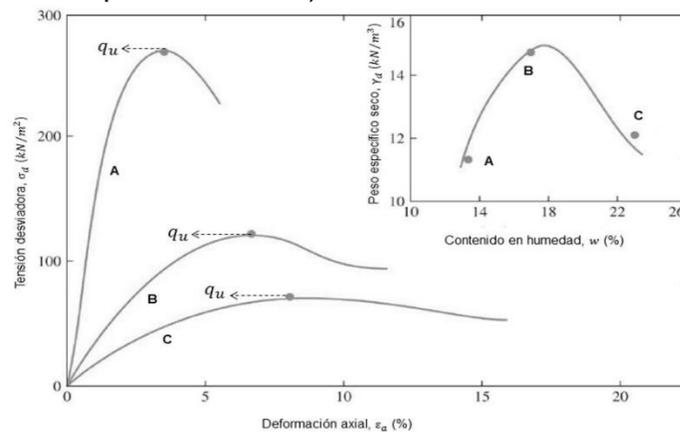
Vale la pena hablar de la relevancia que tiene la compactación en la resistencia de corte de los suelos arcillosos. En la ilustración 25 se ven los resultados de “resistencia a la compresión simple” que son obtenidos por Das⁴⁶ realizados en suelos cohesivos, en muestras secas el comportamiento es mostrado en la curva A,

Figura 24. Efecto de la compactación en el ensayo de compresibilidad unidimensional para suelos arcillosos con (a) baja presión de consolidación y (b) alta presión de consolidación.



Fuente: (Lambe T. W., 1958)

Figura 25. Ensayo de resistencia a compresión simple, relación tensión desviadora y deformación axial de tres muestras de suelo compactado arcilloso; A) Muestra seca, B) cerca de la humedad óptima y C) muestra húmeda de la curva de compactación (gráfico en la parte superior derecha)



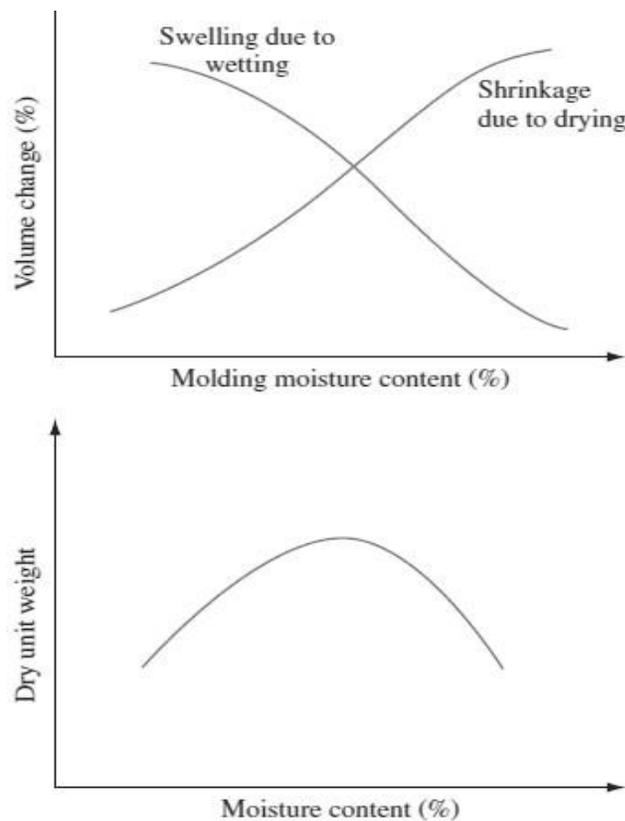
fuentes: (Das, 2010)

⁴⁶ Das, B. M. (2010). (Vol. Séptima). Cengage.

en la humedad óptima en la curva B y en muestras húmedas mostrado en la curva C. En la esquina superior derecha del gráfico se observa la gráfica de la curva de compactación indicando las condiciones de $\gamma_d - w$ de las muestras A, B, C. Se observa un comportamiento en el que la resistencia de los suelos arcillosos se hace menos a medida que aumenta la humedad de la muestra, debido a que, la resistencia a la compresión uniaxial (qu) disminuye notablemente en la muestra húmeda (C) de la curva de compactación.

Por otro lado, las arcillas cuentan con una variación en la expansión y en la retracción, la cual se puede observar en la *figura 26*. Este es un estudio realizado por Das⁴⁷ y deduce en él, que estas variaciones que experimentan las arcillas expansivas pueden ser de gran utilidad en las labores de ingeniería para tener en cuenta el contenido de humedad para minimizar la expansión y la retracción que sufren las arcillas.

Figura 26. Naturaleza de la variación en el hinchamiento y la retracción de una arcilla expansiva.



Fuente: (Das, 2010)

⁴⁷ *Ibíd.* P. 17-25

4.2 RETOS DE LA PERFORACIÓN.

4.2.1 La perforación de las arcillas, un reto geomecánica.

En los procesos de perforación de pozos de petróleo y gas se hace necesario lubricar la broca, mantener la presión hidrostática, eliminar los ripios de roca perforada, transmitir lecturas de sensores y otros, por lo que se utilizan fluidos de perforación. Entre estos fluidos de perforación se encuentran los lodos de base agua, el cual, al entrar en contacto con arcillas reactivas pueden llegar a tener un impacto bastante fuerte y adverso, aumentando los costos del proceso de perforación del pozo.

Según lo dicho por Anderson R.⁴⁸ Este exceso de costos en las operaciones se ve explicado ya que la expansión de las arcillas puede resultar en problemas de inestabilidad del pozo que se identifica comúnmente con el desprendimientos de lutitas, el cierre del pozo por causa de estrechamiento del espacio anular, derrumbes que provocan relleno en los viajes o embotamiento de la tubería y problemas al instalar la tubería de revestimiento, de igual manera, es común que se reduzca la eficacia en la limpieza del pozo y el apelmazamiento de la broca debido a la arcilla. Todos estos son problemas que en un conjunto pueden traer consecuencias graves como la perdida del conjunto de perforación, La desviación del plan original de perforación e incluso, la pérdida total del pozo. Estos problemas como consecuencia incrementan drásticamente el tiempo de perforación y aumentan costos en los procesos de producción y exploración.

Según lo estimado por Bloys y otros⁴⁹, opinión similar a la de Boek, Coveney , & Skipper⁵⁰, los problemas de inestabilidad de los pozos petroleros se cotizan en más de USD 500 M por año, por esta razón, el desarrollo de inhibidores de expansión de arcillas con un rendimiento técnico y respetuoso ambientalmente, es un desafío para la química que se presenta en los campos petrolíferos pues la naturaleza compleja y heterogénea de los minerales arcillosos y además, con el cuidado de mantener las propiedades de un fluido de perforación efectivo.

4.2.1.1 Mecánica De Rocas

⁴⁸ Anderson, R. R. (2010). Clay swelling- A challenge in the oilfield. *Earth Escience Reviews* , 1.

⁴⁹ Bloys , B., Davis , N., Smolen , B., Bailey, L., Houwen , O., Reid , P. Hodder, M. (1994). Designing and managing drilling fluid. *Schlumberger Oilfield Review*, 6(2), 33-43. p. 34

⁵⁰Boek, Coveney , & Skipper. Op. Cit., p. 12608

Citando de manera literal la definición que Ramírez Oyangurén, P., & Alejano Monge, L⁵¹ adjudican al comité americano de mecánica de rocas en 1974:

“Mecánica de rocas es la ciencia teórica y aplicada que estudia el comportamiento de mecánico de las rocas y de los macizos rocosos. Sería pues la rama de la ingeniería dedicada al estudio de la respuesta de las rocas y macizos rocosos al campo de fuerzas que actúan en su entorno”

El efecto que ejercen estas fuerzas sobre el cuerpo se ven explicadas por las leyes del movimiento de Newton las cuales establecen que la suma de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo es igual a la masa del cuerpo por su aceleración, así mismo, las condiciones para que un cuerpo se encuentre en un estado de equilibrio, las sumas de las fuerzas externas y los momentos que actúan sobre ella se cancelen y desaparezcan.

Según lo dicho por Jaeger, Cook, & Zimmerman⁵² Estos conceptos se aplican de igual manera a cuerpos deformables como las masas de roca, no obstante, los conceptos se deben modificar por algunas razones. Entre esas razones se encuentra el hecho de que la fuerza a la que está sometida la roca, casi siempre, variará de un punto a otro y se distribuirá por todo el cuerpo.

4.2.1.1.1 Terminología mecánica de rocas.

Resistencia Compresiva y resistencia aparente de la roca.

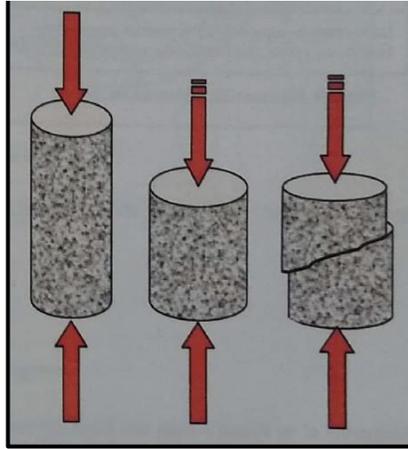
Según Mitchell⁵³, para determinar la resistencia de una formación comúnmente se toman núcleos de roca y se transportan al laboratorio donde se procede a comprimir mediante el uso de una prensa hidráulica. La fuerza aplicada se irá aumentando lentamente hasta que la muestra falle (Se rompa), este momento es conocido como resistencia compresiva de la roca. (*Ver figura 27*).

⁵¹ Ramírez Oyangurén , P., & Alejano Monge , L. (2007). Mecánica de rocas: fundamentos de ingeniería de taludes. Vigo. p. 3

⁵² Jaeger, Cook, & Zimmerman. Op. Cit., p. 1-2

⁵³ Mitchell , J. Op. Cit., p 119

Figura 27. Compresión de un núcleo de Roca hasta el fallo.

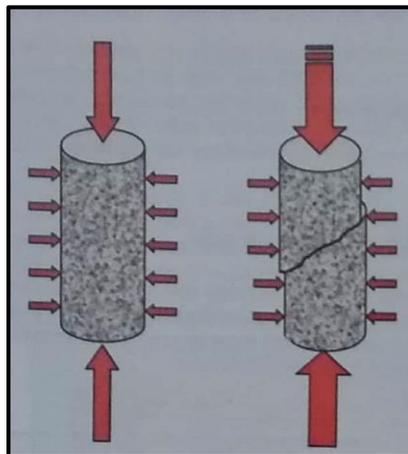


Fuente: (Mitchell , 2001)

A medida que el núcleo es sometido a las fuerzas compresivas, si se toman medidas de longitud y diámetro se notará que la roca tiende a perder longitud, pero a aumentar su diámetro debido a que intenta mantener el mismo volumen original. Este cambio de longitud vertical se conoce como deformación axial y el cambio del diámetro se conoce como deformación radial.

Si el núcleo es puesto en un cilindro el cual aplique una fuerza de confinamiento que provoque resistencia al aumento de diámetro, se notará que es más difícil acortar la muestra y de igual manera, un aumento en la fuerza compresiva necesaria para fallar la muestra (Ver ilustración 28). Este esfuerzo necesario para romper la

Figura 28. Compresión de un núcleo de roca con presión de confinamiento.



Fuente: (Mitchell , 2001)

muestra de roca cuando se tiene una fuerza de confinamiento se llama resistencia aparente de la roca, por ende, a esfuerzos de confinamiento mayores se obtienen mayores resistencias aparentes de la roca, hasta el punto de que se vuelve más probable de que la muestra se deforme a que se rompa.

Propiedades que determinan la resistencia de la roca.

Para poder ahondar en este tema, se hace necesario observar la roca a un nivel microscópico, donde según lo descrito por Jaeger, Cook, & Zimmerman⁵⁴, gran parte de las rocas están conformadas por agregados de cristales y partículas amorfas que son unidas con diferentes tipos de materiales cementantes. Los cristales pueden ser conformados por materiales relativamente homogéneos u heterogéneos al igual que también puede cambiar su tamaño puede ser variable. Por una parte, los límites de los cristales representan debilidades estructurales de la roca, pues como describe Mitchell⁵⁵, para que las rocas tengan un cambio de forma o ceda ante los esfuerzos y se rompa, se hace necesario una interacción cinética entre los granos individuales de la roca, por lo que una parte de la roca se mueve en una dirección y la otra en la dirección opuesta. Los responsables de evitar el movimiento y dar resistencia a la roca es la fricción y la cementación entre los granos individuales de la roca.

Cuando se habla de la fricción, se debe tomar en cuenta la sobrecarga, la forma, tamaño, la orientación, la cantidad de fluido de lubricación entre los espacios porosos y las fuerzas compresivas a través, así mismo, la edad de la roca es un factor influyente. Por su parte la cementación se da en el momento en el que los minerales que se encuentran disueltos en el agua de forma iónica, pasan a través de la formación, precipitándose en los espacios entre granos, cementando los granos juntos, haciendo la roca más cohesiva y, por ende, incrementando la resistencia de la roca.

Terminología: Fuerza y esfuerzo, Resistencia compresiva de la roca, Deformación axial y radial, corte, compresión y tensión, esfuerzo total, esfuerzo efectivo y presión de poro, deformación elástica y plástica, relación de poisson, esfuerzos triaxiales y principales, esfuerzos in situ.

- Fuerza y esfuerzo:

⁵⁴ Jaeger, Cook, & Zimmerman. Op. Cit., p. 1-4

⁵⁵ Mitchell , J. Op. Cit., p 115-116

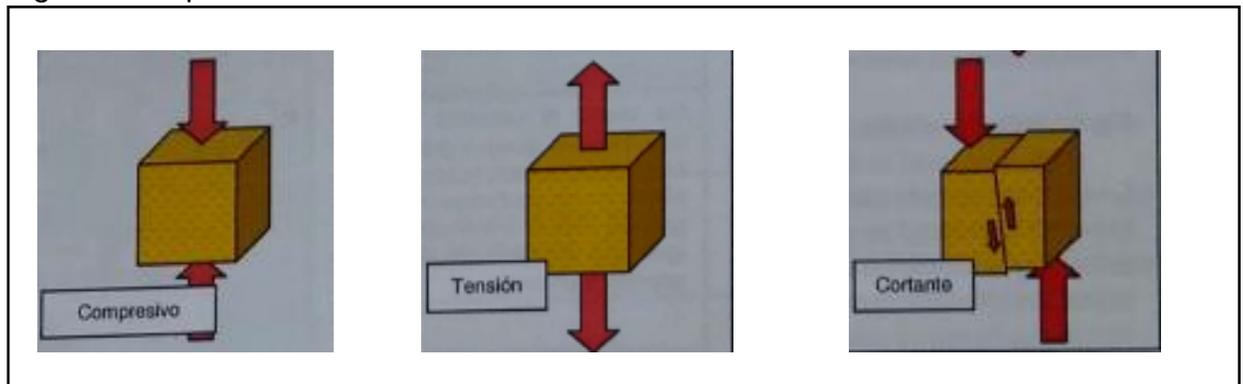
Partiendo de la definición de Beer et al.⁵⁶ Una fuerza es la acción que ejerce un objeto sobre otro, contando con tres características básicas: Dirección, Magnitud y punto de aplicación. La fuerza es la causa por la cual un cuerpo obtiene un cambio en el movimiento o en su estructura interna.

Según la opinión de Mitchell⁵⁷, la cual comparte Gamio Arisnabarreta⁵⁸, analógicamente como las fuerzas son transferidas a por medio de la presión, en el caso de los sólidos, las fuerzas lo hacen a través de los esfuerzos. Esfuerzo puede ser definido como la fuerza aplicada por unidad de área y tiene las mismas unidades que las de la presión, pero al contrario esta, los esfuerzos pueden tener magnitud positiva o negativa. Los tipos de esfuerzos a los que puede estar sometido un sólido son los siguientes:

- Esfuerzo compresivo: Ocurre cuando el material es sometido a presión.
- Esfuerzo de tensión: Tiene lugar cuando el material se encuentra en tensión, por ejemplo, cuando una carga está suspendida en un cable.
- Esfuerzo cortante: Que existen esfuerzos de movimiento lateral.

No obstante, el sólido puede estar sometido a los tres tipos de esfuerzo en un mismo momento (Ver figura 29).

Figura 29. Tipos de esfuerzos.



Adaptados de: (Mitchell , 2001)

⁵⁶ Beer, F. P., Johnston, R., Dewolf, J., & Mazurek , D. F. (2009). Mecánica de materiales (Quinta ed.). México D:F: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V. p. 2.

⁵⁷ Mitchell , J. Op. Cit., p 119.

⁵⁸ Gamio Arisnabarreta, L. E. (2014). Resistencia de Materiales-Teoría y aplicaciones. Lima, Perú : Empresa Editora Macro EIRL .

- Deformación axial y radial

Para Ortiz Berrocal⁵⁹ una deformación es el cambio que sufre un cuerpo en su forma o tamaño, como consecuencia a un esfuerzo externo producido por una o más fuerzas. En el caso de la deformación axial, se aplica un esfuerzo normal, donde la fuerza es aplicada de manera perpendicular a la cara que se quiere analizar. Esta deformación axial sigue los comportamientos de la ley de Hooke, con la cual, al generarse sobre un material una deformación en una dirección, se producirá una deformación sobre los demás ejes, los que genera esfuerzos sobre estos.

La deformación axial es definida como el cambio de longitud por unidad de longitud. La ecuación que sigue este comportamiento es la siguiente:

$$e = \frac{\Delta s}{s} = \frac{s' - s}{s}$$

Donde S es la longitud inicial del cuerpo en estudio y S' es la longitud final o longitud deformada del cuerpo. Como se habló anteriormente, este tipo de deformación sigue los postulados de la ley de Hooke, esta afirma que la deformación elástica al a que es sometida un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza que produce dicha deformación, desde que no sobrepase el límite de elasticidad. Dicho en otras palabras, cuando se aplica una fuerza sobre un cuerpo como un resorte (El objeto que estudió Hooke), este se alargara, de la misma manera, si se duplica la fuerza, el alargamiento también es hará el doble, siempre y cuando no se deforme de manera permanente el cuerpo. Si al momento que aplicamos la fuerza se deforma permanentemente el cuerpo, se dice que se ha superado su límite de elasticidad como se muestra en la *figura 30*. Explicando cada parte de la ilustración tenemos que:

-Límite de proporcionalidad: Es el punto después en el que el esfuerzo deja de ser proporcional a la deformación.

-Límite de elasticidad: Es la región donde el material obtiene una deformación plástica, es decir, recupera su forma original al librarse de los esfuerzos.

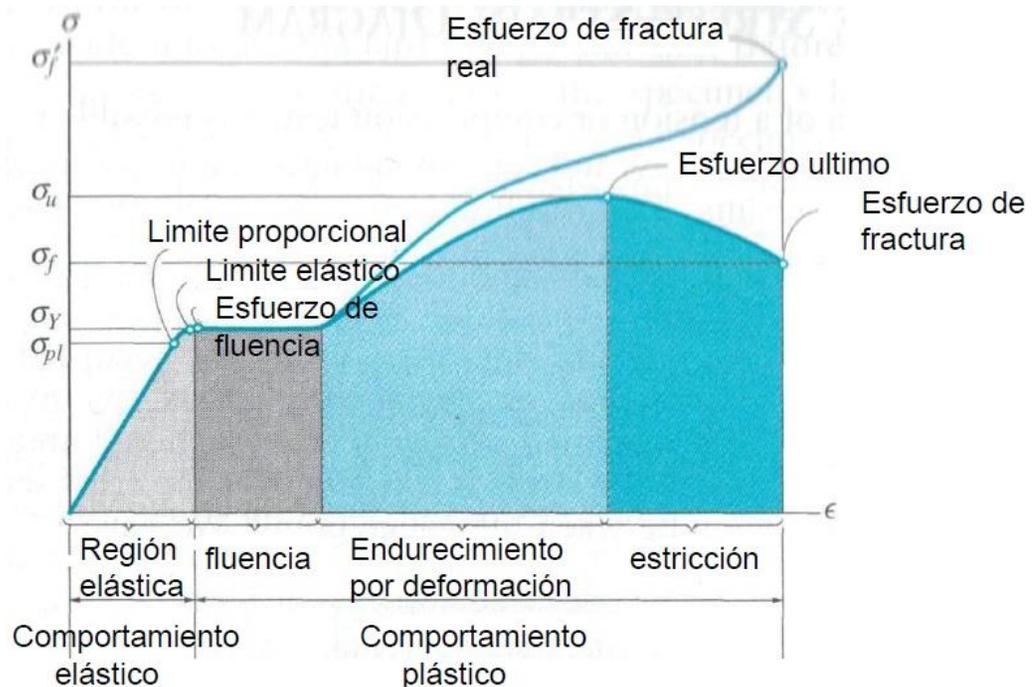
-Punto de fluencia: es en el que aparece un alargamiento considerable sin que se haya aumentado los esfuerzos.

-Esfuerzo último: Es el punto en el que se alcanza el valor máximo de esfuerzo.

-Esfuerzo de fractura: Es el punto en el que se fractura el material.

⁵⁹ Ortiz Berrocal, L. (2007). Resistencia de Materiales . Madrid: McGraw-Hill España. P. 71-72

Figura 30. Diagramas esfuerzo-deformación unitaria, convencional y real, para un material dúctil.



Fuente: (Metalografía – Universidad Tecnológica De Pereira, 2020)

Según el mismo Ortiz Berrocal⁶⁰ El cuerpo además de experimentar una deformación según la dirección de la fuerza, presenta una deformación en las direcciones normales a ella, pues, los esfuerzos de tracción provocan alargamiento con adelgazamiento del cuerpo, mientras que la compresión provoca el acortamiento y el ensanchamiento, esto es conocido como deformación radial.

- Esfuerzo cortante.

Según la opinión de Beer⁶¹, la cual también es compartida y completada por Fitzgerald⁶², el esfuerzo cortante es aquel que resulta luego de aplicar sobre un cuerpo dos fuerzas paralelas y en sentidos contrarios, lo cual, comúnmente, hace que una parte del cuerpo se corte o deslice con respecto a la otra, como se muestra

⁶⁰ Ibíd. p. 71-72

⁶¹ Beer, F. P., Johnston, R., Dewolf, J., & Mazurek, D. F. (2009). Op. Cit. P. 7-9

⁶² Fitzgerald, R. W. (1996). Mecánica de materiales. México D.F: Alfaomega Grupo Editor. P. 21-23

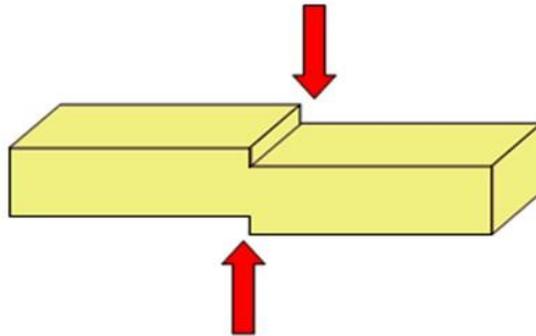
en la *figura 31*. La magnitud del esfuerzo cortante es igual a la relación entre la fuerza cortante y el área sobre la que actúa. Por lo que tenemos que:

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

Ecuación 1. Relación entre fuerza cortante y el área.

Esta afirmación parece indicar que el esfuerzo cortante se encuentra distribuido de manera uniforme, cosa que no es cierta, pues, este es el esfuerzo cortante promedio de esa área aplicada al cuerpo. La distribución real del esfuerzo no es de naturaleza uniforme, no obstante, esta distribución real no es importante para fines prácticos.

Figura 31. Cuerpo sometido a esfuerzo de corte.



fuelle: (Zapata , s.f.)

Al relacionar el esfuerzo cortante y la deformación, se encuentra que el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la deformación unitaria ocasionada sobre el objeto, el cual, si no se sobrepasa la región elástica, vuelve a sus dimensiones originales en el momento en que los esfuerzos dejen de actuar sobre él, en tal caso:

$$\text{Esfuerzo cortante} \propto \text{Deformación unitaria}$$

La constante de proporcionalidad es el módulo de corte, donde tenemos que *Esfuerzo cortante* (τ) = *Módulo de cizalla* (G) * *Deformación unitaria* (γ)
Donde (γ) = $\Delta L/L_0$ siendo ΔL la diferencia entre la longitud final y la inicial.

- Compresión y tensión.

Según lo que nos describe Beer et al.⁶³, tanto los esfuerzos de compresión y tensión son esfuerzos axiales, donde un elemento con área transversal A sometido a una carga axial P. se obtiene al dividir la magnitud P de la carga entre el área A:

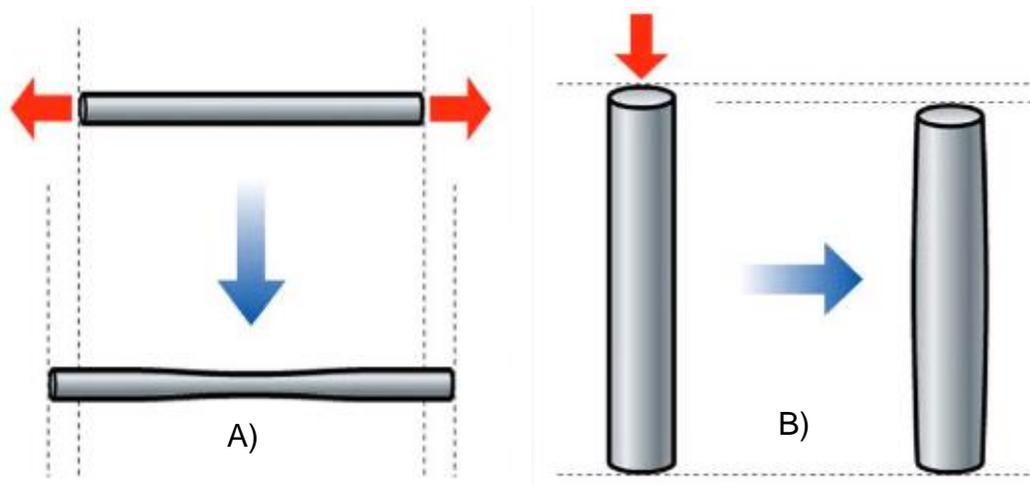
$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Ecuación 2. Esfuerzo.

Matemáticamente, se emplea signo positivo para esclarecer que el cuerpo se encuentra bajo un esfuerzo de tensión, caso contrario, negativo para un esfuerzo de compresión.

Cuando un cuerpo deformable es sometido a un esfuerzo compresivo tiende a presentar una reducción del volumen y acortamiento del cuerpo en la misma dirección que en la que se está aplicando la fuerza, además, un ensanchamiento en la dirección perpendicular a esta. El esfuerzo de tracción o tensión puede definirse como el esfuerzo interno al que está sometido un cuerpo al que se le aplican dos fuerzas en direcciones opuestas. Los cuerpos sometidos a este tipo de esfuerzo tienden a sufrir deformaciones positivas o estiramientos a razón de la tracción, no obstante, también se presenta un acortamiento en las direcciones transversales o perpendiculares a la fuerza aplicada. Este comportamiento en ambos casos (De compresión y tensión) son matemáticamente explicadas y fundamentadas con el coeficiente de Poisson. (Ver figura 32)

Figura 32. Cuerpo que sufre esfuerzo de tracción o compresión B) Cuerpo que sufre esfuerzo de compresión.



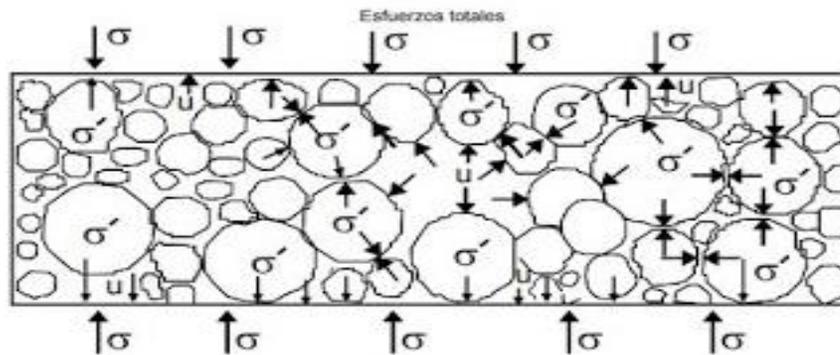
Fuente: (Cayul , Rivera , Soto, & Soto, 2020)

⁶³ Beer, F. P., Johnston, R., Dewolf, J., & Mazurek , D. F. (2009). Op. Cit. P. 3-5

- Esfuerzo total.

Mitchell⁶⁴ define que el esfuerzo total resulta de la aplicación de una fuerza o presión sobre un cuerpo, generalmente se utiliza al hablar de suelos. El esfuerzo total es igual a la suma de todas las fuerzas, incluyéndose a las que son transmitidas mediante el contacto de las partículas, las transmitidas por la presión de poro en el agua divididas en el área total, e incluyendo el área de los sólido y espacios vacíos. (Ver figura 33)

Figura 33. Esfuerzos totales y efectivos. $\sigma':\text{efectivo} = \sigma(\text{total}) - \mu$.



Fuente: (SUELOS, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS, 2018)

- Presión de poro y esfuerzo efectivo

Con lo expuesto por Mitchell⁶⁵, no todos los esfuerzos presentes en la formación se encuentran soportados por la matriz de la roca. Una parte de estos esfuerzos son soportados por el fluido presente en los espacios porosos de la roca. (Ver figura 34) Como ya se ha mencionado, cuando la lutita está en el proceso de deposición, todos los granos se encuentran rodeados por agua, que es forzada a salir mientras la lutita es compactada. No obstante, en ocasiones la compactación se da de manera muy rápida, lo que hace que la permeabilidad se reduzca abruptamente, no permitiendo que los fluidos salgan a medida que esta se compacta. De esta manera, el fluido comienza a recibir algo de carga de las que se encuentran circundantes en el sistema. El esfuerzo total sentido en la formación se divide entre el esfuerzo que soporta la matriz de la roca y el que soporta el contenido por el poro. La parte del esfuerzo que es soportada por la matriz de la roca es llamada comúnmente como esfuerzo efectivo o también como esfuerzo inter-granular.

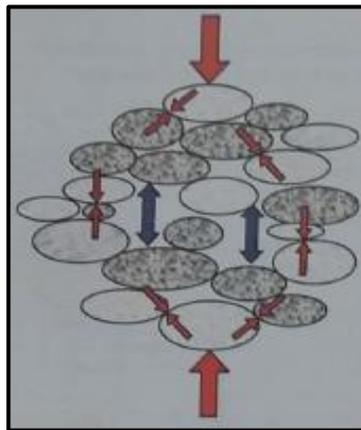
⁶⁴ Mitchell, J. (2001).). Op. Cit. p. 120

⁶⁵ Ibíd, p. 117-118

El esfuerzo que es soportado por el fluido presente en el espacio poroso se conoce como presión de poro. La combinación de la presión de poro y el esfuerzo efectivo se le llama esfuerzo total.

Cae aclarar, que la deformación y la resistencia de una roca son dependientes únicamente del esfuerzo efectivo, ya que el esfuerzo entre los granos es el que controla el movimiento relativo entre ellos. Por lo tanto, el deslizamiento intergranular y la deformación es independiente de la presión de poro e incluso, el aumento de la presión de poro disminuye el esfuerzo efectivo y, por tanto, hace menor la resistencia de la roca.

Figura 34. El esfuerzo efectivo es el que se da por el contacto entre los granos. La presión de poro es un esfuerzo que se da por el contacto entre el fluido con los granos. La presión de poro ayuda a soportar la sobrecarga



Fuente: (Mitchell , 2001)

- Deformación elástica y plástica.

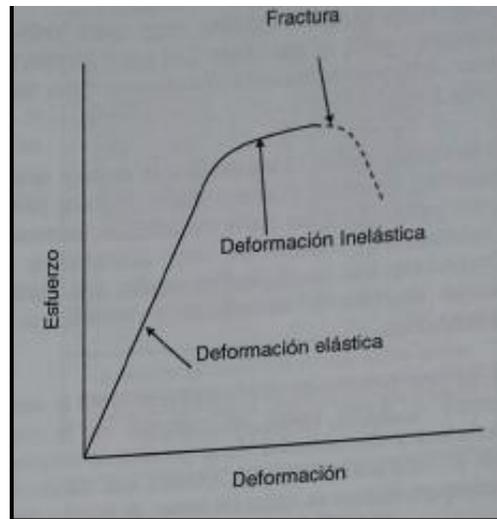
Deformación se define, según Mitchell⁶⁶, como el cambio de la longitud o el espesor de un cuerpo que se da a raíz de su sometimiento a un esfuerzo. Normalmente está representada con la letra griega épsilon (ϵ). La deformación es directamente proporcional al esfuerzo que experimenta.

En la *figura 35* se muestra la relación típica entre esfuerzo y deformación que es sufrida por un cuerpo expuesto a esfuerzos compresivos. Cuando los esfuerzos tienen un valor bajo, la roca se comporta de una manera elástica y donde si los esfuerzos son retirados, la roca vuelve a las dimensiones originales como lo hace un resorte. Esta deformación elástica está representada en la gráfica (*figura 35*) por

⁶⁶ Ibíd, p. 121

la línea recta. Si los esfuerzos se siguen manteniendo, cuando el límite elástico es excedido el cuerpo se deforma permanentemente, o en su defecto, se fractura. Este estado se conoce como deformación inelástica o plástica. En las rocas comúnmente, se alcanza un pequeño umbral de deformación inelástica antes que se alcance la resistencia máxima, una vez que esta es excedida, la roca se rompe. En el caso de las lutitas, se puede alcanzar un alto límite plástico antes de que se presente una ruptura a raíz de alcanzar su resistencia máxima, caso contrario de las calizas que alcanzas el punto de fractura antes de su límite plástico.

Figura 35. Diagrama esfuerzo vs deformación de un cuerpo sometido a compresión.



fuelle: (Mitchell , 2001)

- Relación de Poisson.

Como dice Mitchell⁶⁷, el comportamiento de la presión en los líquidos actúa igual en todas las direcciones, fenómeno conocido como principio de Pascal. En otras palabras, si se tiene una columna hidrostática de 100 psi, la presión que actúa horizontalmente en el en el borde del tanque es de 100 psi, es decir, la totalidad de la presión vertical es sentida en todas las direcciones horizontales. Al hablar de los sólidos, menos del 100% de esa fuerza vertical es sentida en las otras direcciones. La relación del esfuerzo horizontal con respecto al esfuerzo vertical es una función de la relación de Poisson expresada como:

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \nu / (1 - \nu)$$

⁶⁷ Ibíd, p. 122

Ecuación 3. Relación de Poisson.

Teniendo que la relación de Poisson (La cual es representada por la letra griega Nu, ν) cuenta con un valor menor a 0.5 (Ver figura 50).

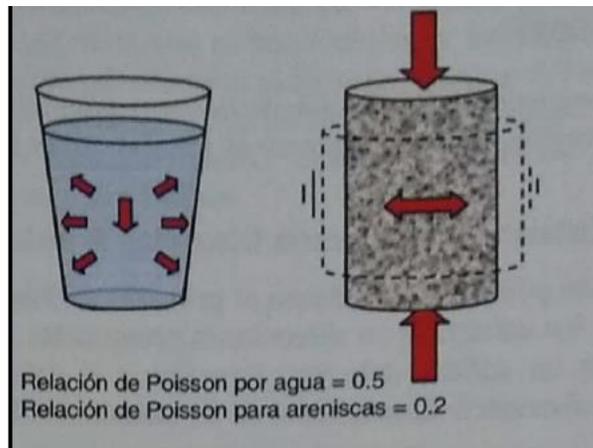
La relación de deformación horizontal y deformación vertical también está ligada a Poisson y se ve como:

$$\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_v} = \nu$$

Ecuación 4. Relación de deformación horizontal y vertical.

Para efectos de estudio, el agua cuenta con una relación de 0.5, además, la magnitud de la fuerza que la roca puede ejercer perpendicularmente a una carga depende de la relación de Poisson, es decir, una roca con una relación de Poisson alta es más fácil de deformar. (Ver figura 48)

Figura 36. Relación de Poisson.



Fuente: (Mitchell , 2001)

En el caso de las lutitas y arcillas suaves la relación de Poisson tiene un valor alto, Siendo así, los esfuerzos horizontales in situ son elevados, razón por la que se siente un mayor esfuerzo vertical en una dirección horizontal y tiene una mayor tendencia a deformarse que rocas como la dolomita, las cuales su relación de Poisson es relativamente baja.

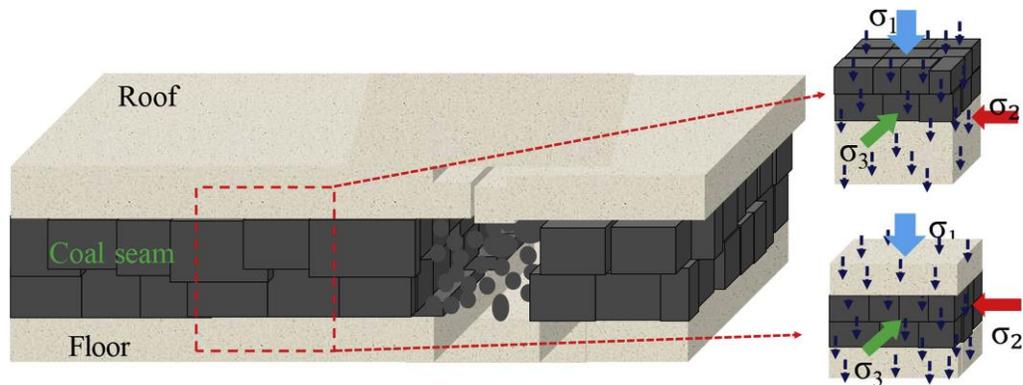
Los valores de la relación de Poisson para las lutitas varían desde 0.17 hasta 0.28 y la arcilla puede ir desde 0,17 hasta 0.50 (si la arcilla se encuentra muy húmeda). En el campo de la perforación petrolera es importante conocer la relación de Poisson de las rocas que perforamos ya que las rocas que, al recibir el peso de las capas rocosas superiores, tienden a estrechar el agujero y se necesitará un peso de lodo mayor que ayude a compensar el peso con la columna hidrostática, evitando que el

agujero se derrumbe o desmorone (En el caso de las rocas con una alta relación de Poisson).

- Esfuerzos triaxiales y principales

Como se ha descrito anteriormente, los sólidos no siguen los principios expuestos por Pascal, es decir, los esfuerzos en una dirección no deben ser iguales a los esfuerzos en las direcciones perpendiculares, de esta manera para poder explicar mejor los comportamientos entre la relación esfuerzo-deformación en un sólido se opta por esquematizar los esfuerzos principales en las tres dimensiones a los que está sometido un sólido o en otras palabras, en un esfuerzo triaxial. En la *figura 37* se observan los esfuerzos triaxiales de una formación rocosa (Carbón) y la influencia de las formaciones rocosas adyacentes.

Figura 37. Esfuerzos a los que está sometida una formación de carbón.



fuelle: (Jun Lu, 2019)

Como lo explica Jun Lu⁶⁸ y Mitchell⁶⁹, el estado triaxial demostrado en la *figura 37* es un esquema de los esfuerzos principales lo cual nos indica que uno de estos esfuerzos es el esfuerzo máximo al que va a estar sometido el elemento y otro es el mínimo esfuerzo. El tercer esfuerzo es ortogonal a los anteriores descritos y es de magnitud media.

En la *figura 37* el esfuerzo 1 (σ_1) representa el esfuerzo que es generado por la roca que está encima, normalmente es llamado como esfuerzo de sobrecarga σ_v . En el caso de los esfuerzos horizontales son representados como σ_h en el caso del esfuerzo horizontal menor y σ_H en el caso del mayor, estos esfuerzos horizontales en pocas ocasiones son iguales y es común que el movimiento de las placas tectónicas haga que la fuerza horizontal en una dirección sea mayor que en otra.

⁶⁸ Jun Lu, G. Y. (2019). Permeability characteristics of layered composite coal-rock under true triaxial stress conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 60-76.

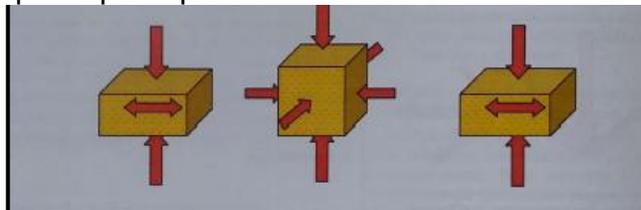
⁶⁹ Mitchell, 2001. Op. Cit., p. 125

- Esfuerzos in situ

Para Mitchell⁷⁰ Al hablar de la roca in situ, se hace referencia a que la roca se encuentra en su lugar original en la formación rocosa, además, de que se encuentra en equilibrio de esfuerzos. La roca cuando está en su lugar de origen debe soportar la carga que proviene de la roca presente en la parte superior, provocando un esfuerzo que como se ha nombrado antes, hará que pierda "Altura" y gane espesor (*Ver figura 38*), sin embargo, en este caso, todas las rocas adyacentes están soportando la misma sobrecarga y tienden a acortar su altura y ganar espesor. A este comportamiento en el que la roca recibe esfuerzos de todos lados es lo que hemos llamado presión de confinamiento la cual hace que la roca eleve su resistencia aparente y no se provoque la falla.

Con el paso del tiempo la presión de sobrecarga y confinamiento van aumentando gradualmente hasta el punto en el que se excede la resistencia del material y se da la falla, situación que ocurre normalmente a profundidades cercanas a los 80.000-90.000 pies.

Figura 38. El elemento de la roca in situ se encuentra en equilibrio, provocado por la sobrecarga generada por las rocas vecinas. Esto genera una presión de confinamiento que impide que la roca se deforme.



Fuente: (Mitchell , 2001)

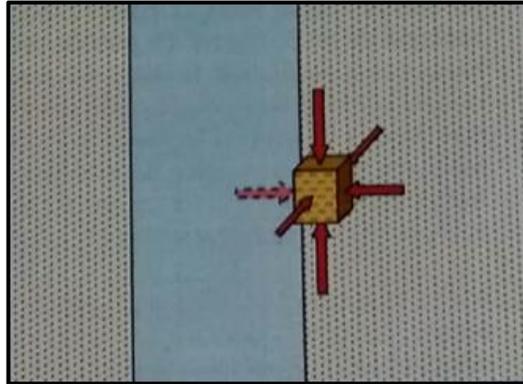
Esfuerzos alrededor del pozo

Mitchell⁷¹ explica que, Cuando la formación de roca se encuentra inalterada cada pequeña porción de ella está recibiendo esfuerzos de soporte, lo que crea lo que se ha denominado como presión confinamiento, ilustrado mejor en la *Figura 49*, No obstante, en los trabajos de perforación removemos fragmentos de roca y con él, parte del esfuerzo de soporte (*Ver figura 39*), el cual debe ser reemplazado por la presión ejercida por la columna hidrostática con el apoyo de la presión ejercida por el lodo de perforación ya que si no existiera el fluido, todos esfuerzos resultantes dependerían de los esfuerzos transferidos por el esfuerzo circunferencial, el cual es un esfuerzo tangencial a la pared del agujero.

⁷⁰ Ibid., p. 125

⁷¹ Ibid., p. 126

Figura 39. Al perforar se remueven fragmentos de roca y, por ende, el esfuerzo de soporte.

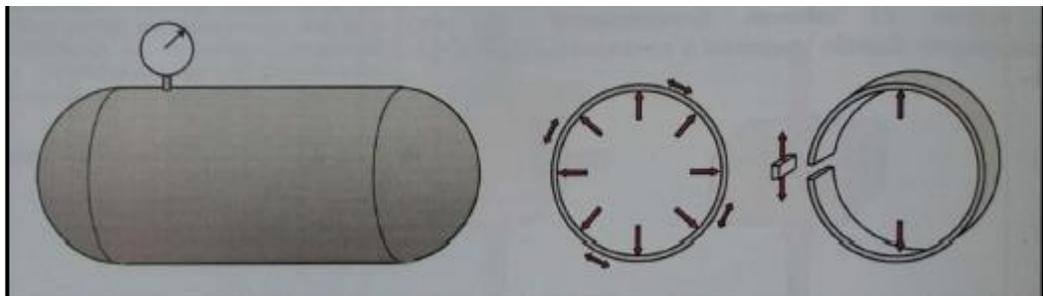


fuelle: (Mitchell , 2001)

- Esfuerzo tangencial.

John Mitchell⁷² acude a una analogía, teóricamente se habla de recipiente que se encuentra a presión, como lo podemos ver en la *figura 40*. Si el recipiente es cortado a la mirada a lo largo de un plano vertical, por la presión interna contenida en el recipiente, las dos mitades tienden a apartarse, además, desaparece el esfuerzo de tensión contenida en las paredes del tanque y que no permitía que las dos mitades se apartaran. El esfuerzo multiplicado por el área de la sección transversal de la pared nos da como resultado la fuerza que intenta separar las dos mitades. Este esfuerzo tangencial es el mismo a lo largo de toda la superficie del tanque, siempre y cuando, el espesor de la pared se mantenga igual en toda la pared.

Figura 40. La presión interna intenta separar en dos partes el tanque. La presión interna genera un esfuerzo de tensión tangencial en las paredes del recipiente.



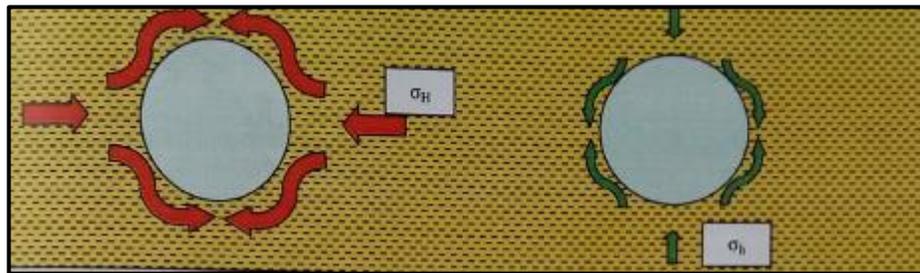
Fuelle: (Mitchell , 2001)

⁷² Ibid., p. 127-130

Ahora, si el tanque de la *figura 40* se presuriza desde afuera, como si estuviera recibiendo esfuerzos provenientes de la profundidad del océano, la presión externa que actúa sobre la sección transversal de las paredes del tanque, es la que no permite la separación de las dos mitades del tanque. En este caso, el esfuerzo tangencial en cualquier parte del tanque se encuentra bajo compresión.

Aplicando esta analogía en el caso de la roca in situ, en el momento que perforamos el pozo, se remueve roca de soporte de uno de los lados de la formación, por lo tanto, el esfuerzo que es retirado es reemplazado por el esfuerzo tangencial. De igual manera, el campo de esfuerzos se comporta de una manera distinta y se adapta alrededor del agujero, como se muestra en la *figura 42*.

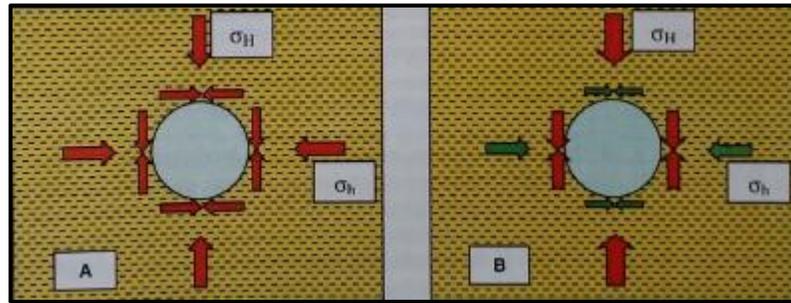
Figura 42. Al momento en que se remueve fragmentos de roca durante la perforación, los campos de esfuerzos se re-distribuyen al rededor del agujero como esfuerzos tangenciales.



Fuente: (Mitchell , 2001)

Cuando el pozo es vertical y no hay fuerzas tectónicas, las fuerzas horizontales σ_H y σ_h son iguales y el esfuerzo tangencial es uniforme en toda la superficie (*figura 43A*). No obstante, realmente siempre hay fuerzas tectónicas, por lo que el esfuerzo horizontal mayor σ_H debe trabajar en el agujero como un esfuerzo tangencial. Ocurre algo similar con el esfuerzo horizontal mínimo σ_h , el cual produce un esfuerzo tangencial mayor a los 90 grados y a los 270 grados a partir del esfuerzo mayor (*figura 43B*)

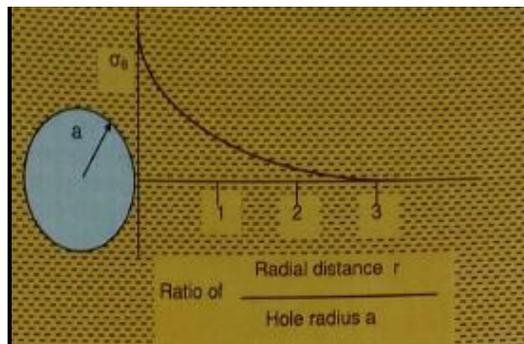
Figura 43. A) Cuando las fuerzas horizontales son iguales, el esfuerzo tangencial es uniforme alrededor del agujero. B) Cuando los esfuerzos horizontales no son iguales, el esfuerzo tangencial no es uniforme en el agujero.



Fuente: (Mitchell , 2001)

El esfuerzo tangencial es diferente en cada uno de los puntos a lo largo de la pared, de igual manera, los esfuerzos tangenciales cambian a medida que nos alejamos de la pared hacia el interior de la formación, o en otras palabras, el esfuerzo tangencial es mayor en la pared del pozo y se reduce gradualmente hasta cero a una distancia de tres veces el radio del agujero, como se muestra en la *figura 44*.

Figura 44. El esfuerzo tangencial es máximo en las paredes del agujero y se reduce a medida que se adentra a la formación, llegando a cero a una distancia de 3 veces el radio del agujero.



Fuente: (Mitchell , 2001)

Regímenes de Esfuerzos in situ y anisotropía de esfuerzos.

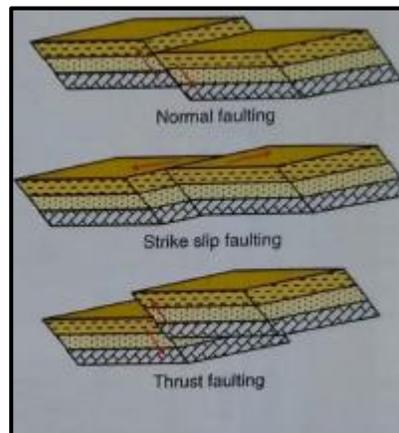
Según Mitchel⁷³, los regímenes de esfuerzos tectónicos se pueden definir como la resistencia relativa de los esfuerzos principales. Al hablar de esfuerzos in situ, nos referimos a los esfuerzos que son aportados por la formación en el lugar de la perforación. Estos regímenes de esfuerzos se dan como resultado del empuje realizado por el movimiento de las placas tectónicas. En la *figura 45* se ilustran los principales regímenes de esfuerzos. Un régimen de esfuerzo para falla normal se

⁷³ Ibid., p. 145

da en el momento en el que $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$. En esta, el esfuerzo principal o mayor se encuentra en el eje vertical, los esfuerzos intermedios y menores en la dirección horizontal figura 45A.

Los regímenes de esfuerzo de falla de deslizamiento tienen lugar en el momento en el que $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$. Es decir, el esfuerzo horizontal mayor es mayor que el esfuerzo vertical y este, a su vez, es mayor que el esfuerzo horizontal menor- *figura 45B*. En el régimen de esfuerzo de falla inversa, los esfuerzos se presentan de esta manera $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$. Donde el esfuerzo vertical es menor que los dos esfuerzos horizontales. *figura 45C*.

Figura 45. Regímenes de esfuerzos.



Fuente: (Mitchell , 2001)

La diferencia entre los esfuerzos horizontales es conocida como anisotropía de esfuerzos y representan la diferencia entre la resistencia de los esfuerzos horizontales mayores y los horizontales menores. Para hacer mayor la estabilidad del agujero, se hace necesario minimizar la anisotropía de los esfuerzos mediante la dirección y la inclinación de la trayectoria del pozo.

Líneas de corrientes de esfuerzos.

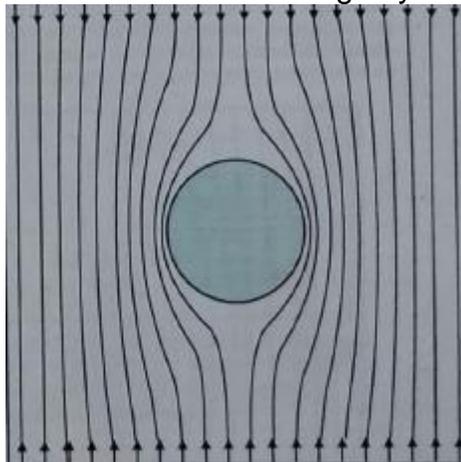
Según Hoek & Brown⁷⁴, una línea de corriente de esfuerzos puede interpretarse como una línea imaginaria que ilustra la trayectoria del esfuerzo principal. Estas líneas permanecen prácticamente inalteradas mientras pasan por las formaciones rocosas, no obstante, en las labores de perforación se generan agujeros que ocasionan una perturbación en el campo de esfuerzos, de manera análoga como un flujo de agua es alterado por un cuerpo que va desde el fondo hasta la superficie. Dicho lo anterior, los esfuerzos deben adaptarse y fluir alrededor del agujero. De

⁷⁴ Hoek , E., & Brown , E. T. (1990). *Under g ound Excavations in Roc k*. Londres : Institution Of Mining And Metallurgy. p. 107-109

igual manera que el flujo de agua aumenta su velocidad cuando un cuerpo perturba su flujo debido a que una mayor cantidad de agua tiene que fluir por un área reducida, las líneas de esfuerzos se separan en el momento que encuentran la obstrucción (El agujero) y se ven obligadas a acercarse mientras pasan alrededor del mismo.

En este caso, el esfuerzo compresivo se reduce, e incluso, puede llegar a pasar a ser un esfuerzo de tensión a medida que las líneas de corriente de esfuerzos se alejan, de la misma forma, el esfuerzo compresivo se ve incrementado en la región en la que las líneas de corriente de esfuerzos convergen.

Figura 46. Agujero alterando las líneas de corriente de esfuerzos. El esfuerzo compresivo es mayor donde las líneas convergen y menor donde se separan.



Fuente: (Mitchell , 2001)

Curvas de nivel de esfuerzos.

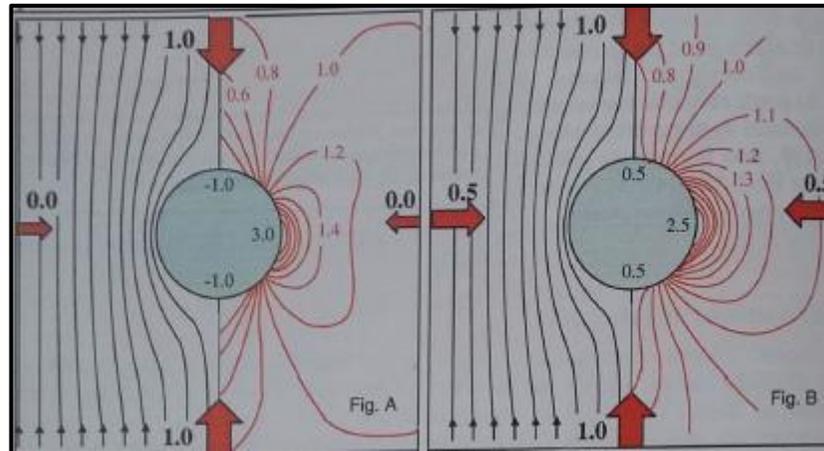
En las investigaciones realizadas por Hoek & Brown⁷⁵, se denotó que las líneas de corriente de esfuerzos se comportan distinto según la forma que tenga el agujero o perturbación en la formación. Las curvas de nivel de esfuerzos denotan la relación de los esfuerzos principales junto con el esfuerzo mayor aplicado.

Lo que realmente es de interés nuestro, es el esfuerzo tangencial mayor a en las paredes del agujero. Esta relación de esfuerzos tangenciales se debe ser leída en el punto en el que la curva de nivel intercepta el agujero. Si observamos las *figuras 47 y 48*, está bien afirmar que esta es mayor a 90° y 270° a partir del campo de

⁷⁵ Ibíd, p. 109-111

esfuerzos mayores y varía según la diferencia entre los campos de los esfuerzos mayores y menores.

Figura 47. Líneas de corrientes de esfuerzos a la izquierda y curvas de nivel a la derecha. Las curvas de nivel representan la relación del esfuerzo máximo con el campo de esfuerzo máximo. En la mayoría de los casos el esfuerzo principal es el tangencial.



Fuente: (Mitchell , 2001)

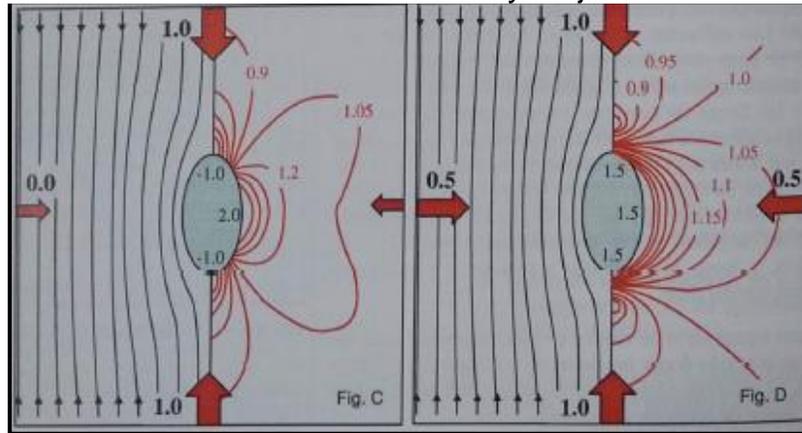
Hoek & Brown⁷⁶ explican que estos ensayos de curva de nivel de esfuerzos se realizan mediante un material foto elástico con varias anisotropías de esfuerzos y formas de agujero, cabe aclarar, que estas curvas son echas sin esfuerzo radial provocado por el lodo de perforación.

Comparando las *figuras 47 y 48* se denota claramente la gran influencia que tienen la forma del agujero en el campo de esfuerzos alrededor de este, de igual manera, cómo la anisotropía de esfuerzos afecta el campo de esfuerzos. Como lo explica Mitchell⁷⁷, el colapso del agujero normalmente es causada por los esfuerzos cortantes, el cual es determinado por la diferencia entre el máximo esfuerzo tangencial en la pared y el esfuerzo radial que provee el lodo. La falla por inestabilidad se verá provocada cuando el esfuerzo cortante se haga mayor, situación que ocurre cerca a la pared del agujero, lo cual, para formaciones blandas y plásticas como la Halita, lutita suave y arenas no consolidadas, puede ocurrir a una distancia de hasta tres radios del centro del pozo.

⁷⁶ Ibíd p. 109-111

⁷⁷ Mitchell , 2001. Op. Cit ., p. 132

Figura 48- El agujero puede tomar forma elíptica debido a la vibración de la tubería. El esfuerzo tangencial puede ser menor que en el agujero circular si el es mayor campo de esfuerzos está alineado con el mayor eje.



Fuente: (Mitchell , 2001)

Círculo de Mohr.

Según Santos⁷⁸, este fue creado por Christian Otto Mohr (1835-1918). Con el modelo de Mohr- Coulomb (MC) podemos tener una aproximación para la representación de los esfuerzos de la roca sobre un plano, es un modelo elástico, lineal y de plasticidad perfecta no asociada.

El círculo de Mohr es un método gráfico para determinar el estado tensional de los distintos puntos de una muestra en un plano. Entre las tensiones que existentes en de la muestra es sometida a un cierto estado de cargas y con unas ciertas restricciones, importan en general las tensiones principales, que son las tensiones que existen sobre ciertos planos del cuerpo, donde las tensiones de corte nulas. Estas tensiones son de importancia para el estudio de la resistencia mecánica de una pieza. Según Antico, F., & Pezzotti, S⁷⁹, este método tiene aplicación para estados tensionales en dos y tres dimensiones. En el sistema de coordenadas (Véase figura 49) encontramos trazados σ y τ ; donde σ (Esfuerzo Compresivo) y τ (Esfuerzo Cortante).

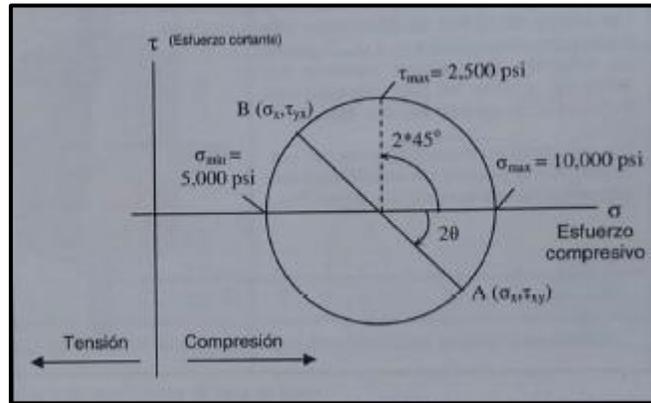
En la figura 49, los esfuerzos ortogonales en un punto se grafican en un sistema de coordenadas σ y τ . Los puntos A y B en esta gráfica representan los esfuerzos

⁷⁸ Santos, C. G. (2019). *Comportamiento Geotecnico de suelos arcillosos compactados respuesta a cartas estaticas y dinámicas*. Madrid: Electrónica. p 129-131.

⁷⁹ Antico, F., & Pezzotti, S. (2008). CIRCULO DE MOHR : para el cálculo de tensiones principales en el plano y el espacio. Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata, 1-10.

mayores y menores a lo largo de la superficie. Por su parte, los esfuerzos principales tienen lugar cuando el esfuerzo cortante tiene un valor de cero, el esfuerzo cortante es máximo cuando es igual al radio del círculo.

Figura 49. Forma típica del círculo de Mohr.



Fuente: (Mitchell , 2001)

Según lo descrito por Mitchell⁸⁰, el concepto primordial del círculo de Mohr es que: “cada uno de los puntos representados en el círculo representa el estado de esfuerzo sobre un plano imaginario que pasa a través de la roca en un ángulo θ desde el plano de los esfuerzos principales”.

Falla de envolvente de círculo de Mohr.

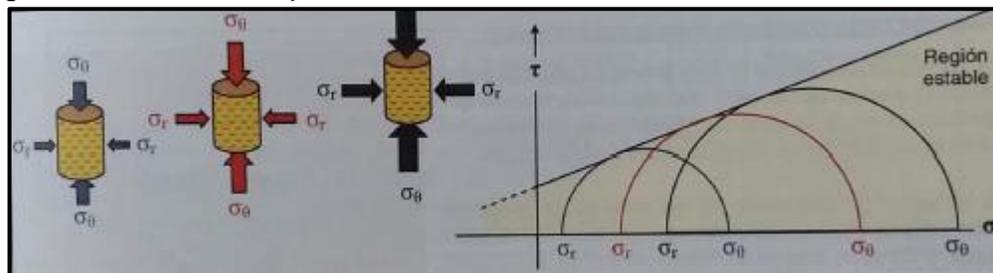
Haciendo alusión a lo que describe Mitchell⁸¹, Uno de los principales intereses es encontrar teóricamente las condiciones en las que exista mayor estabilidad para el pozo, o en su defecto, las condiciones que propician la inestabilidad. Si se conocen los esfuerzos tenidos en la formación o esfuerzos in situ, se necesita encontrar los rangos de peso de lodo en los que el agujero tenga una propicia limpieza, prevenga la pérdida de circulación y el colapso del pozo. Para explicar mejor cabe aclarar que, si el peso del lodo es muy alto, el pozo sufrirá pérdida de circulación, en contra parte, si el peso del lodo es menor que el estipulado, las paredes del pozo tienden a sufrir más fácilmente de derrumbes. Por esta razón se hace necesario utilizar un método que se conoce como falla de envolvente del círculo de Mohr, la cual ayuda a predecir estos rangos del peso de lodo.

⁸⁰ Mitchell , 2001. Op. Cit ., p. 132

⁸¹ Ibíd., p. 136-138

Parte del procedimiento nombrado anteriormente consta de la extracción de núcleos directamente de la formación a estudiar. Las muestras se prueban hasta la falla a condiciones de confinamiento y se construye un círculo de Mohr basado en los datos obtenidos con las pruebas (Véase figura 50). Se traza una “línea de resistencia cortante” a lo largo de las partes superiores de los círculos. El área bajo la línea de resistencia cortante indica las condiciones en los que el pozo se encuentra en condiciones estables.

Figura 50. La prueba de núcleos con presiones de confinamiento establece los rangos de esfuerzo aceptables.



Fuente: (Mitchell , 2001)

Mitchell⁸² explica que el radio del círculo representa el máximo esfuerzo cortante. Los esfuerzos principales que se encuentran presentes en el círculo comúnmente son los esfuerzos tangenciales y el esfuerzo radial. Cuando el esfuerzo radial aumenta, el esfuerzo tangencial se hace menor, por lo que el aumento del peso del lodo tiene una influencia directa en los dos esfuerzos, siendo que: el círculo se hará más pequeño si el esfuerzo radial es menor que el tangencial, caso contrario, hará más grande el círculo si el esfuerzo radial es mayor que el esfuerzo tangencial.

4.2.2 Factores Que Afectan La Estabilidad Del Pozo

4.2.2.1 Características del lodo.

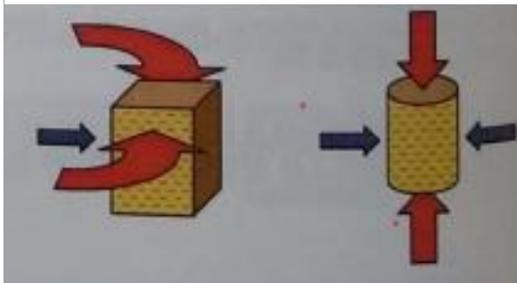
Como ilustra Mitchell⁸³, la Presión hidrostática del lodo da un esfuerzo radial en la pared del agujero. Como se habló anteriormente, al perforar retiramos una parte de la roca y con ellos, los esfuerzos que esta proveía a la formación (Ver figura 52), estos esfuerzos deben ser reemplazados por la combinación de los esfuerzos radiales y tangenciales descritos anteriormente. Por esa razón, mientras mayor sea

⁸² Ibid., p. 136-138

⁸³ Ibid., p. 136-138

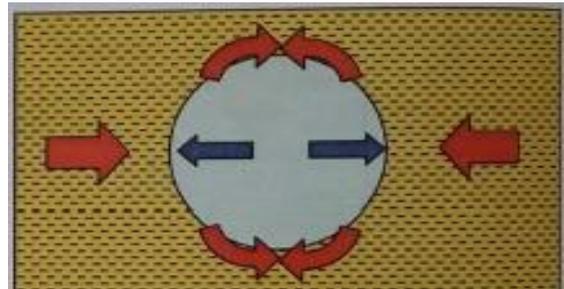
el peso del lodo, menos será el esfuerzo tangencial. El lodo además de reducir el esfuerzo tangencial, también provee presión de confinamiento en la roca, lo que incrementa la resistencia aparente de la roca, previniendo así derrumbes y otros problemas en la formación (Ver figura 51).

Figura 51. El esfuerzo radial provee a la roca una presión de confinamiento, lo que incrementa la resistencia aparente de la roca.



fuente: (Mitchell , 2001)

Figura 52. La roca removida provee esfuerzos, esfuerzos que son reemplazados por esfuerzos radiales y tangenciales.



No obstante, Como dice Hawker, Vogt, & Robinson⁸⁴ si el peso del lodo se hace mucho mayor a los valores óptimos establecidos previamente, los esfuerzos tangenciales pasan a convertirse en esfuerzos de tensión, los cuales, provocan que la roca falle bajo tensión, lo que se conoce comúnmente como un fractura hidráulica (Ver figura 53).

Figura 53. Relación entre esfuerzo radial y tangencial y su influencia en la fractura hidráulica.



fuente: (Mitchell , 2001)

- Ventana de peso de lodo.

Aadnoy⁸⁵ afirma que Se puede creer erróneamente que se debe mantener el peso del lodo lo más bajo posible y de esa manera, hacer mayor la velocidad de

⁸⁴ Hawker D., Vogt, K, & Robinson, A. (2001). Procedimientos y operaciones de pozo (Vol. 3). Calgary, Alberta, Canada: Datalog.

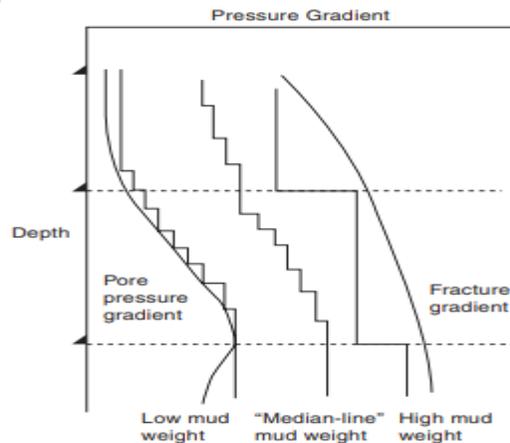
⁸⁵ Aadnoy , B. S. (2010). Modern well design. Stavanger, Noruega : CRC Press/ Balkema.

penetración, no obstante, esto genera otros problemas con el agujero, los cuales genera gastos adicionales por lo que es importante evitar problemas que provoquen inactividad.

Según el mismo Aadnoy⁸⁶, el éxito del programa de perforación siempre está relacionado con el óptimo uso de densidad del lodo, lodos con densidad demasiado baja, puede traer problemas de colapso y llenado, y caso contrario, si se tiene un lodo con densidad demasiado alta, se puede traer daños a la formación, pérdidas de lodo o adherencia a la tubería. No obstante, la optimización del peso del lodo solamente se da para una profundidad, o en otras palabras, el lodo solamente estará optimizado para una pequeña sección del agujero, según lo descrito por (Mitchell , 2001), la mejor manera de optimizar el peso del lodo consiste en: Hacerlo a la profundidad perforada y luego ir incrementando el peso del lodo a medida que se va aumentando la profundidad, pero nunca reducirlo.

Como afirma Mitchell⁸⁷, se ha desarrollado un método que se conoce como “Ventana de peso de lodo permitido”, siendo una “zona” donde existe un peso del lodo mínimo aceptable para contener los fluidos de la formación y prevenir el derrumbe del agujero y un peso máximo para aceptable para prevenir una pérdida de circulación. Ver figura 54.

Figura 54. Pesos típicos de lodo



Fuente: (Aadnoy , 2010)

4.2.2.2 Resistencia de la roca.

⁸⁶ *Ibíd.*, p. 136

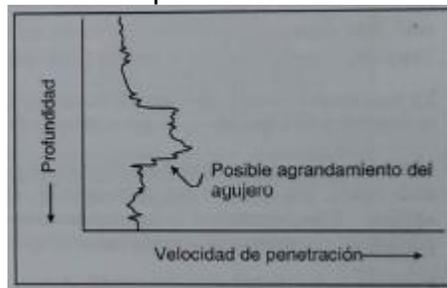
⁸⁷ Mitchell , 2001. *Op. Cit .*, p. 141

Como se vio anteriormente, la resistencia de la roca depende de la cementación y la fricción existente entre los granos individuales, aunque también se ve influenciado por la resistencia a la compresión y la elasticidad que poseen cada uno de los granos de la roca.

Mitchell⁸⁸ Si el número de puntos de contacto es pequeño, el esfuerzo real de estos puntos es alto, por consiguiente, la resistencia de la roca es directamente proporcional a los puntos de contacto de los granos de la roca. Algunos de los granos se encuentran sobre el plano de deslizamiento, por lo que deben romperse o deformarse para permitir el deslizamiento. Mientras más fuertes sean estos granos, será más complicado romperlos.

Las formaciones débiles se perforan de una manera más rápida, pero de igual manera, suelen fallar más fácilmente y provocar colapsos en el agujero. Gráficos como *la figura 55* son utilizados normalmente al lado de una gráfica litológica, con lo cual se puede ayudar a encontrar la velocidad de penetración óptima según la resistencia de la formación e informar al personal de la perforación.

Figura 55. Gráfica profundidad vs penetración.



Fuente: (Mitchell , 2001)

4.2.3 Temperatura

El núcleo de la tierra está compuesto por hierro y Niquel a temperaturas cercanas a los 4000°C. La temperatura es transferida hacia las capas más superficiales de la tierra. En Schlumberger⁸⁹ encontramos que, a medida que se está en las labores de perforación, cada vez que descendemos dentro de la corteza terrestre, la temperatura aumenta en promedio unos 15°F cada mil pies, esto es debido a un fenómeno denominado gradiente geotérmico.

⁸⁸ *Ibíd.*, p. 142

⁸⁹ Schlumberger. (1 de 12 de 2020). Oilfield Glossary en español. Obtenido de Gradiente geotérmico: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/g/geothermal_gradient

Mitchell⁹⁰ explica que, Cuando el lodo circula a través del agujero, hace un intercambio de calor con las formaciones que se encuentran expuestas, siendo que el lodo frío que sale de la tubería enfría las formaciones calientes del fondo del pozo, por su parte, el lodo caliente que va de regreso por el anular calienta las formaciones más superficiales. Los cambios de la temperatura tienen un efecto perjudicial para la estabilidad del agujero.

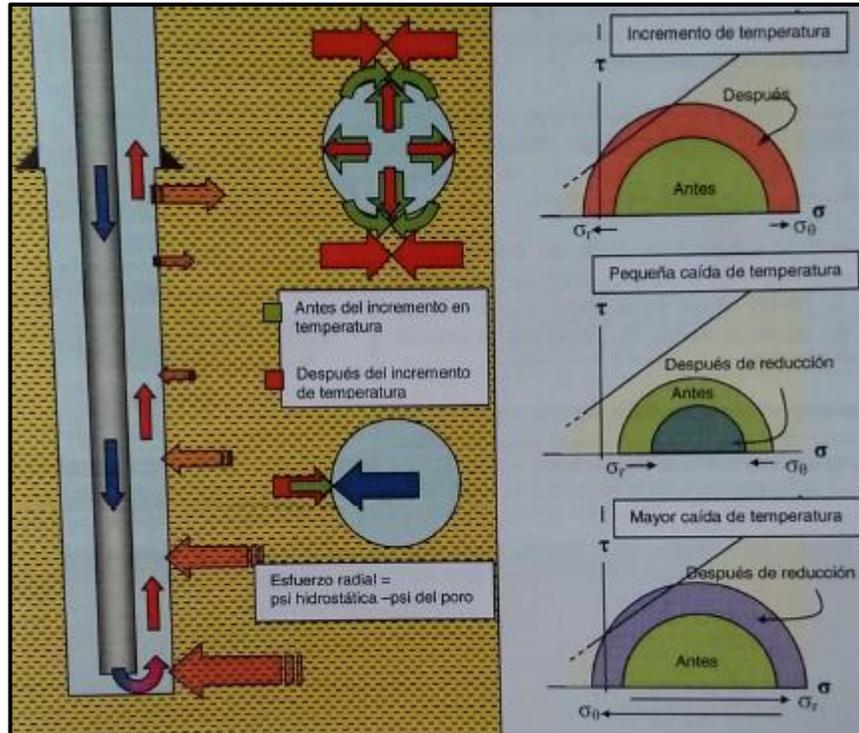
Un aumento de la temperatura puede tener los siguientes efectos: incrementar los esfuerzos tangenciales en las paredes del agujero, reduciendo la fuerza radial que produce la presión del lodo, de igual manera puede debilitar la roca al reducir la fricción entre los granos. Cuando se utilizan lodos de perforación a base agua se debe tener en cuenta que el agua tiene un coeficiente de expansión mayor que la roca, al existir un aumento de la temperatura, el fluido presente en los poros se expandirá más rápidamente que la roca de la matriz, esto incrementará la presión de poro, reduciendo el esfuerzo efectivo de la matriz.

Un aumento en la presión de poro también provoca que los granos individuales de la roca se separen un poco uno del otro, disminuyendo la fricción entre ellos y declinando la resistencia de la roca, de igual manera, el aumento del volumen del fluido lubrica y rompe la cementación.

En caso contrario, una reducción en la temperatura genera que el fluido pierda volumen más rápido que la matriz de roca, aumentando la presión diferencial sobre las paredes del pozo y el esfuerzo efectivo. Ello aumenta la resistencia de la roca, pero, si esto se hace de manera muy abrupta puede causar la pérdida de circulación. Los frecuentes viajes de tubería pueden fatigar las formaciones por los constantes cambios de temperatura, incluso si se mantienen los esfuerzos dentro de la envolvente de falla de Mohr. *Ver figura 56.*

⁹⁰ Mitchell , 2001. Op. Cit ., p. 143-144

Figura 56. Un incremento en la temperatura reduce el esfuerzo radial y aumenta el tangencial, provocando inestabilidad del agujero. Un cambio pequeño de la temperatura mantendrá un agujero estable, no obstante, un gran diferencial de temperatura genera pérdida de circulación.



Fuente: (Mitchell , 2001)

5. MÉTODOS PARA MEDIR LA EXPANSIÓN DE ARCILLAS

Según Anderson R.R⁹¹ Las características físicas y químicas de los minerales de arcilla expansivos pueden ser estudiados mediante una amplia gama de técnicas, las cuales, son clasificadas en dos sub grupos: Aquellas que miden sus propiedades macroscópicas como lo es el contenido de agua y el cambio de volumen total. Por otra parte, se cuenta con aquellas que miden propiedades microscópicas como la interacción específica entre las capas de arcilla y espaciamientos entre capas. Esta información puede ser obtenida mediante técnicas experimentales o por simulación por computadora.

⁹¹ Anderson, R. R. (2010). Clay swelling- A challenge in the oilfield. Earth Science Reviews , 1.

5.1 Ensayo De Lambe

El ensayo siguiente es el descrito por Lambe⁹², además, es el que rige la Norma INVIAS E-120-13⁹³. Su propósito es la determinación del potencial de cambio volumétrico de un suelo empleando el aparato de Lambe. Donde se describe de forma detalla, como se hace el ensayo completo y cuáles son las expresiones matemáticas que se utilizan para calcular el Cambio Volumétrico Potencial (CVP), como consecuencia de variaciones en su contenido de humedad.

Objetivos del ensayo

- El rápido reconocimiento de suelos que lleguen a presentar cambio de volumen o expansión, debido a las variaciones en su contenido de humedad.
- Resumen del método:
Este ensayo consiste en medir la expansión que presenta una muestra de suelo compactado sometido a condiciones de humedad establecidas y controladas, mediante la utilización del aparato o expansómetro de Lambe. Luego de realizado el ensayo, el cambio de volumen potencial puede ser clasificado entre uno de los siguientes cuatro grupos.

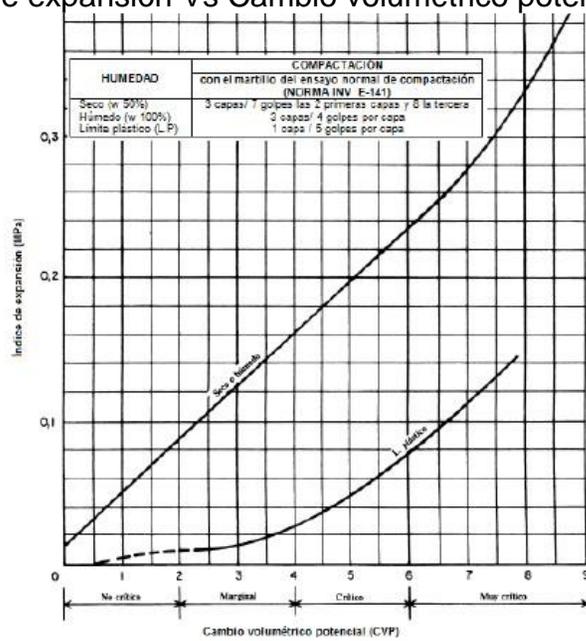
- No crítico.
- Marginal.
- Crítico.
- Muy crítico.

El Pertenecer a un grupo u otro se define usando el índice de hinchamiento, el cual es la presión necesaria para reducir la expansión de la muestra a un valor pequeño. Esta magnitud y las condiciones de humedad en las que se encuentra la muestra en un inicio, permiten obtener el cambio de volumen potencial (PVC) en el gráfico de la *figura 57*.

⁹² Lambe, W. T. (1960). Character Identification of expansive soils. Washington: Technical Studies Report.

⁹³ INVIAS. (2013). Determinación del potencial de expansividad de un suelo en el aparato de Lambe. I.N.V. E – 120 – 13.

Figura 57. Índice de expansión Vs Cambio volumétrico potencia (CVP)

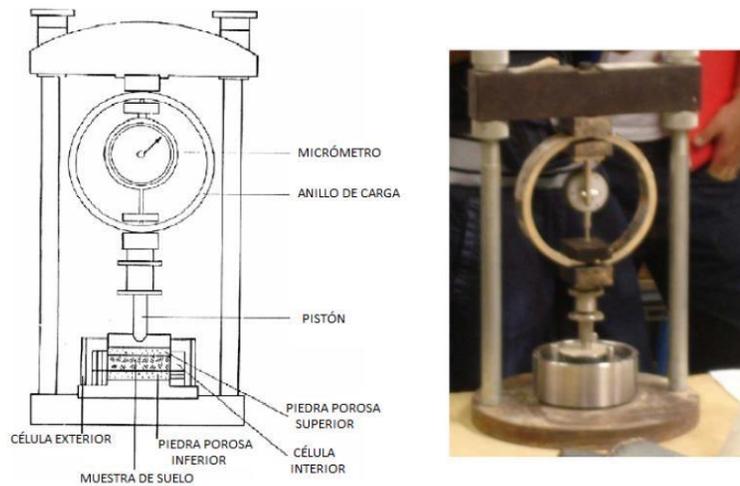


Fuente: (INVIAS, 2013)

- Equipo

Aparato de Lambe: El aparato de lambe para medir la expansión es como el mostrado en la figura 58, el cual debe contar con los siguientes elementos:

Figura 58. Aparato de Lambe.



Fuente: (INVIAS, 2013)

- Marco metálico y base: Deben ser resistentes, sólidos y capaces de soportar esfuerzos producidos durante el ensayo sin que se produzcan deformaciones perceptibles. El marco metálico debe contar con elementos que permitan fijar el anillo dinamométrico.

- Célula: La célula del aparato debe ser constituida por:
 - Un anillo porta probeta: En él se aloja la muestra de suelo a medir, el espesor es tal que asegure que no se presentarán aumento de diámetro apreciables bajo el efecto de las presiones que se generen durante el ensayo. La dimensión de esta debe ser la suficiente para contener una muestra que compactada posea 70 mm de diámetro y 16 mm de altura.
 - Anillo guía: Debe ser del mismo diámetro interior y espesor que el anillo porta probeta y con una altura de 17 mm.
 - Dos placas porosas: Pueden ser de material abrasivo o metálicas, que sean resistentes a la corrosión, permitiendo en cualquiera de los casos el paso libre de agua y un tamaño de poro que evite la intrusión de las partículas de muestra. La placa inferior debe poseer un diámetro superior que el interior del anillo porta probeta. La placa superior debe tener un diámetro menor que el interior del anillo, siendo un valor inferior entre 0,2 y 0,5 mm. Esta placa puede tener una forma troncocónica para evitar acodamientos, si es el caso, la base mayor debe quedar en contacto con la probeta. La relación entre los diámetros de las bases superior e inferior debe estar entre 0,97 y 1.
 - Un pistón de carga: Debe tener la rigidez propicia para que no presente deformaciones durante le ensayo.
 - Anillo dinamométrico: Debe tener una rigidez que permita una deformación de una milésima de milímetro bajo una fuerza de 10 ± 1 N. Debe estar unido sólidamente al puente superior del marco metálico y tener, en la posición opuesta diametralmente, un pistón de longitud variable con una tuerca de bloqueo en la posición deseada.
- Martillo de compactación: Utilizado en el ensayo Proctor normal, como se describe en la norma INV E –141.
- Horno: Debe tener una circulación de aire frío o caliente, con temperatura regulable hasta 60°C.
- Tamiz: de 2.2 mm (No. 10)
- Enrasador metálico de borde recto y afilado.
- Cuchara.
- Una brocha de pelo suave.
- Un mazo de coma para desmenuzar la muestra.

Preparación de la muestra.

La muestra de suelo se debe secar en el horno, en el aire o por medio de secadores de aire caliente o frío, siempre siendo a una temperatura menor a 60°C, esto hasta que la muestra se pueda deshacer utilizando el mazo de goma.

Cuando se encuentre seca se cuartea para obtener dos porciones de 1 kg, se pasa al tamizado por el tamiz de 2.0 mm (No. 10). Este ensayo se debe realizar con la fracción de muestra que pasa por este, preparada con uno de los contenidos de humedad que se describen a continuación.

- El correspondiente plástico: se le denomina así cuando se encuentra en el límite plástico.
- El resultado luego de mantener la fracción de la muestra de suelo por 48 h en un ambiente con una humedad del 100%. Se puede utilizar una cámara húmeda. Este estado es húmedo1.
- El resultado de mantener la fracción de la muestra de suelo durante 48 h en un ambiente con una humedad relativa del 50%. Se puede usar una cámara húmeda o dejar al aire durante 48 horas en una zona de clima seco. Este estado se le denomina seco.

Tabla3.
Numero de capas y humedad del suelo.

Humedad	No. De capas	No. De golpes por capa con martillo de Proctor Normal.	Energía por unidad de volumen
Límite plástico.	1	4	Proctor normal (INV E-141)
Húmedo (100% hum. Relativa)	2	5	1/2 Proctor modificado.
Seco (50% Hum. Relativa)	3	6	Proctor modificado (INV E-142)

Fuente: (INVIAS, 2013)

- Procedimiento:
Se deben seguir los siguientes pasos:

Compactación del suelo y obtención de la muestra:

El número de capas y el de golpes por capa, con que se ha de compactar el suelo depende de las condiciones de humedad en que se haya preparado, de acuerdo

con lo indicado en la Sección anterior. En la Tabla 3 se indican los valores correspondientes a la definición de la compactación para cada caso:

Se poner sobre la base del anillo porta muestras, sobre él, el anillo guía. Se debe situar el conjunto sobre un soporte sólido que evite amortiguación.

Según las condiciones se debe proceder como se muestra:

- Si se ha preparado con las condiciones de humedad correspondientes al límite plástico, se coloca el suelo dentro de los anillos y se presiona con la maza uniformemente por toda su superficie, hasta que ésta quede plana y unos 3 mm por debajo de la cara superior del anillo guía. Se dan, seguidamente, cinco golpes repartidos por dicha superficie, cambiando la posición de la maza después de cada golpe.
- Si se ha preparado en las condiciones de humedad de los estados húmedo y seco, se echa en el interior del conjunto una cantidad de suelo necesaria, tal que, cuando se haya finalizado la compactación, la altura de la capa sea ligeramente superior a $1/3$ de la altura del anillo. Se debe presionar continuamente con la masa de manera uniforme y se distribuye bien el suelo. Luego se aplican los golpes que correspondan según sea el caso, haciéndolo por toda la superficie. Antes de poner la siguiente capa, se debe escarificar con un objeto de punción con una profundidad de 1 a 2 mm lo cual facilita la unión entre ambas.
- En cualquiera de los casos que fueron descritos anteriormente, luego que se finaliza la compactación, la superficie de la debe queda entre 3 mm y 6 mm encima del plano de separación de los dos anillos. Si no se consigue, se debe repetir el proceso aumentando o disminuyendo el suelo a compactar en cada capa. Al finalizar la compactación, se sueltan los elementos de fijación y se gira un poco el anillo guía para hacer más fácil su separación y se retira.
- Se eliminan los restos de la muestra que hayan podido quedar en la base, esto es si la compactación se ha hecho directamente sobre ella.

Montaje del equipo.

- Se debe colocar la placa porosa inferior sobre la base del equipo y sobre esta, el anillo porta muestras cerciorándose de un buen contacto entre los dos elementos. Luego, se sitúa el anillo guía encima del anillo porta muestras, asegurando el ajuste por medio del encaje que ambos tienen. Se fija mediante uso de los tornillos correspondientes y se colocan sobre la probeta, la placa porosa y el pistón de carga. Se coloca en su posición, el puente superior del

marco metálico con el dinamómetro y se fijan las columnas por medio de las tuercas.

- Se coloca la carga de fijación, se ajusta el vástago del anillo sobre la superficie del pistón de carga hasta el punto en el que se consigue una lectura del medidor de deformaciones que equivale a 40 N (4.1 Kgf). Seguidamente se fija la contratuerca que va provista de vástago, se manera que no quede ninguna especie de juego. Se debe seguir comprobando la lectura del medidor de deformaciones.

Realización del ensayo.

Se anota el tiempo y se añade agua, llenando la célula hasta que el nivel de aquella sobrepase ligeramente la cara superior del anillo guía. Se toman lecturas del anillo dinamométrico a medida que el suelo hincha, a diferentes tiempos, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos. Transcurridas 2 horas, se toma el valor de la lectura del anillo dinamométrico y se calcula el valor de la fuerza correspondiente en Newtons.

- Cálculos.

Estos se hacen a partir del ensayo realizado, y se expresan los resultados del índice de hinchamiento y del cambio de volumen potencial de cómo sigue:

- Índice de hinchamiento: Es el cociente entre el valor de la fuerza acumulada del ensayo, expresada en N, y la sección de la probeta expresada en mm^2 . Este índice es expresado en MPa.
- Obtención del cambio de potencial (PVC): Cuando ya ha sido determinado el valor del índice de hinchamiento, se entra en la curva correspondiente del gráfico de la *ilustración 27*, Partiendo de las condiciones de humedad iniciales en el suelo muestra, se lee en el eje de las abscisas el valor del cambio de volumen potencial (PVC), donde se podrá clasificar como: No crítico, marginal, crítico o muy crítico.

El valor de la fuerza, producto de la lectura del anillo dinamométrico; se establece el valor de la fuerza en Newton.

El índice de expansión que se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de expansión} = \frac{\text{Fuerza (N)}}{\text{Área de la sección transversa de la probeta (mm}^2\text{)}} = (\text{Mpa})$$

Ecuación. 1 Índice de expansión Método de Lambe

5.2 Ensayo De Expansión Libre.

El índice de expansión libre se define como el aumento de volumen que sufre un suelo sin restricciones externas, cuando se sumerge en agua; esta es la definición que brinda la norma INVIAS 132-13, por la que se determina este índice en suelos expansivos en Colombia.

El procedimiento del ensayo es el siguiente:

Se debe tomar una porción de 5 gramos de suelo, posteriormente se colocan dos muestras cada una en una probeta graduada de 100 ml de capacidad, con precaución se llenan los cilindros con agua destilada y kerosene hasta completar los 100 ml de la probeta, con una varilla de vidrio se remueve el aire atrapado en la probeta. Se deja reposar la muestra por un lapso de 24 horas para permitir el equilibrio volumétrico de las muestras. La norma hace una nota aclaratoria donde se describe que el kerosene es un fluido no polar, por lo cual puede no generar variaciones volumétricas en el suelo.

Luego de pasadas las 24 horas se toma lectura del volumen alcanzado en el cilindro por cada probeta. Obtenidas las lecturas de datos se procede con los cálculos para obtener el índice de expansión libre (IEL), este índice se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$IEL = \frac{V_w - V_k}{V_k} * 100$$

Ecuación. 2 Índice de expansión Libre.

Donde:

V_w = Volumen de la muestra leído de la probeta que contiene agua.

V_k = Volumen de la muestra leído de la probeta que contiene kerosene.

5.3 Ensayo De Consolidómetro.

Este ensayo se rige por la norma INV-173-07, la norma de este ensayo no tuvo actualización ni modificación alguna, por este motivo, la norma por la que se desarrolló el ensayo fue la del año 2007.

El ensayo de Consolidómetro se puede realizar por medio de tres métodos, cada método determina diferentes indicadores de expansión o asentamiento en diferentes condiciones de las muestras. A continuación, se hace una breve descripción del método A el cual se utilizó para el desarrollo de esta investigación. Método A: Este método de prueba mide a) la expansión libre, b) porcentaje de levantamiento para presiones verticales de confinamiento hasta la presión de expansión, y c) la presión de expansión.

El procedimiento de este método es:

Se arma la cámara de consolidación con el anillo y se coloca la muestra seca seguido se coloca la cámara en el Consolidómetro y se instala el comparador de caratula (deformímetro) permitiendo que quedé en contacto con el bloque de carga, dejándolo en un valor inicial. Se coloca en el brazo del equipo un peso, que nos garantice un esfuerzo de 0.01kg/cm^2 . Inmediatamente se inunda la muestra y se empiezan a tomar deformaciones en los siguientes tiempos 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos, 1, 2, 4, 8, 24 y 72 horas. Se miden las deformaciones que presenta la muestra en esos tiempos, obteniéndose de estas deformaciones las expansiones libres de la muestra. Posteriormente se realiza el proceso de consolidación del espécimen, se aplica una presión vertical de aproximadamente 5, 10, 20, 40, 80, etc., kPa (0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, etc., kgf/cm^2), con cada presión mantenida constante se realiza la lectura de la deformación. Se mantiene la presión hasta que el espécimen sea recomprimido a su relación inicial de vacíos/altura. Finalmente se procede con la etapa de descarga de la etapa de consolidación.

6 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

Al verse la necesidad de la presencia de un equipo experimental para la evaluación de la expansión de las arcillas en el laboratorio de Lodos de perforación de la Universidad Surcolombiana, se sugiere el diseño, construcción, prueba y análisis de un prototipo que pueda suplir esta necesidad.

6.1 Bases De Diseño.

Este prototipo se realiza en base a los lineamientos de la norma ASTM D4829-11⁹⁴, y del aparato realizado por Lambe⁹⁵ (Véase numeral 5.1) y del ensayo de expansión libre anteriormente descritos, además, se deben tener en cuenta las condiciones y problemas descritos en la fase del marco teórico para así intentar solventarlos, estudiarlos y puedan ser incluidos en las etapas de diseño y análisis.

Para este prototipo se hace de suma importancia tener en cuenta que se realizará el estudio y la medición solamente en un eje (Eje Y), ya que, como se describió en el marco teórico, la roca in-situ se encuentra bajo presiones de confinamiento que son aportadas por las formaciones adyacentes, por lo que las arcillas presentes en la formación, solamente pueden expandirse hacia un solo eje, es decir, hacia el interior del agujero.

6.2 Diseño Del Equipo

6.2.1 Diseño general y esbozado del equipo.

Es importante aclarar que, Más adelante en el numeral 6.2.4, se realiza el despiece general del equipo con su respectivo acotamiento.

El equipo consta de:

- Marco metálico y base: Basados en el prototipo de Lambe y del prototipo de la norma ASTM 4829-11, se debe contar con un marco metálico y una base que sean resistentes, sólidos y que sea capaz de soportar los esfuerzos producidos durante el ensayo, sin que se presenten deformaciones apreciables.
- Molde: Un molde metálico de forma cilíndrica, en la parte inferior se debe tener un aro de forma metálica que puede ser retirado, este debe de igual manera soportar las presiones existentes en la prueba. Este molde sigue las características descritas en el numeral 6.1 de la norma ASTM 4829-11. Este molde consta de dos partes compuestas por anillos de igual diámetro interno pero que difieren en la medida de su diámetro externo. Estos anillos pueden desencajarse, así hacer más fácil la colocación de la muestra y la limpieza del prototipo.

⁹⁴ ASTM international. (2011). Standard test method for expansion index soils (D4829-11). ASTM Int'l.

⁹⁵ Lambe (1960), Op. Cit.

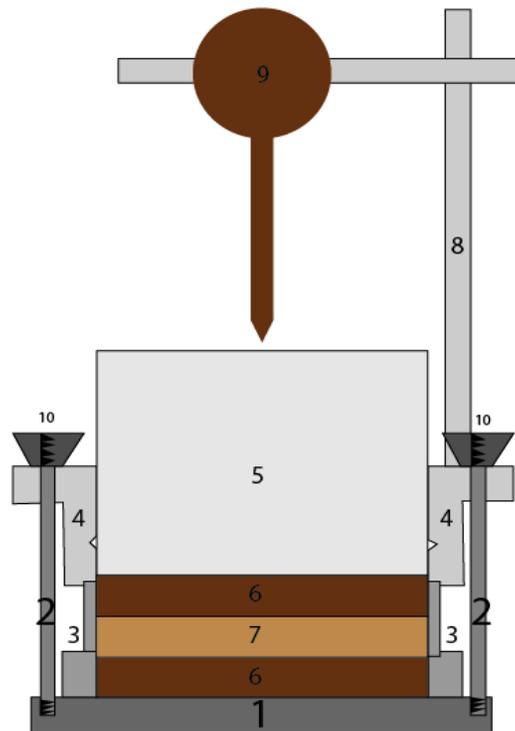
- Tuercas o mariposas: Mariposas o tuercas que permitan el debido ajuste de cada una de las partes del equipo, uniendo el marco metálico, la base y el molde con presiones, previniendo la filtración de fluidos y/o la muestra de roca que se encuentra en estudio.
- Consolidómetro: En el ensayo de lambe como en la norma ASTM 4829-11 (Punto 5.2.4.3) se describe un dispositivo de carga que tiene la labor de mantener sumergida la muestra de roca mediante una carga vertical. El consolidómetro debe ser capaz de realizar movimientos por el eje vertical ya que partir de él se pueden realizar las mediciones de cambio de altura de la muestra.
- Discos porosos: Dos discos porosos que sean resistentes a la corrosión, que permite el libre paso de los fluidos. El disco poroso en lo posible debe contar con un tamaño de poro que no permita el paso de partículas de la muestra dentro del mismo. Estos discos deben ir en contacto con el consolidómetro y la muestra, ya que, deben suavizar la superficie de la muestra ayudando en la precisión de las mediciones. Estos dos discos porosos son descritos en el ensayo de Lambe y norma ASTM 4829-11 (Numeral 6.9).
- Micrómetro: Es utilizado para medir con gran precisión la expansión de las arcillas, este debe ir colocado sobre un soporte y su punta para la medición se debe poner sobre el consolidómetro.
- Soporte para micrómetro: Este debe ir conectado a la estructura central del prototipo, de igual manera, debe ser graduable tanto en el eje Y como en el eje X para así poder realizar el debido desmonte o realizar los registros a las distancias necesarias.

Es de resaltar que cada una de las componentes del aparato debe ser resistente a ambientes corrosivos ya que se trabajará con fluidos de perforación cuya base es agua dulce, otras bases agua salada o salmueras y, de igual manera, fluidos de perforación a base aceite. Teniendo en cuenta lo anterior dicho, la cantidad de fluidos con los que se puede trabajar el equipo induce a tener un amplio espectro corrosivo que debe ser solventado de algún modo.

En la *figura 59* se puede evidenciar un bosquejo muy general de un corte transversal del prototipo donde se muestra cada una de las partes del prototipo y su debida ubicación. A continuación, las partes y su etiqueta:

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| 1. Base. | 6 Rocas porosas. |
| 2. Marco metálico. | 7 Muestra. |
| 3. Molde sección inferior. | 8 Soporte micrómetro. |
| 4. Molde sección superior. | 9 Micrómetro. |
| 5. Consolidómetro. | 10 Tuercas o mariposas. |

Figura 59. Corte transversal esbozado del prototipo donde se pueden observar sus distintos componentes.



Fuente: Autoría propia.

Funciones de cada una de las partes:

- Base: Es la parte inferior del prototipo, la cual debe ir apoyada sobre una superficie plana y estable. En la parte superior descansará la muestra de arcilla y/o lutita a ser estudiada, de igual manera por su cara superior cuenta con 4 orificios con rosca hembra y a 90° uno del otro, en estos

orificios se introduce y aseguran 4 barras metálicas que conforman el marco metálico. La forma de la base es un cilindro sólido.

- Marco metálico: Consta de 4 barras metálicas con rosca macho en ambos extremos que permiten su unión con los orificios con rosca hembra de la base en un extremo y los tornillos o mariposas en el otro. El marco metálico permite la fijación mediante presión de los tres componentes del molde y la base, además, impide la salida de los fluidos del prototipo.
- Molde sección inferior: Debe soportar las presiones que se generan durante la prueba pues es la sección del aparato que contiene la muestra de arcilla o lutita, las Rocas porosas y parte del fluido introducido en la prueba para el estudio. Esta sección va apoyada contra la base del prototipo en la parte inferior y por el “molde sección superior” en la parte superior. Esta parte del prototipo está conformada por la unión de dos cilindros huecos con un radio interno igual pero que son de radio externo distinto.
- Molde sección superior: Esta sección está conformada por dos cilindros huecos unidos, los cuales cuentan con el mismo diámetro interno y difieren en el diámetro externo, siendo el cilindro superior el que tiene mayor diámetro externo. Por el diámetro interno del “molde sección superior” se moverá el consolidómetro. El cilindro superior cuenta con 4 perforaciones ubicadas cada una a 90° por las cuales pasan las 4 barras del marco metálico para que se puedan asegurar con las tuercas o mariposas y se haga el ajuste del prototipo. Además de los 4 orificios anteriores, tiene un orificio por el que se asegura el soporte del micrómetro.
- Consolidómetro: Es un cilindro sólido de un diámetro levemente menor al diámetro interno del molde. Cuenta con un peso de 5.7 kilogramos, el cual debe ser provisto a la muestra durante la prueba simulando la presión ejercida por la columna de lodo de perforación. El consolidómetro tiene un permitido un movimiento en el eje Y a través del diámetro interno del molde. En la parte inferior se encuentra en contacto con las rocas porosas y por la parte superior se encuentra en contacto con el micrómetro, siendo su movimiento vertical el que permite la lectura de la expansión de las arcillas/lutitas.
- Rocas porosas: Son rocas naturales o artificiales con poros interconectados, su forma es cilíndrica de un diámetro levemente menor al diámetro interno del molde y similar al del consolidómetro. Estas Rocas

porosas contendrán y permitirán el paso el fluido de perforación a la muestra de arcilla de una manera gradual. En la parte inferior están en contacto con la muestra, mientras que en la parte superior se encuentran en contacto con el consolidómetro.

- Soporte micrómetro: Consta de dos barras metálicas, unidas por medio de una rosca tipo macho al “Molde sección superior”. Cuentan con un sistema que permite el movimiento de la barra horizontal en los ejes “X” y “Y”, para así acomodar el micrómetro de la manera que sea más adecuada y pertinente en la prueba.
- Micrómetro: Micrómetro o comparador de carátula de marca Baker, va anclado sobre el soporte para micrómetro, estando a su vez en contacto con el consolidómetro. Este permite hacer las lecturas cuantitativas de la expansión de las arcillas/lutitas. El micrómetro cuenta con una división de escala de 0.0001 pulgadas y un rango de hasta 0.2 pulgadas.
- Tuercas o mariposas: Son cilindros metálicos huecos que al momento de la prueba se enroscan en una de las roscas macho del “marco metálico”, generando presión sobre el “Molde sección superior”, permitiendo un ensamblaje confiable del prototipo.
- Unión soporte del micrómetro: Esta pieza une la barra vertical con la barra horizontal del soporte del micrómetro, permite el movimiento de la barra horizontal de manera vertical y horizontal para permitir un buen ajuste del micrómetro con respecto al consolidómetro. Cuenta con tornillo de sujeción a la barra vertical del soporte del micrómetro para un anclaje efectivo.

6.2.2 Selección de materiales.

Para la selección de los materiales se deben tener en cuenta las condiciones a las que el prototipo se encontrará sometido. El aparato debe ser capaz de soportar las presiones bajo las que se encontrará, de igual manera debe resistir a condiciones corrosivas, pues estará en contacto con lodos de perforación a base de agua dulce, fluidos base aceite y fluidos base agua salada, los cuales contienen iones disueltos que aumentan su poder corrosivo.

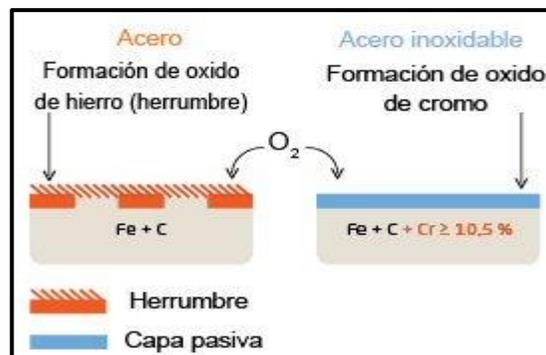
Encontrando que en la norma no se ve explícito el material con el que se debe realizar el prototipo, se hizo necesario el análisis para el material idóneo para dicho

aparato. Después de esto se encontró que el material predilecto para este uso sería el acero inoxidable, por lo tanto, se realizará una breve descripción de su propiedad. Dicho lo anterior cabe aclarar, habrá piezas de medición como el micrómetro que deben ser comprados y sus especificaciones son las aportadas por el fabricante, entre otras piezas.

6.2.2.1 Propiedades acero inoxidable.

Consultando en ULMA⁹⁶, encontramos que el acero es una aleación de hierro y Carbono, donde el carbono representa como máximo un 2% de porcentaje en peso (Ingemecánica, 2020) del total de la aleación, como otros metales ferrosos al entrar en contacto con el oxígeno, se oxida y forma óxido ferroso tomando una coloración parda y teniendo un alto nivel de deterioro

Figura 60. Efectos de la oxidación sobre el acero común (Izquierda) y acero inoxidable (Derecha)



Fuente: (Orozco, 2020).

Para evitar este proceso de deterioro se agrega un nuevo elemento a la aleación: El cromo. Para ser considerado como acero inoxidable el porcentaje en peso de cromo deberá ser mayor a 10.5% y de carbono ser menor a 1.2%. La capacidad que otorga el cromo a los aceros se da gracias a su afinidad con el oxígeno, el cual al entrar en contacto con un medio oxidante como la atmósfera o el agua, forma de manera automática y espontánea una fina capa superficial de óxido de Cromo (Cr₂O₃) (Ver figura 60), que es invisible, impermeable y que además, cubre

⁹⁶ ULMA . (01 de 07 de 2020). Acero inoxidable: Estas son sus principales propiedades y aplicaciones. Obtenido de <https://www.ulmaforge.com/noticia/acero-inoxidable-propiedades-y-aplicaciones/>

homogéneamente toda la pieza impidiendo la progresiva oxidación sobre el acero. Como dice Ingemecánica⁹⁷, este proceso es conocido como pasivación del acero. Esta propiedad de pasivación hace que el acero inoxidable posea las siguientes características:

- Alta resistencia a la corrosión y oxidación, de igual manera es muy resistente a las altas temperaturas y a la humedad.
- Durabilidad debido a su capacidad para soportar las condiciones físicas y químicas a las que esté expuesto es un material muy duradero, teniendo en algunos casos una vida útil superior a los 60 años.
- Gran resistencia a agentes abrasivos.
- Posee una gran tenacidad, es decir, una alta tolerancia a los golpes absorbiendo una gran cantidad de energía sin romperse.
- Es sostenible ambientalmente ya que es reciclable por sus altas cantidades de cromo y níquel.

Siendo estas las características esenciales de los aceros inoxidables cabe aclarar que, hay varios tipos de aceros inoxidables, en nuestro caso se deben las propiedades de los aceros austeníticos, compararlos entre ellos y entender las características que hacen que el acero inoxidable 316 sea el más apropiado para las partes en contacto con los fluidos y no otros como el acero inoxidable 304, que aun siendo la aleación más usada de acero inoxidable, presenta algunas desventajas en estos lugares del prototipo.

El acero inoxidable 316 es el segundo acero inoxidable más usado, la diferencia principal del acero inoxidable 316 es que además de los componentes comunes de la aleación como hierro, cromo, carbono y níquel, contiene en su proporción peso un 2-3% de Molibdeno (*Ver tabla 4*), lo que lo hace particularmente más resistente a la corrosión causada por los cloruros y otros solventes industriales.

⁹⁷ Ingemecánica. (1 de 07 de 2020). Ingemecánica. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn102.html>

Según el fabricante Cima inoxidable⁹⁸ El acero inoxidable 304 presenta cierta debilidad a soluciones que contienen iones cloruro, pues tiende a mostrar una corrosión localizada o corrosión por picadura en ciertas partes de la superficie del material. El crecimiento de este proceso corrosivo es un proceso auto catalítico. No obstante como se dijo anteriormente, el acero inoxidable del tipo 304 resulta más atractivo que el 316 en partes que no están en contacto con los fluidos.

Tabla 4. Comparación entre acero inoxidable 304 y 316

	Inox 304	Inox 316
Carbono	0,08% Máx.	0,08% Máx.
Manganeso	2,00 % Máx.	2,00 % Máx.
Fosforo	0,045% Máx.	0,045% Máx.
Sulfuro	0,030% Máx.	0,030% Máx.
Silicio	1,00% Máx.	1,00% Máx.
Cromo	18,00%-20.00%	16%-18%
Niquel	8,00%-10,50%	10%-14%
Molibdeno	-	2,00%-3,00%

Fuente: (Ferros Planes, 2018)

6.2.2.2 Latón:

El Latón es una aleación de cobre y zinc en los que sus proporciones varían según sea la variedad. En el caso industrial, el porcentaje de Zinc siempre es menor a 50%, siendo en los latones amarillos un porcentaje entre 25% y 35%.

El latón presenta algunas propiedades que aventajan sobre el acero inoxidable, entre ellas se encuentra su fácil moldeo mecánico, lo que permite una reducción de costos y tiempo al momento de realizar perforaciones, cortado o calado del mismo, además de esto, el latón presenta un costo levemente inferior al acero inoxidable, sobre todo a los aceros inoxidables austeníticos, además, la viruta generada durante el mecanizado presenta un costo de recompra muy similar al del latón original, por último, presenta una resistencia moderada a la exposición a soluciones alcalinas moderadas, de igual manera a la corrosión frente a ácidos no oxidantes. (Pasko, 2013).

6.2.3 Tabla de resumen de partes, materiales seleccionados y bondades del material conforme la función de la parte que compone.

⁹⁸ Cima inoxidable. (11 de 12 de 2020). Acero Inoxidable. Obtenido de Serie 300: <http://www.aceroinoxidable.com/acero-inoxidable-tipo-304-serie-300>

Tabla 5. Resumen de partes, materiales seleccionados y sus bondades.

Parte del prototipo.	Material seleccionado.	Bondades del material.
Base.	Acero inoxidable 316.	Presenta una gran resistencia a la corrosión causada por cloruros y otros solventes industriales que pueden estar presentes en los fluidos de perforación.
Marco metálico.	Acero inoxidable 304.	Presenta una alta resistencia a la corrosión. Esta pieza no estará en contacto con ningún tipo de fluido con iones cloruros durante la prueba.
Molde sección inferior.	Acero inoxidable 316.	Presenta una gran resistencia a la corrosión causada por cloruros y otros solventes industriales que pueden estar presentes en los fluidos de perforación.
Molde sección superior.	Acero inoxidable 316.	Presenta una gran resistencia a la corrosión causada por cloruros y otros solventes industriales que pueden estar presentes en los fluidos de perforación.
Consolidómetro.	Acero inoxidable 316.	Presenta una gran resistencia a la corrosión causada por cloruros y otros solventes industriales

		que pueden estar presentes en los fluidos de perforación.
		Presenta una alta resistencia a la corrosión. Esta pieza no estará en contacto con ningún tipo de fluido con iones cloruros durante la prueba.
Soporte micrómetro.	Acero inoxidable 304.	
		Presenta una alta resistencia a la corrosión. Esta pieza no estará en contacto con ningún tipo de fluido con iones cloruros durante la prueba.
Tuercas.	Acero inoxidable 304.	
		Presenta una menor dureza que el acero inoxidable, lo que traduce en una mayor facilidad de moldeado y calado, de igual manera presenta una gran resistencia a la corrosión.
Unión soporte micrómetro.	Latón.	

Fuente: Autoría propia

6.2.4 Diseño específico y dimensional de las partes.

Para esta etapa se hizo la utilización de un software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D y 3D que ha sido creado y comercializado por la compañía Autodesk.

De igual manera las medidas son tomadas de la norma ASTM 4829-1⁹⁹, donde los resultados del diseño de cada parte y el montaje final son descritos a continuación

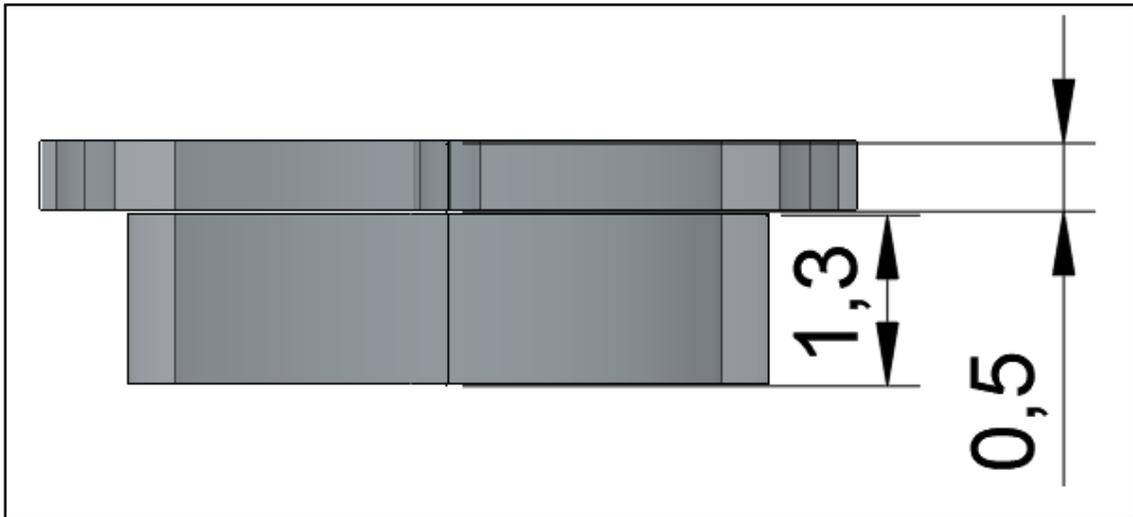
⁹⁹ ASTM D4829-11 international. (2011). Standard test method for expansion index soils (D4829-11). ASTM Int'l.

mediante el uso de las vistas principales (Planta, y alzado) en caso de ser necesario también se mostrará otra vista.

6.2.4.1 Molde o recinto de arcillas.

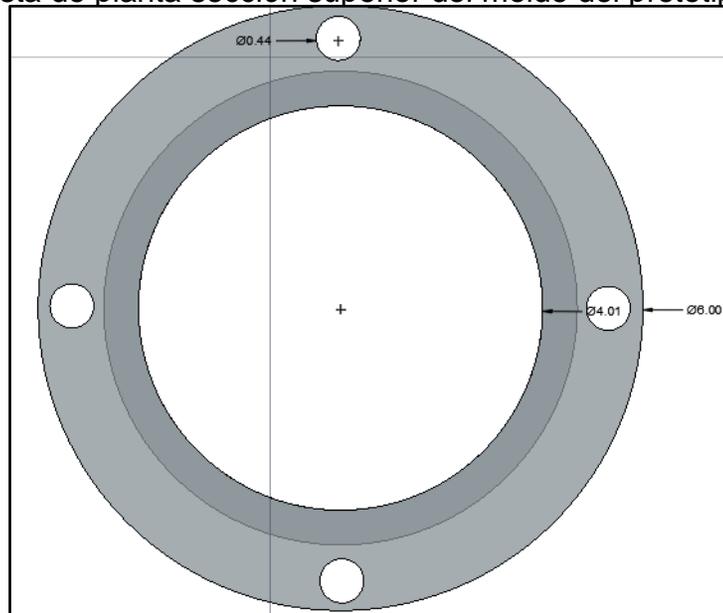
- Sección superior:

Figura 61. Vista de alzado sección superior del molde del prototipo.



Fuente: Autoría propia

Figura 62. Vista de planta sección superior del molde del prototipo.



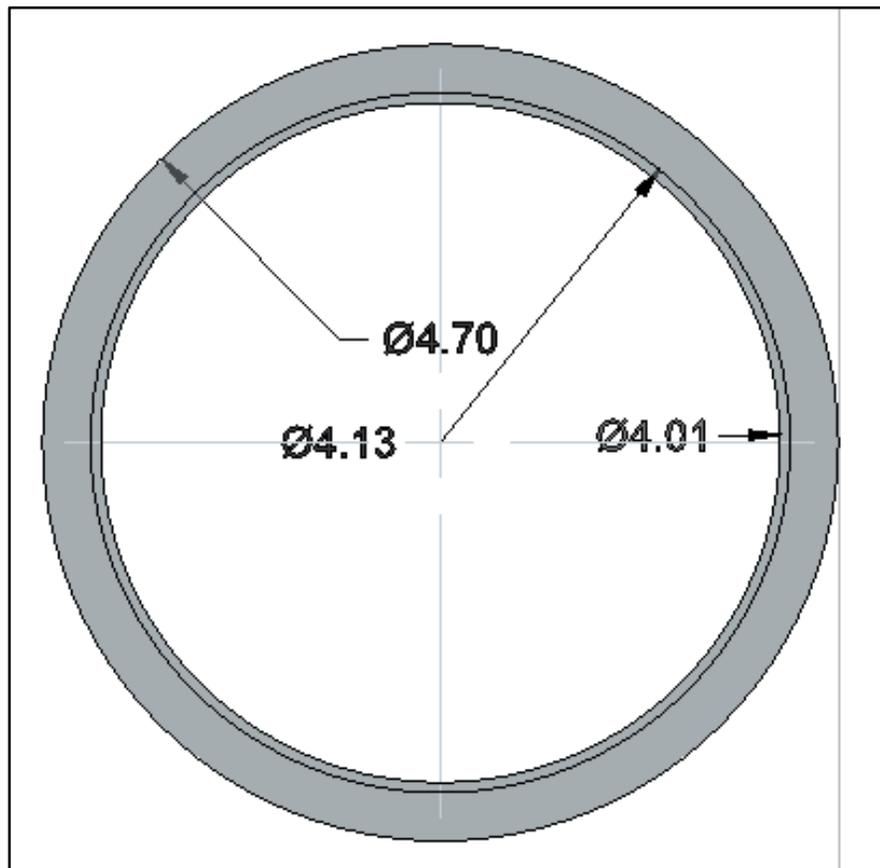
Fuente: Autoría Propia.

uenta con un diámetro interno de 4.01 ± 0.005 pulgadas, un diámetro externo de 6 ± 1.01 pulgadas, 4 agujeros de $7/32 \pm 1/64$ de pulgada de radio que se encuentran puestos a 90° uno del otro si se toma de referencia el círculo del agujero, una altura total de 1.625 ± 0.01 pulgadas, el grosor de la pared es de 0.325 ± 0.01 pulgadas para un diámetro de 4.7 y las 4 respectivas mariposas.

- Sección inferior:

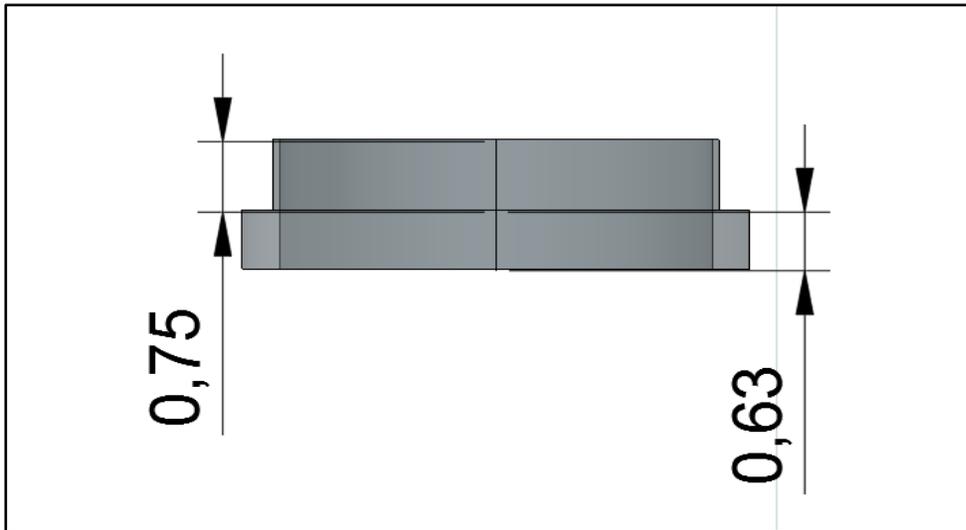
Cuenta con dos anillos, ambos un diámetro interno de 4.01 ± 0.005 pulgadas. El anillo superior cuenta con un diámetro externo de 4.13 pulgadas (grosor de pared de $0,12 \pm 0.000$ pulgadas) y una altura de 0.75 pulgadas, por su parte el anillo inferior cuenta con un diámetro externo de 4.7 pulgadas (Grosor de pared de 0.688 ± 0.010 pulgadas) y una altura de 0.63 pulgadas.

Figura 63. Vista de planta sección inferior del prototipo.



Fuente: Autoría propia.

Figura 64. Vista de alzado sección inferior del molde del prototipo.



Fuente: Autoría propia.

6.2.4.2 Base y marco metálico.

La base Cuenta con una cilindro de diámetro de 6 ± 1.01 pulgadas y una altura de 0.5 ± 0.01 pulgadas, anclado en el tenemos a marco metálico, conformado por 4 cilindros de mental con rosca a cada extremo, estos cilindros cuentan con un diámetro de $7/32\pm 1/64$ y una altura de 4 pulgadas. La placa de acero de la sección inferior cuenta con un biselado poco profundo que permite el encaje de la sección central.

Figura 65. Vista de planta base del prototipo.

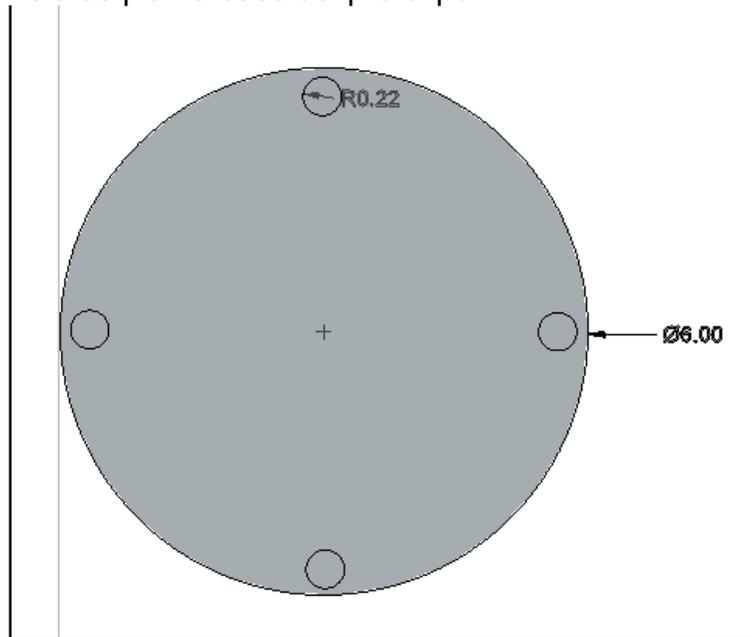
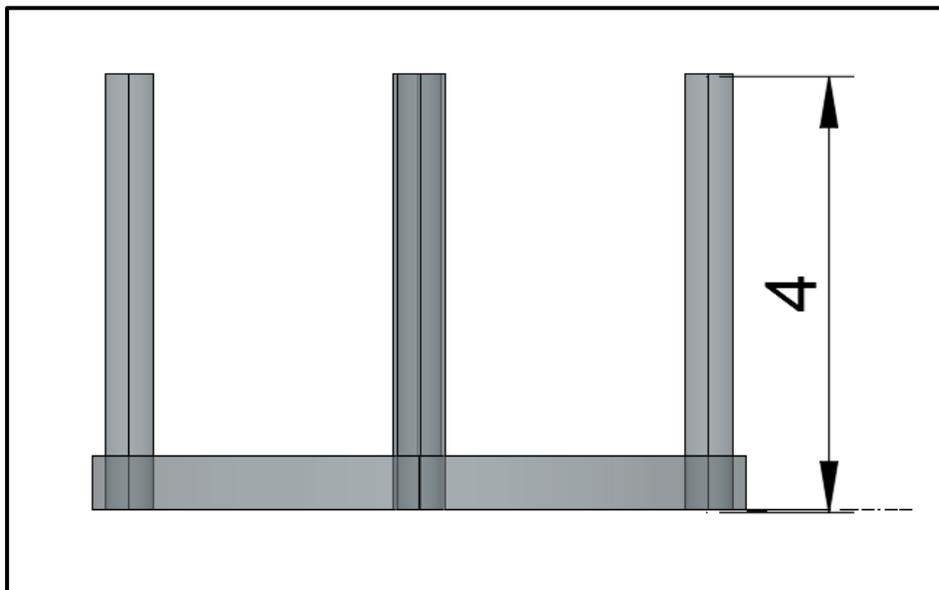


Figura 66. Vista de alzado de base y marco metálico del prototipo.

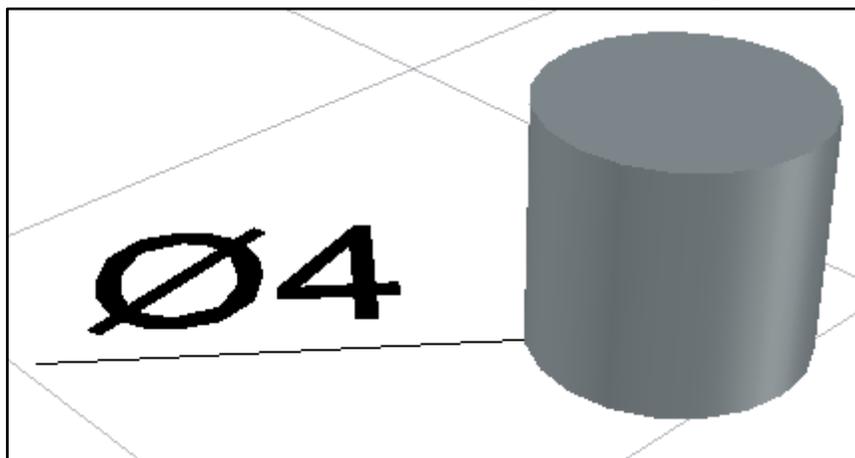


Fuente: Autoría propia.

6.2.4.3 Consolidómetro.

Es una pesa que permita aplicar cargas verticales o esfuerzos totales a la arcilla estudiada. La pesa debe ser capaz de mantener una carga específica en largos periodos de tiempo. Esta contará con un diámetro aproximado de 4.0 pulgadas y un peso total de 5.7 kilogramos, por lo tanto se da una altura de 3,6 pulgadas u 8,7 cm.

Figura 67. Consolidómetro visto desde un plano contra picado



Fuente: Autoría propia.

6.2.4.4 Soporte micrómetro.

Este está conformado por dos cilindros metálicos, uno irá dispuesto de manera vertical y contará con un diámetro de 0.21 pulgadas y 5 pulgadas de altura (Ver figura 67 y 69), el otro se dispondrá de manera horizontal, diámetro de 0.21 pulgadas y 3.75 pulgadas de largo, ambos tendrán una rosca en uno de los extremos (ver figuras 70 y 71).

Además de los cilindros anteriormente descritos, cuentan con una “unión de soporte de micrómetro” que es de forma cúbica, con 1 pulgada de alto, 1 de ancho y 1.25 pulgadas de fondo, de igual manera, estará atravesado por dos agujeros de 0.22 pulgadas de diámetro por donde pasarán los cilindros metálicos (Ver figuras 72 y 73).

Figura 69. Vista superior de cilindro metálico vertical.

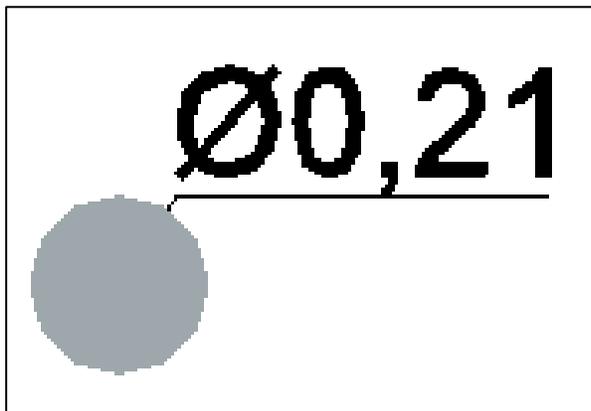
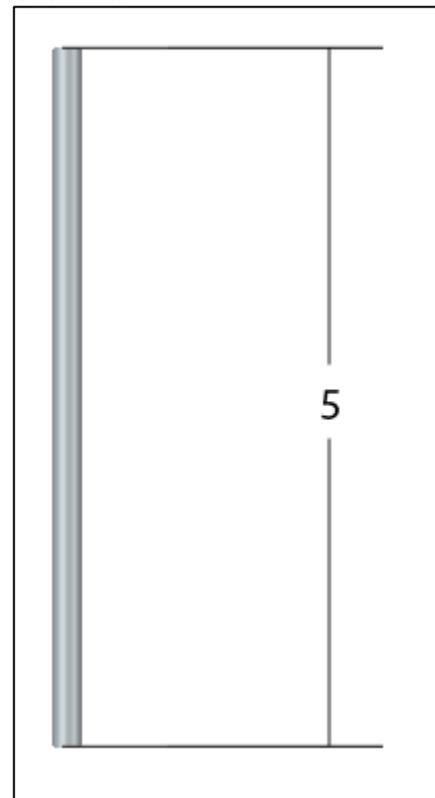
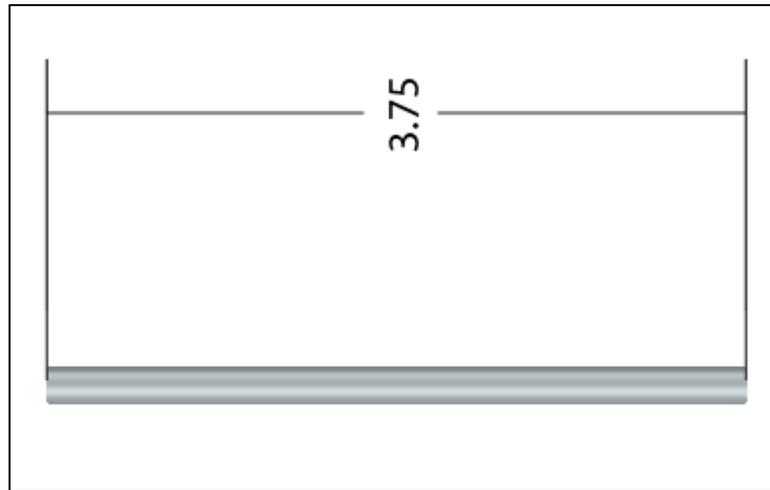


Figura 68. Vista frontal cilindro vertical.



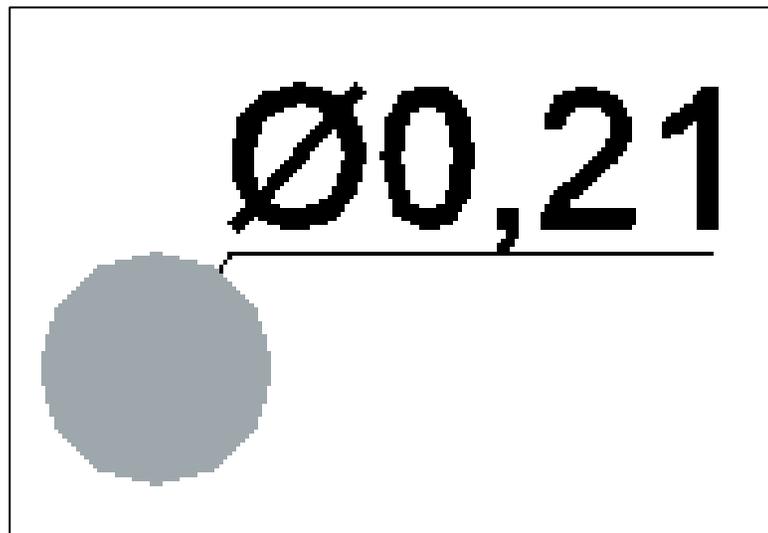
Fuente: Autoría propia.

Figura 70. vista frontal de cilindro metálico horizontal.



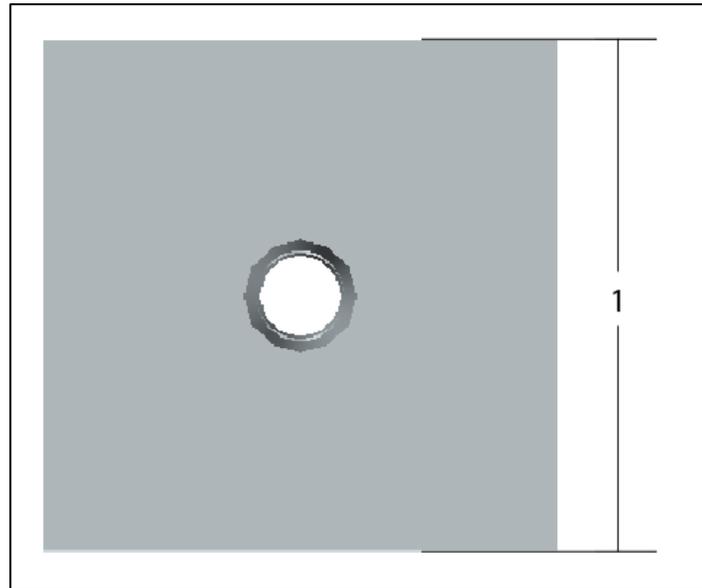
Fuente: Autoría propia.

Figura 71. Vista superior cilindro metálico horizontal.



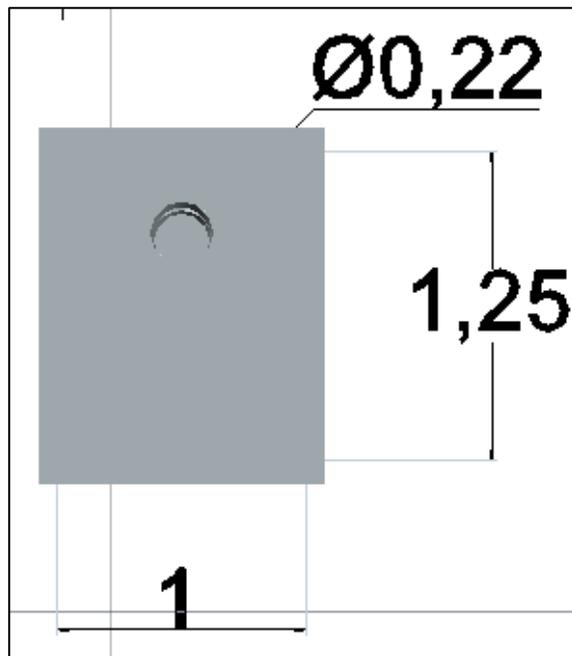
Fuente: Autoría propia.

Figura 72. Vista frontal unión de soporte del micrómetro.



Fuente: Autoría Propia.

Figura 73. Vista superior unión de soporte del micrómetro.

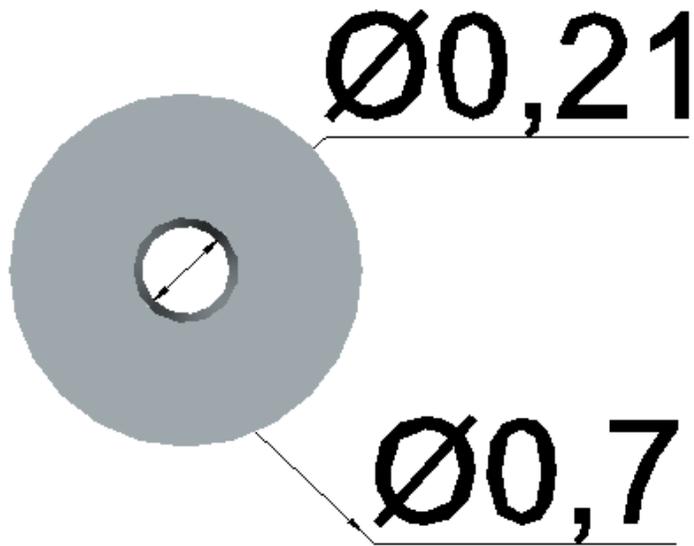


Fuente: Autoría propia.

6.2.4.5 Tuercas.

Son 4 tuercas o mariposas hechas de acero inoxidable que cuentan con un diámetro externo de 0.7 pulgadas, un diámetro interno de 0,21 pulgadas y una altura de 0,7 pulgadas. Estas irán puestas en la parte roscada del marco metálico apretando las secciones del molde y la base del marco metálico (Ver figuras 74 y 75).

Figura 74. Vista superior de las tuercas.



Fuente: Autoría propia.

Figura 75. Vista frontal tuercas.



Fuente: Autoría propia

6.2.4.6 Micrómetro.

También conocido como reloj comparador de carátula es un utensilio utilizado ampliamente para medir longitudes y formas mediante la medida diferencial. En este aparato los pequeños desplazamientos de la punta palpante son amplificados de manera mecánica, siendo transferidos a una aguja indicadora.

Este instrumento lo que nos indica es la diferencia que existe entre varias piezas que se quieran verificar, o en su defecto, a dos medidas de una misma pieza que en distinto tiempo tengan medidas distintas.

El funcionamiento del mecanismo interno del micrómetro se da mediante la transformación del movimiento de la punta lineal deslizante a un movimiento circular que se transfiere a la aguja indicadora del reloj.

Internamente el micrómetro se encuentra compuesto por un vástago que en uno de sus extremos se encuentra engranado mediante una cremallera con un conjunto de engranajes amplificadores del movimiento.

En la *Figura 76* y *77* se pueden observar las partes que componen un micrómetro análogo.

Figura 77. Partes internas del micrómetro.

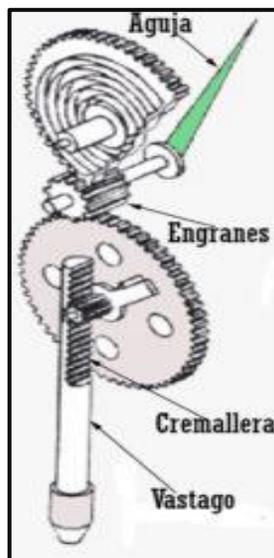
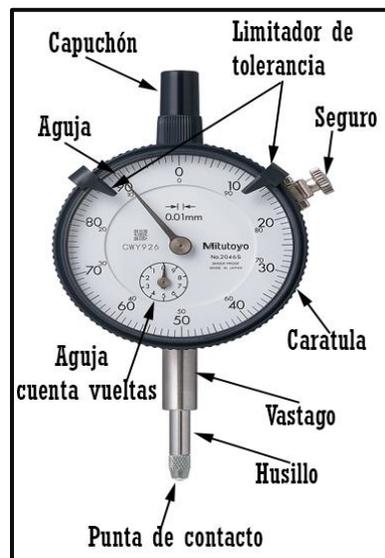


Figura 76. (derecha) Partes externas del micrómetro.



Fuente: (Ingeniería Mecafenix, 2018)

Según lo descrito por Arancibia Galleguillos¹⁰⁰, se considera que cuando una muestra de arcilla expansiva que está en contacto con un fluido, tiene un cambio de volumen menor que 1.5% se considera bajo, cuando está entre 1.5%-5% es medio,

¹⁰⁰ Arancibia Galleguillos, C. A. (2003). Arcillas expansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil ejecución. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

si se encuentra entre 5%-25% es alto y si es superior al 25% es muy alto. Por lo tanto, se espera que la expansión de la arcilla expansiva en el mayor de los casos, no supere el 50% del volumen inicial. Siendo así, se espera que el rango máximo que crezca la muestra de 1 pulgada, sea de ½ de pulgada, donde este es el mínimo que debería tener el comparador de carátula.

Tabla 6. Relación entre grado de expansión de arcillas reactivas y porcentaje de cambio de volumen.

Grado de expansión	Cambio de Volumen (%)
Bajo.	<1.5
Medio.	1.5-5
Alto.	5-25
Muy alto.	>25

Fuente: (Arancibia Galleguillos , 2003)

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, el comparador de carátula con el que cuenta el prototipo es un comparador marca Baker, con una división de escala de 0.0001 pulgadas y un rango de hasta dos pulgadas.

6.2.4.7 Rocas porosas.

Las Rocas porosas se ajustan según la norma ASTM D4829¹⁰¹ o la norma ASTM D2435¹⁰², siendo su composición de carburo de silicón, óxido de aluminio, o un metal que no reaccione con la humedad del suelo o algún compuesto del mismo. Las Rocas porosas deben tener una altura de 0.5±0.005 pulgadas y una altura de 3.995±0.005 pulgadas.

6.2.5 Partes complementarias

6.2.5.1 Pisón o martillo compactador.

Se utilizará un pisón de metal con una cara circular con un diámetro de 50,8 mm (2,00 in.) y una masa de 2,5 kg (5,5 lbm). El pisón deberá estar equipado con una disposición adecuada para el control de altura de caída, debe permitir una caída libre de 304,8 mm ±1,3 mm (12 pulg ± 0,05 in.) Sobre la parte superior de la muestra

¹⁰¹ ASTM D4829-11 international.Op Cit. p. 2

¹⁰² ASTM international. (2002). ASTM D2435-02-Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils. ASTM international.

a compactar. Esto se hace para que todas las muestras se encuentren al mismo nivel de compactación.

6.2.5.2 Balanza.

Una balanza analítica de al menos 1000 g de capacidad. Esta balanza permitirá realizar las lecturas de humedad de la muestra antes y después del secado y a partir de estos resultados obtener la humedad inicial de la misma.

6.2.5.3 Horno de secado.

horno de secado controlado termostáticamente capaz de mantener una temperatura de 110 ± 5 ° C (230 ± 9 °F) por un tiempo mínimo de 12 horas, para así minimizar el contenido de agua en la muestra.

6.2.5.4 Tamices.

Esta herramienta es opcional, se puede utilizar un Tamiz de medida 4,75 mm (No. 4), para poder realizar el ensayo con muestras de un grano similar o uniforme, de igual manera evitando cantos y rocas de tamaño muy superior.

6.2.5.5 Mezcla de herramientas.

Herramientas varias tales como sartenes de mezcla, cucharas, paletas, espátula, entre otros para realizar la mezcla de la muestra de arcilla con el agua.

6.3 VALORACIÓN ECONÓMICA

Para la producción del prototipo o, debido a que el prototipo queda en el laboratorio de lodos de perforación como parte de la Universidad Surcolombiana, si se hace necesario hacer el reemplazo de alguna de sus partes por deterioro, es importante analizar los costos que se genera al producir cada una de estas piezas a la fecha de producción (15 de octubre del año 2020), teniendo en cuenta costos de materiales, costos mano de obra y envío. Dichos costos se encuentran descritos en la *tabla 7*.

Tabla 7. Valoración económica del prototipo a fecha de 15/10/2020

Valoración económica			
Parte del prototipo.	Costo unitario	Unidades	Total

Base	\$250.000	1	\$250.000
Marco metálico	\$50.000	4	\$200.000
Molde sección inferior	\$350.000	1	\$350.000
Molde sección superior	\$350.000	1	\$350.000
Consolidómetro	\$700.000	1	\$700.000
Soporte micrómetro	\$80.000	2	\$160.000
Tuercas	\$25.000	4	\$100.000
Unión soporte de micrómetro	\$180.000	1	\$180.000
Micrómetro	\$350.000	1	\$350.000
Rocas porosas	\$50.000	2	\$100.000
Costos de envío	\$43.000	1	\$43.000
Total			\$2.740.000

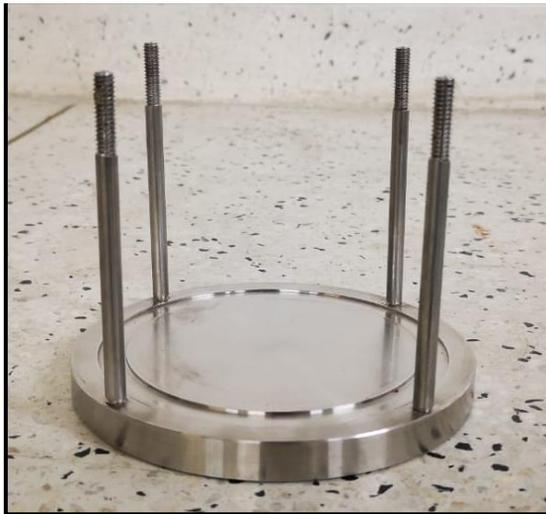
Cabe aclarar que en el ANEXO 1 queda constancia de que el laboratorio de Lodos recibe el prototipo y lo hace en óptimas condiciones.

6.4 MONTAJE Y ENSAMBLADO DEL EQUIPO.

5.4.1 Base y marco metálico.

Ponga la base sobre una superficie limpia, plana y estable. Enrosque cada una de las varillas del marco metálico en los orificios de la base mediante la utilización de los extremos roscados y realice la inspección de que se encuentran bien atornilladas. *Ver Figura 78.*

Figura 78. Paso 1 base y marco metálico



Fuente: Autoría propia.

6.4.1 Molde o recinto de arcillas-inferior.

Asegúrese que la base no contenga ninguna impureza que comprometa el sellado óptimo de las partes, coloque la sección inferior del molde sobre la base siguiendo la línea guía que se encuentra sobre la misma. Ver Figura 79.

Figura 79. Paso 2. Sección inferior del molde.



Fuente: Autoría Propia.

6.4.2 Primera Rocas porosa.

Ponga una Roca porosa en el agujero interior presente en el molde, haciendo contacto con la base del prototipo. Ver Figura 80.

Figura 80. Paso 3- Inserción primera piedra porosa

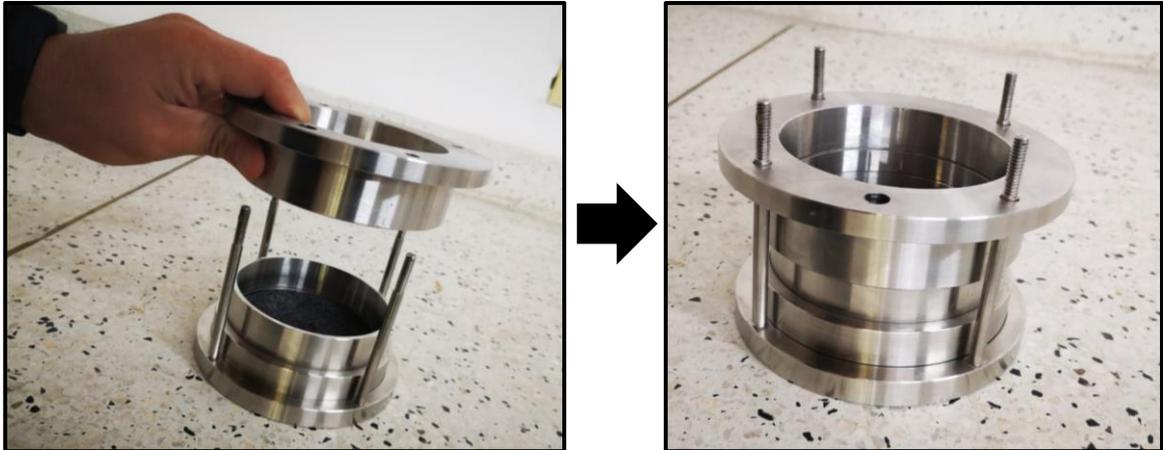


Fuente: Autoría propia.

6.4.3 Molde o recinto de arcillas-Superior.

Asegúrese de que el molde-inferior ninguna impureza que comprometa el sellado óptimo de las partes, coloque el molde-superior sobre el molde inferior. Ver Figura 81.

Figura 81. Paso 4- Recinto de arcillas sección superior.

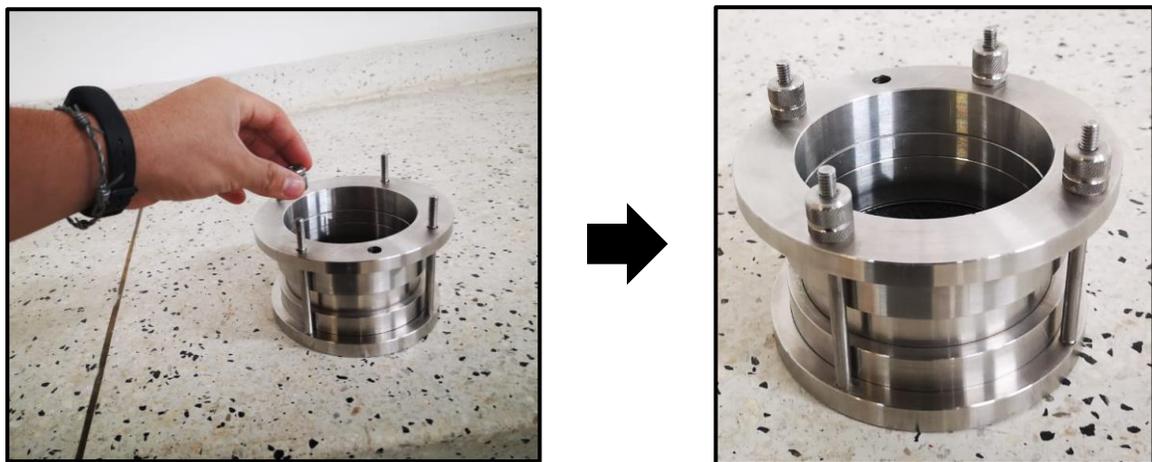


Fuente: Autoría propia.

6.4.4 Tuercas

Enrosque las tuercas por el extremo libre en cada una de las varillas del marco metálico, hágalo fuertemente para asegurar un buen selle hermético. Ver Figura 82.

Figura 82. Paso 5- Ajustar las tuercas.



Fuente: Autoría propia.

6.4.5 Muestra y Roca porosa.

Inserte la muestra de arcilla poniéndola en contacto con la Roca porosa ya insertada anteriormente en la parte inferior del molde y, por último, ponga la otra Roca porosa sobre la muestra. Ver Figura 83.

Figura 83. Paso 6- Inserte muestra de arcilla y piedra porosa.



Fuente: Autoría propia.

6.4.6 Inundación de la muestra con lodo de perforación:

Inunde la muestra y las Rocas porosas con el lodo de perforación, asegurándose que no se presenta ninguna filtración en ningún punto del prototipo.

6.4.7 Consolidómetro.

Ponga el consolidómetro sobre la Roca porosa que se encuentra en la parte superior, comprobando que este tenga una buena horizontalidad. Ver Figura 84.

Figura 84. paso 8- Inserción del consolidómetro.

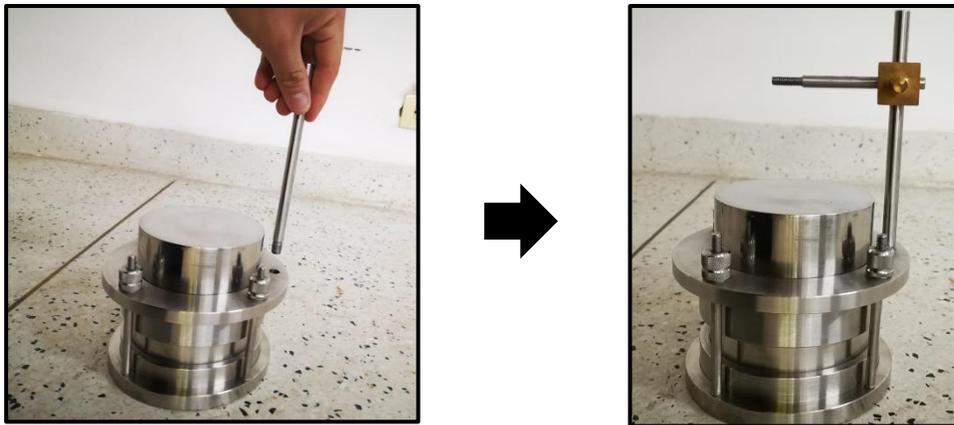


Fuente: Autoría propia.

6.4.8 Soporte del micrómetro.

Asegure cada una de las partes (Horizontal y vertical) del micrómetro y la unión del soporte, cerciorando una buena estabilidad. Ver *Figura 85*.

Figura 85. Paso 9- Soporte del micrómetro.



Fuente: Autoría propia.

6.4.9 Micrómetro:

Coloque el micrómetro sobre el soporte del micrómetro, acomode éste según la altura y la horizontal necesitada sobre el consolidómetro (Asegúrese que quede en contacto con el mismo). Ver *Figura 86*.

Figura 86. Paso 10- Micrómetro



Fuente: Autoría propia

7. MANUAL DE OPERACIÓN DEL PROTOTIPO.

7.2 GUÍA DE LABORATORIO EXPANSIÓN DE ARCILLAS.

7.2.2 Objetivos del ensayo de expansión de arcillas.

7.2.2.1 *Objetivo general.*

Simular en el laboratorio los procesos de expansión que presentan las arcillas o suelos arcillosos al entrar en contacto con los diferentes fluidos de perforación.

7.2.2.2 *Objetivos específicos.*

- Determinar el índice de expansión de una arcilla reactiva al ponerla en contacto con uno o más fluidos de perforación usados comúnmente en la industria de los hidrocarburos.
- Entender los mecanismos de hidratación que influyen en la expansión de las arcillas reactivas.
- Analizar la importancia de aditivos para impedir la expansión de las arcillas reactivas y la manera en que estos impiden la expansión.

7.2.3 Materiales y equipos:

- Medidor expansión de arcillas (prototipo).
- Micrómetro.
- Balanza analítica que permita medidas de pesos de al menos hasta 1000 g.
- Horno de secado.
- Tamiz número 4 (4.75 mm).
- Sartenes de mezcla.
- Cucharas.
- Paletas.
- Espátulas.
- Pisón o Martillo compactador.
- Recipiente hermético que permita el flujo de aire.
- Beaker de 100 mL

7.2.4 preparación y compactación de la muestra de arcilla.

7.2.4.1 Preparación de la muestra.

- Preparación para tamizado: Siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D4829¹⁰³, Si la muestra de arcilla a examinar se encuentra húmeda y compactada en grumos, se utilizará una paleta para desmenuzarla hasta que desaparezcan los grumos y se deja secar a temperatura ambiente, si aún se mantiene húmeda se puede utilizar otra instrumentación, se sugieren hornos de secado los cuales no superen la temperatura de 60°C (140°F) para el secado de la muestra. Para esto tenemos en cuenta que cualquier grumo de arcilla que se encuentre en la muestra deberá ser reducido a partículas (las partículas de tamaño superior a 6.35 mm que son potencialmente expansivas como la lutita, esquistos y rocas volcánicas meteorizadas, deben ser trituradas hasta un tamaño de partícula menor que pase por el tamiz de 4.75mm (No. 4). Se registra el porcentaje del material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No.4) y se descarta.)). luego de realizar el tamizado se toma una muestra representativa de la muestra de arcilla con una masa aproximada de 1 Kg.
- Preparación de las muestras: Se toma una cantidad de arcilla para la compactación, este procedimiento está regido por la norma ASTM D2216-98¹⁰⁴ la cual nos dice que podemos tomar una cantidad de hasta 100 gr para ser compactada para poder desarrollar la prueba, todo esto está indicado bajo los criterios de evaluación que se desean en la construcción del prototipo.
- Contenido de humedad: esta se hace según la normativa presente en la norma ASTM D2216-98¹⁰⁵ Mezclar bien la muestra representativa seleccionada con suficiente agua destilada para llevar el suelo a un contenido de agua que tiene un grado correspondiente de 50 más o menos 2 % de saturación en la condición compactada.
- Después de mezclar, tomar una muestra representativa del material para la determinación del contenido de agua y sellar el resto de arcilla en un recipiente adecuadamente hermético, protegido contra del aire. Cierre por un periodo no

¹⁰³ ASTM D4829-11 international. (2011). Op. Cit. p. 4

¹⁰⁴ ASTM INTERNATIONAL. (s.f.). ASTM D2216-98 Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. Reimpreso del Libro Anual de Normas ASTM. Copyright ASTM, p 5.

¹⁰⁵ *Ibíd.*, p., 7

menor a 16 horas, determinar la masa de la muestra húmeda inmediatamente y dejar secar en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ (230°F) durante al menos 12 horas, o de acuerdo con los métodos de ensayo a una masa constante. La muestra de contenido de agua deberá tener una masa de 100 gr conforme con los métodos de ensayo. El contenido de humedad de los recortes se determinará de acuerdo con los métodos de ensayo usando una resolución de 0.1% o mejor.

7.2.4.2 Compactación de la muestra de arcilla.

Se sigue lo descrito en la norma ASTM D4829¹⁰⁶, Se compactan las arcillas teniendo en cuenta el diámetro del molde 101,9 mm (4,01 pulg) y una altura total compactada de 25,4 mm (1 in). Se compacta cada capa por 15 golpes, estos golpes son realizados desde una altura de 305mm por encima de la parte superior del suelo cuando se utiliza un apisonador. El peso estipulado para la compactación es de 90 kg (200lb).

Para el recorte de las muestras después de la compactación se retira la muestra del molde desde la parte interna del anillo y se recorta la muestra cuidadosamente al ras de la parte superior e inferior con una pala o una regla.

7.2.4.3 Medidas de expansión de la arcilla expuesta a un lodo.

- Preparación de un lodo de perforación:

La preparación de un lodo de perforación se hace según la utilidad y la necesidad que presente el equipo que desee realizar la práctica de perforación, siguiendo la norma API RP 13G¹⁰⁷. Por su parte, La norma API 13B-1¹⁰⁸ tiene como propósito ofrecer procedimientos estándares para la preparación de un fluido base agua. La estandarización de la Norma API 13B-1 está regida bajo la planilla de la norma API RP 13G.

- Exposición de la muestra de arcilla compactada al fluido en estudio:

¹⁰⁶ ASTM D4829-11 international. (2011). Op. Cit. p. 4

¹⁰⁷ American Petroleum Institute. (1991). API RP 13G. Recommended practice standard procedure for drilling mud report form. . Washington : American Petroleum Institute.

¹⁰⁸ American Petroleum Institute. (2009). API 13B-1. Recommended practice for field testing water-based drilling fluids. Washington: American Petroleum Institute.

Con la muestra de arcilla en el anillo del consolidómetro o dispositivo de carga equivalente con los discos de las Rocas porosas secadas al aire en la parte superior e inferior de la muestra. Someter a la muestra a una presión total de 6,9 Kpa (0.07 kg/cm²), incluyendo el peso de la Roca porosa superior y cualquier peso no balanceado del prototipo. Se permite que el espécimen se comprima bajo esta carga por un periodo de 10 minutos. Luego de este periodo de presión inicial, obtener la lectura inicial (D1) en el dial del consolidómetro con una resolución de 0.03 mm o mejor.

- Inundar la muestra con fluido de perforación, obtener la lectura del indicador del deformímetro periódicamente, de acuerdo al método del ensayo ASTM D2435-04¹⁰⁹, por un periodo de 12 horas o hasta que la expansión sea menor al 0.05mm/h. Sin embargo, en ningún caso se pueden hacer la lectura final (D2) antes de haber pasado 3 horas de la inundación de la muestra.

Remover el espécimen del prototipo después de hacer la lectura final (D2), con una resolución de 0.03 mm o mejor y determinar el cambio de altura ΔH como la diferencia entre la lectura inicial y la lectura final. Determinar la masa de la muestra de arcilla al 0.1 g más cercano

- Medición de la expansión y cálculo del índice de expansión: Se calcula el contenido de saturación de acuerdo a la norma ASTM D2216-98¹¹⁰ y el peso unitario seco de acuerdo con la sección 11 de métodos de prueba ASTM D698¹¹¹. Si el grado de saturación no se encuentra dentro de los 50 más o menos 2% preparar otra muestra. Ajustar el contenido de agua de las nuevas muestras basándose en el grado calculado de saturación y vuelva a preparar la muestra, según lo descrito en los párrafos anteriores, para alcanzar 50 más o menos 2% o disminuya el contenido de humedad si la saturación es mayor del 50%.
- Cálculo del índice de hinchamiento: Si el cálculo de saturación se encuentra dentro del rango establecido calcular el índice de hinchamiento con la fórmula descrita abajo. Se calcula de acuerdo al método de prueba (ASTM D4829-11 international, 2011).

¹⁰⁹ ASTM international. (2002). ASTM D2435-02-Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils. ASTM international.

¹¹⁰ ASTM INTERNATIONAL. (s.f.). ASTM D2216-98. Op. Cit.

¹¹¹ ASTM international. (28 de 12 de 2020). Método de prueba estándar para las características de compactación de suelo en laboratorio utilizando estándar ASTM D698. Obtenido de D698, ASTM Scribd: <https://es.scribd.com/document/194788828/ASTM-D698>

$$IH = \frac{\Delta H}{H1} \cdot 1000$$

Formula 7. Cálculo de índice de hinchamiento. (ASTM international D4829-11, 2011)

Donde:

- ΔH = Cambio en la altura D2-D1 mm
- $H1$ = Altura inicial mm
- $D1$ = Lectura inicial mm
- $D2$ = Lectura final mm
- IH =Índice de hinchamiento.

7.3 Manual De Uso Y Mantenimiento Del Prototipo

El uso general del prototipo tanto en sus etapas de arme, desarme, pruebas y limpieza, se deben realizar bajo la inspección del personal docente, monitor/a o encargado/a del laboratorio para evitar percances, usos o fuerzas innecesarias.

7.3.2 Arme.

- Avise a la persona encargada que iniciará el proceso de armado.
- Colocar la base del prototipo sobre una superficie limpia, plana y estable.
- Enrosque cada una de las varillas del marco metálico en los orificios de la base mediante la utilización de los extremos roscados y realice la inspección de que se encuentran bien atornilladas.
- Asegúrese que la base no contenga ninguna impureza que comprometa el sellado óptimo de las partes, coloque la sección inferior del molde sobre la base siguiendo la línea guía que se encuentra sobre la misma.
- Asegúrese de que el molde-inferior ninguna impureza que comprometa el sellado óptimo de las partes, coloque el molde-superior sobre el molde inferior.
- Ponga una Roca porosa en el agujero interior presente en el molde, haciendo contacto con la base del prototipo, paso siguiente inserte la muestra de arcilla poniéndola en contacto con la Roca porosa y, por último, ponga la otra Roca porosa sobre la muestra.
- Enrosque las tuercas por el extremo libre en cada una de las varillas del marco metálico, hágalo fuertemente para asegurar un buen selle hermético.

- Inunde la muestra con el lodo de perforación, asegurándose que no se presenta ninguna filtración en ningún punto del prototipo.
- Ponga el consolidómetro sobre la Roca porosa que se encuentra en la parte superior, comprobando que este tenga una buena horizontalidad.
- Asegure cada una de las partes (Horizontal y vertical) del micrómetro, cerciorando una buena estabilidad.
- Coloque el micrómetro sobre el soporte del micrómetro y acomode este según la altura y la horizontal necesitada sobre el consolidómetro.

7.3.3 Desarme.

- Desenrosque el tornillo que permite la movilidad a la varilla horizontal del soporte del micrómetro y retírela con el micrómetro.
- Desmonte el micrómetro, revise que no tenga suciedad y guárdelo en su caja.
- Desmonte la varilla vertical del soporte del micrómetro.
- Extraiga cuidadosamente el consolidómetro que está sobre la Roca porosa.
- Desenrosque y retire las 4 tuercas que están en cada una de las varillas del marco metálico.
- Saque la Roca porosa que está en la parte superior, es decir, sobre la muestra de arcilla.
- Desmonte la parte superior del molde y colóquela cuidadosamente al lado.
- Retire la muestra de arcilla que fue estudiada y la Roca porosa. Estas se encuentran al interior del molde.
- Retire la parte inferior del molde y déjela a un lado.
- Desenrosque cada una de las varillas del marco metálico y colóquelas a un lado.
- Quitar la base de la superficie.
- Avisar a la persona encargada que terminó el desmonté del aparato.
- Llevar al área de limpieza.

7.3.4 Limpieza.

La limpieza se debe realizar con una bayetilla de microfibra, pañuelo, trapo o esponja que no sea de alambre (MUY IMPORTANTE). El implemento utilizado se debe encontrar limpio de impurezas o partes duras que puedan rayar la superficie del aparato ya que, puede rayar el acero y retirar la capa de pasivación que tiene el acero inoxidable y promover el deterioro temprano del prototipo.

La limpieza se realiza después de finalizar cada prueba, se debe utilizar agua y un poco de jabón líquido lavavajillas, teniendo cuidado de quitar cualquier impureza que haya quedado de la prueba.

7.3.5 Mantenimiento.

El mantenimiento es recomendable hacerlo cada mes, costando de tres partes:

- Revisión de limpieza del prototipo: Se hace una inspección a cada una de las partes del prototipo para constatar la limpieza adecuada, observando detenidamente que no tenga ninguna costra o gránulo de arcilla u otro material sobre alguna superficie, de contener alguno de estos, remítase al numeral 6.2.3. limpieza.
- Revisión integridad de las partes: Revisar cuidadosamente cada una de las partes, busque fisuras, puntos de óxido, evidencia de torción o fuerzas extralimitadas, que hayan comprometido la integridad de las partes del aparato. Si es el caso, se hace necesario analizar el reemplazo de la pieza.
- Engrase de partes roscadas: Encuentre todas las partes del aparato que contengan partes roscadas, límpielas con un trapo seco y realice un engrase con grasa para partes móviles.

7.4 Ensayos Realizados

7.4.2 Preparación de las muestras.

Figura 88. arcilla organifílica después de ser compactada y recortada.



Fuente: Autoría propia.

Figura 87. Muestra de arcilla de tipo bentonita siendo compactada por el apisonador.



Figura 89. Arcilla organofílica siendo preparada para tarado y posterior secado para determinar su contenido de humedad.



Fuente: Autoría propia.

Por disponibilidad de material, en dos de los ensayos se utilizaron arcillas comerciales usadas comúnmente para dar viscosidad a los fluidos de perforación, estas son arcilla de tipo Bentonita sódica, según Grim R. E.¹¹². es una arcilla de grano muy fino del grupo de las esmectitas, específicamente del tipo montmorillonita, es formada por la esvitrificación y alteración de un material ígneo vítreo como las cenizas volcánicas o tobas.

La otra muestra utilizada es la arcilla Organofílica, esta es una arcilla que, según Schlumberger¹¹³, su superficie fue revestida con una sustancia química que permite su dispersión en aceite. Arcillas como la bentonita, la hectorita entre otras, se tratan con agentes mojantes de petróleo durante su fabricación, con la finalidad de que puedan utilizarse como aditivo para lodos base aceite.

Para un tercer ensayo, se utilizó arcilla de alfarería adquirida en un taller de arte ubicado en la ciudad de Neiva.

Se realiza la debida preparación de las muestras de arcilla, teniendo en cuenta los puntos 7.2.4 de preparación y compactación de la muestra.

7.4.3 Preparación de los fluidos.

¹¹² Grim, R. E. (1953). Clay Mineralogy. New York: McGraw-Hill.

¹¹³ Schlumberger. (20 de 02 de 2021). Oilfield Glossary. Obtenido de https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/o/organophilic_clay

Un carácter importante para la realización de las pruebas es la determinación del peso del lodo de perforación. Se tendrán en cuenta 3 tipos de lodos para las pruebas realizadas del prototipo: Lodo Base agua, base aceite, salmuera. Estos lodos se trabajan con una cantidad baja en sólidos, la practica recomendada de estos lodos estará regida por la API PR 13B-1 (Baker Hughes, 1997).

La determinación del peso del lodo será variante ya que esta prueba estará sujeta a las variaciones de arcillas y tipos de lodos. Se tendrán en cuenta formulaciones de pesos las cuales varían según el proceso:

El peso del lodo se puede expresar en libras por galón (Lb/Gal), Libras por pie cubico (Lb/Ft3), gramos por centímetro cubico (g/cm3) o kilogramos por metro cubico (Kg/m3). El peso de lodo lo podemos calcular por medio de la balanza de lodos.

Para el cálculo de densidad del lodo de perforación se puede calcular por medio de una relación de pesos y gravedades específicas de los materiales que constituyen un lodo de perforación:

$$\rho = \frac{8,34(350 + w_1 + w_2 + \dots + w_n)}{350 + \frac{w_1}{SG_1} + \frac{w_2}{SG_2} + \dots + \frac{w_n}{SG_n}}$$

Formula 8. Cálculo de densidad del lodo. (Fuente: API RP 13-B)

SG: Gravedad específica

W: Pesos de viscosificante ó densificante

Considere que 1 lb de aditivo equivale a 1 gramo en laboratorio y un barril equivalente corresponde a 350 cc en laboratorio

La balanza deberá ser calibrada con frecuencia, utilizando agua dulce, la cual debe dar una lectura de 8,3 libras por galón o 62,3 libras por pie cúbico (1000 kilogramos por metro cúbico). De no ser así, ajuste el tornillo en el extremo del brazo graduado, según se requiera.

Ecuación para SG:

$$SG = \frac{g}{cm^3} \text{ ó } \frac{lb/ft^3}{62,3} \text{ ó } \frac{Lb/gal}{8,345}$$

Formula 9. Conversión unidades gravedad específica. (Baker Hughes, 1997)

Donde:

SG: Gravedad específica.

La fórmula 9 será utilizada para la conversión de unidades de densidad.

7.4.3.1 Lodo Base agua, lodo base agua salada y Lodo Base aceite.

- Lodo base agua:

Para la primera prueba de cada una de las arcillas utilizadas anteriormente descritas, se utilizó un lodo base agua con los siguientes aditivos: 1 gr de Bentonita, 1 gr de barita.

Para estas condiciones se obtiene que el lodo de perforación tiene una densidad como sigue:

$$\rho = \frac{8,34(350 + 1 + 1)}{350 + \frac{1}{2,3} + \frac{1}{4,2}} = 8,371$$

- Lodo base agua salada:

En la segunda prueba de las arcillas se utiliza un lodo base agua salada, los aditivos son los siguientes: 0,3 gr de goma Xantica, 2 gr de formiato de Sodio y 0,5 gr de NaCl.

$$\rho = \frac{8,34(350 + 0,3 + 2 + 0,5)}{350 + \frac{0,3}{1,5} + \frac{2}{1,9} + \frac{0,5}{2,1}} = 8,371$$

- Lodo base aceite.

En la tercera prueba de cada una de las muestras de arcilla, se utilizó ACPM para simular el lodo base aceite, con una gravedad específica de 8,4.

8. PRUEBAS REALIZADAS Y CONFIABILIDAD

Se toman 3 tipos de las arcillas que fueron descritas en el numeral 6.3.1. De cada una de ellas, se extraen nueve (9) muestras representativas, las cuales pasan por un proceso de compactación que es descrito en el numeral 6.1.3.2 del presente documento.

Paso siguiente, tres muestras de cada arcilla son evaluadas con el lodo de perforación base agua dulce, tres son evaluadas con el lodo base agua salada y tres con el lodo base aceite. El fin de hacer tres veces cada una de las pruebas, es poder sugerir si hay repetibilidad de las pruebas, es decir, si hay un resultado más o menos constante entre las pruebas en las que se utilizan la misma arcilla y el mismo lodos o lodos con características similares.

Al realizar las pruebas de laboratorio para verificar el funcionamiento del prototipo, se encontraron los siguientes resultados en las 9 pruebas a las que fueron sometidas cada una de las muestras:

Tabla 8. Resultados pruebas de laboratorio.

	Muestra	Altura en T (0)	Altura en T (12 h)	ΔH	Índice de hinchamiento (IH)	Diferencias promedio:	Error
Agua Dulce	Arcilla organifílica.	0,0080	0,0224	0,0144	1800	0,0151	4,635761589
	Bentonita.	0,0051	0,1722	0,1671	32764,70588	0,1661	0,60204696
	Arcilla Común.	0,0041	0,0045	0,0004	97,56097561	0,000366667	9,090909091
Agua salada.	Arcilla organifílica.	0,0054	0,0133	0,0079	1462,962963	0,0081333333	2,868852459
	Bentonita.	0,0030	0,0564	0,0534	17800	0,0523333333	2,038216561
	Arcilla Común.	0,0031	0,0032	0,0001	32,25806452	0,0001	2,84603E-13
Aceite.	Arcilla organifílica.	0,0050	0,0534	0,0484	9680	0,0495	2,222222222
	Bentonita.	0,0060	0,0060	0,0000	0	0	-
	Arcilla Común.	0,0041	0,0041	0,0000	0	0	-

Prueba 2

	Muestra	Altura en T (0)	Altura en T (12 h)	ΔH	Índice de hinchamiento (IH)	Diferencias promedio:	Error
Agua Dulce	Arcilla organifílica.	0,0073	0,0230	0,0157	2150,684932	0,0151	3,973509934
	Bentonita.	0,0051	0,1760	0,1709	33509,80392	0,1661	2,889825406
	Arcilla Común.	0,0062	0,0065	0,0003	48,38709677	0,000366667	18,18181818
Agua salada.	Arcilla organifílica.	0,0060	0,0135	0,0075	1250	0,007966667	7,786885246
	Bentonita.	0,0030	0,0564	0,0534	17800	0,0523333333	2,038216561
	Arcilla Común.	0,0033	0,0034	0,0001	30,3030303	0,0002	1,49078E-13
Aceite.	Arcilla organifílica.	0,0043	0,0545	0,0502	11674,4186	0,0495	1,414141414
	Bentonita.	0,0052	0,0052	0,0000	0	0	-
	Arcilla Común.	0,0040	0,0040	0,0000	0	0	-

Prueba 3

	Muestra	Altura en T (0)	Altura en T (12 h)	ΔH	Índice de hinchamiento (IH)	Diferencias promedio:	Error
Agua Dulce	Arcilla organifílica.	0,0062	0,0214	0,0152	2451,612903	0,0151	0,662251656
	Bentonita.	0,0068	0,1671	0,1603	23573,52941	0,1661	3,491872366

	Arcilla Común.	0,0055	0,0059	0,0004	72,72727273	0,000366667	9,090909091
	Arcilla organifílica.	0,0050	0,0140	0,0090	1800	0,008133333	10,6557377
Agua salada.	Bentonita.	0,0041	0,0543	0,0502	12243,90244	0,052333333	4,076433121
	Arcilla Común.	0,0037	0,0038	0,0001	27,02702703	0,0001	1,49078E-13
	Arcilla organifílica.	0,0055	0,0554	0,0499	9072,727273	0,0495	0,808080808
Aceite.	Bentonita.	0,0060	0,0060	0,0000	0	0	-
	Arcilla Común.	0,0054	0,0054	0,0000	0	0	-

8.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos durante las 27 pruebas descritas en la *tabla 8*, se puede denotar un buen funcionamiento en el prototipo, donde los resultados concuerdan con el análisis teórico hecho antes de la construcción del prototipo y que se explicarán a más detalle a continuación. Debido que para las arcillas utilizadas no tenemos resultados de pruebas de hinchamiento con anterioridad, Para este análisis se tomaron los resultados obtenidos, se realizó un promedio y luego se realiza el porcentaje de error partiendo de ese promedio obtenido de los tres ensayos.

Para la arcilla de tipo organofílica, se encontró una reacción con el agua dulce que, no obstante, fue mucho menor que en la arcilla de tipo bentonita, sin embargo, es un resultado esperado debido a que las moléculas di polares del agua aún tienen cierta reacción con las cargas presentes en las láminas de arcilla. De igual manera, se obtuvo una lectura con el lodo agua salada, sin embargo, esta es mucho menor que con el lodo base agua salada, denotando que las sales disueltas en el lodo actuaron como una especie de inhibidor de la expansión. Como parte última para esta arcilla, se denotó que el fluido base aceite generaba una gran reacción, siendo estas las mayores lecturas obtenida de las 3 pruebas que se realizaron sobre esta arcilla. Este comportamiento se ve explicado por el tratamiento especial que reciben estas arcillas, entre ellos, el revestimiento de esta con una sustancia que permite su dispersión en aceite y por tanto su expansión.

Se observa que para arcillas de tipo bentonita, los lodos base agua dulce influyen mucho más en su hidratación y posterior expansión, siendo esto explicado por la afinidad que tienen las cargas de las moléculas de agua y las laminillas de arcilla, razón por la que el agua se introduce entre las láminas de arcilla y la hidratan. Esta información se encuentra mejor descrita en el numeral 4.1.5 Las arcillas y sus

características de hidratación y expansión. Para este tipo de arcilla se observa que el error máximo no superó el 4%, por lo que se considera un margen muy aceptable.

Por su parte los lodos agua salada si bien, pueden generar una hidratación, está se hace mucho menor que con lodos base agua dulce debido a que las sales disueltas en el lodo tienen mayor afinidad con las cargas eléctricas de la lámina de arcilla que las moléculas de agua, reduciendo los valores de expansión (ΔH) en más de un 50%, de igual manera, se encontró que el error máximo en esta prueba se encuentra en el orden del 5%.

por último, los lodos base aceite, no generan ningún tipo de reacción ni hidratación en este tipo de arcilla debido a que no tienen ningún tipo de afinidad ni atracción con ella.

Para la arcilla común los resultados no fueron significativos, pues no se vio una gran expansión en ninguna de las tres pruebas, esto quizá se ve explicado que ya había recibido un tratamiento por parte de la persona a la que fue adquirida, y no se le realizó ningún secado si no que se probó en las condiciones en las cuales fue entregada, cuestión que habría que analizar.

8.2.1 Efectividad De La Medición De La Expansión De Las Arcillas Usando El Prototipo.

Al analizar la repetibilidad del estudio, se halla que al realizar cada una de las pruebas en tres ocasiones, éstas contenían lecturas congruentes entre sí. Como se describió anteriormente, se asumió que el resultado promedio es resultado idóneo para cada uno de los experimentos realizados, se encuentra que el error máximo no es superior al 10%, (Sin tener en cuenta los resultados para arcilla común ya que estos no fueron significativos), teniendo 0,6 % como menor error. Sin embargo, teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, es importante aclarar que no todas las arcillas y/o mezclas de ellas tendrán el mismo comportamiento, por lo que los resultados pueden variar en las diferentes pruebas, lo que lleva a sugerir realizar más pruebas para poder analizar la variación con una mayor cantidad de datos.

La reproducibilidad no pudo ser determinada en este experimento debido a que se necesita una mayor cantidad de prototipos en diferentes laboratorios que puedan simular las pruebas realizadas con cada una de las arcillas y fluidos con los que fue probado el prototipo.

8.2.2 Ventajas del prototipo.

- Fácil manejo y ensamblado del prototipo.
- Representa una manera fácil y rápida para determinar e ilustrar la expansión de las arcillas reactivas en el laboratorio.
- Debido al análisis de los materiales realizado antes de la construcción del prototipo, este es resistente a las condiciones normales a las que será expuesto durante las pruebas, incluso, en ambientes corrosivos como el agua salada.
- Se pueden utilizar varios tipos de arcilla y de fluidos de perforación, lo cual permite que la cantidad de pruebas que se pueden realizar con el prototipo sean bastante numerosas.
- Los cuidados del prototipo no son muchos ni excesivos, pues solamente exige limpieza con jabón para loza después de cada uso.
- Si una pieza llega a fallar, estas pueden ser reemplazadas con facilidad.
- Las herramientas extras que son necesarias para llevar a cabo las pruebas no son extrañas, pues la universidad Surcolombiana cuenta con estos en sus laboratorios.

8.2.3 Desventajas del prototipo.

- La carga de fluidos se limita a la cantidad que se logró inundar en las rocas porosas, por lo que puede significar una limitante en la expansión de las arcillas.
- La muestra de arcilla se debe encontrar con un contenido de humedad muy bajo, por lo tanto, no es posible realizar el ensayo con las muestras extraídas directamente de la formación.

8.2.4 Ficha técnica del prototipo.

Figura 90. Ficha técnica del prototipo.

FICHA TÉCNICA DEL EQUIPO.						
REALIZADO POR:	Gómez U-Ramírez T.	Fecha:	20/04/2021			
MAQUINA-EQUIPO	Medidor expansión arcillas	UBICACIÓN	Neiva-Huila			
FABRICANTE	Gómez y Ramírez.		SECCIÓN	Univ. Surcolombiana- Laboratorio de Fluidos de perforación.		
MODELO	N/A					
MARCA	N/A					
COMBUSTIBLE	N/A					
DATOS TÉCNICOS						
Escala microm.	Voltaje	Dimensiones		Capacidad	Medidor	
0.0001 pulg	No aplica	Largo	8 Pulg.	Muestra de: 4 Pulg. De diametro por 1 Pulg. De altura	Marca	Baker.
		Ancho	6. Pulg.		Escala	0,0001 Pulg.
		Alto	8.5 Pulg.		Rango	2 Pulg.
FUNCIÓN.			FOTO DEL EQUIPO.			
<p>Aparato utilizado para medir la expansión de las arcillas reactivas cuando son puestas en contacto con los fluidos de perforación, utilizando un mecanismo de peso móvil que está en contacto con un comparador de carátula marca Baker.</p>						
MANTENIMIENTO						
<p>Se debe realizar una revisión periódica cada mes donde se busquen busque fisuras, puntos de óxido, evidencia de torción o fuerzas extralimitadas, que hayan comprometido la integridad de las partes del aparato</p>						
PRECAUCIONES						
Riesgo de aplastamiento de manos.						
DATOS DEL FABRICANTE						
Ubicación.		Neiva, Huila-Colombia				
Teléfono		316 3844449				
e-mail.		ernestourbano1300@hotmail.com				

Fuente: Autoría propia.

9. ANEXOS

9.1 Carta De Entrega del Prototipo.

Neiva- Huila 07 de mayo de 2021

Señores

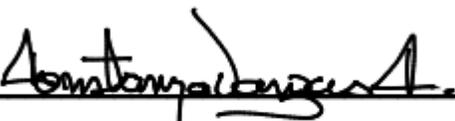
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
Programa de Ingeniería de Petróleos
Universidad Surcolombiana
Ciudad, Neiva

ASUNTO: CARTA DE ENTREGA DE PROTOTIPO AL LABORATORIO DE LODOS DE PERFORACION

Con la presente informo que los estudiantes del programa de Ingeniería de Petróleos DAYRO EMANUEL RAMIREZ TRUJILLO COD: 20142130668 y MILTON ERNESTO GOMEZ URBANO COD:20142131636 realizaron la entrega del prototipo creado durante su proyecto de grado con título: "CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN DE LAS ARCILLAS", el cual queda adscrito al laboratorio de fluidos de perforación y es entregado a la docente Constanza Vargas Castellanos.

Para constancia de lo anterior se firma en Neiva a los 07 días del mes de mayo de 2021.

Atentamente,



Constanza Vargas Castellanos
Docente directora de tesis

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

10.1 CONCLUSIONES

Se da por alcanzado el propósito de este trabajo de grado pues, se logró el diseño y construcción de un prototipo que permite obtener resultados de hinchamiento de arcillas de una manera rápida y acertada.

Los datos obtenidos en las pruebas confirman lo propuesto en la revisión bibliográfica, deduciendo así, que el prototipo funciona para efectos metodológicos y académicos.

Se logra el desarrollo de una guía de laboratorio que para efectos prácticos es adecuada, esta ayudara a un buen manejo, funcionamiento eficaz y buen cuidado del prototipo.

Se pudo proponer mecanismos de limpieza del prototipo, que, de ser aplicadas, conllevan a esperar una vida útil considerable.

El prototipo funciona con diferentes fluidos de perforación y arcillas, lo cual permite que el número de pruebas que se pueden realizar sean numerosos.

El prototipo puede ayudar a estudiar la reacción de las arcillas expansivas con fluidos de perforación que contengan aditivos que sean postulados y estudiados para la inhibición de la expansión de las arcillas.

Habiendo obtenido un buen funcionamiento del equipo, se concluye que el diseño y la construcción del prototipo fue el adecuado, donde se tomó en cuenta el comportamiento esperado de las arcillas expansivas y se siguieron los lineamientos normativos.

10.2 RECOMENDACIONES.

Las lecturas solamente se toman con la carga de fluido absorbida y contenida en la Roca porosa, por tanto, es una cantidad limitada. Se pueden hacer estudios y/o otros trabajos de investigación para que la cantidad de fluido nunca sea absorbida

en su totalidad, si no, que permita la entrada constante del mismo, simulando el flujo constante de un bombeo de fluido de perforación.

No se pudo determinar la reproducibilidad del prototipo, por lo tanto, se recomienda el análisis en diferentes laboratorios, con la construcción del prototipo según las normativas y guía de uso dadas en el presente documento.

Para determinar la expansión y el índice hinchamiento de una arcilla, se recomienda hacer por las menos 3 pruebas con cada arcilla y tipo de fluido, las cuales deben demostrar una tendencia similar.

Si es posible, adquirir más rocas porosas (Mínimo 4) para que sean utilizadas 2 por cada tipo de fluido de perforación que se vaya a utilizar, para así, disminuir el riesgo de compactación y taponamiento dentro de los poros de la roca porosa.

Por último, se hace indispensable seguir los lineamientos guías del presente documento, ya que, de no seguir cada uno de los procesos aquí descritos lo resultados pueden tener variaciones que no aseguran la confiabilidad de los datos obtenidos.

11. BIBLIOGRAFÍA

- BEER, F., JOHNSTON, R., MAZUREK, D., & EISENBERG, E. (2020). *MECÁNICA VECTORIAL PARA INGENIEROS*. Mexico D.F: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Aadnoy , B. S. (2010). *Modern well design*. Stavangerm, Noruega : CRC Press/ Balkema.
- Abdohamild, S. P. (2015). *Effect of nanoparticles on clay swelling and migration*. . Egyptian Journal of Petroleum, 24(4),429-437.
- American Petroleum Institute. (1991). *API RP 13G. Recomendado practice standard procedure for drilling mud report form*. . Washington : American Petroleum Institute.
- American Petroleum Institute. (2009). *Práctica Recomendada API 13B-1. Recommended practice for field testing water-based drilling fluids*. Washington: American Petroleum Institute.
- Anderson, R. L., ratcliffe, I., Greenwell, H. C., Williams, P. A., Cliffe, S., & Coveney, P. V. (2010). Clay swelling — A challenge in the oilfield. *Earth-Science Reviews*, 98, 201-216. doi:<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.11.003>
- Anderson, R. R. (2010). Clay swelling- A challenge in the oilfield. *Earth Escience Reviews* , 1.
- ANH, A. N. (2007). *Colombian Sedimentary Basins*. Bogota, Colombia: ANH and B&M Exploration Ltda.
- Antico, F., & Pezzotti, S. (2008). CIRCULO DE MOHR : para el cálculo de tensiones principales en el plano y el espacio. *Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata*, 1-10.
- Arancibia Galleguillos , C. A. (2003). *Arcillas expansivas: Comportamiento, identificación y su correlación mediante ensayos de fácil ejecución*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- ARENIVAR MARROQUÍN , B. A., MARTÍNEZ PÉREZ, G. C., & IVANIA RIVERA, L. (2012). *EVALUACIÓN FISICOQUIMICA DE ARCILLAS NATURALES EXISTENTES EN EL CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN, USULUTÁN Y ELABORACIÓN DEL DIAGNOSTICO DE SU COMPORTAMIENTO REOLOGICO DURANTE LA PERFORACION DE POZOS GEOTERMICOS*. . San Salvador .
- ASTM international. (2011). *D4829-11 Standard test method for expansion index soils (D4829-11)*. ASTM Int'l.
- ASTM international. (2002). *ASTM D2435-02-Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils*. ASTM international.
- ASTM INTERNATIONAL. (s.f.). *ASTM D2216-98. Reimpreso del Libro Anual de Normas ASTM. Copyright ASTM*.
- Badillo , J., & Amorocho , P. (jueves de 06 de 2012). *Boletín De Geología*. Obtenido de SciELO:

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832012000100006

- Baker Hughes, M. G. (1997). *Práctica Recomendada Procedimiento Estándar para las Pruebas de Campo con Fluidos de Perforación de Base Agua*. Houston Texas: American Petroleum Institute.
- Beer, F. P., Johnston, R., Dewolf, J., & Mazurek, D. F. (2009). *Mecánica de materiales* (Quinta ed.). México D:F: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Beltran Martinez, R. (2009). *DISEÑO GEOTÉCNICO Y ESTRUCTURAL DE UNA CIMENTACIÓN EN ARCILLA EXPANSIVA*. México, DF.
- Bloys, B., Davis, N., Smolen, B., Bailey, L., Houwen, O., Reid, P., . . . Hodder, M. (1994). Designing and managing drilling fluid. *Schlumberger Oilfield Review*, 6(2), 33-43.
- Boek, E. S., Coveney, P. V., & Skipper, N. T. (1995). Monte Carlo Molecular Modeling Studies of Hydrated Li-, Na-, and K-Smectites: Understanding the Role of Potassium as a Clay Swelling Inhibitor. *Journal of the American Chemical Society*, 117(50), 12608-12617. doi:10.1021/ja00155a025
- Braja M, D. (2013). *Origen de los depósitos del suelo, tamaño de grano y forma*. Mexico D.F : Learning .
- Braja M., D. (2019). *Advanced Soil Mechanics*. Boca Ratón, FL: CRC Press.
- Cases, J. M., Bérend, I., Besson, G., Francois, M., Uriot, J. P., Thomas, F., & Poirier, J. E. (1992). Mechanism of Adsorption and Desorption of Water Vapor by Homoionic Montmorillonite. 1. The Sodium-Exchanged Form. *Langmuir*, 8(11), 2730-2739. doi:10.1021/la00047a025
- Cayul, S., Rivera, I., Soto, J. P., & Soto, M. (21 de 11 de 2020). *Compresión, tracción y flexo-tracción*. Obtenido de Slideplayer: <https://slideplayer.es/slide/12175328/>
- Cima inoxidable. (11 de 12 de 2020). *Acero Inoxidable*. Obtenido de Serie 300: <http://www.aceroinoxidablee.com/acero-inoxidable-tipo-304-serie-300>
- Cuervo, R. V. (2005). *Geología física para ingenieros*. Neiva, Huila: Universidad Surcolombiana.
- D 2435-04, A. I. (s.f.). Métodos de prueba estándar para Propiedades de consolidación unidimensional de suelos mediante carga. En A. INTERNATIONAL, *Métodos de prueba estándar para Propiedades de consolidación unidimensional de suelos mediante carga* (pág. 10). ASTM INTERNATIONAL.
- D698, A. (28 de 12 de 2020). *Método de prueba estándar para las características de compactación de suelo en laboratorio utilizando estándar ASTM D698*. Obtenido de D698, ASTM Scribd: <https://es.scribd.com/document/194788828/ASTM-D698>
- Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering* (Vol. Séptima). Cengage.
- Dominguez, J. M., & Schifter, I. (23 de 09 de 2020). *Las arcillas: El barro noble*. Obtenido de I.¿QUÉ SON LAS ARCILLAS?:

- http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/109/html/sec_6.html
- Egger , A. E. (2005). *Ciencias de la tierra*. Washington D.C : Visionlearning en español.
- Fernandez , J., & Coronado , G. (12 de Junio de 2020). *Fisicalab*. Obtenido de FisicaLab Suma de vectores : <https://www.fisicalab.com/apartado/suma-de-vectores>
- Ferros Planes. (24 de 11 de 2018). *PLANES*. Obtenido de Inox 304 vs Inox 316: las diferencias entre los dos tipos de acero: <https://ferrosplanes.com/inox-304-vs-inox-316-diferencias/>
- Fitzgerald, R. W. (1996). *Mecánica de materiales* . México D.F: Alfaomega Grupo Editor.
- Foster, W. R., Savins , J. G., & Waite, J. M. (1954). Lattice expansion and rheological behavior relationships in water-montmorillonite systems. *Arcillas Clay Miner*, 296-316. doi:<https://doi.org/10.1346/CCMN.1954.0030124>
- Gamio Arisnabarreta, L. E. (2014). *Resistencia de Materiales-Teoría y aplicaciones*. Lima, Perú : Empresa Editora Macro EIRL .
- Gomez de Santos , C. (2018). *Comportamiento geotécnico de suelos arcillosos compactados respuesta a cargas estáticas y dinámicas*. Madrid.
- Grim. (1968). *Mineralogía de la arcilla*. Nueva York : McGraw-Hill Book Company.
- Grim, R. E. (1953). *Clay Mineralogy*. New York: McGraw-Hill.
- Hawker , D., Vogt , K., & Robinson, A. (2001). *Procedimientos y operaciones de pozo* (Vol. 3). Calgary, Alberta, Canadac: Datalog.
- Hensen, E. J., & Smit, B. (2002). Why clays swell. *Journal of Physical Chemistry B*, 106(49), 12664-12667. doi:10.1021/jp0264883
- Hoek , E., & Brown , E. T. (1990). *Under ground Excavations in Roc k*. Londres : INSTITUTION OF MINING AND METALLURGY.
- Ingemecánica. (1 de 07 de 2020). *Ingemecánica*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn102.html>
- Ingeniería Mecafenix. (9 de Marzo de 2018). *Ingeniería Mecafenix*. Obtenido de Que es un reloj comparador y para que sirve: <https://www.ingmecafenix.com/medicion/comparador/>
- INVIAS. (2013). *DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE EXPANSIVIDAD DE UN SUELO EN EL APARATO DE LAMBE*. I.N.V. E – 120 – 13.
- Jaeger , J. C., Cook, N. G., & Zimmerman, R. W. (2007). *Fundamentals of Rock Mechanics*. Malden, Massachusetts: Blackwell Publishing.
- Jun Lu, G. Y. (2019). Permeability characteristics of layered composite coal-rock under true triaxial stress conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 60-76.
- Lambe, T. W. (1958). The Structure of Compacted Clay. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 84(2), 1-34.
- Lambe, W. T. (1960). *Character Identification of expansive soils*. Washington: Technical Studies Report.
- Lopez F, T. (2000). *Relaciones hídricas en el cOlltinuo agua-suelo-planta-atmósfera* . Cali : DIPAL .

- Lopez, M. C. (s.f.). Geotectónica. En M. C. Lopez, *Análisis de deformación tectónica en los piedemontes de las cordilleras Central y Occidental* (pág. 12). Valle del Cauca-Colombia: Universidad EAFIT.
- Lopez, Y. (17 de 08 de 2000). *Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera*. Palmira, Valle: División de Investigaciones de la Universidad. Obtenido de Biblioteca digital Universidad Nacional de Colombia : http://www.bdigital.unal.edu.co/46132/2/9588095050_Part02.PDF
- METALOGRAFÍA – UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.** (15 de 11 de 2020). Obtenido de <https://blog.utp.edu.co/metalografia/diagramas-esfuerzo-deformacion-unitaria-convencional-y-real-para-un-material-ductil-acero-no-de-escala-2/>
- Mitchell , J. (2001). *Perforando sin problemas*. Villa Hermosa, Tabasco, México.: Drillbert engineerong INC.
- Mooney, R. W., Keenan, A. G., & Wood, L. A. (1952). Adsorption of water vapor by montmorillonite. II. Effect of exchangeable ions and lattice swelling as measured by X-Ray diffraction. *Journal of the American Chemical Society*, 74(6), 1371. doi:10.1021/ja01126a002
- Murray, H. H. (2007). *Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing, and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays*. Amsterdam: Elsevier B.V .
- Norrish , K. (1954). The swelling of montmorillonite. *Discussions of the Faraday Society*, 120-134. doi:10.1039/DF9541800120
- Oilfield Glossary . (12 de 03 de 2020). *Oilfield Glossary en Español*. Obtenido de <https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/p/permeability.aspx>
- Oilfield Glossary. (12 de 03 de 2020). *Oilfield Glossary en Español*. Obtenido de <https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/p/porosity.aspx>
- Ortiz Berrocal, L. (2007). *Resistencia de Materiales* . Madrid: McGraw-Hill España.
- Pasko, M. (2013). *Spirol documentos técnicos: Latón o acero inoxidable*. . Danielson: Spirol international corporation. .
- Perez, D. A. (12 de 07 de 2013). *Slideshare*. Obtenido de Slideshare: <https://es.slideshare.net/daramburov/principales-fallas-de-colombia>
- Ramírez Oyangurén , P., & Alejano Monge , L. (2007). *Mecánica de rocas: fundamentos de ingeniería de taludes*. Vigo.
- Ramirez, D., & Gomez, M. (2021). *CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO PARA EVALUAR LA EXPANSIÓN DE LAS ARCILLAS*. Neiva-Huila.
- Sandoval , M. E. (2000). *Diagénesis de areniscas*. Caracas : Universidad Central de Venezuela .
- Santos, C. G. (2019). *Comportamiento Geotecnico de suelos arcillosos compactados respuesta a cargas estáticas y dinámicas*. Madrid: Electrónica.
- Sayson, J. (2014). *Standard Test Method for Expansion index of soils* . International. Schlumberger. (1 de 12 de 2020). *Oilfield Glossary en español*. Obtenido de https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/g/geothermal_gradient
- Schlumberger. (20 de 02 de 2021). *Oilfield Glossary*. Obtenido de https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/terms/o/organophilic_clay

- ESFUERZOS TOTALES Y EFECTIVOS (23 de 11 de 2018). *SUELOS, GEOTECNIA Y PAVIMENTOS*. Obtenido de: <https://ingeotec.blogspot.com/2018/11/esfuerzos-totales-y-efectivos.html#:~:text=El%20esfuerzo%20total%20es%20la,y%20el%20%C3%A1rea%20de%20vac%C3%ADos>.
- Tarbuck , E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson Educación S.A.
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la tierra : Una introducción a la geología física (Capítulos minerales y placas tectónicas)*. España: Pearson Prentice Hall.
- ULMA . (01 de 07 de 2020). *Acero inoxidable: Estas son sus principales propiedades y aplicaciones*. Obtenido de <https://www.ulmaforge.com/noticia/acero-inoxidable-propiedades-y-aplicaciones/>
- Vicente Hidalgo , M. E., & Ruíz Martín , L. (7 de 10 de 2020). *Servidor Web de Minerales*. Obtenido de Clases minerales : http://greco.fmc.cie.uva.es/mineralogia/contenido/clases_miner8_6.html
- Well Control International. (2013). *Well control-Manual del alumno*. Well Control International.
- Zapata , F. (s.f.). *Esfuerzo cortante: cómo se calcula y ejercicios resueltos*. Recuperado el 21 de 11 de 2020, de <https://www.lifeder.com/esfuerzo-cortante/>
- Zhang, Z. Z., & Low, P. F. (1989). Relation between the heat of immersion and the initial water content of Li-, Na-, and K-montmorillonite. *Journal of Colloid and Interface Science*, 461-472. doi:[https://doi.org/10.1016/S0021-9797\(89\)80057-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9797(89)80057-8)