

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN
TRIAxIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS
SOBRE MUESTRAS DE LUTITAS DE POZOS PETROLEROS”**

REALIZADO POR:

VILORIA MARTÍNEZ LAURA DEL VALLE

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

Puerto La Cruz, Agosto de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN
TRIAxIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS
SOBRE MUESTRAS DE LUTITAS DE POZOS PETROLEROS”**

Prof. Ulacio Ivón

Asesor Académico

Firma

Puerto La Cruz, Agosto de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



**“ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN
TRIAxIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS
SOBRE MUESTRAS DE LUTITAS DE POZOS PETROLEROS”**

Prof. Ulacio Ivón
Asesor Académico

Prof. Sosa José
Jurado Principal

Prof. Moreno, Jesús
Jurado Principal

Puerto La Cruz, Agosto de 2009

RESOLUCIÓN

De acuerdo con el reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de Grado son propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual participará al Consejo Universitario”

DEDICATORIA

A mi **Dios**, quien es la fuente de mi fortaleza y valor, quien me guía hacia el éxito...

A **La Ciencia**, quien da respuestas a las preguntas del ser humano, y nutre nuestros conocimientos con los avances de cada día...

Laura Vilorio

AGRADECIMIENTO

Este logro no hubiera sido posible sin la colaboración de:

Gerardo Jaimes, quien generosamente comparte sus conocimientos y experiencia, y es apoyo de esta investigación.

El personal del LFR; en especial Gerardo Jaimes, Neida Moreno y Miguel Medrano.

El personal del Laboratorio Geológico El Chaure; por su receptividad y por brindarme un ambiente armonioso para la creación de esta investigación.

Mi tutora Ivón Ulacio, por su colaboración y apoyo.

Mis padres; Laura Martínez, José Viloría y Juan Mirabal, quienes son mi fuente de inspiración y mi guía por este camino, la vida. Y a los demás integrantes de mi familia.

Mis profesores en especial a José Ríos, por su apoyo incondicional; y a todos mis compañeros de clases, quienes formaron parte de mi aprendizaje durante toda la carrera. Ésta ha sido una experiencia fascinante...

A mi novio Enrique Moy; por su paciencia y comprensión.

A ellos, y a los muchos amigos que me alentaron a la tarea de estos últimos meses, dedico el resultado de lo que es hoy mi tesis.

RESUMEN

Las lutitas son rocas sedimentarias, que poseen baja permeabilidad y son las causantes de aproximadamente el 90% de los problemas relacionados con inestabilidades durante la perforación de pozos petroleros. En este trabajo se estudia la metodología para realizar ensayos de compresión triaxial para la obtención de módulos elásticos en este tipo de roca (lutitas). Estos se utilizan para la estimación de la ventana operacional de lodo para controlar los derrumbes y daños a la formación. En estos ensayos se utilizan las presiones de poros para determinar el esfuerzo efectivo de la roca; para esto se le inyecta un fluido y se calculan los parámetros A y B de Skempton. Se calcularon A y B en el estado transitorio, de igual manera se realizaron ensayos confinados no drenados sobre lutitas, para obtener todos estos valores. Los círculos de Mohr están fuertemente influenciados por la presión de poros, y en este caso por la presión de chaqueta, pues el fluido estuvo situado entre la chaqueta y la superficie de la muestra, no en su interior. Los círculos dibujados para esfuerzos efectivos describen un comportamiento más armónico que los círculos para esfuerzos totales. De los cuales se obtuvo $c' = 14,24$ MPa, $\phi' = 35,86^\circ$ para las lutitas del pozo ZG-349 al promediar los valores para 3 envolventes encontradas. El esfuerzo máximo es mayor para muestras horizontales, lo cual indica que cuando la laminación es paralela a la inyección del fluido la resistencia al esfuerzo cortante aumenta. En ensayos sobre muestras verticales, se observa disminución de la resistencia al aumentar el tiempo rotura durante el ensayo triaxial. A medida que aumenta la profundidad se incrementa el módulo de Young, disminuye la relación de Poisson, aumenta el módulo de rigidez y disminuye el módulo de compresibilidad.

CONTENIDO

| | |
|---|------|
| RESOLUCIÓN | iv |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTO | vi |
| RESUMEN..... | vii |
| CONTENIDO | viii |
| LISTA DE TABLAS | xiii |
| LISTA DE FIGURAS..... | xiv |
| INTRODUCCIÓN | xvii |
| CAPITULO I..... | 19 |
| EL PROBLEMA | 19 |
| 1.1. Ubicación geográfica | 19 |
| 1.2. Generalidades de la Cuenca Oriental de Venezuela | 20 |
| 1.3. Estratigrafía regional..... | 22 |
| 1.3.1. Basamento..... | 23 |
| 1.3.2 Formación hatoviejo..... | 24 |
| 1.3.3. Formación carrizal | 24 |
| 1.3.4. Grupo temblador | 24 |
| 1.3.5. Formación merecure..... | 25 |
| 1.3.6. Formación oficina | 25 |
| 1.3.7. Formación Freites | 27 |
| 1.3.8. Formación las piedras | 27 |
| 1.3.9. Formación mesa | 27 |
| 1.4. Objetivos | 28 |
| 1.4.1. Objetivo general..... | 28 |
| 1.4.2. Objetivos específicos | 28 |
| CAPITULO II | 30 |

| | |
|---|----|
| MARCO TEÓRICO..... | 30 |
| 2.1. Antecedentes | 30 |
| 2.2. Suelos y rocas..... | 32 |
| 2.3. Utilización de los núcleos geológicos | 33 |
| 2.4. Características especiales de los materiales geológicos..... | 33 |
| 2.5. Lutitas..... | 34 |
| 2.6. Preparación de probeta para ensayos triaxiales..... | 35 |
| 2.7. Ensayos mecánicos | 36 |
| 2.7.1. Ensayo de compresión triaxial | 36 |
| 2.8. Elasticidad..... | 36 |
| 2.8.1. Esfuerzo | 37 |
| 2.8.2. Deformación..... | 37 |
| 2.8.3. Curva esfuerzo-deformación..... | 38 |
| 2.9. Porosidad..... | 39 |
| 2.10. Permeabilidad..... | 40 |
| 2.11. Esfuerzos geostáticos | 41 |
| 2.12. Módulos elásticos..... | 42 |
| 2.12.1. Módulo de Young | 42 |
| 2.12.2. Coeficiente de Poisson | 42 |
| 2.12.3. Módulo de rigidez | 43 |
| 2.12.4 Módulo de compresibilidad | 43 |
| 2.13. Esfuerzos principales | 45 |
| 2.14. Circulo de Mohr..... | 45 |
| 2.15. Resistencia al esfuerzo cortante | 48 |
| 2.15.1. Esfuerzo total | 49 |
| 2.15.2. Esfuerzo efectivo..... | 49 |
| 2.15.3. Presión de poros | 49 |
| 2.15.4. Factores que influyen en la resistencia..... | 51 |
| 2.16. Tipos de ensayos triaxial..... | 52 |

| | |
|---|----|
| 2.16.1. Ensayo no consolidado - no drenado (UU)..... | 52 |
| 2.16.2. Ensayo consolidado – no drenado (CU)..... | 53 |
| 2.16.3. Ensayo consolidado - drenado (CD)..... | 55 |
| 2.17. Parámetros de presión de poros | 56 |
| 2.18. Ley de acción y reacción..... | 58 |
| CAPITULO III..... | 60 |
| METODOLOGÍA | 60 |
| 3.1. Revisión bibliográfica | 60 |
| 3.2. Manejo del sistema Autolab2000..... | 60 |
| 3.2.1. Montaje del ensayo | 62 |
| 3.3. Corte, pulido e instrumentación de las probetas | 66 |
| 3.3.1. Corte y pulido de probetas | 67 |
| 3.3.2 Instrumentación de las probetas | 72 |
| 3.4. Ensayo de las probetas | 75 |
| 3.4.1. Ensayo hidrostático | 75 |
| 3.4.2. Ensayo de compresión triaxial | 76 |
| 3.5 Depurado de la data..... | 76 |
| 3.5.1 Procesamiento de la data..... | 77 |
| 3.5.2. Diseño de la hoja de cálculo..... | 80 |
| 3.6. Construcción de graficas | 81 |
| 3.7. Dibujar los círculos de Mohr y envolvente de falla | 82 |
| 3.8. Interpretar los resultados | 82 |
| 3.9. Flujoograma de la metodología empleada | 83 |
| CAPITULO IV..... | 84 |
| HERRAMIENTAS UTILIZADAS..... | 84 |
| 4.1. Equipo AUTOLAB 2000..... | 84 |
| 4.2. Software microsoft excel..... | 85 |
| CAPITULO V..... | 86 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 86 |

| | |
|---|-----|
| 5.1. Ensayos sobre probetas verticales..... | 87 |
| 5.1.1. Probeta 3 | 87 |
| 5.1.1.1. Ensayo hidrostático | 88 |
| 5.1.1.2. Ensayo triaxial..... | 90 |
| 5.1.2. Probeta 4 | 92 |
| 5.1.2.1. Ensayo hidrostático | 92 |
| 5.1.2.2. Ensayo triaxial..... | 93 |
| 5.1.3. Probeta 7 | 93 |
| 5.1.3.1. Ensayo hidrostático | 94 |
| 5.1.3.2. Ensayo triaxial..... | 94 |
| 5.1.4. Probeta 8 | 95 |
| 5.1.4.1. Ensayo hidrostático | 96 |
| 5.1.4.2. Ensayo triaxial..... | 97 |
| 5.1.5. Probeta 9 | 98 |
| 5.1.5.1. Ensayo hidrostático | 98 |
| 5.1.5.2. Ensayo triaxial..... | 99 |
| 5.1.6. Probeta 10 | 100 |
| 5.1.6.1. Ensayo hidrostático | 100 |
| 5.1.6.2. Ensayo triaxial..... | 101 |
| 5.2. Ensayos sobre probetas horizontales..... | 102 |
| 5.2.1. Probeta 1 | 102 |
| 5.2.1.1. Ensayo hidrostático | 103 |
| 5.2.1.2. Ensayo triaxial..... | 104 |
| 5.2.2. Probeta 5 | 105 |
| 5.2.2.1. Ensayo hidrostático | 105 |
| 5.2.3. Probeta 15 | 106 |
| 5.2.3.1. Ensayo hidrostático | 107 |
| 5.3. Resultados | 108 |
| 5.4. Círculos de Mohr y envolventes de falla..... | 109 |

| | |
|--|-----|
| 5.5. Vestido y permeabilidad en las probetas..... | 111 |
| CAPITULO VI..... | 113 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 113 |
| 6.1. Conclusiones | 113 |
| 6.2. Recomendaciones..... | 115 |
| BIBLIOGRAFÍA | 118 |
| APENDICES..... | 120 |
| METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO..... | 125 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 2.1. Constantes elásticas de las rocas, valores máximos y mínimos. Fuente: González L, 2002 | 44 |
| Tabla 2.2. Valores típicos de c y ϕ para roca intacta. Fuente: González L, 2002 | 48 |
| Tabla. 5.1. Ensayos realizados en muestras ZG-349. Fuente: Propia | 86 |
| Tabla 5.1. Resultados de los ensayos. <i>Fuente: Propia.</i> | 108 |
| Tabla 5.2. Valores de c' y ϕ' resultantes. Fuente: Propia. | 110 |
| Tabla 5.3. Materiales utilizados para vestir las probetas. Fuente: Propia | 111 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Ubicación geográfica del campo Zapatos-Mata R. Fuente: PDVSA GAS, 2008..... | 20 |
| Figura. 1.2. Cuencas Petrolíferas de Venezuela. Fuente: SCHLUMBERGER, 1997.21 | |
| Figura. 1.3. Columna estratigráfica de la Cuenca Oriental de Venezuela | 23 |
| Figura 2.1. Núcleos de Yacimientos. Fuente: LFR, 2006..... | 33 |
| Figura 2.2. Dimensiones de la muestra para ensayo triaxial. Fuente: LFR, 2006 | 36 |
| Figura 2.3. a) Deformación axial; b) Deformación radial: Fuente: González L, 2002. | 38 |
| Figura 2.4. Curva Esfuerzo vs Deformación. Fuente: González L, 2002. | 38 |
| Figura 2.5. Deformación axial. Fuente: Jiménez Salas, 1975..... | 39 |
| Figura 2.6. Esfuerzo geostático. Fuente: Propia | 41 |
| Figura 2.7. Esfuerzos principales. Fuente: González L, 2002. | 45 |
| Figura 2.8. Circulo de Mohr. Fuente: González L, 2002. | 46 |
| Figura 2.9. Envolvente de falla. Fuente: González L, 2002..... | 47 |
| Figura 2.10. a) etapa de aplicación de presión hidrostática o confinante; | 50 |
| b) etapa de aplicación del esfuerzo desviador. Fuente: González L, 2002. | 50 |
| Figura 2.11. Circulo de esfuerzos efectivos único. Fuente: Américo Bustamante, 2000 | 54 |
| Figura 2.12. Teoría de poroelasticidad. Fuente: J.C. Jaeger, 2007 | 59 |
| Figura 3.1. Autolab2000 diagrama de conexión. Fuente: NER, 2008. | 61 |
| Figura 3.2. Cámara de ensayo y conexiones de sensores. Fuente: Propia, 2009. | 62 |
| Figura 3.3. Consola hidráulica de presión confinante y presión axial. Fuente: Propia, 2009..... | 63 |
| Figura 3.4. Consola hidráulica para presión de poros. Fuente: Propia. | 64 |
| Figura 3.5. Funcionamiento del sistema de presión de poros. Fuente: Propia..... | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.6. Sensores de presión de poros. Fuente: Propia. | 66 |
| Figura 3.7. Esquema de la cortadora. Fuente: LFR, 2006. | 68 |
| Figura 3.8. Secuencia de pasos de corte de las probetas. Fuente: LFR, 2006. | 69 |
| Figura 3.9. Secuencia de pasos para el pulido de las caras de las probetas. Fuente: LFR, 2006. | 70 |
| Figura 3.10. Esquema de la pulidora. Fuente: LFR, 2006. | 70 |
| Figura 3.11. Esquema del Extensómetro. Fuente: LFR, 2006. | 71 |
| Figura 3.12. Secuencia de pasos para el control de calidad de las probetas. Fuente: LFR, 2006. | 72 |
| Figura 3.13. Secuencia de pasos para la colocación de la chaqueta de cobre en la probeta. Fuente: LFR, 2006. | 74 |
| Figura 3.14. Secuencia de pasos para la colocación los sensores en la probeta. Fuente: LFR, 2006. | 75 |
| Figura 3.15. Data cruda. Fuente: Propia. | 77 |
| Figura 3.16. Data depurada de un ensayo completo. Fuente: Propia. | 78 |
| Figura 3.17. Grafica esfuerzo vs deformación antes de depurar la gráfica. Fuente: Propia. | 79 |
| Figura 3.18. Grafica esfuerzo vs deformación depurada. Fuente: Propia. | 80 |
| Figura 3.19. Hoja de cálculos resultados. Fuente: Propia. | 81 |
| Figura 3.20. Flujograma de la metodología empleada. Fuente: Propia. | 83 |
| Figura 4.1. Equipo Autolab2000. Fuente: Propia. | 84 |
| Figura 4.2. Ventana Microsoft Excel. Fuente: Propia. | 85 |
| Figura 5.1. Laminación de la probeta vertical y dirección del fluido. Fuente: Propia. | 87 |
| Figura 5.2. Presión vs tiempo. Ensayo hidrostático probeta 3. Fuente: Propia. | 89 |
| Figura 5.3. Presión vs tiempo. Etapa 2 ensayo hidrostático probeta 3. Fuente: Propia. | 90 |
| Figura 5.4. Presión vs tiempo. Triaxial probeta 3. Fuente: Propia. | 91 |
| Figura 5.5. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 3. Fuente: Propia. | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.6. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 4. Fuente: Propia. | 92 |
| Figura 5.7. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 4. Fuente: Propia. | 93 |
| Figura 5.8. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 5. Fuente: Propia. | 94 |
| Figura 5.9. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 7. Fuente: Propia. | 95 |
| Figura 5.10. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 8. Fuente: Propia. | 96 |
| Figura 5.11. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 8. Fuente: Propia. | 97 |
| Figura 5.12. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 9. Fuente: Propia. | 98 |
| Figura 5.13. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 9. Fuente: Propia. | 99 |
| Figura 5.14. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 10. Fuente: Propia. | 100 |
| Figura 5.15. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 10. Fuente: Propia. | 101 |
| Figura 5.16. Laminación de la probeta horizontal y dirección del fluido. Fuente: Propia. | 102 |
| Figura 5.17. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 1. Fuente: Propia. | 103 |
| Figura 5.18. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 1. Fuente: Propia. | 104 |
| Figura 5.19. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 5. Fuente: Propia. | 105 |
| Figura 5.20. Deformación vs tiempo. Ensayo probeta 5. Fuente: Propia. | 106 |
| Figura 5.21. Presión vs tiempo. Ensayo muestra 15. Fuente: Propia. | 107 |
| Figura 5.22. Deformación vs tiempo. Ensayo probeta 15. Fuente: Propia. | 108 |
| Figura 5.23. Círculos de Mohr para esfuerzos totales. Fuente: Propia. | 109 |
| Figura 5.24. Círculos de Mohr para esfuerzos efectivos. Fuente: Propia. | 110 |

INTRODUCCIÓN

Las lutitas son rocas sedimentarias, formadas por la consolidación de arcilla, limo o lodo, y se caracterizan por poseer una estructura laminar, baja permeabilidad y una alta sensibilidad a la deshidratación de los fluidos. Constituyen cerca del 75% de las secciones perforadas y causan aproximadamente el 90% de los problemas relacionados con inestabilidades durante la perforación de pozos petroleros, lo cual incrementa significativamente los costos de los mismos. Las pérdidas de tiempo asociadas con éstos, representan alrededor del 15% de los costos de perforación promedio alrededor del mundo. En la actualidad, es de gran importancia para la industria petrolera nacional resolver y manejar los problemas durante la perforación en las lutitas. El objetivo de este trabajo es evaluar la metodología para realizar ensayos mecánicos de compresión triaxial, y conocer su efectividad en la obtención de módulos elásticos en este tipo de roca (lutitas). La obtención de los parámetros mecánicos y de los módulos elásticos se utiliza para la estimación de la ventana operacional de lodo, la cual se calcula a través de diferentes software, utilizando registros de pozos y parámetros mecánicos para controlar los derrumbes y daños a la formación.

La metodología para estos ensayos comúnmente utiliza las presiones de poros para determinar el esfuerzo efectivo soportado por la roca; para esto se inyecta en la roca un fluido durante un periodo continuo de 12 a 24 horas y se calculan los parámetros A y B de Skempton. La instrumentación consiste en “vestir” las muestras con una malla especial y una chaqueta de material impermeable, intentando obtener la saturación. La lutita es un material impermeable, hacerla permeable significa disminuir su resistencia, induciendo micro-fracturas. Los parámetros A y B normalmente son calculados en estado estacionario cuando la presión confinante es constante. Se propone calcular los parámetros A y B en el estado transitorio cuando

ocurre el incremento de los valores de presión, de igual manera ensayos confinados no drenados sobre lutitas, para obtener valores reales de su resistencia y propiedades elásticas.

Esta investigación se desarrolló en LABORATORIO GEOLÓGICO ORIENTE de PDVSA; ubicada en El Chaure, Puerto La Cruz, Estado Anzoátegui.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

Se extrajeron 24'5'' de núcleo del pozo ZG-349 entre las profundidades 12537'2'' y 12561'7'', del campo Zapatos-Mata R, este capítulo contiene información sobre la ubicación del campo y descripción de la cuenca petrolífera a la cual pertenece este pozo y las formaciones que la constituyen.

1.1. Ubicación geográfica

El Campo Zapatos - Mata R, se encuentra ubicado 50 kilómetros al sudeste de la ciudad de Anaco, Estado Anzoátegui. Desde el punto de vista geológico pertenece a la Cuenca Oriental de Venezuela, sub-cuenca Maturín en el Área Mayor de Oficina, la cual estratigráficamente se extiende desde el Cretáceo hasta el Pleistoceno y está constituido por las siguientes Formaciones: Mesa de edad Pleistocena, Las Piedras, Freites, Oficina y Merecure del Terciario y el Grupo Temblador del Cretáceo constituido por las Formaciones Canoa y Tigre.

Geográficamente estos campos se encuentran ubicados entre las coordenadas geográficas 9°12'00'' - 9°20'00'' de latitud Norte y 64°11'00'' - 63°51'00'' de longitud Este y entre las coordenadas UTM, N 1.018.000 - 1.030.000 y E 372.000 - 406.200.

Las primeras formaciones productoras del Área Mayor de Oficina en orden estratigráfico son Merecure y Oficina. Ambas fueron depositadas en ambientes progresivamente transgresivos sobre el Flanco Sur de la Cuenca. El Campo de

Zapatos – Mata R se encuentra en el Área Mayor de Oficina, donde la Formación Oficina supera los 6.000 pies de espesor.



Figura 1.1. Ubicación geográfica del campo Zapatos-Mata R. Fuente: PDVSA GAS, 2008.

El pozo en estudio es ZG-349 y las muestras extraídas para investigación pertenecen a la Formación Oficina.

1.2. Generalidades de la Cuenca Oriental de Venezuela

Es la segunda cuenca petrolífera más importante de Venezuela. La Cuenca Oriental puede definirse como una gran depresión, la cual está ubicada al sur de la Cordillera de la Costa y de la Serranía del Interior, hasta el Escudo Guayanés; hacia el Este se extiende hasta la plataforma continental del Atlántico y en el Oeste hasta el Arco del Baúl. Comprende la sub-cuenca Guárico al Oeste y la sub-cuenca Maturín al Este.

Esta cuenca comprende los estados: Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro y se caracteriza topográficamente, por sus extensas llanuras y una zona de mesetas en Anzoátegui y Monagas. Su superficie es de 120.000 Km² aproximadamente.



Figura. 1.2. Cuencas Petrolíferas de Venezuela. Fuente: SCHLUMBERGER, 1997.

La Cuenca Oriental contiene más de 20.000 pies de sedimentación precretáceos y terciarios, entre las cadenas montañosas terciarias situadas al norte y el escudo Guayanés emplazado al sur, su columna estratigráfica consta casi exclusivamente de areniscas y lutitas con edades que van desde el Cámbrico Inferior al Pleistoceno. La cuenca en su totalidad, mide aproximadamente 200 Km, de ancho en sentido norte-sur, por unos 600 Km, de longitud en sentido este-oeste.

Esta cuenca es la segunda en importancia en Venezuela en cuanto a reservas petrolíferas, precedida solamente por la cuenca del Lago de Maracaibo, Si incluimos las reservas de la Faja Petrolífera del Orinoco y las áreas prospectivas al Norte de Anzoátegui y Monagas sería una de las cuencas de mayores reservas en el mundo. Se caracteriza por las condiciones variables de entrapamiento y calidad del crudo. La producción proviene de arenas que varían en edad desde el Mioceno hasta el Cretáceo.

Las principales trampas están controladas por combinación de factores estructurales y estratigráficos. El flanco norte de la subcuenca de Maturín presenta acuñamiento en la Formación la Pica, asociación con fallas de gran desplazamiento y diapiros de barro. El flanco sur contiene yacimientos múltiples en las Formaciones Oficina y Merecure del Oligoceno-Mioceno, en domos cortados por fallas inversas, cierres contra fallas normales por cambios laterales de permeabilidad, porosidad y litología y por otras fallas y posibles asociaciones erosionales "monadnocks" hacia el extremo sur de la cuenca, en la Faja Petrolífera del Orinoco.

La cuenca es asimétrica con flanco sur de buzamiento suave hacia el norte, hasta que es interceptada por una zona de complejos disturbios tectónicos y plegamientos, que constituye el flanco norte. Toda la cuenca se encuentra inclinada al Nor-Este, hacia Trinidad donde se estima que se pudo haber acumulado 40.000 pies de sedimentos.

1.3. Estratigrafía regional

La estratigrafía regional que enmarca el área de estudio, se extiende desde el basamento cristalino hasta la Formación Mesa. Las Formaciones más antiguas son; Hato Viejo y Carrizal, continuando en orden estratigráfico ascendente las Formaciones Canoa y Tigre del Grupo Temblador, seguidas por un hiatus de aproximadamente 70 millones de años, posteriormente se tienen las Formaciones Merecure, Oficina, Freites y Las Piedras; y se completa la columna estratigráfica, con la Formación Mesa. Las lutitas extraídas para este estudio pertenecen a la Formación Oficina.

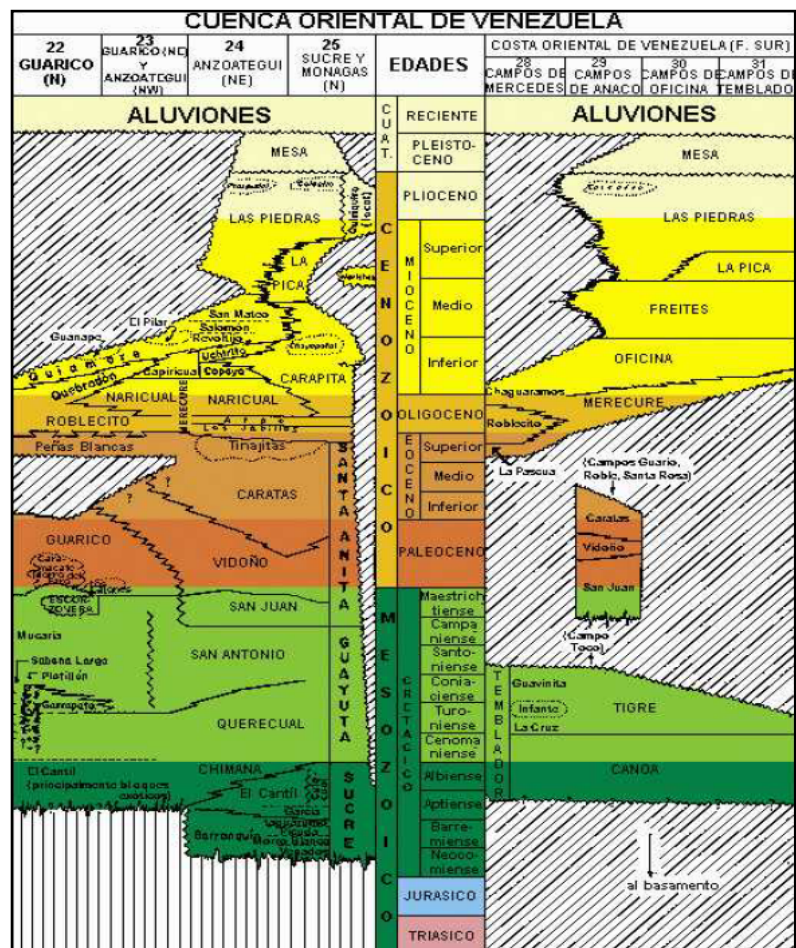


Figura. 1.3. Columna estratigráfica de la Cuenca Oriental de Venezuela.
Fuente: Comité Interfilial de Estratigrafía y Nomenclatura, 1997.

1.3.1. Basamento

La parte basal de esta área, está formada por un conjunto de rocas ígneas-metamórficas del Escudo Guayanés. Este grupo de rocas reúne una muy variada litología, que en general, corresponde a la siguiente: granitos (biotíticos, porfídico), granodiorita, gneiss (granítico, porfídico, granatíferos porfídicos), esquistos (gnéisicos-biotíticos, anfíbolíticos, gnéisicos-granatíferos-biotíticos), diorita cuarcífera, filita cuarcífera, micaesquistos, vetas de cuarzo.

1.3.2 Formación ható viejo

Esta Formación yace discordantemente sobre el basamento, y se encuentra constituida litológicamente por arcosa de grano medio a grueso con algunas láminas de arcillitas verdosas, las arcosas pasan lateralmente a areniscas cuarcíferas y lentes conglomeráticos. En estas predominan los colores grises, a veces con tonos rojizos.

Su extensión va desde la parte Nor-Oriental de los Estados Guárico y Anzoátegui, desaparece al Este de Anzoátegui. Esta Formación es de origen continental, y representa uno de los sedimentos más antiguos pertenecientes al Carbonífero-Devónico.

1.3.3. Formación carrizal

Se encuentra concordantemente sobre la Formación Hato Viejo. Su composición litológica es la de arcillas verdosas, duras, macizas y densas, notablemente homogéneas a pesar de la presencia de intervalos limosos con intercalaciones locales o conglomerados de guijarros. Su extensión abarca los Estados Guárico y Anzoátegui Sur-Occidental, desaparece hacia el Este en Estado Guárico, es relativamente delgada. La Formación Carrizal es de origen marino y al igual que la Formación Hato Viejo representa los sedimentos más antiguos del Carbonífero-Pérmico.

1.3.4. Grupo temblador

Discordantemente sobre la Formación Carrizal se encuentra el Grupo Temblador el cual representa toda la sedimentación cretácica conocida en el subsuelo de Guárico, Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro; se encuentra en contacto discordante sobre el Flanco Norte del Escudo de Guayana. El Grupo Temblador, en esta zona se subdivide en dos Formaciones, denominadas de más antigua a más

joven: La Formación Canoa que es de ambiente continental, con conglomerados de grano fino y areniscas conglomeráticas y la Formación Tigre que es de ambiente marino; interestratificada de areniscas y limonitas finas glauconíticas.

1.3.5. Formación merecure

Los sedimentos marinos del Oligoceno_Mioceno Inferior de la Formación Merecure, suprayacen al Grupo Temblador, caracterizándose por abundantes areniscas de macizas, duras, ásperas, de grano fino a grueso, intercaladas con capas más delgadas de lutitas carbonáceas duras, arcillitas y limonitas.

La localidad tipo se encuentra en el área de Santa Ana de Anaco, la cual fue penetrada por la perforación de pozos en el área, su extensión geográfica comprende el Área Mayor de Anaco, Área Mayor de Oficina con extensión provisional al área de Temblador, Estados Anzoátegui y Monagas.

Los fósiles característicos de esta Formación son foraminíferos arenáceos y abundantes restos de plantas, lo que sugiere un ambiente de sedimentación en aguas dulces a salobres.

El Grupo Merecure es equivalente a las Formaciones Naricual, Areo y Jabillos del Norte de la Cuenca Oriental. Hacia el sur, la Formación Areo desaparece por acuñaamiento y no hay separación entre areniscas de la Formación Los Jabillos y Naricual.

1.3.6. Formación oficina

Concordante y suprayacente a los sedimentos de la Formación Merecure, la Formación Oficina está presente en el sub-suelo de todo el Flanco Sur de los Estados

Anzoátegui y Monagas. Su litología característica consiste de una alternancia monótona de arenas y lutitas parálicas, con abundantes lignitos de muy poco espesor pero de gran extensión lateral. Individualmente las areniscas son lenticulares, pero los paquetes de arenisca se extienden a grandes distancias, facilitando la correlación a través de la Cuenca. El ambiente de sedimentación corresponde a un complejo fluviodeltaico de grandes dimensiones.

La Formación Oficina se hace más espesa y menos arenosa por lo general hacia el norte, en las Áreas Mayores de Oficina y Anaco. Debido a que el Escudo Guayanés ubicado al sur de la Cuenca Oriental de Venezuela es probablemente la fuente de las areniscas de la Formación Oficina, es de esperarse una secuencia de ambientes desde fluvial al sur, pasando por deltaico o marino somero, a marino abierto de plataforma externa, al norte. La concentración de areniscas individuales Este-Oeste en la Faja Petrolífera del Orinoco, justo al norte del escudo Guayanés, representa probablemente depósitos formados en un ambiente fluvial. La gran estabilidad de los ambientes de sedimentación marinos abiertos de la plataforma externa, aparece indicada por las lutitas de Roblecito, Areo y Carapita del lado norte del Área Mayor de Oficina, donde conforman un arco de centros de depósitos o depocentros.

Desde el punto de vista de generación de hidrocarburos, la Formación Oficina es muy importante en la Cuenca Oriental de Venezuela. De hecho son de Oficina las principales arenas que producen desde la Faja Petrolífera del Orinoco hasta los campos próximos al eje de la Cuenca. Por otra parte, las lutitas de Oficina han sido consideradas por varios autores como rocas madres del petróleo para las arenas de esa misma formación. El Área de Oficina tiene alrededor de 120 arenas diferentes con espesor variables entre 3 pies y 90 pies, algunas de ellas se extienden como verdaderos mantos por kilómetros cuadrados; otras son arenas de canal, situada preferentemente en la parte media de la Formación y se extienden por distancias considerables.

La Formación de Oficina en el Norte del Área Mayor de Oficina y Monagas Central ha sido dividida en tres intervalos que son Oficina Superior, Media e Inferior y la nomenclatura correspondiente para las arenas en dichos intervalos se inicia desde A-O en el tope de Oficina hasta U-1L en la parte basal de la misma.

Su localidad tipo se consigue en la ciudad del El tigre, al Sur del Estado Anzoátegui, descubierta por el pozo Oficina N°1.

1.3.7. Formación Freites

Ésta se encuentra en forma concordante y suprayacente con la Formación Oficina. Se encuentran depósitos de sedimentos marinos de Mioceno Superior, pertenecientes a la Formación Freites. La litología en estos sedimentos corresponde a arcillitas verdes, con areniscas cerca de la base, a diferencia de la parte media y mayor de la unidad esencialmente lutítica. Esta Formación se extiende en el sub-suelo de la provincia del Flanco Sur de la Cuenca de Maturín.

1.3.8. Formación las piedras

Se encuentra transicional sobre la Formación Freites. La Formación Las Piedras, de edad Mioceno Superior-Plioceno, se caracteriza litológicamente por areniscas y lutitas más o menos carbonosas, lutitas arcillitas y lignitos. Ésta aflora en la mayor parte de los Estados Anzoátegui y Monagas, en el subsuelo se extiende a pedernales en el Estado Delta Amacuro y por debajo del Golfo de Paria, Estado Sucre.

1.3.9. Formación mesa

La Formación Mesa se encuentra discordante y suprayacente a la Formación Las Piedras. Está formada por depósitos fluvio-deltaicos de Pleistoceno, que

consisten en depósitos planos con conglomerados que llega a ser peñones a lo largo del frente de montañas, pero de textura más fina en los flancos, areniscas, limos y arcillas consolidadas. Esta formación se presenta en los llanos Orientales del Guárico, Anzoátegui, Monagas y Sucre. Se presume gradacional hacia el Este a las capas arcillosas de la Formación Paria y equivalente a la serie.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la metodología de ensayo de compresión triaxial para la determinación de módulos elásticos sobre muestras de lutitas de pozos petroleros.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Adquirir conocimientos sobre el uso del sistema de software y hardware AutoLab2000 para la obtención de data proveniente de ensayos mecánicos en rocas.
2. Realizar la preparación de las muestras de lutitas.
3. Ensayar las muestras a diferentes presiones de confinamiento controlando los parámetros A y B de presión de poros.
4. Organizar la data obtenida de los ensayos.
5. Obtener la curva esfuerzo vs deformación para cada muestra, para el cálculo de los módulos de Young, Relación de Poisson, módulo de rigidez, resistencia al esfuerzo cortante para cada muestra.

6. Graficar los círculos de Mohr y envolvente de falla para los de ensayos.
7. Interpretar los resultados obtenidos de los ensayos sobre muestras de lutitas a diferentes profundidades.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

Este capítulo contiene todas las bases teóricas que fueron tomadas en cuenta para la realización de esta investigación. Comienza con los conceptos necesarios de materiales geológicos, siguiendo con la teoría de elasticidad y los módulos elásticos, hasta llegar a los ensayos de compresión triaxial y las teorías de falla utilizadas; finalizando con los parámetros de presión de poros de Skempton.

2.1. Antecedentes

Jaimes et al, realizaron un trabajo donde analizaron el comportamiento geomecánico y acústico de muestras lutíticas de la Formación Pagüey y Formación Navay; con la finalidad de obtener propiedades mecánicas y parámetros elásticos de estas rocas en la sub-cuenca Barinas. Como resultado obtuvieron que las lutitas de Formación Pagüey, presentan una baja anisotropía (10-15%), módulo de Young en un rango de 11-22 Gpa y relación de Poisson en un rango de 0.25-0.44, con un comportamiento frágil-dúctil, con deformaciones elásticas y plásticas no recuperables. Para las lutitas del Miembro de la Formación Navay la anisotropía de las muestras es mayor, comprendiendo un rango entre 20-30%, el módulo de Young está entre 25-50 Gpa, haciéndolas mas resistentes las deformaciones elásticas. Dibujaron los círculos de Mohr los que describen una envolvente de falla de pendiente negativa y presumen que esto esta asociado a las presiones de poros. [1]

Blundun et al, realizaron el estudio mecánico para la definición de la ventana operacional de densidades de lodo, para la perforación de los hoyos intermedio y de producción, mediante la evaluación de las propiedades mecánicas de las rocas, la

determinación de la magnitud y orientación del campo de esfuerzos en sitio y la cuantificación de las densidades de lodo críticas, mediante el uso de particulares criterios de resistencia. Definieron que los principales problemas que afectan ambos campos son los severos problemas de estabilidad en el hoyo intermedio, por la existencia de extensas secciones de lutitas presurizadas, que dan lugar a problemas de colapso de revestidores e inestabilidad de las paredes del hoyo durante la perforación, la cual se manifiesta con severos problemas de arrastres, apoyos, pegas de tuberías y hasta la pérdida de sartas de perforación y del hoyo mismo. Otro problema es la presencia de numerosas intercalaciones lutíticas en la sección productora que dan lugar a problemas de inestabilidad de hoyo, también asociados al colapso de las paredes, que se traducen en problemas de cementación comprometiendo el aislamiento de zonas de agua. [2]

Moreno, Cita: “el trabajo presentado por Bockh 2001, titulado “Aplicaciones Geomecánicas en la Estabilidad del Hoyo durante la Perforación de Lutitas en los Campos Borburata y Bejucal”, este autor estimó la ventana operacional óptima del peso del lodo, mediante la aplicación de la Geomecánica, para poder perforar la Formación Pagüey en los campos Borburata y Bejucal, disminuyendo de manera significativa los problemas de estabilidad de hoyo. Realizó un análisis de sensibilidad variando los parámetros más importantes de mecánica de rocas como fueron estado de esfuerzo, resistencia al corte de la roca, resistencia a la tensión, ángulo de fricción interna entre los granos, la relación de Poisson y la presión de poros”. [3]

Sánchez et al, propusieron una metodología de selección de parámetros óptimos de perforación de formaciones lutíticas para estabilidad de hoyo. Entre esta metodología está la realización de ensayos geomecánicos los cuales se deben diseñar previamente de acuerdo a las condiciones "in situ": profundidad, esfuerzos, presión de poro. El tiempo de desarrollo de estos ensayos depende de la permeabilidad de la lutita. Las lutitas de baja permeabilidad requieren mucho más tiempo en restaurar y

homogeneizar la presión de poro. Entre los ensayos de caracterización geomecánica se encuentran los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial y triaxial (no drenados), ensayos acústicos, ensayos de resistencia a la tracción. También publicaron resultados de ensayos de compresión triaxial realizados a muestras de lutitas. Obtuvieron las propiedades elásticas para muestras verticales; Módulo de Young de aproximadamente 1×10^6 lpc, una relación de Poisson de 0,08 y una resistencia a la compresión UCS de un valor aproximado a 5200 lpc. [4]

Rodríguez et al, Manifiestan que en la actualidad existe un interés particular en resolver o minimizar los problemas de perforación asociados a formaciones que están constituidas por lutitas, especialmente los relacionados a la interacción de la lutita con el fluido de perforación y a los relacionados al comportamiento mecánico de las rocas. Para resolver estos problemas es necesario caracterizar muestras de lutitas a escala de laboratorio. En un proyecto de exploración y producción la selección del lodo juega un rol muy importante tanto técnicamente como económicamente. Los problemas derivados de una selección inadecuada del peso o la composición del fluido de perforación son varios: inestabilidad de las paredes del hoyo (apertura o colapso del hoyo), pega de tubería, incremento del torque y arrastre, excesiva pérdida de tiempo en repasos, daño a la formación con reducción del desempeño del yacimiento y en el caso más crítico pérdida parcial o total del hoyo. Un revisión exhaustiva de la literatura muestra que en las secciones donde el material rocoso esta conformado por lutitas se han identificado el mayor porcentaje de problemas de perforación y que estos a su vez están asociados a la composición del fluido y su influencia sobre el material lutítico. Ellos diseñaron y adaptaron un recipiente contenedor de fluidos al banco de prueba del sistema TSI para mantener las muestras sumergidas, evitar la deshidratación para poder ensayar lutitas. [5]

2.2. Suelos y rocas

Los materiales geológicos pueden ser divididos en rocas y suelos. Los suelos son aglomerados relativamente sueltos compuestos de minerales, materiales orgánicos y sedimentos que se encuentran sobre la roca madre. Las rocas son materiales geológicos con fuerzas moleculares entre sí, que le confieren a los granos minerales una resistencia interna considerable. La diferencia entre ellos está relacionada con la resistencia intrínseca del material. [6]

2.3. Utilización de los núcleos geológicos

Resulta necesario obtener núcleos geológicos de las zonas de interés para poder realizar ensayos. Estos tienen que ser tomados con técnicas que minimicen la perturbación. Deben estar orientados para realizar ensayos de laboratorio que determinen las direcciones de esfuerzos principales.



Figura 2.1. Núcleos de Yacimientos. Fuente: LFR, 2006

2.4. Características especiales de los materiales geológicos

- Son diferentes en cada localidad. No existe un material geológico de propiedades constantes para una zona.
- El comportamiento de los materiales geológicos depende de presión, tiempo y condiciones ambientales.
- Su historia geológica afecta su comportamiento futuro.
- Sólo puede ser evaluada en base de pequeñas muestras obtenidas en localidades puntuales.
- Debido a las grandes profundidades, resulta difícil y costoso obtener información de las características de la roca.
- Son sensibles a la perturbación por las operaciones de muestreo y por lo tanto las propiedades mecánicas medidas en el laboratorio pueden no ser representativas del comportamiento en el sitio.
- No poseen una relación esfuerzo-deformación única y lineal. Un mismo material presentará diferencias a diferentes presiones confinantes. Por lo tanto es de comportamiento anisotrópico.[6]

2.5. Lutitas

Son rocas que contienen cantidades importantes de arcilla por lo que su permeabilidad es muy baja, casi nula. Las lutitas son uno de los materiales más complejos, son rocas sedimentarias anisotrópicas por excelencia, las cuales por su estructura laminar presentan importantes variaciones de sus propiedades elásticas según la dirección de la misma. De acuerdo con el grado de solidificación las lutitas varían en su comportamiento. La mayoría presentan una resistencia al cortante de mediana a baja. Las lutitas pueden ser arcillosas, limosas, arenosas o calcáreas de acuerdo a los tamaños y composición de las partículas. En ocasiones tienen una presencia de roca cementada y en otras el de un suelo con capas relativamente sueltas.

Algunas lutitas tienen resistencia alta, pero otras se comportan más como suelos que como rocas y presentan con frecuencia problemas de deslizamiento. Se consideran un material muy inestable en zonas tropicales, debido a que se meteorizan fácilmente y las arcillas producto de esta descomposición poseen ángulos de fricción bajos.

2.6. Preparación de probeta para ensayos triaxiales

Se utilizan cilindros de 1" o 1 ½ " extraídos de la roca con técnicas que minimicen las perturbaciones. Las caras tienen que estar paralelas, para no introducir momentos flectores ajenos. La longitud debe ser igual o mayor a dos veces el diámetro. Algunos tipos de roca como las lutitas son muy sensibles a la deshidratación de los fluidos naturales en los poros; por lo que se debe evitar ciclos de secado durante la preparación de la muestra.

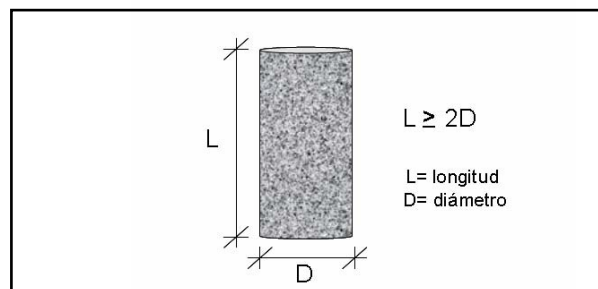


Figura 2.2. Dimensiones de la muestra para ensayo triaxial. Fuente: LFR, 2006.

2.7. Ensayos mecánicos

El conocimiento de las propiedades mecánicas de las rocas de formación constituye el primer paso en un análisis geomecánico. Las propiedades mecánicas de interés se dividen en aquellas que miden resistencia, las que miden direcciones de esfuerzos o deformaciones y las que miden comportamiento esfuerzo-deformación. Generalmente existe un tipo de ensayo para medir una propiedad en particular. El ensayo triaxial, sirve para medir la resistencia al corte y el comportamiento esfuerzo-deformación de una muestra de suelo, a una presión confinante. [6]

2.7.1. Ensayo de compresión triaxial

El ensayo más útil en el estudio de las propiedades mecánicas de las rocas es el de compresión triaxial. Un sistema de ensayo triaxial es conformado por una probeta de roca sometida a una presión confinante, aplicada por un fluido, que representa las condiciones in-situ y a su vez se le aplica una carga vertical. Varias relaciones entre las propiedades mecánicas de la roca y el grado de confinamiento son obtenidas al realizar una serie de ensayos utilizando diferentes condiciones de confinamiento.

2.8. Elasticidad

Cuando se aplica una fuerza sobre la superficie de un cuerpo, su tamaño y forma cambian. A estas fuerzas externas se oponen las fuerzas internas, las cuales se resisten al cambio de forma y volumen. Dando como resultado que el cuerpo tienda a retornar a su estado original cuando las fuerzas externas son removidas. Esta propiedad de resistencia al cambio se llama elasticidad.

2.8.1. Esfuerzo

Es definido como la fuerza por unidad de área. Entonces cuando una fuerza es aplicada sobre un cuerpo varía de un punto a otro el esfuerzo también varía. Si la fuerza es perpendicular al área, el esfuerzo es llamado esfuerzo normal (σ). Si la fuerza es tangencial al elemento de área, el esfuerzo es llamado esfuerzo cortante o tangencial (τ). El esfuerzo se calcula según la base de las dimensiones de la sección transversal de una pieza antes de la aplicación de la carga.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{ecuación (2.1.)}$$

Donde σ es el esfuerzo, F es la carga aplicada y A la sección normal (transversal) a la aplicación de la carga.

2.8.2. Deformación

Es la relación que existe entre la nueva forma de un elemento y su configuración original, cuando es sometido a fuerzas externas. [5]

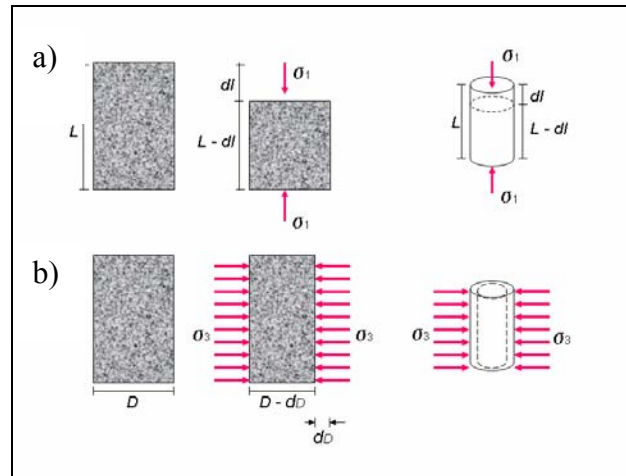


Figura 2.3. a) Deformación axial; b) Deformación radial: Fuente: González L, 2002.

2.8.3. Curva esfuerzo-deformación

Cuando se somete una probeta de roca a una carga axial, esta se deformará; mientras más alto sea el nivel de esfuerzo mayor será la deformación que experimentará la roca. En un ensayo durante la etapa inicial de carga, ocurre el cierre de microfisuras preexistentes en la muestra, esto es una marca de la historia de esfuerzos soportados por la muestra de roca durante el pasado geológico.

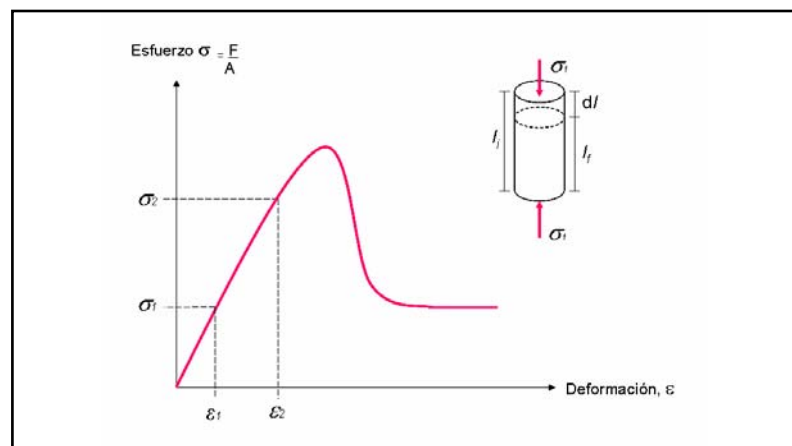


Figura 2.4. Curva Esfuerzo vs Deformación. Fuente: González L, 2002.

A medida que se incrementa la carga (Figura 2.4), la curva esfuerzo-deformación se hace lineal, en ese segmento se considera que existe el coeficiente de proporcionalidad, E , llamado módulo de Young. Muchas rocas exhiben tal comportamiento a través de un rango de carga sustancial.

Cuando el proceso de carga se produce más allá del segmento lineal, ocurrirá un daño irreversible unido a grandes deformaciones. Una vez que se empieza la descarga, la muestra de roca va a exhibir una deformación permanente y el camino de descarga va a ser distinto del camino de carga. La diferencia corresponde a la energía disipada por procesos irreversibles como la creación de nuevas microfisuras.

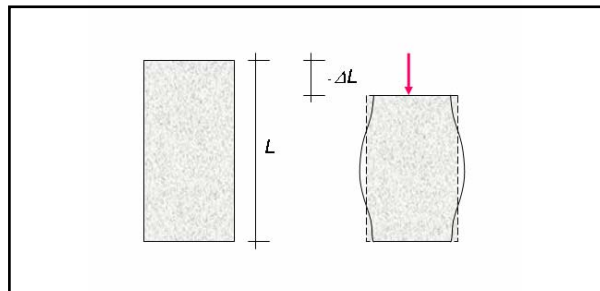


Figura 2.5. Deformación axial. Fuente: Jiménez Salas, 1975.

En la probeta las deformaciones ocurren en todas las direcciones (Figura 2.5). Cuando una probeta de roca es comprimida en una dirección, no solo se hará más corta en la dirección de la carga, sino que también se expandirá en la dirección lateral.

2.9. Porosidad

Es la relación del volumen de poros de la roca entre el volumen total, y define la capacidad de ésta de almacenar una cantidad de fluido. Se expresa como el porcentaje de volumen de poros respecto al volumen total de la roca. Y se puede calcular de la siguiente ecuación;

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 \quad \text{Ecuación (2.2.)}$$

Donde n es la porosidad, V es el volumen total; V_v el volumen de poros y V_s es el volumen de sólidos [6]

2.10. Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura macroscópica interna. Un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable. Para ser permeable, un material debe ser poroso, y los poros deben estar interconectados para que el fluido pueda pasar a través del material.

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

- la porosidad del material;
- la densidad del fluido;
- la presión a que está sometido el fluido.

Cuando se le aplica instantáneamente una carga a una roca porosa, el medio va a reaccionar como si estuviera no drenado y se comportara de una forma tiesa. Pero si la tasa de presión es lo suficientemente lenta para que la roca tenga un tiempo amplio para drenar, la roca se suavizara ocurriendo así una deformación.

2.11. Esfuerzos geostáticos

Los esfuerzos en el interior de un suelo son producidos por las cargas exteriores aplicadas al mismo y también por el peso del propio suelo. [6]

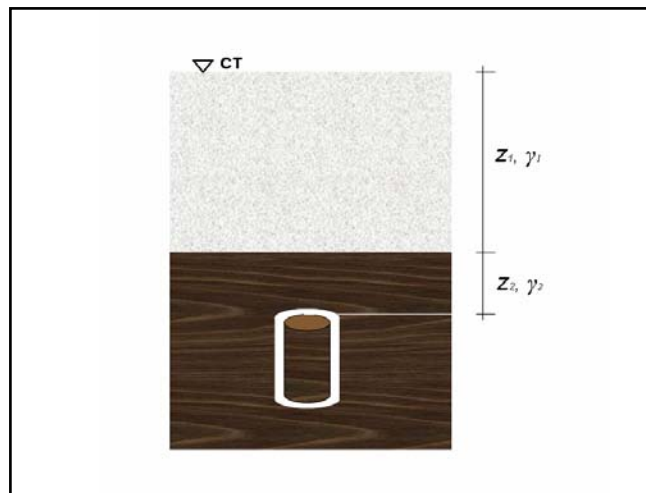


Figura 2.6. Esfuerzo geostático. Fuente: Propia.

El esfuerzo vertical geostático a cualquier profundidad puede calcularse simplemente considerando el peso del suelo por encima de dicha profundidad. [6]

$$\sigma_v = z\gamma \quad \text{ecuación (2.3.)}$$

Donde z es la profundidad y γ es el peso unitario total del suelo. En este caso, el esfuerzo vertical variará linealmente con la profundidad. Por supuesto el peso unitario no es constante con la profundidad. Generalmente un suelo resultará cada vez más compacto al aumentar la profundidad debido a la compresión originada por los esfuerzos geostáticos. [6]

2.12. Módulos elásticos

2.12.1. Módulo de Young

Define la relación lineal elástica entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida en la dirección de aplicación del esfuerzo. Definido por la siguiente ecuación;

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Ecuación (2.4.)}$$

Donde E es el módulo de Young, $\Delta\sigma$ es la variación de esfuerzo y $\Delta\varepsilon$ es la variación de deformación.

Al calcular el módulo de Young, se toman dos puntos tomados de la curva esfuerzo-deformación, correspondientes al dominio elástico (Figura 2.1), los cuales se relacionan en la siguiente formula;

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad \text{Ecuación (2.5.)}$$

2.12.2. Coeficiente de Poisson

Es la relación entre la deformación axial y la radial, también se obtiene a partir de la curva esfuerzo-deformación, calculando la deformación radial y axial. La mayor parte de los materiales en la ingeniería rondan entre 0,0 y 0,5.

$$\nu = \frac{\mathcal{E}_{radial}}{\mathcal{E}_{axial}} \quad \text{ecuación (2.6.)}$$

2.12.3. Módulo de rigidez

Representa la resistencia de un cuerpo a ser deformado y se define por la siguiente ecuación:

$$G = \frac{E}{1 + \nu} \quad \text{Ecuación (2.7.)}$$

Donde G es el módulo de rigidez; E el módulo de Young y ν el coeficiente de Poisson.

2.12.4 Módulo de compresibilidad

Es una medida de la resistencia de los materiales elásticos a la compresión hidrostática. Si un cuerpo está sometido a esfuerzos de compresión en todas las direcciones, su volumen disminuirá de una forma isotrópica. El modulo de compresibilidad es la relación entre el cambio unitario de volumen y la presión confinante.

$$K = \frac{V_f - V_0}{\sigma_3} \quad \text{Ecuación (2.8.)}$$

Donde K es el módulo de compresibilidad; V_f es el volumen final; V_0 es el volumen inicial y σ_3 la presión confinante.

Tabla 2.1. Constantes elásticas de las rocas, valores máximos y mínimos. Fuente: González L, 2002

| Roca intacta | Módulo de Young estático, E Kg/cm² (x10⁵) | Coefficiente de Poisson, ν |
|---------------------|---|--|
| Andesita | 3,0-4,0 | 0,23-0,32 |
| Anfibolita | 1,3-9,2 | |
| Anhidrita | 0,15-7,6 | |
| Arenisca | 0,3-6,1 | 0,1-0,4 |
| Basalto | 3,2-10 | 0,19-0,38 |
| Caliza | 1,5-9,0 | 0,12-0,33 |
| Cuarcita | 2,2-10 | 0,08-0,24 |
| Diabasa | 6,9-9,6 | 0,28 |
| Diorita | 0,2-1,7 | |
| Dolomía | 0,4-5,1 | 0,29-0,34 |
| Gabro | 1-6,5 | 0,12-0,20 |
| Gneiss | 1,7-8,1 | 0,08-0,40 |
| Esquisto | 0,6-3,9 | 0,01-0,31 |

Tabla 2.1. Constantes elásticas de las rocas, valores máximos y mínimos. Fuente: González L, 2002 (Continuación)

| | | |
|--------------|---------|-----------|
| Granito | 1,7-7,7 | 0,1-0,4 |
| Grauvaca | 4,7-6,3 | |
| Limonita | 5,3-7,5 | 0,25 |
| Lutita | 0,3-2,2 | 0,25-0,29 |
| Marga | 0,4-3,4 | |
| Mármol | 2,8-7,2 | 0,1-0,4 |
| Micaesquisto | 0,1-2,0 | |
| Pizarra | 0,5-3,0 | |
| Sal | 0,5-2,0 | 0,22 |
| Toba | 0,3-7,6 | 0,24-0,29 |
| Yeso | 1,5-3,6 | |

2.13. Esfuerzos principales

En cualquier punto sometido a esfuerzos existen tres planos perpendiculares entre sí en los cuales los esfuerzos tangenciales son nulos. Los esfuerzos normales que actúan sobre estos tres planos se denominan esfuerzos principales. El más grande de estos tres esfuerzos principales se denomina esfuerzo principal mayor σ_1 , el más pequeño se denomina esfuerzo principal menor σ_3 y el tercero es el esfuerzo principal intermedio σ_2 . [6]

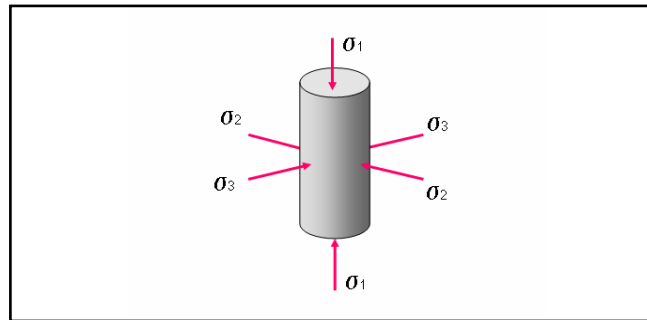


Figura 2.7. Esfuerzos principales. Fuente: González L, 2002.

2.14. Círculo de Mohr

Se trabaja solamente con dos esfuerzos principales, el mayor σ_1 y el menor σ_3 , porque el modelo físico trabaja con un estado de esfuerzos y deformaciones plano continuo. Dada la magnitud y dirección de σ_1 y σ_3 , se pueden calcular los esfuerzos normales y tangenciales en cualquier otra dirección mediante ecuaciones específicas. Estas ecuaciones, que proporcionan una descripción completa del estado de esfuerzos, corresponden a un círculo. Esta representación gráfica del estado de esfuerzos se conoce como Círculo de Mohr y tiene una gran importancia en la mecánica de suelos y rocas. [6]

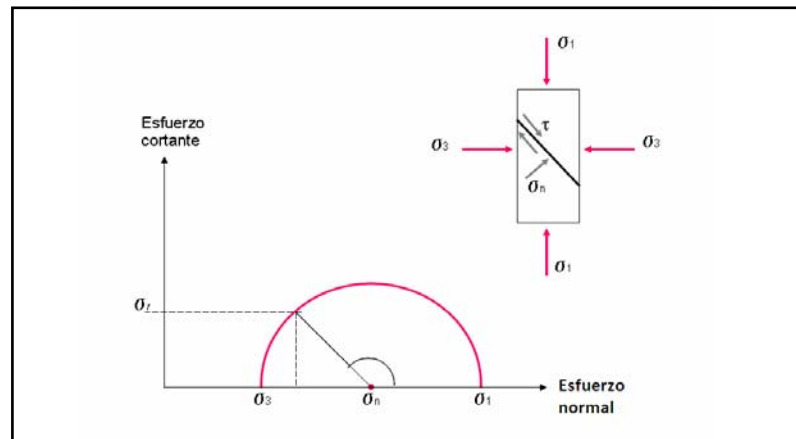


Figura 2.8. Círculo de Mohr. Fuente: González L, 2002.

El esfuerzo tangencial máximo en un punto, $\tau_{máx}$ es siempre igual a $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$; equivale al radio del círculo de Mohr. Este esfuerzo tangencial máximo se produce en planos que forman $\pm 45^\circ$ con la dirección del esfuerzo principal mayor. [6]

La línea sobre estos círculos es la envolvente de falla, esta representa límites de resistencia mecánica para el material. Que tiene las siguientes implicaciones:

Los esfuerzos por debajo de la envolvente son estables.

Los esfuerzos por encima de la envolvente no existen, ya que el material ha fallado.

El círculo de Mohr tangente a la envolvente ha alcanzado la resistencia máxima en un determinado plano. [6]

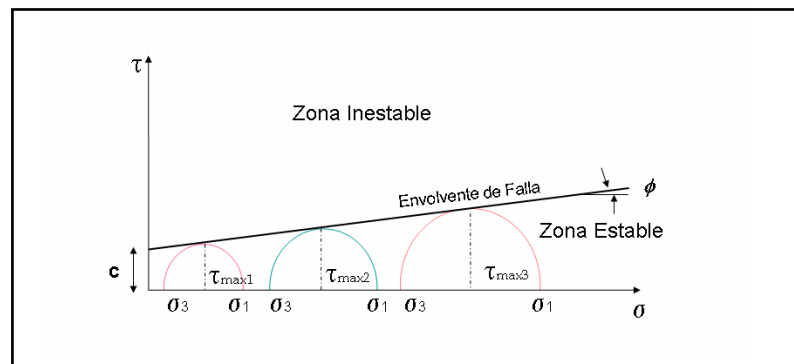


Figura 2.9. Envoltorio de falla. Fuente: González L, 2002.

Esta envoltorio es una curva para un rango grande de presiones. Esta envoltorio de falla se hace lineal para utilizar la ley Mohr-Coulomb que se puede escribir de la siguiente manera:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad \text{ecuación. (2.9.)}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, σ es el esfuerzo normal al plano de falla, ϕ es el ángulo de fricción del suelo y c es la cohesión del suelo.

El carácter friccional del material geológico hace que la falla no esté ocurriendo en el plano de 45° con respecto a la horizontal donde ocurren los mayores esfuerzos, sino que ocurre en otro plano $45^\circ + \phi/2$ a menor esfuerzo. [6]

Tabla 2.2. Valores típicos de c y ϕ para roca intacta. Fuente: González L, 2002

| Roca | Cohesión, c (kp/cm ²) | Ángulo de fricción, ϕ (grados) |
|----------|-------------------------------------|--|
| Andesita | 280 | 45 |
| Arenisca | 80-350 | 30-50 |
| Basalto | 200-600 | 48-55 |
| Caliza | 50-400 | 35-50 |
| Cuarcita | 250-700 | 40-55 |
| Diabasa | 900-1.200 | 40-50 |
| Diorita | 150 | 50-55 |
| Dolomía | 220-600 | 25-35 |
| Gabro | 300 | 35 |
| Gneiss | 150-400 | 30-40 |
| Esquisto | 250 | 25-30 |
| Granito | 150-500 | 45-58 |
| Grauvaca | 60-100 | 45-50 |
| Lutita | 30-350 | 40-60 |
| Mármol | 150-350 | 35-45 |
| Pizarra | 100-500 | 40-55 |
| Toba | 7 | - |
| Yeso | - | 30 |

2.15. Resistencia al esfuerzo cortante

La primera hipótesis sobre la resistencia al corte de un suelo fue presentada por Coulomb en 1773 como;

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad \text{ecuación. (2.10.)}$$

Esta ecuación fue modificada cuando Terzaghi publicó el principio de esfuerzos efectivos.

$$\sigma = \sigma' + u \quad \text{ecuación. (2.11.)}$$

Donde σ es el esfuerzo total, σ' es el esfuerzo efectivo y u es la presión de poros.

Para el estudio de resistencia al esfuerzo cortante de una roca es esencial tener, en primer lugar, ideas claras respecto a lo que es esfuerzo total, presión de poros y esfuerzo efectivo.

2.15.1. Esfuerzo total

En una roca es la fuerza total por unidad de área que actúa sobre un plano. El esfuerzo total tendrá una componente normal y una componente tangencial. Las rocas saturadas suelen estar formadas por dos elementos: partículas sólidas y agua. Al someter un suelo saturado a un estado de esfuerzos, estos son absorbidos en diferente proporción por cada uno de estos elementos. [7]

2.15.2. Esfuerzo efectivo

Es la parte de esfuerzos tomada por el esqueleto sólido, es decir, es la presión que determina la resistencia al esfuerzo cortante, o la deformación de un suelo. Esta presión también tendrá componentes normal y tangencial. [7]

2.15.3. Presión de poros

Es la parte de esfuerzos absorbidos por el agua; como el agua no puede soportar esfuerzos cortantes, la presión de poros sólo tendrá componente normal. [7]

La porción que es absorbida por cada una de las partes depende de una serie de circunstancias tales como tipo de suelo, velocidad y tiempo de aplicación de la carga con relación a la permeabilidad del mismo, su historia de cargas, etc. [7]

Tomando en cuenta este principio de esfuerzos efectivos, la ecuación de Coulomb quedó de la siguiente manera;

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad \text{Ecuación. (2.12.)}$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad \text{ecuación . (2.13.)}$$

En la cual los parámetros c' y ϕ' son propiedades del esqueleto de suelo, denominadas cohesión efectiva y ángulo de fricción efectiva, respectivamente. [8]

Si la resistencia al corte depende de los esfuerzos efectivos, los análisis se harán entonces en términos de esfuerzos efectivos. Sin embargo, en ciertas circunstancias el análisis puede hacerse en términos de esfuerzos totales. [8]

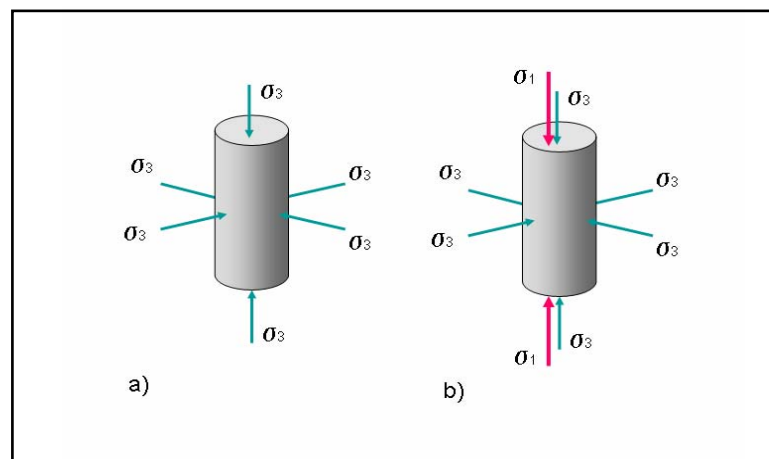


Figura 2.10. a) etapa de aplicación de presión hidrostática o confinante; b) etapa de aplicación del esfuerzo desviador. Fuente: González L, 2002.

Bajo las condiciones del ensayo triaxial, el esfuerzo principal mayor σ_1 es el esfuerzo axial, y los esfuerzos principales, intermedio y menor, σ_2 y σ_3 , son iguales a la presión de cámara. En la figura 2.10. σ_1 actúa no sólo en la superficie vertical de la muestra, sino también en sus bases. Por tanto, si en cualquier etapa del ensayo de corte la carga del pistón vertical es F y la sección transversal de la muestra es A , entonces:

$$\sigma_1 = \frac{F}{A} + \sigma_3 \quad \text{ecuación. (2.14.)}$$

Donde;

$$\frac{F}{A} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{ecuación. (2.15.)}$$

El esfuerzo F/A que aplica el pistón es por tanto igual a la diferencia entre los esfuerzos totales principales, mayor y menor, $\sigma_1 - \sigma_3$, el cual se denomina esfuerzo desviador. [8]

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{ecuación. (2.16.)}$$

2.15.4. Factores que influyen en la resistencia

La resistencia al corte no solo está influenciada por la presión confinante sino también por la porosidad.

Otro factor es el esfuerzo principal intermedio ya que el ángulo de fricción es directamente proporcional a su magnitud. Otros parámetros de importancia son

aquellos que involucran la composición, tales como tamaño de grano, distribución granulométrica, angulosidad de partículas y tipo de mineral. [6]

En el laboratorio la resistencia al esfuerzo cortante está fuertemente influenciado por:

- Método de ensayo.
- Muestras alteradas.
- Contenido y tipo de fluido.
- Velocidad de deformación. [8]

2.16. Tipos de ensayos triaxial

La aplicación de la presión confinante y del esfuerzo desviador son dos etapas diferentes del ensayo. Si el drenaje de la muestra en cada etapa se permite o no, depende del tipo de roca y de la naturaleza del problema de campo que se quiere estudiar. Un elemento puede fallar en estado no drenado, parcialmente drenado o drenado. Pueden tenerse entonces tres tipos básicos de ensayos: no consolidados - no drenados (UU), consolidado – no drenado (CU) y consolidado - drenado (CD). [8]

2.16.1. Ensayo no consolidado - no drenado (UU)

Este ensayo tiene aplicación en los análisis de estabilidad a corto plazo de obras construidas sobre depósitos de arcilla en los que se considera que el tiempo transcurrido hasta el final de la construcción es insuficiente para la disipación del exceso de presión de poros. [8]

La resistencia no drenada se obtiene con probetas sometidas a condiciones no drenadas durante todo el ensayo, donde no se permite el drenaje durante la aplicación de la presión de cámaras ni durante la aplicación del esfuerzo desviador. [8]

Si la muestra está saturada, la presión de poros toma el incremento de esfuerzos en la presión de cámara sin modificación en el esfuerzo efectivo de la muestra y, por tanto, sin modificación en la resistencia al corte. En consecuencia, el esfuerzo desviador necesario para fallar la muestra es independiente de la presión de cámara a la cual se realiza el ensayo. [8]

Si varias muestras fallan de manera convencional, en la cual σ_3 se mantiene constante y se incrementa σ_1 . Puesto que el esfuerzo desviador en la falla es independiente de la presión de cámara, se obtiene el mismo resultado sin importar la trayectoria de esfuerzos que se siga. Por lo tanto, los parámetros no drenados en esfuerzos totales son únicos e independientes del procedimiento del ensayo utilizado para medirlos. [8]

2.16.2. Ensayo consolidado – no drenado (CU)

Si el tiempo de construcción de una obra se extiende por largo tiempo, es razonable suponer que al final de la construcción ya se habrá producido algún grado de consolidación. Si en este momento los esfuerzos cortantes que se generan en el suelo tienen la magnitud suficiente para producir la falla, ésta se producirá rápidamente sin drenaje adicional. Este comportamiento se modela con el ensayo consolidado – no drenado en el cual la muestra de suelo se consolida por completo con la presión de cámara y luego el esfuerzo desviador produce la falla en condiciones no drenadas. [8]

Cuanto mayor sea la presión a la cual se consolida la muestra mayor será el esfuerzo desviador necesario para producir la falla. El intercepto y la pendiente de la envolvente de falla define los parámetros de resistencia al corte en esfuerzos totales del suelo, que en los ensayos consolidados no drenados se designan con c_{cu} y ϕ_{cu} , respectivamente. Si durante el ensayo se mide la presión de poros, entonces pueden dibujarse los círculos de Mohr de esfuerzos efectivos cuya envolvente de falla permite definir los parámetros de resistencia al corte en esfuerzos efectivos c' y ϕ' . Los círculos de esfuerzos efectivos se sitúan a la izquierda de los círculos de esfuerzos totales. [8]

En el ensayo triaxial estándar la muestra se falla de manera convencional, es decir, se mantiene σ_3 constante y se incrementa σ_1 . En una situación de campo los cambios de esfuerzos que conducen a la falla potencial de un elemento son más complejos ya que van desde aquellas que están en el rango de σ_3 constante y aumento de σ_1 hasta aquellas que se producen con σ_1 constante y reducción de σ_3 . Es importante considerar la posible influencia que lo anterior puede tener en la medición del valor de los parámetros de resistencia al corte. [8]

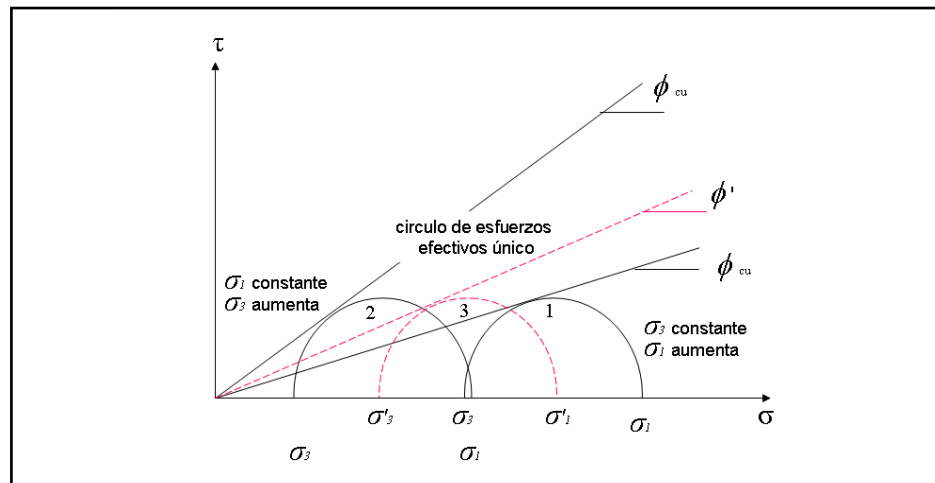


Figura 2.11. Circulo de esfuerzos efectivos único. Fuente: Américo Bustamante, 2000

En la Figura 2.11., una probeta se consolida completamente bajo la presión de cámara σ_3 . La válvula de drenaje se cierra y la probeta se falla en condiciones no drenadas incrementando σ_1 . La envolvente de falla de este ensayo define entonces el valor ϕ_{cu} . En el ensayo 2, una probeta idéntica se consolida a la misma presión de cámara σ_3 . La válvula de drenaje se cierra y se falla la probeta disminuyendo σ_3 , y al mismo tiempo se mantiene σ_1 constante e igual a la presión inicial de la cámara de consolidación. Dado que la presión a la cual se consolidaron las probetas es la misma, entonces el esfuerzo desviador en la falla será el mismo que en el ensayo 1. La envolvente define entonces el valor de ϕ_{cu} . Se observa así que el valor de ϕ_{cu} no es único y por tanto tiene una aplicación práctica limitada si se considera la condición de esfuerzos efectivos, en el ensayo 1 la presión de poros en la falla es positiva y por tanto el círculo de esfuerzos efectivos se sitúa a la izquierda del círculo de esfuerzos totales. Los dos círculos de esfuerzos efectivos coinciden (círculo 3). Por tanto, el valor de ϕ' es único y, en consecuencia, tiene una aplicación práctica mucho más amplia. Esto es lógico puesto que el esfuerzo efectivo es lo que controla la resistencia al esfuerzo. [8]

2.16.3. Ensayo consolidado - drenado (CD)

Cuando la construcción reposa sobre un depósito de arena o grava, la falla potencial se producirá en condiciones drenadas. Estas condiciones pueden simularse en un ensayo drenado en el cual la probeta se consolida completamente con la presión de la cámara y luego se falla bajo condiciones drenadas a una velocidad adecuada para impedir la generación de excesos de presión de poros, de tal manera que $u=0$ a lo largo de la etapa de corte. [8]

Puesto que $u=0$ a largo del proceso de corte, $\sigma'_3=\sigma_3$, $\sigma'_1=\sigma_1$, y el círculo de Mohr de esfuerzos efectivos y el de esfuerzos totales coinciden. La envolvente de falla define los parámetros de esfuerzos efectivos c' y ϕ' . Estos a menudo se designan con c_d y ϕ_d , respectivamente. [8]

Por lo general existe muy poca diferencia entre los parámetros de esfuerzos efectivos que se obtienen en ensayos consolidados drenados con los que se obtienen en ensayos consolidados - no drenados; porque c' y ϕ' son parámetros únicos que no dependen de la forma de ensayo (condiciones de drenaje) [8]

2.17. Parámetros de presión de poros

Una probeta de roca es sometida a una presión hidrostática en la cual $\Delta\sigma_2=\Delta\sigma_3$ y luego se le induce un incremento del esfuerzo desviador $\Delta\sigma_1-\Delta\sigma_3$. Este es el estado de esfuerzos que se impone en el ensayo triaxial y es claro que el exceso de presión de poros que se genera al interior del elemento resulta, en primer lugar, del cambio del esfuerzo hidrostático e isotrópico que reina alrededor de la probeta y, en segundo lugar, del cambio del esfuerzo desviador.

En este caso la presión de poros inducida viene dada por la expresión (Skempton, 1924):

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad \text{Ecuación. (2.17.)}$$

Donde A y B son los coeficientes de presión de poros. Esta ecuación puede descomponerse en dos parciales;

$$\Delta u = \Delta u_h + \Delta u_d \quad \text{Ecuación. (2.18.)}$$

Siendo Δu_h el incremento de la presión de poros debido a un incremento de igual magnitud de las dos tensiones principales $\sigma_1 = \sigma_3$, es decir a un incremento hidrostático [6];

$$\Delta u_h = B \Delta \sigma_3 \quad \text{Ecuación. (2.19.)}$$

Despejando B , se obtiene;

$$B = \frac{\Delta u_h}{\Delta \sigma_3} \quad \text{Ecuación. (2.20.)}$$

Los valores Δu_h y $\Delta \sigma_3$ son medidos en laboratorio durante la prueba hidrostática. El **parámetro B** se determina midiendo el incremento de presión de poros que resulta del incremento de la presión confinante, y varía desde 1 en los suelos completamente saturados hasta 0 en los suelos secos.

El Δu_d es el incremento de la presión de poros debido a un incremento de igual magnitud de las dos tensiones principales $\sigma_1 = \sigma_3$, es decir a un incremento de tipo hidrostático [6];

$$\Delta u_d = B \cdot A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad \text{Ecuación. (2.21.)}$$

Despejando A , se obtiene;

$$A = \frac{\Delta u_d}{B (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)} \quad \text{Ecuación. (2.22.)}$$

$$A = \frac{\Delta u_d}{B \cdot \Delta \sigma_d} \quad \text{Ecuación. (2.23.)}$$

Cuando B=1;

$$A = \frac{\Delta u_d}{\Delta \sigma_d} \quad \text{Ecuación. (2.24.)}$$

Los valores Δu_d y $\Delta \sigma_d$ son medidos en laboratorio durante la prueba triaxial. El **parámetro A**, se determina midiendo la presión de poros que induce en la probeta la aplicación del esfuerzo desviador [6].

2.18. Ley de acción y reacción

Las rocas por naturaleza tienen poros con un contenido de fluido, estos fluidos tienen gran influencia en la conducta mecánica de la roca. Véase la Figura 2.13.; donde V es el volumen total de la roca, V_s es el volumen sólido de la roca y V_v es el volumen de vacíos o volumen de poros.

Entonces;

$$V = V_s + V_v \quad \text{Ecuación. (2.25.)}$$

Y si a esa roca se le aplica una presión confinante como se ve en la Figura 2.12.; el fluido de los poros en respuesta a esa presión ejerce una presión llamada P_p .

La ecuación de presión es;

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación. (2.26.)}$$

La fuerza aplicada por la presión de poros y la presión confinante son iguales en magnitud; pero el área donde es aplicada la presión confinante es mayor al área donde se aplica la presión de poros; de esta manera se explica el porqué la presión de poros en muchos casos es mayor a la presión confinante. Si el incremento de presión confinante es muy violento la presión de poros se dispararía y fallaría la muestra.

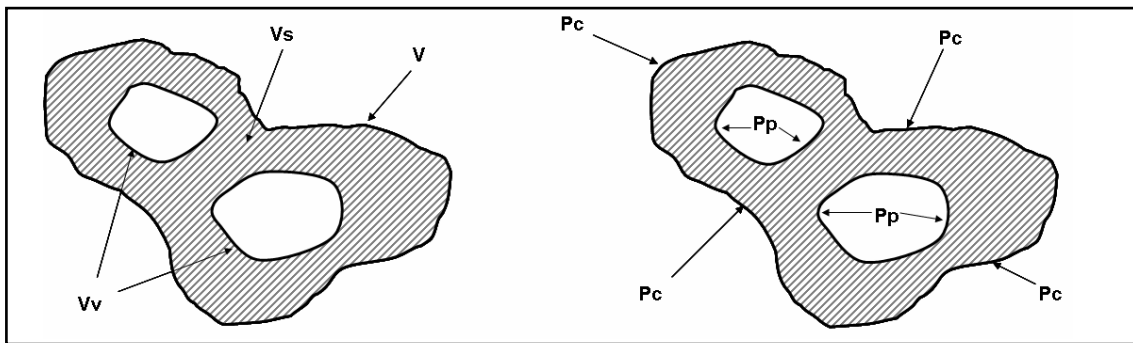


Figura 2.12. Teoría de poroelasticidad. Fuente: J.C. Jaeger, 2007.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

El presente proyecto se desarrollo de acuerdo al método científico, con investigación de tipo experimental y analítico. Mediante la cual se establece un método para ensayos de compresión triaxial sobre muestras de lutitas de núcleos de pozos petroleros. Se realizaron una serie de ensayos sobre muestras de lutitas extraídas del pozo ZG 349, pertenecientes al campo Zapatos Mata R.

3.1. Revisión bibliográfica

Se consultaron libros referentes a mecánica de suelos, mecánica de rocas, geomecánica, geofísica, manuales del laboratorio, revistas e informes técnicos referentes a ensayos triaxiales, caracterización geomecánica.

3.2. Manejo del sistema Autolab2000

Se recibió adiestramiento para el manejo del sistema de laboratorio Autolab2000, para controlar y monitorear los ensayos mecánicos.

La Figura 3.9 es un diagrama de todas las conexiones del Autolab 2000; a la izquierda se encuentran las conexiones de válvulas confinantes y axiales, que conjunto con el aliviadero de reservorio y el depósito de aire/aceite forman la consola hidráulica del equipo. La mitad restante de la derecha es la cámara, la cual en su inferior tiene una pequeña consola hidráulica para controlar la presión de poros.

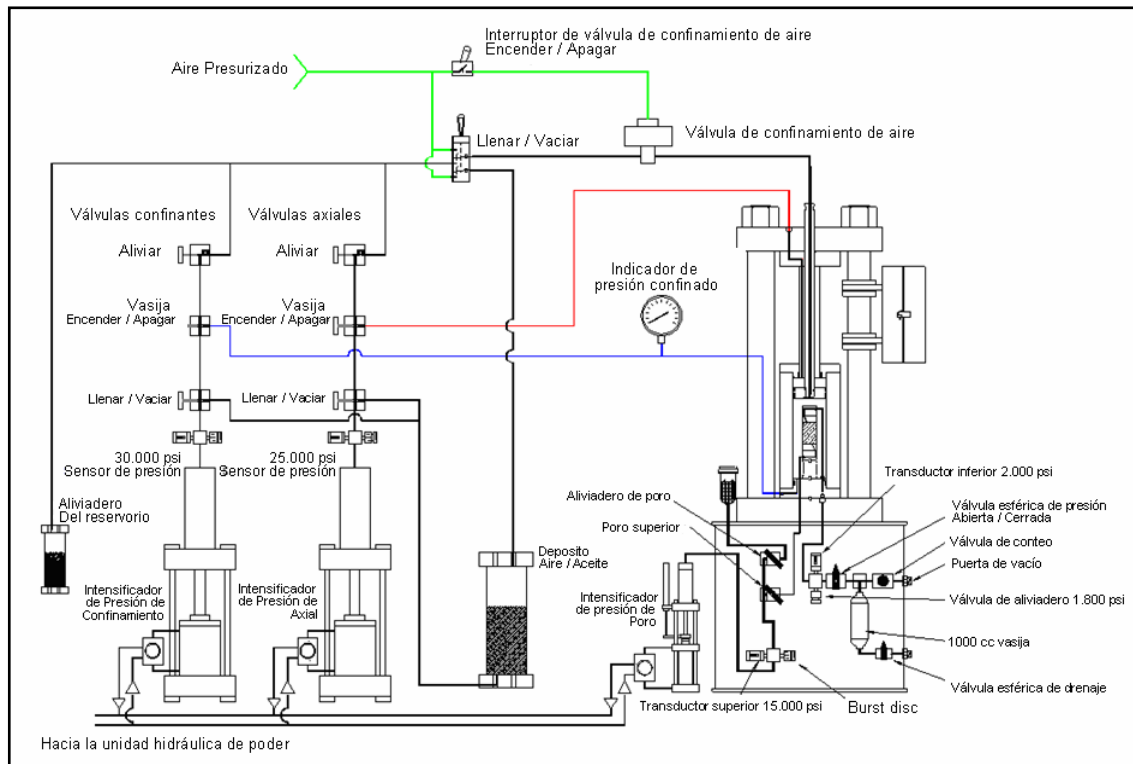


Figura 3.1. Autolab2000 diagrama de conexión. Fuente: NER, 2008.

Todo ensayo comienza con la preparación manual del equipo y luego se controlan los intensificadores a través de la computadora; estos intensificadores no son más que pistones que impulsan aire para que ocurra el desplazamiento de las presiones; axial, confinante o de poros.

Al iniciar el ensayo se coloca la muestra dentro de la cámara de confinamiento como se puede apreciar en la Figura 3.2. El pedestal de la cámara es el lugar en donde se conectan la manguera de entrada de presión de poros del cabezal de deformación inferior, los sensores de deformación axial y radial y el sensor de presión de poros del cabezal superior de deformación. Los sensores durante el ensayo emiten señales eléctricas que son traducidas por el software Autolab2000.

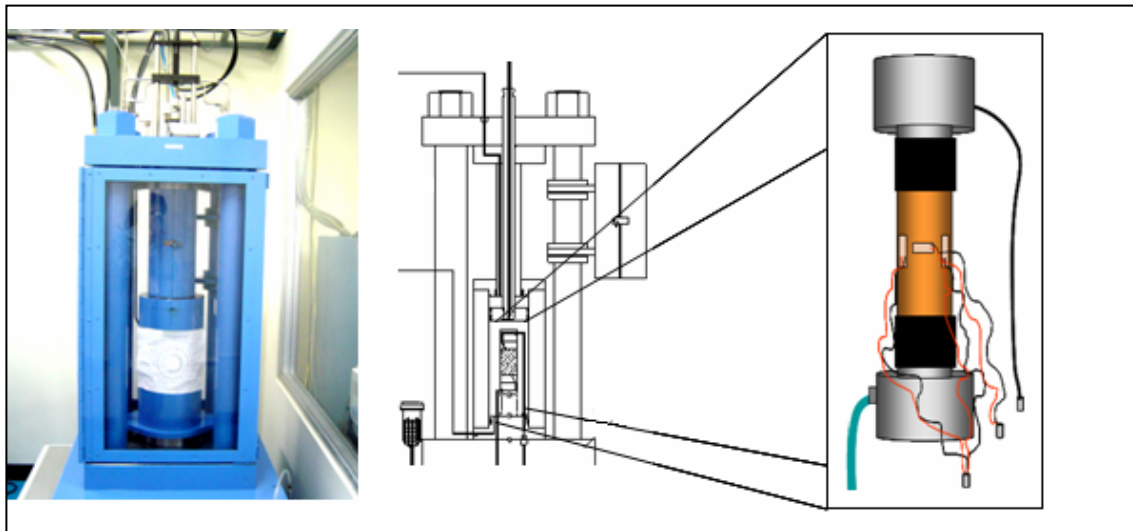


Figura 3.2. Cámara de ensayo y conexiones de sensores. Fuente: Propia, 2009.

3.2.1. Montaje del ensayo

Luego de verificar el buen funcionamiento de los sensores de deformación en la consola electrónica, se alimenta el software con la información de cada muestra como lo son; identificación de la muestra, nombre del pozo, profundidad de la que fue extraído, formación a la cual pertenece, tipo de roca, peso unitario, diámetro y longitud. Seguidamente se cierra la cámara controlando la consola hidráulica, existen diferentes configuraciones de abierto y cerrado para las llaves, que permiten realizar diferentes operaciones como; subir y bajar vasija, desprender martillo, llenar y vaciar de aceite la vasija, subir y bajar pistón, aplicar presión axial y aplicar presión confinante.

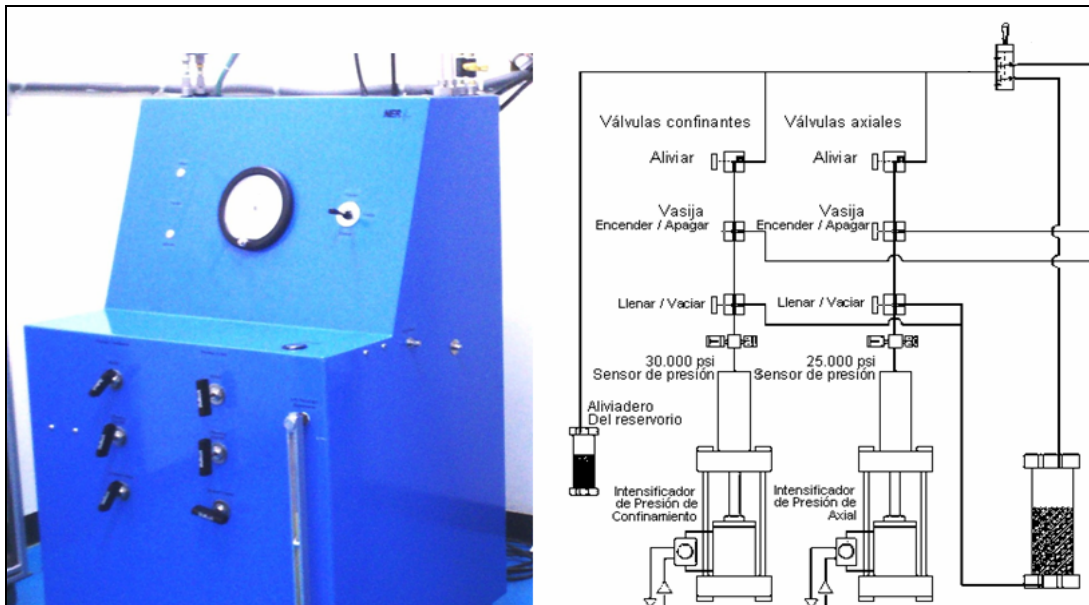


Figura 3.3. Consola hidráulica de presión confinante y presión axial. Fuente: Propia, 2009.

Procedimiento para el montaje del ensayo:

- Se baja la vasija, para cerrar la cámara y se asegura.
- Se desprende el martillo que mantiene inmóvil al pistón.
- El siguiente paso es bajar el pistón, el cual se monitorea con la ayuda del software Autolab2000 quien indica el valor del desviador, solo se hace un ligero contacto entre el pistón y la muestra; es decir; σ_d tiende a cero.
- Seguidamente se llena la vasija de aceite, monitoreando a través del software Autolab2000, hasta que la presión sea positiva; después de realizar este

paso, el pistón se despegue de la muestra, por la presencia de la presión confinante que lo desplaza un poco hacia arriba.

- Se configura la consola hidráulica para aplicar presión axial y confinante. En este punto todo queda listo para ser manipulado con la computadora, la consola electrónica y el software Autolab2000.
- Se le aplica una pequeña presión confinante a una tasa rápida.
- Luego se hace pegar el pistón a la muestra sin hacer presión.
- Se manipulan las llaves de presión de poros para que se inserte fluido a la muestra, este sistema funciona al igual que la consola hidráulica manipulando las llaves. Como vemos en la Figura 3.4. el cuadro azul resalta la consola hidráulica para presión de poros, arriba de la consola está el envase que contiene el fluido de poros, en este caso es aceite mineral.

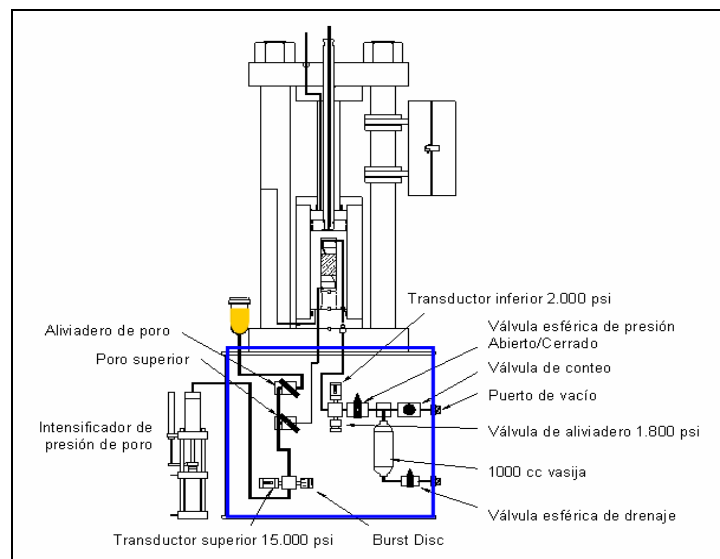


Figura 3.4. Consola hidráulica para presión de poros. Fuente: Propia.

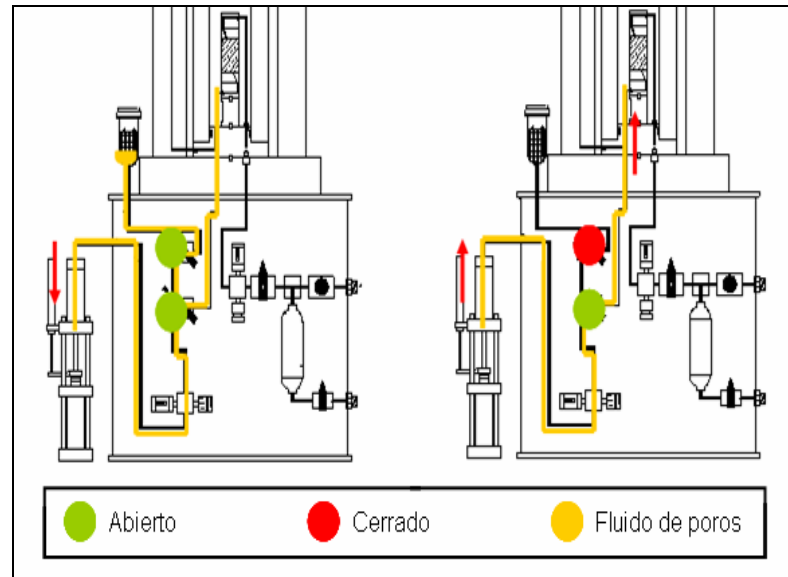


Figura 3.5. Funcionamiento del sistema de presión de poros. Fuente: Propia.

En la leyenda de la Figura 3.5 existe un color para cada posición de las llaves y un color para el fluido de poros. Abriendo las dos llaves como lo muestra la primera configuración de la figura, el aceite baja del envase y llena toda la tubería, llegando hasta la muestra y hasta el pistón. Luego se aplica la segunda configuración cerrando la primera llave y se aplica presión con el intensificador de presión axial y el fluido sube y entra en la muestra. Todas estas operaciones son monitoreadas en la computadora por el software Autolab2000. Las medidas de presiones de poros son tomadas en la entrada por un transductor colocado en la tubería que inyecta el fluido Figura 3.6 y en la salida de la muestra el cabezal superior de deformación tiene un sensor que se conecta al sistema.

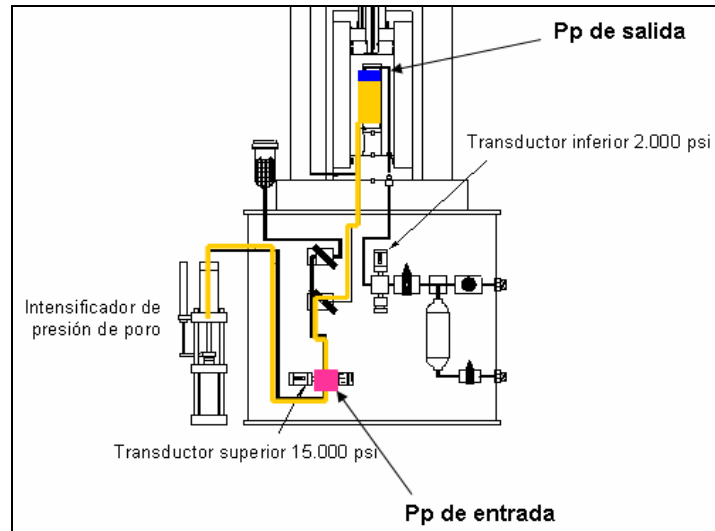


Figura 3.6. Sensores de presión de poros. Fuente: Propia.

3.3. Corte, pulido e instrumentación de las probetas

Se realizó el corte y pulido de las probetas, evitando la deshidratación de las lutitas para cuidar su integridad antes del ensayo. Se “vistieron” las probetas utilizando diferentes materiales como; tamiz #200, lienzo, tull con el fin de encontrar el más apropiado para permitir el paso del fluido a través de toda la probeta. Seguido a esto se enchaquetó cada probeta con una lámina de cobre y para adherir la chaqueta a las probetas se le aplicará una presión de 3000 psi en la enchaquetadora. Sobre la chaqueta se colocaron los sensores cuidando que estén perfectamente verticales los de lectura de deformación axial y horizontales el de lectura de deformación radial. Luego las probetas enchaquetadas se colocaron en los cabezales de deformación.

3.3.1. Corte y pulido de probetas

Se realizó el pulido de las muestras, con relación de dimensiones $L \geq 2D$. Cuidando que las caras de cada probeta estén perfectamente paralelas, para verificar esto se utilizó un extensómetro. Para realizar estas operaciones se deben mantener las manos alejadas de los discos de corte al manipular la cortadora y la pulidora; y es necesario el uso de mascarilla y lentes. Para estas operaciones se utilizaron los siguientes equipos:

- Cortadora. Marca: RAYTECH, rpm: 1725.
- Pulidora Marca: WILTON, Modelo: 52ª PSG-68.
- Extensómetro Marca: MITUTOYO, Apreciación: $(1 \pm 0.0001 \text{ pulg.})$.

Antes del corte de las caras se verificó la calidad de la probeta, para descartar las que estén fracturadas o no cumplen con la longitud mínima requerida. Luego la probeta fue llevada a la cortadora, con la cual se emparejan las dos caras a la longitud deseada.

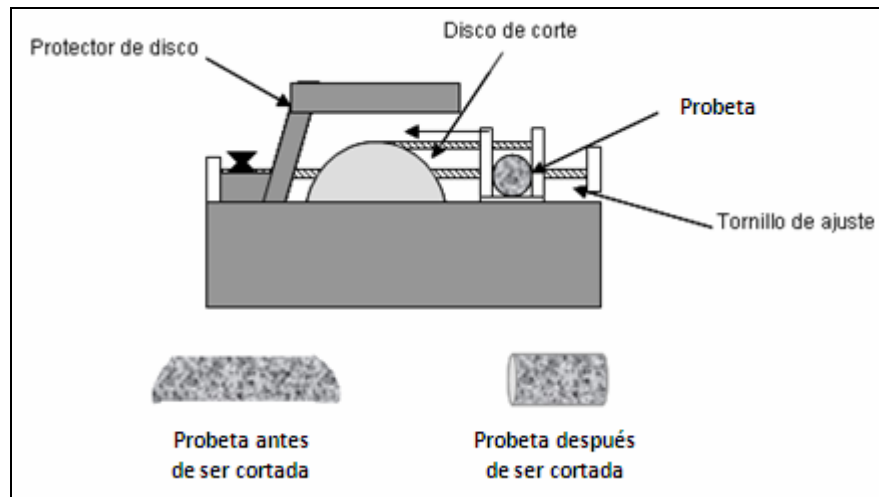


Figura 3.7. Esquema de la cortadora. Fuente: LFR, 2006.

Procedimiento para el corte de las caras:

- Marcar la longitud requerida de la probeta.
- Colocar el tapón en la cortadora y cortar en forma automática.
- Una vez cortado de un lado de la probeta, apague el equipo, retire la probeta y coloque nuevamente la probeta para cortar el otro lado.
- Repetir el proceso con el otro extremo.
- Al finalizar apague el equipo antes de retirar la probeta.

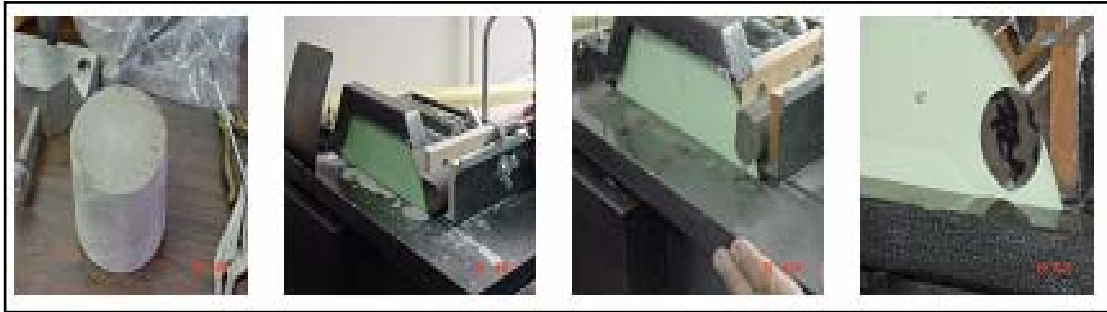


Figura 3.8. Secuencia de pasos de corte de las probetas. Fuente: LFR, 2006.

En el pulido se crea una textura lisa y uniforme en las caras de la probeta. Estas son pulidas en estado húmedo y pero como la lutitas es muy sensible a la deshidratación es necesario aplicarle aceite mineral cada cierto tiempo para evitar que seque.

Procedimiento para el pulido de las caras:

- Colocar la probeta en el porta muestras.
- El porta muestras con la probeta es colocado sobre el imán industrial. (Figura 3.9).
- Presionar botón de encendido de la pulidora.
- Colocar el disco justo sobre el tapón y bajar despacio hasta llegar a la superficie de la probeta.
- Graduar el volante de elevación a cero y bajar cada 0.005”.

- Repetir el procedimiento para pulir la otra cara.



Figura 3.9. Secuencia de pasos para el pulido de las caras de las probetas. Fuente: LFR, 2006.

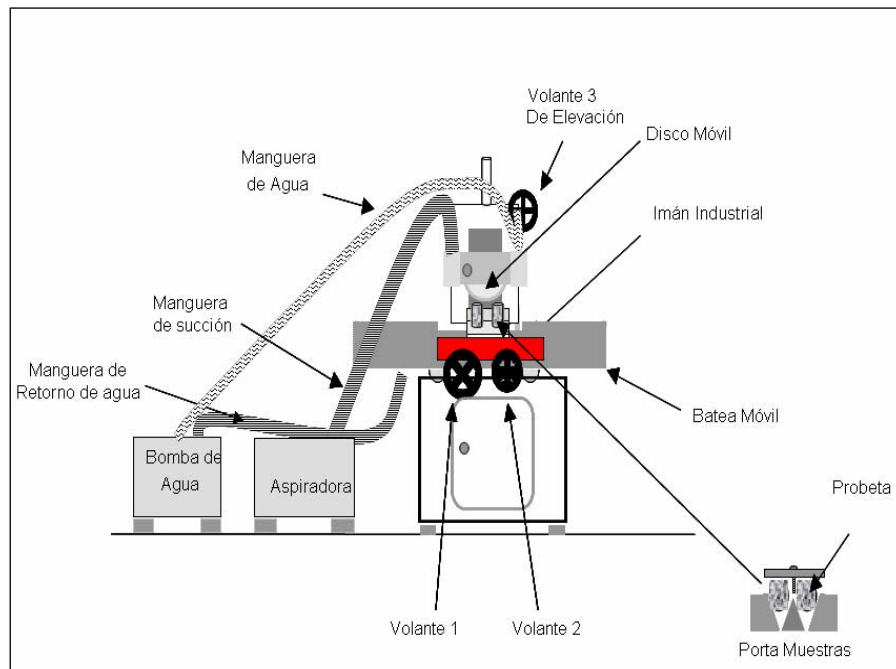


Figura 3.10. Esquema de la pulidora. Fuente: LFR, 2006.

Luego se verifica el paralelismo de las caras previamente pulidas de las probetas utilizando un extensómetro. (Figura 3.11)

Procedimiento de verificación del paralelismo:

- Colocar el tapón en la base del extensómetro.
- Girar lentamente la muestra sobre la base del extensómetro, verificar la probeta tenga diferencias de longitud que no excedan una centésima de pulgada (0,01”).

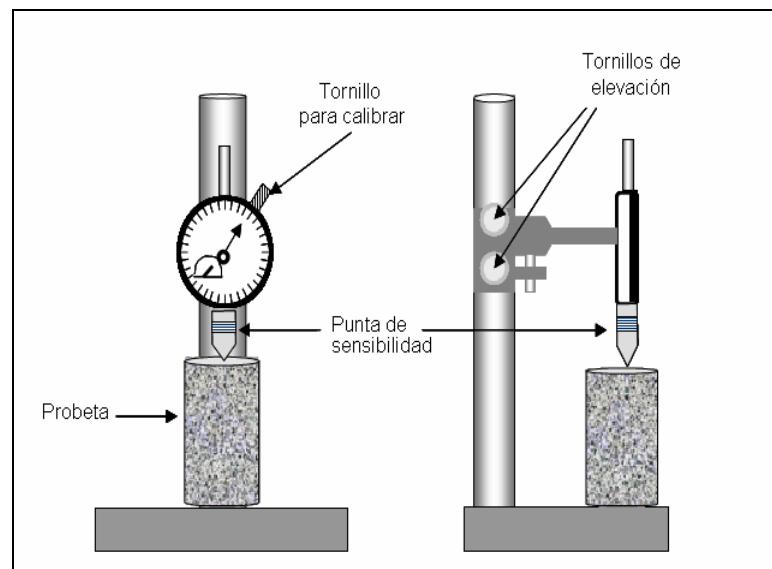


Figura 3.11. Esquema del Extensómetro. Fuente: LFR, 2006.



Figura 3.12. Secuencia de pasos para el control de calidad de las probetas. Fuente: LFR, 2006.

3.3.2 Instrumentación de las probetas

Se vistieron las muestras utilizando diferentes materiales como; malla #200, liencillo, tul y dipovelo. Seguido a esto se enchaqueto cada muestra con una lámina de cobre y para adherir la chaqueta a la muestra se le aplico una presión de 3000 psi en la enchaquetadora. Sobre la chaqueta se colocaron los sensores cuidando que estuviesen perfectamente verticales los de lectura de deformación axial y horizontales el de lectura de deformación radial. Se conectaron los sensores a los cables conectores. Luego las muestras instrumentadas se colocaron en los cabezales especiales para aplicar presión de poros. Para instrumentar las probetas se utilizaron los siguientes equipos:

- Balanza. Marca: OHAUS, apreciación: $(1 \pm 0.01 \text{ g.})$.
- Enchaquetadora. Marca: BARBEE, capacidad: 3000 psi.
- Cautín WE 550. Marca: WELLER, capacidad: 85°F.
- Multímetro 110. Maca: FLUKE, capacidad: 600V.

- Vernier. Marca: MITUTOYO, capacidad: 200 mm., apreciación: (1 ± 0.05 mm.).
- 2 Cabezales de deformación para muestra de 1”.
- Strain Gages (sensores de deformación).

Procedimiento de colocación de la chaqueta:

- Tomar las medidas definitivas de la probeta; longitud, diámetro y peso.
- Calcular su peso unitario, área transversal y dimensiones del vestido y la chaqueta.
- Con un transportador, medir el ángulo de inclinación de los planos de debilidad con respecto al eje de la muestra.
- Cortar una malla o tela para el vestido y una lámina de cobre para la chaqueta.
- Lijar los extremos de la lámina de cobre con la esponja de alambre.
- Limpiar la lámina con acetona para quitar la grasa y que se pueda adherir la soldadura.
- Colocar el vestido y la chaqueta a la probeta.

- Soldar los extremos de la lámina con estaño
- Introducir la probeta en la enchaquetadora (cámara de presión) y aplicarle una presión confinante de 3000 psi, y luego descargar.
- Identificar la presencia de anomalía en las chaquetas.



Figura 3.13. Secuencia de pasos para la colocación de la chaqueta de cobre en la probeta. Fuente: LFR, 2006.

Procedimiento para la colocación de los sensores de deformación:

- Marcar en la probeta enchaquetada las líneas guías para colocar los sensores.
- Pegar los sensores a la chaqueta con una sustancia adhesiva instantánea.
- verificar la calidad de los sensores con el multímetro; este debe indicar 120 Ω .
- Identificar con el nombre del pozo y la profundidad a la cual fue tomada la probeta, con un marcador de tinta indeleble.

- Colocar la probeta en los cabezales de deformación, asegurándola con gomas y alambres.
- Pegar los cables conectores a los sensores utilizando estaño.
- Colocar la manguera de presión de poros en el cabezal inferior.

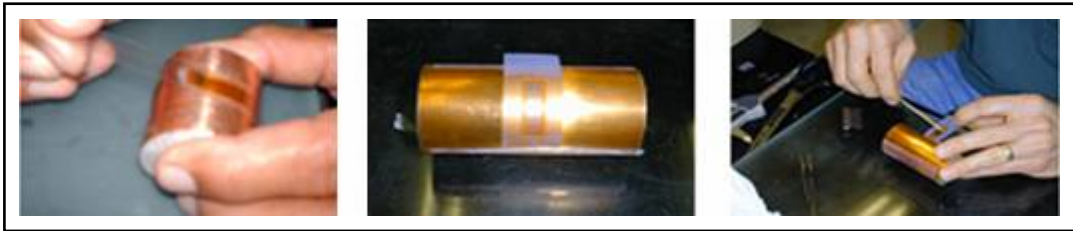


Figura 3.14. Secuencia de pasos para la colocación los sensores en la probeta.
Fuente: LFR, 2006.

3.4. Ensayo de las probetas

Las probetas se ensayarán en dos etapas; la etapa 1 es el ensayo hidrostático y la etapa 2 que consiste en el ensayo triaxial.

3.4.1. Ensayo hidrostático

Para el ensayo hidrostático se colocó cada muestra en la cámara y se llenó de aceite mineral. Luego se aplicó presión de poros a través de la consola hidráulica para presión de poros. Seguidamente se programó el ensayo para que se aplique presión confinante con una tasa muy baja y durante un período prolongado, para asegurar que la probeta se ajuste muy lentamente y no falle durante este proceso. En este ensayo se quiere obtener una tasa de presión confinante igual a la de presión de poros, para

lograr que $B=1$, lo que indicaría que la probeta está saturada y los poros están interconectados para permitir la permeabilidad.

3.4.2. Ensayo de compresión triaxial

Para el ensayo de compresión triaxial las condiciones iniciales son las conseguidas del ensayo hidrostático donde esa presión debe ser igual a la geopresión soportada por la formación a esa profundidad, lo siguiente sería aplicarle a la probeta un esfuerzo axial por medio del pistón. La tasa de aplicación del esfuerzo axial debe ser muy lenta para simular las condiciones presentes in-situ, de otra manera podría romper la probeta rápidamente por incremento instantáneo de la presión de poros. Se incrementó entonces el esfuerzo axial desviador, hasta que la probeta falló; y se recolectó la data que arroja el software Autolab2000 con las medidas tomadas durante los ensayos.

Existen dos formas de realizar este ensayo, la primera es configurándolo para que empiece justo cuando termina el hidrostático y la segunda es desmontando el ensayo y montándolo nuevamente con igual procedimiento que para el hidropático. En algunos casos es necesario desmontar por razones experimentales, la más común es que se dañe uno o varios sensores de deformación.

3.5 Depurado de la data

La data cruda recolectada de los ensayos por el software AutoLab2000 contiene todas las filas y columnas de datos que pueden ser obtenidos de los ensayos, los que han sido medidos y los que no. La data se introduce en el software Excel Windows para hacerle un depurado y seleccionar solo los datos que son de interés para el análisis mecánico de la roca.

3.5.1 Procesamiento de la data

Se ve en la Figura 3.15 toda la data cruda suministrada de los ensayos y bajada al software Excel Windows.

| 1 | Channel | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------------|--------------------|---------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|------------------|-------------------|------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------|------------|--|--|--|--|--|
| 2 | time | pp | pp | pphg | ppbtm | ppint_lg | disp | ppdcdt_hg | ppdcdt_low | ppdcdt_high | Asialt | Asial2 | str3 | Radial | | | | | |
| 3 | Elapsed Time | Confining Pressure | Pore Pressure | Pore Pressure High Gain | Pore Pressure Downstream | Pore Pressure Internal | PP DCCT Low Gain | PP DCCT High Gain | | | Asial Strain #1 | Asial Strain #2 | Strain #3 | Radial Str | | | | | |
| 4 | s | MPa | MPa | MPa | MPa | MPa | mm | mm | | | me | me | me | me | | | | | |
| 5 | 7571.8 | 1.49424 | 0.88675 | 0.715318 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.2339 | 5.8302 | -0.93923 | -0.80566 | 2 | | | | | | | | |
| 6 | 7631.8 | 1.53648 | 1.06483 | 0.918862 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.2339 | 5.8302 | -0.93579 | -0.80631 | 2 | | | | | | | | |
| 7 | 7691.8 | 1.57872 | 1.2938 | 1.12495 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.2339 | 5.8302 | -0.932641 | -0.80767 | 2 | | | | | | | | |
| 8 | 7751.8 | 1.57872 | 1.421 | 1.27761 | 0.037065 | -0.839501 | 23.2339 | 5.8302 | -0.905046 | -0.804689 | -0.80691 | 2 | | | | | | | |
| 9 | 7811.8 | 1.62096 | 1.52276 | 1.36688 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.2339 | 5.8302 | -0.89897 | -0.801611 | -0.80566 | 2 | | | | | | | |
| 10 | 7871.8 | 1.62096 | 1.5482 | 1.37684 | 0.037065 | -0.839501 | 23.2339 | 5.8302 | -0.89532 | -0.80072 | -0.80691 | 2 | | | | | | | |
| 11 | 7931.8 | 1.6632 | 1.59308 | 1.44044 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.892894 | -0.796993 | -0.80691 | 1 | | | | | | | |
| 12 | 7991.8 | 1.6632 | 1.64996 | 1.47352 | 0.037065 | -0.839501 | 23.2339 | 5.8302 | -0.889856 | -0.795454 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 13 | 8051.8 | 1.70544 | 1.70084 | 1.51932 | 0.037065 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.888336 | -0.793915 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 14 | 8111.8 | 1.70544 | 1.70084 | 1.52949 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.82873 | -0.886817 | -0.793915 | -0.80691 | 1 | | | | | | | |
| 15 | 8171.8 | 1.74768 | 1.75172 | 1.58801 | 0.037065 | -0.839501 | 23.2339 | 5.8302 | -0.886817 | -0.793915 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 16 | 8231.8 | 1.74768 | 1.77716 | 1.62109 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.1602 | 5.8302 | -0.886817 | -0.795454 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 17 | 8291.8 | 1.74768 | 1.77716 | 1.60073 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.888336 | -0.796993 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 18 | 8351.8 | 1.78991 | 1.82004 | 1.63635 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.889856 | -0.796993 | -0.80691 | 1 | | | | | | | |
| 19 | 8411.8 | 1.78991 | 1.82804 | 1.66889 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.888336 | -0.798532 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 20 | 8471.8 | 1.83215 | 1.87892 | 1.70505 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.888336 | -0.800072 | -0.80691 | 1 | | | | | | | |
| 21 | 8531.8 | 1.83215 | 1.87892 | 1.72032 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.889856 | -0.800072 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 22 | 8591.8 | 1.87439 | 1.92981 | 1.74576 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.889856 | -0.800072 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 23 | 8651.8 | 1.87439 | 1.90436 | 1.75085 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.891375 | -0.801611 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 24 | 8711.8 | 1.91663 | 1.98069 | 1.79195 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.889856 | -0.801611 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 25 | 8771.8 | 1.91663 | 1.98069 | 1.79684 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.2339 | 5.8302 | -0.886817 | -0.800072 | -0.80691 | 1 | | | | | | | |
| 26 | 8831.8 | 1.95887 | 2.00613 | 1.8299 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.889856 | -0.800072 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 27 | 8891.8 | 1.95887 | 2.00613 | 1.84753 | 0.0404301 | -0.839501 | 23.197 | 5.8302 | -0.886817 | -0.798532 | -0.80691 | 1 | | | | | | | |
| 28 | 8951.8 | 2.04335 | 2.05701 | 1.86788 | 0.0404301 | -0.408014 | 23.2339 | 5.8302 | -0.885298 | -0.796993 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 29 | 9011.8 | 2.00111 | 2.05701 | 1.88842 | 0.0404301 | -0.795565 | 23.197 | 5.8302 | -0.883779 | -0.795454 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 30 | 9071.8 | 2.04335 | 2.08245 | 1.92386 | 0.0404301 | -0.542854 | 23.2339 | 5.8302 | -0.883779 | -0.793915 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 31 | 9131.8 | 2.04335 | 2.10789 | 1.91088 | 0.0404301 | -0.623757 | 23.197 | 5.8302 | -0.88226 | -0.793915 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 32 | 9191.8 | 2.08959 | 2.10789 | 1.97475 | 0.0404301 | -0.650725 | 23.2339 | 5.8302 | -0.880741 | -0.792376 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 33 | 9251.8 | 2.08959 | 2.13333 | 1.98238 | 0.0404301 | -0.563821 | 23.2339 | 5.8302 | -0.880741 | -0.792376 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 34 | 9311.8 | 2.08959 | 2.16977 | 1.99001 | 0.037065 | -0.46185 | 23.197 | 5.8302 | -0.879222 | -0.80298 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 35 | 9371.8 | 2.12782 | 2.18421 | 2.0409 | 0.0404301 | -0.209042 | 23.2339 | 5.8302 | -0.877703 | -0.80298 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 36 | 9431.8 | 2.12782 | 2.18421 | 2.02563 | 0.0404301 | -0.542854 | 23.2339 | 5.8302 | -0.877703 | -0.80298 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 37 | 9491.8 | 2.17006 | 2.23509 | 2.0638 | 0.0404301 | -0.515886 | 23.197 | 5.8302 | -0.876184 | -0.801611 | -0.80691 | 1 | | | | | | | |
| 38 | 9551.8 | 2.17006 | 2.23509 | 2.08161 | 0.0404301 | -0.273174 | 23.197 | 5.8302 | -0.874665 | -0.801611 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 39 | 9611.8 | 2.2123 | 2.26053 | 2.1045 | 0.037065 | -0.219238 | 23.197 | 5.8302 | -0.874665 | -0.80226 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 40 | 9671.8 | 2.25454 | 2.28597 | 2.10196 | 0.0404301 | -0.030463 | 23.197 | 5.8302 | -0.874665 | -0.80226 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 41 | 9731.8 | 2.25454 | 2.31841 | 2.14267 | 0.037065 | 0.0404301 | 23.197 | 5.8302 | -0.873146 | -0.804689 | -0.80566 | 1 | | | | | | | |
| 42 | 9791.8 | 2.25454 | 2.31841 | 2.15045 | 0.0404301 | 0.38528 | 23.197 | 5.8302 | -0.873146 | -0.804689 | -0.804689 | 1 | | | | | | | |

Figura 3.15. Data cruda. Fuente: Propia.

El depurado consiste en borrar los datos tomados antes de comenzara el ensayo y después de que ocurre la falla.

El resultado de seleccionar los datos y depurar la data se puede apreciar en la figura 3.16.; una hoja con los datos organizados y de fácil manejo, donde se pueden resaltar las variables de mayor interés y los eventos en un instante dado del ensayo.

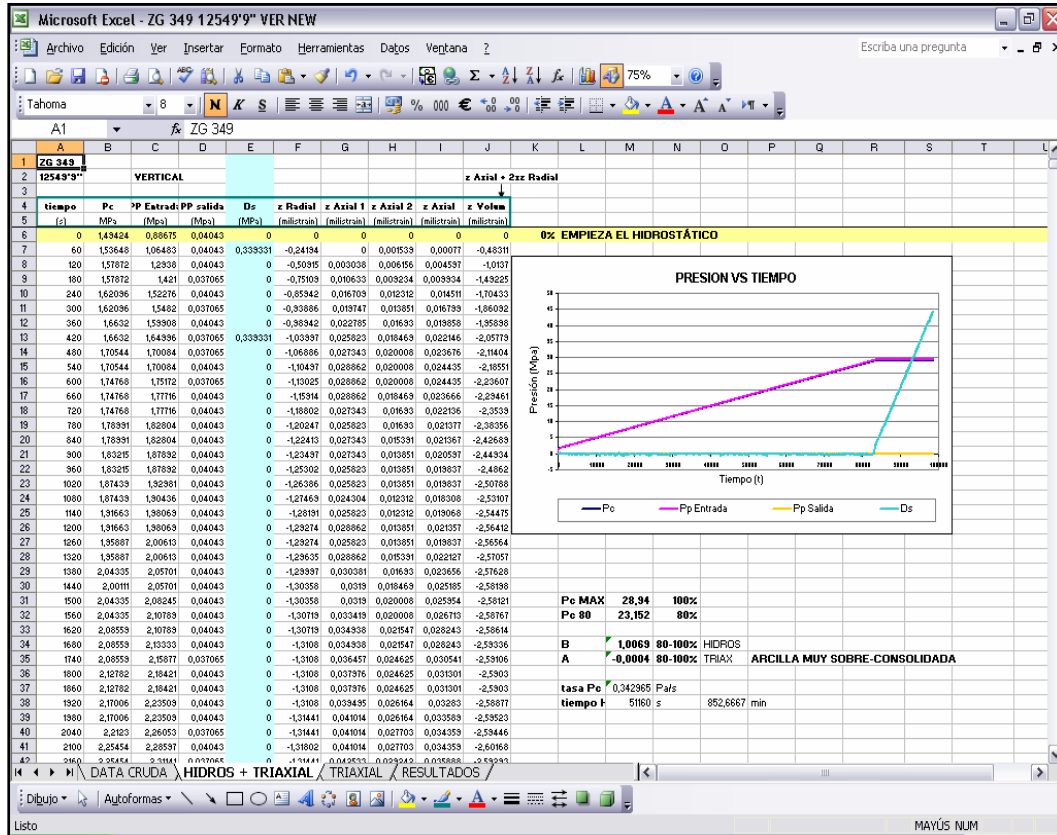


Figura 3.16. Data depurada de un ensayo completo. Fuente: Propia.

La Figura 3.17 es una gráfica a la que ya se le han borrado los datos después de la falla, pero no los de antes de empezar el triaxial, los puntos A pertenecen al mismo instante igualmente para los B, solo que unas líneas muestran deformaciones axiales y la otra es deformación radial.

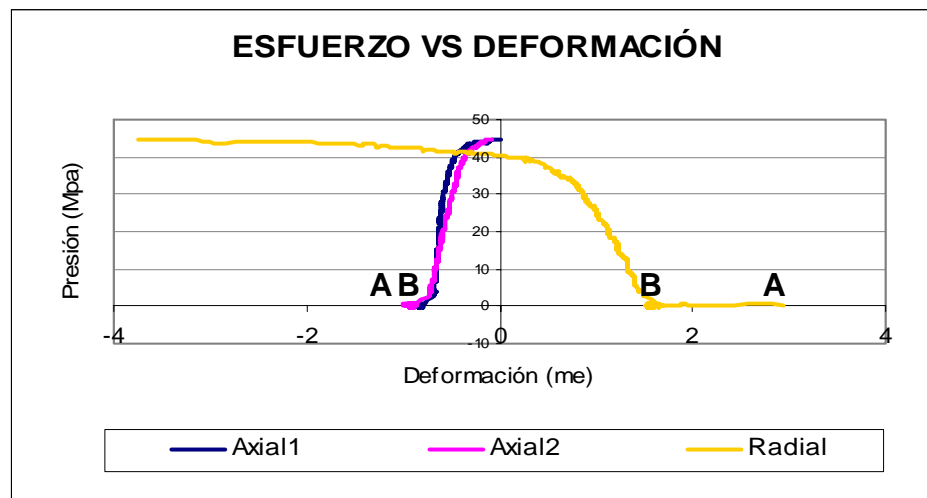


Figura 3.17. Grafica esfuerzo vs deformación antes de depurar la gráfica. Fuente: Propia.

Desde el punto A hasta el B, esos datos no pertenecen al ensayo triaxial, pues son datos tomados durante el ensayo hidrostático, cuando no varía el desviador pero la probeta experimentaba deformaciones producto de la variación de la presión confinante y la presión de poros. Las deformaciones iniciales de la probeta en el ensayo triaxial empiezan en cero, por lo que hay que separar los datos del ensayo triaxial. Una vez separados hay que correr la lectura de todos los puntos en el instante B hasta el punto cero de las coordenadas de las gráficas, puesto que las deformaciones radiales son negativas y las axiales positivas. Después de este proceso la gráfica resultante es la que se muestra en la Figura 3.18.

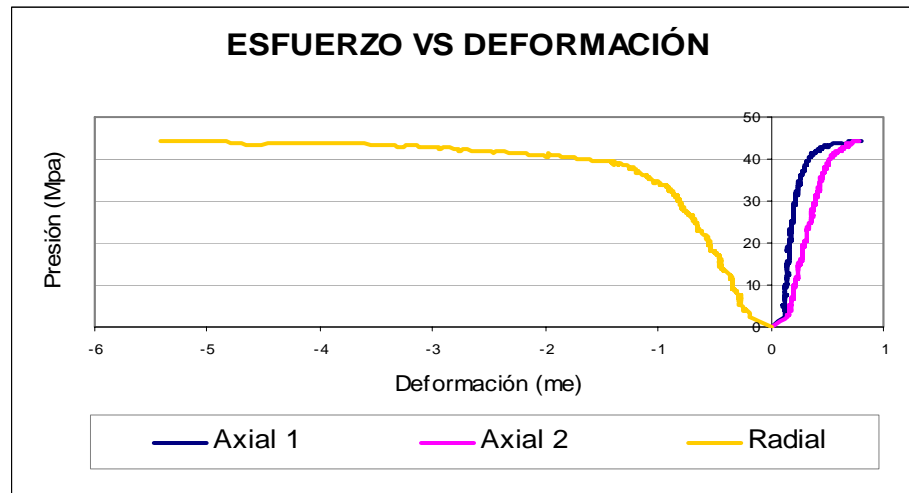


Figura 3.18. Grafica esfuerzo vs deformación depurada. Fuente: Propia.

Otro depurado es arrastrar las medidas de los sensores al punto correcto, pues los sensores tienen un límite de deformación y cuando la probeta deforma más allá de ese límite, el sensor se corre al inicio nuevamente.

3.5.2. Diseño de la hoja de cálculo

Una vez procesada la data se diseña la hoja de cálculo con formulas para obtener los resultados de cada ensayo y poder visualizarlos para mayor comprensión y mejor análisis. La hoja tiene el gráfico de esfuerzo-deformación que se modifica automáticamente al modificar o insertar datos nuevos en las hojas anteriores de la data procesada, igualmente sucede con el resultado de las ecuaciones. La hoja obtiene el esfuerzo máximo registrado en la data procesada, y tiene unas celdas donde interpola los valores correspondientes a los porcentajes del ensayo necesarios para los cálculos. Se ubican cada uno de estos porcentajes en la data procesada y así se conocen los números de las celdas para cada porcentaje. Con estos números de celdas se debe modificar los rangos de las fórmulas. El resultado es un libro de trabajo con

una hoja de cálculo que hemos llamado **RESULTADOS** que facilita la obtención de estos, y todo se vuelve un sencillo proceso de cortar y pegar.

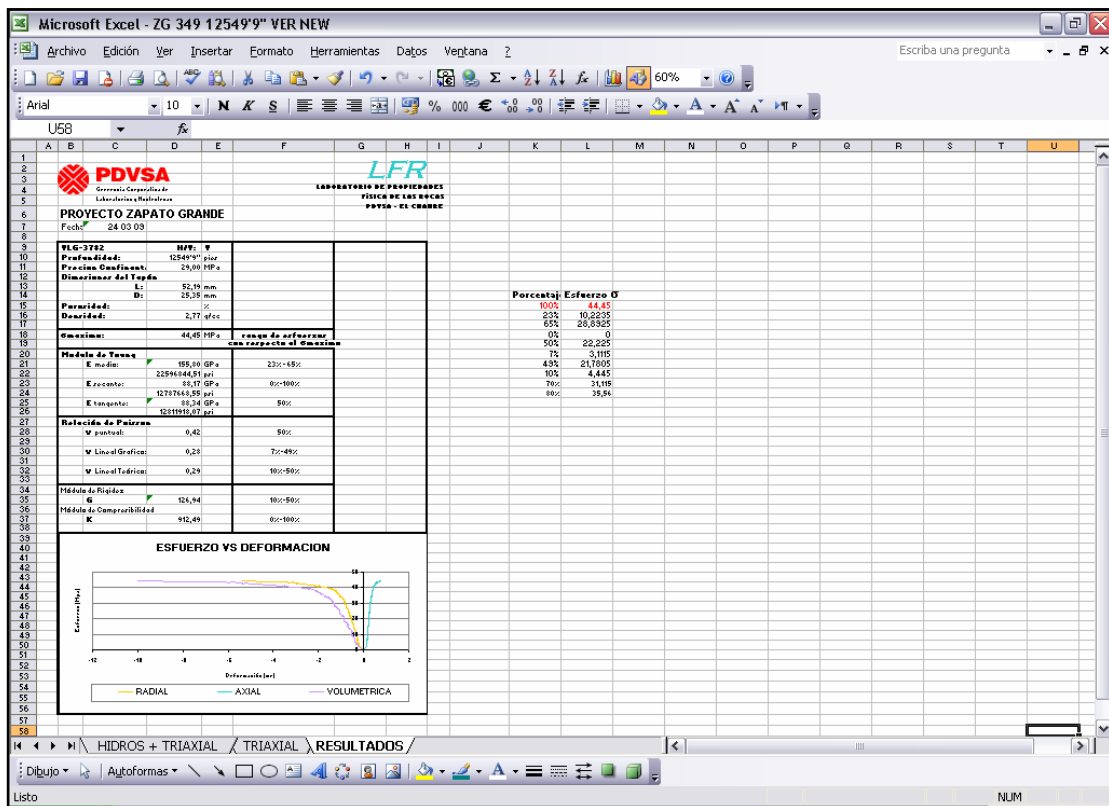


Figura 3.19. Hoja de cálculos resultados. Fuente: Propia.

3.6. Construcción de graficas

Se construyeron las graficas necesarias de cada ensayo:

- Desviador, presión confinante, presión de poros de entrada y presión de poros de salida vs tiempo; para visualizar las etapas de los ensayos realizados sobre cada una de las probetas.

- Esfuerzo vs deformación durante la el ensayo triaxial, para determinar los módulos elásticos.
- Círculos de Mohr y envolvente de falla.

Para cada ensayo se calcularon los módulos elásticos utilizando la hoja de cálculos **RESULTADOS**:

- Módulo de Young.
- Relación de Poisson.
- Módulo volumétrico.
- Compresibilidad.

3.7. Dibujar los círculos de Mohr y envolvente de falla

Se dibujaron los círculos de Mohr y envolvente de la serie de ensayos para obtener los parámetros c' y ϕ' . Luego se construyo la ecuación de la resistencia al esfuerzo cortante de estas lutitas.

3.8. Interpretar los resultados

En este periodo se hizo un análisis de todos los resultados obtenidos para cada muestra en los ensayos. Con la ayuda de Excel se pudo visualizar y revisar los resultados fácilmente. Se interpreto el comportamiento de la lutita en cada estado de

esfuerzos. Seguidamente se construyo una tabla con resultados obtenidos en lutitas de ZG 349 a diferentes profundidades.

Se analizaron las operaciones del ensayo que pudieran afectar la obtención de estos. Se establecieron conclusiones y realizaron recomendaciones para ensayos futuros sobre lutitas a grandes profundidades.

3.9. Flujograma de la metodología empleada

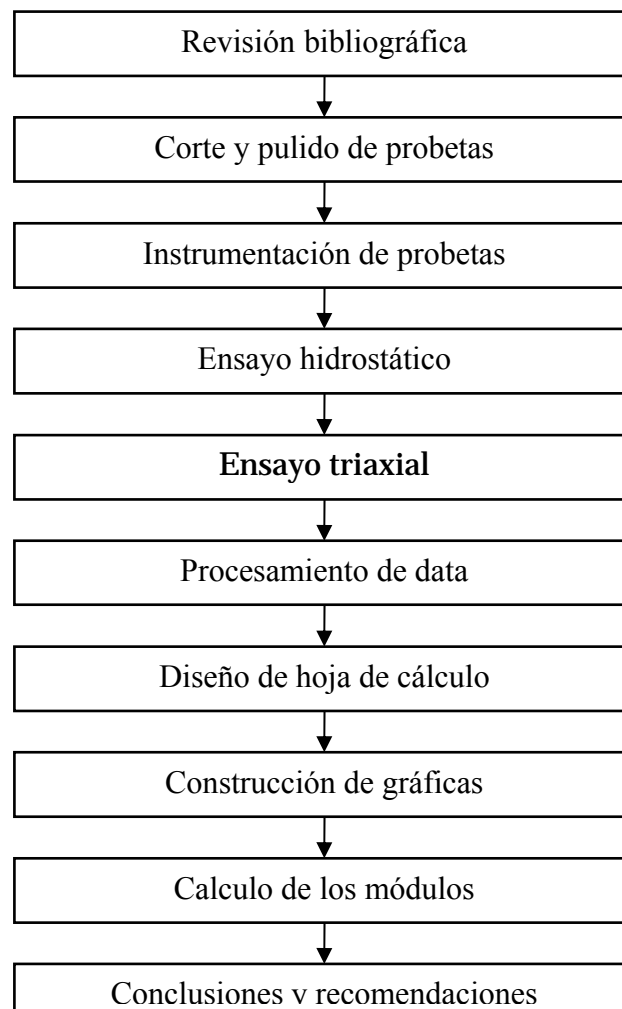


Figura 3.20. Flujograma de la metodología empleada. Fuente: Propia.

CAPITULO IV

HERRAMIENTAS UTILIZADAS

4.1. Equipo AUTOLAB 2000

Es un completo sistema de laboratorio que cuenta con los sistemas hardware y software; compuesto por una consola hidráulica, una celda triaxial, una consola electrónica y un sistema computarizado. Todo fue fabricado por la New England Research, Inc (NER). Este equipo está diseñado para medir las propiedades acústicas, mecánicas y eléctricas de las rocas cilíndricas de 1", 1 ½ ", 2".

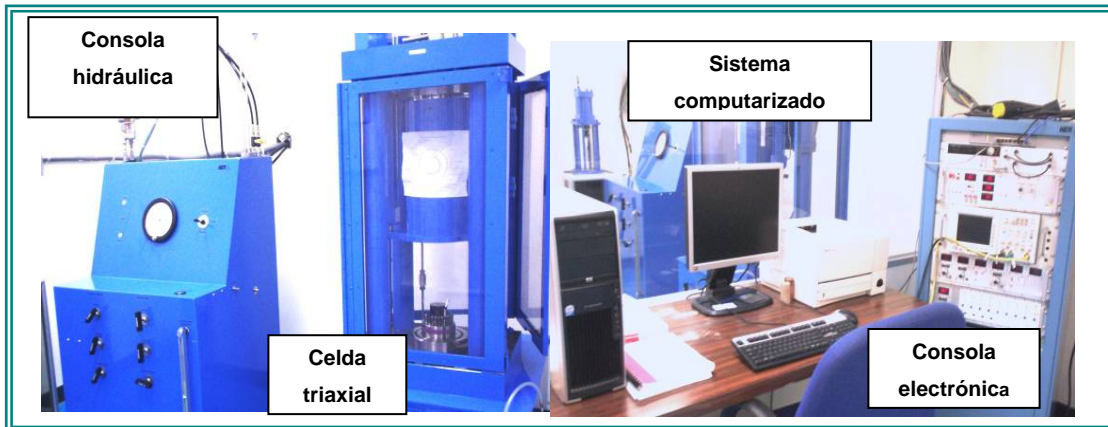


Figura 4.1. Equipo Autolab2000.Fuente: Propia

De los ensayos mecánicos las propiedades que se determinan son resistencia mecánica, módulo de Young, relación de Poisson, módulo de corte y módulo de Bulk. Durante el tiempo de ejecución del ensayo, el programa va colectando datos de la

presión de confinamiento, presión de poros, esfuerzo axial y deformaciones medidas por los sensores; todo esto en función del tiempo.

4.2. Software microsoft excel

Es una aplicación para manejar hojas de cálculos. Este programa es diseñado y distribuido por la empresa Microsoft.

Permite también el trabajo con bases de datos una vez que se obtiene la data almacenada en el mismo formato de EXCEL, la utilidad de esta aplicación está en poder utilizar filas y columnas para almacenar la información y programar hojas de cálculos que permita obtener resultados óptimos. Permite semi-automatizar casi todas las operaciones y ahorrarse buena parte del tiempo en calcular formulas extensas y engorrosas.

Microsoft Excel está integrado en el paquete Microsoft Office, el cual es compatible en el intercambio de datos con las demás aplicaciones como Microsoft Word, Microsoft Access. Así como también permite la creación de gráficos que se modificarán automáticamente al cambiar los datos en su hoja de cálculo.

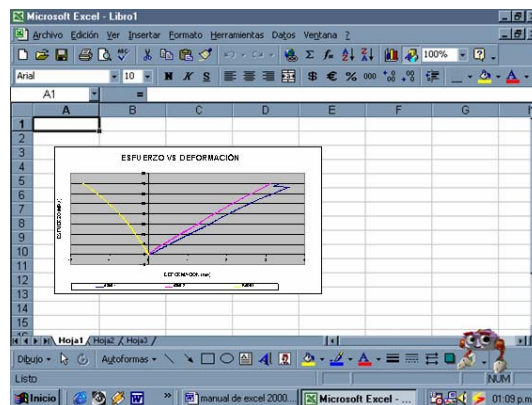


Figura 4.2. Ventana Microsoft Excel. Fuente: Propia

CAPITULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se discutirán todas las gráficas y resultados obtenidos de los ensayos realizados a las muestras de lutitas del núcleo ZG-349 del Campo Zapatos-Mata R. La Tabla 5.1 indica la profundidad, orientación y tipo de ensayo realizado sobre cada una de estas muestras.

Tabla. 5.1. Ensayos realizados en muestras ZG-349. Fuente: Propia

| PROFUNDIDAD | ORIENTACIÓN | Nº DE PROBETA | EMSAYO |
|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| 12537'2" | Horizontal A | 1 | E. Mecánico |
| 12537'2" | Horizontal B | 2 | Fracturada |
| 12537'3" | Vertical | 3 | E. Mecánico |
| 12549'9" | Vertical | 4 | E. Mecánico |
| 12549'12" | Horizontal A | 5 | E. Mecánico |
| 12549'12" | Horizontal B | 6 | Fracturada |
| 12552'7" | Vertical A | 7 | E. Mecánico |
| 12552'7" | Vertical B | 8 | E. Mecánico |
| 12556'4" | Vertical | 9 | E. Mecánico |
| 12558'9" | Vertical A | 10 | E. Mecánico |
| 12558'9" | Vertical B | 11 | E. Acústico |
| 12561'5" | Horizontal | 12 | E. Acústico |
| 12561'7" | Vertical A | 13 | E. Acústico |
| 12561'7" | Vertical B | 14 | E. Acústico |
| 12561'7" | Horizontal | 15 | E. Mecánico |

Las probeta resaltadas en negrita son las de interés de esta investigación, las probetas 2 y 6 se fracturaron en el traslado hasta el laboratorio y las otras fueron

destinadas a ensayos acústicos para posteriores correlaciones. Las probetas para ensayos mecánicos se separaron en dos grupos según su orientación; verticales y horizontales.

5.1. Ensayos sobre probetas verticales

Estas probetas fueron extraídas verticalmente con respecto al núcleo, y por ello la laminación es perpendicular a la dirección en la que el fluido es inyectado en la probeta (Figura 5.1).

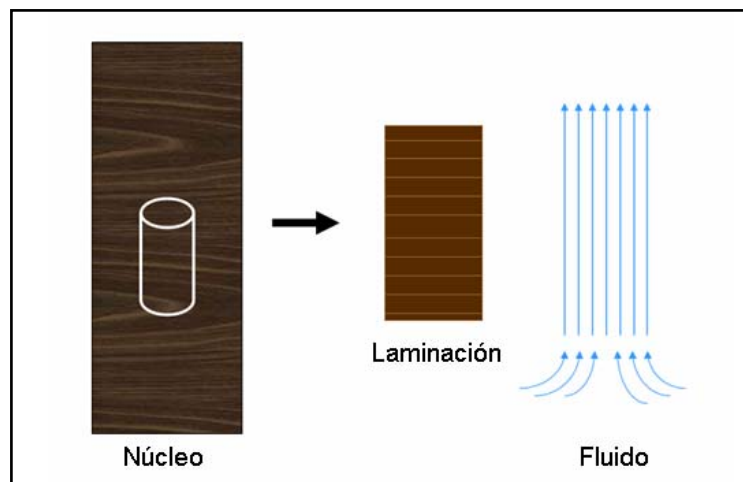


Figura 5.1. Laminación de la probeta vertical y dirección del fluido. Fuente: Propia.

Las probetas verticales son de mayor interés para este estudio ya que la mayoría de los pozos son perforados en dirección vertical, y los esfuerzos inducidos a la formación van en esta dirección.

5.1.1. Probeta 3

Corresponde a la profundidad de 12537'3"; a la cual se le realizó ensayo consolidado-no drenado, cuyos ensayos se realizaron de forma separada.

5.1.1.1. Ensayo hidrostático

Este ensayo se realizó en dos etapas (Figura 5.2). El tiempo de duración fue de 23 horas.

- **Etapas 1. Hidrostático de medio ciclo**

Las condiciones iniciales de este ensayo fueron: $\sigma_3=1,30$ MPa con una tasa de aplicación de $3,9 \times 10^{-7}$ MPa/s y σ_a bloqueado para que el pistón no tenga ningún desplazamiento.

Se obtuvo un valor de $B=1,00$; pero se considera que la probeta no estuvo bien saturada porque el valor de u *salida* se mantuvo en cero, indicando que el fluido no se transmitió a través de toda la probeta, esto pudiese ser ocasionado por la laminación de la probeta, la cual es perpendicular a la dirección de inyección de fluido, haciendo que esta actúe como barrera impermeable, impidiendo el flujo. La u *entrada* durante todo el ensayo fue mayor a la σ_3 , esto debido a la ley de acción y reacción, pero aun así u *entrada* y σ_3 son proporcionales en su incremento.

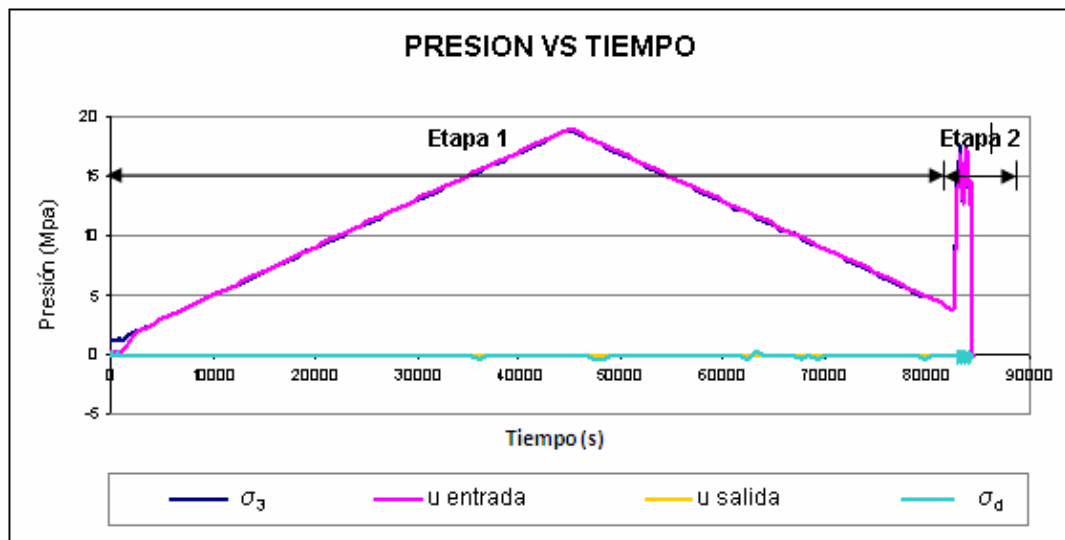


Figura 5.2. Presión vs tiempo. Ensayo hidrostático probeta 3. Fuente: Propia.

- **Etapa 2. Hidrostático de dos ciclos**

Las condiciones iniciales de este ensayo fueron; $\sigma_3=15,00$ MPa incrementándose a una *tasa* $=5,4 \times 10^{-7}$ MPa/s y σ_d bloqueado. Se configuró el ensayo para realizar dos ciclos de carga y descarga (Figura 5.2), con el fin de hacer que σ_3 y u aumentaran y disminuyeran varias veces para conseguir la relajación de la probeta y que la *u salida* se hiciera positiva, lo cual no se logró. El ensayo se detuvo antes de finalizar el último ciclo. El tiempo de duración del ensayo fue de 25 minutos. Se obtuvo un valor de $B=1,00$; pero se considera que la probeta no estuvo bien saturada porque el valor de *u salida* se mantuvo en cero, debido a la orientación de la probeta. La *u entrada* inicialmente fue menor a la σ_3 , pero para el segundo ciclo *u entrada* supero una vez más a σ_3 , esto debido a la ley de acción y reacción, siendo el incremento de *u entrada* siempre proporcional al de σ_3 .

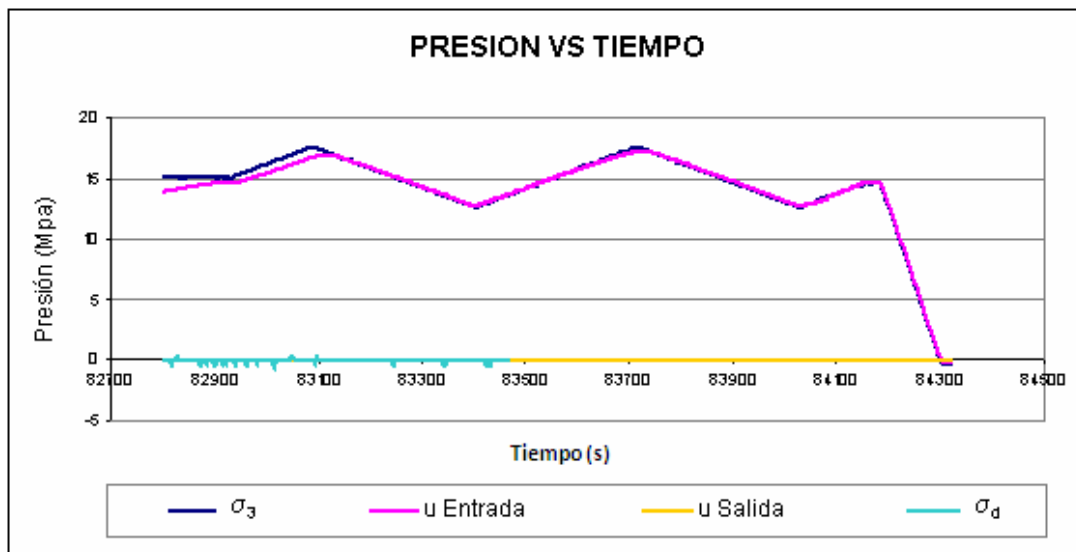


Figura 5.3. Presión vs tiempo. Etapa 2 ensayo hidrostático probeta 3. Fuente: Propia.

5.1.1.2. Ensayo triaxial

Fue un ensayo simultáneo (Figura 5.4). Las condiciones iniciales fueron; $\sigma_3=46,00$ MPa con decrecimiento a una *tasa* $=2 \times 10^{-5}$ MPa/s y $\sigma_d=0$ con incremento a una *tasa* $=1,31 \times 10^{-4}$ MPa/s. De este ensayo se obtuvo la gráfica esfuerzo vs deformación (Figura 6.5) a partir de la cual se calcularon los siguientes valores; *esfuerzo máximo* 81,44 MPa, *módulos de Young* 29,17 GPa, *relación de Poisson* 1,05; *módulo de rigidez* 25,28 GPa; *módulo de compresibilidad* 236,34 mstrain³/MPa y parámetro $A=-0,0015$; el cual corresponde a valores encontrados para arcillas muy sobre-consolidadas.

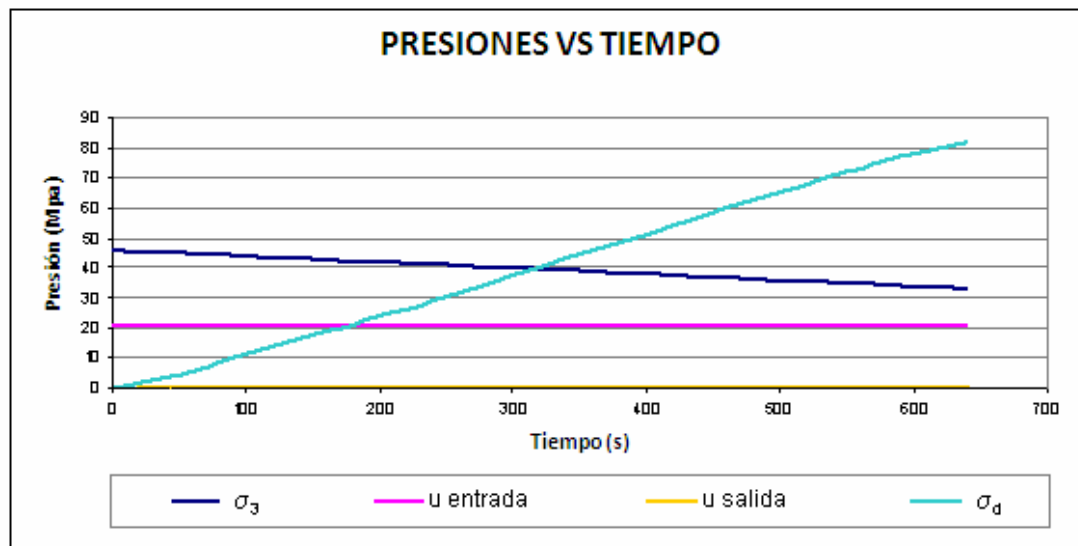


Figura 5.4. Presión vs tiempo. Triaxial probeta 3. Fuente: Propia

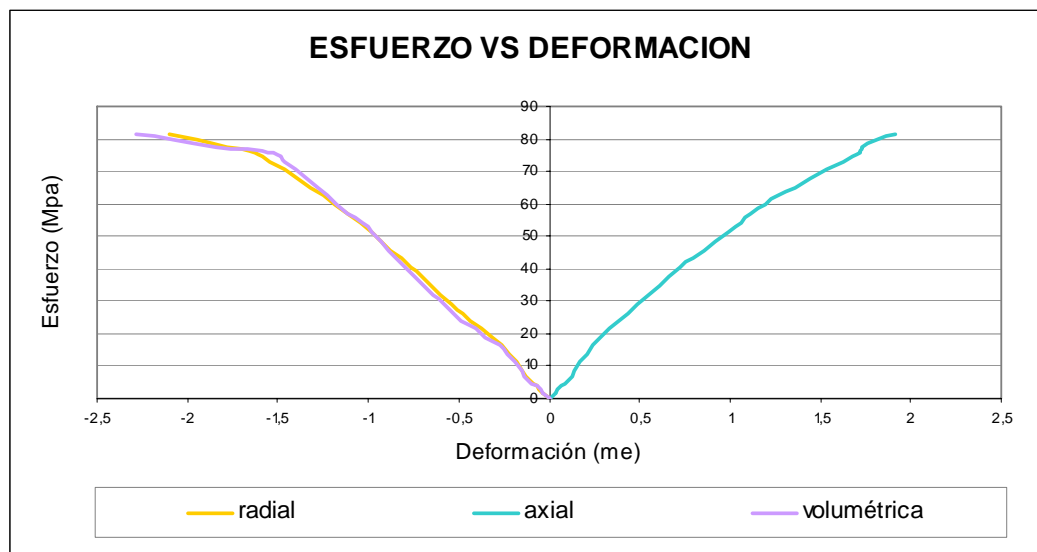


Figura 5.5. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 3. Fuente: Propia

5.1.2. Probeta 4

Corresponde a la profundidad 12549'9"; a la cual se le realizó ensayo consolidado-no drenado, cuyos ensayos se realizaron de forma simultánea en dos etapas (Figura 5.6). El tiempo de duración del ensayo fue de 14 horas y 12 minutos.

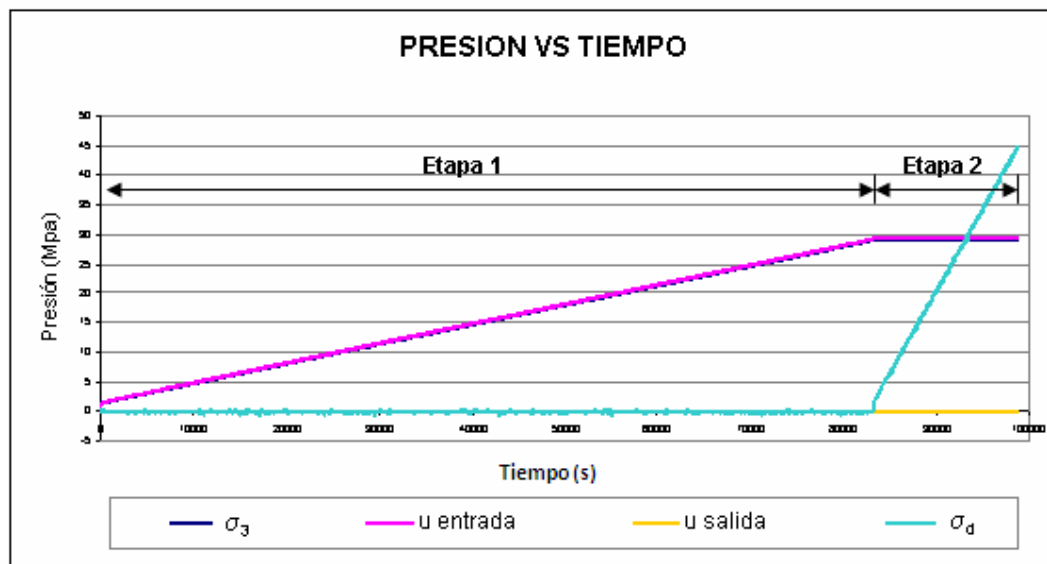


Figura 5.6. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 4. Fuente: Propia.

5.1.2.1. Ensayo hidrostático

Las condiciones iniciales de este ensayo fueron: $\sigma_3=1,50$ MPa, incrementándose a una *tasa* $=3,4 \times 10^{-7}$ MPa/s y σ_d bloqueado. Se obtuvo un valor de $B=1,00$; pero se considera que la probeta no estuvo bien saturada porque el valor de u *salida* se mantuvo en cero, lo que indica que el fluido no se transmitió a través de toda la probeta, esto ocasionado por la laminación, la cual es perpendicular a la dirección de inyección de fluido. La u *entrada* durante todo el ensayo fue mayor a la σ_3 , esto debido a la ley de acción y reacción, pero aun así u *entrada* y σ_3 son proporcionales en su incremento.

5.1.2.2. Ensayo triaxial

Las condición inicial fue: $\sigma_3=29,00$ MPa, con un incremento del σ_d a una *tasa* $=4 \times 10^{-6}$ MPa/s. De este ensayo se obtuvo la gráfica esfuerzo vs deformación (Figura 5.7) a partir de la cual se calcularon los siguientes valores; *esfuerzo máximo* 44,45 MPa, *Módulos de Young* 155,80 GPa, *relación de Poisson* 3,26 esto debido a que la deformación radial fue mucho mayor a la deformación axial; *módulo de rigidez* 38,39 GPa; *módulo de compresibilidad* 912,49 mstrain³/MPa y parámetro $A=-0,00045$; el cual corresponde a valores encontrados para arcillas muy sobre-consolidadas.

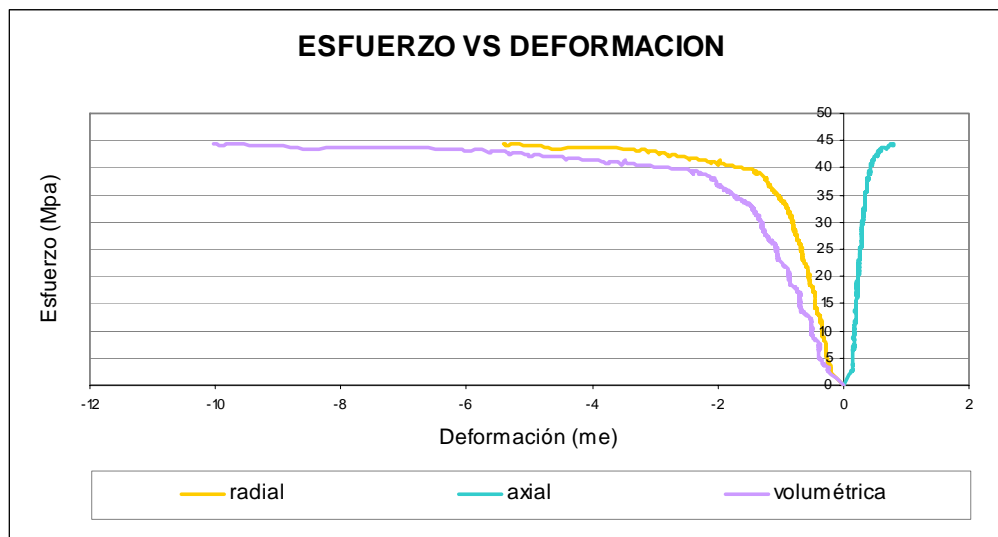


Figura 5.7. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 4. Fuente: Propia.

5.1.3. Probeta 7

Corresponde a la profundidad 12552'7"; a la cual se le realizó ensayo consolidado-no drenado, cuyos ensayos se realizaron de forma simultánea en dos etapas, (Figura 5.8).

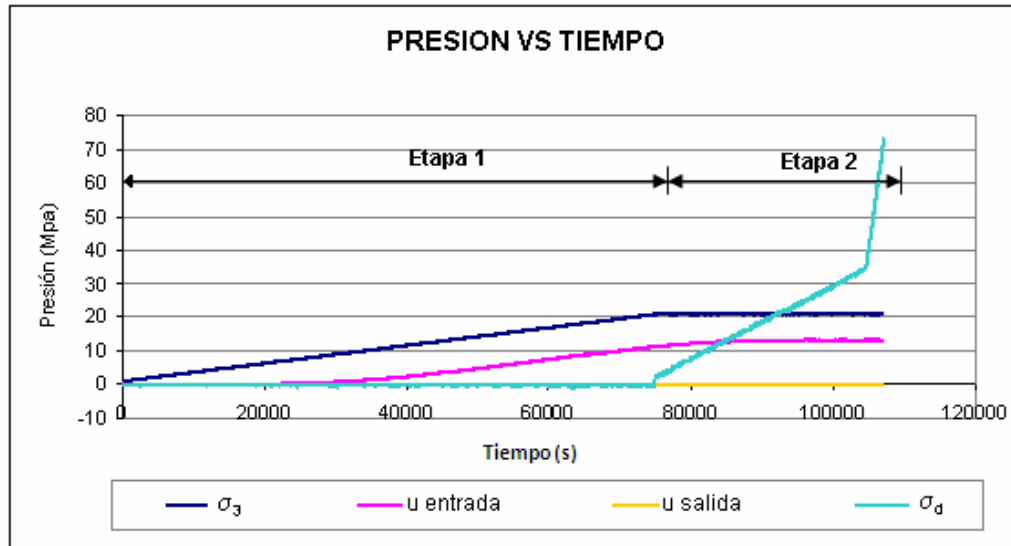


Figura 5.8. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 5. Fuente: Propia.

5.1.3.1. Ensayo hidrostático

Las condiciones iniciales de este ensayo son; $\sigma_3=1,20$ MPa con incremento a una *tasa* $=2,7 \times 10^{-7}$ MPa/s y σ_d bloqueado. El tiempo de duración del ensayo fue de 20 horas y 45 minutos. Se obtuvo un valor de $B=0,95$; pero se considera que la probeta no estuvo bien saturada por ser este valor diferente de 1 y porque el valor de *u salida* se mantuvo en cero, lo que indica que el fluido no se transmitió a través de toda la probeta. La *u entrada* durante todo el ensayo fue mucho menor a la σ_3 , por lo que se afirma que no hubo buena permeabilidad durante esta prueba, *u entrada* y σ_3 son proporcionales en su incremento en algunos tramos de este ensayo.

5.1.3.2. Ensayo triaxial

Las condiciones iniciales fueron $\sigma_3=21$ MPa, $\sigma_d=0$ con incremento a una *tasa* $=9,1 \times 10^{-7}$ MPa/s la cual es muy baja, por lo que se le aumento a $1,1 \times 10^{-6}$ MPa/s,

de este ensayo se obtuvo la gráfica esfuerzo vs deformación (Figura 6.9) a partir de la cual se calcularon los siguientes valores; *esfuerzo máximo* 72,96 MPa, *módulo de Young* 21,05 GPa, *relación de Poisson* 0,46; *módulo de rigidez* 14,10 GPa; *módulo de compresibilidad* 257,44 mstrain³/MPa y parámetro $A=-0,00457$; el cual corresponde a valores encontrados para arcillas muy sobre-consolidadas.

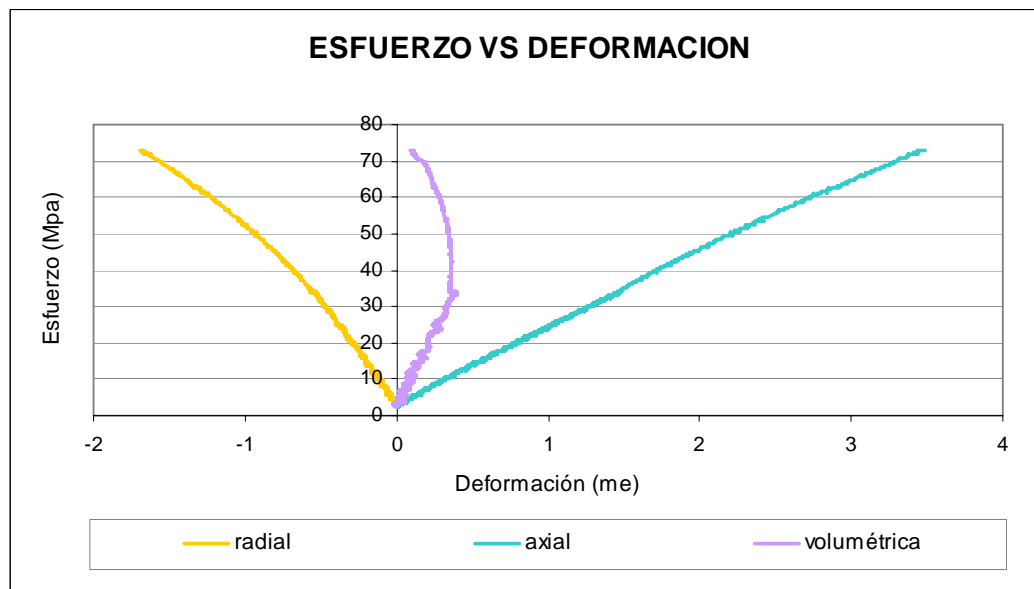


Figura 5.9. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 7. Fuente: Propia

5.1.4. Probeta 8

Corresponde a una profundidad de 12552'7"; a la cual se le realizó ensayo consolidado-no drenado, cuyos ensayos se realizaron de forma simultánea en dos etapas (Figura 5.10). El tiempo de duración del ensayo fue de 26 horas y 40 minutos.

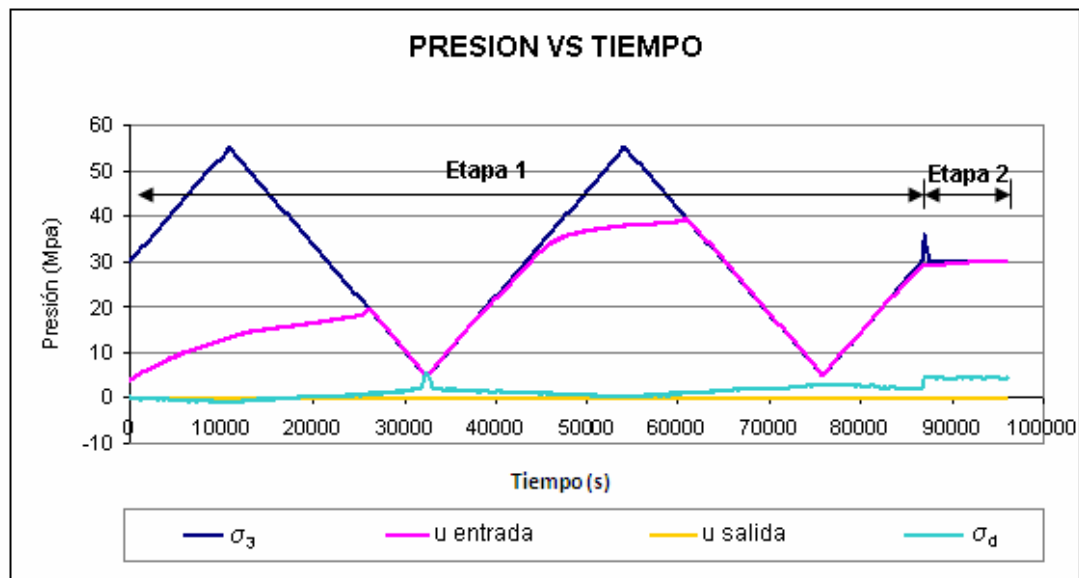


Figura 5.10. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 8. Fuente: Propia.

5.1.4.1. Ensayo hidrostático

Las condiciones iniciales de este ensayo fueron; $\sigma_3=30,00$ MPa incrementándose a una *tasa* $=2,3 \times 10^{-6}$ MPa/s y σ_d bloqueado. Se obtuvo un valor de $B=1,00$ en el ultimo tramo; pero se considera que la probeta no estuvo bien saturada porque el valor de *u salida* se mantuvo en cero, es decir; el flujo no se transmitió a través de toda la probeta. La *u entrada* durante todo el ensayo fue mucho menor a la σ_3 , por lo que se afirma que no hubo buena permeabilidad durante esta prueba. Por otra parte *u entrada* y σ_3 son proporcionales en algunos tramos de la misma prueba. Este ensayo demuestra que aunque a una presión cualquiera $B=1$; a una presión mayor pudiese ser $B \neq 1$, es decir que aunque $B=1$ la probeta no está 100% saturada. Los cambios producidos en las lecturas de σ_d son causados porque en las condiciones iniciales σ_3 es un valor positivo grande y σ_d se encuentra bloqueado, es decir, el pistón se encuentra tocando la probeta y resistiéndose a la presión confinante que lo empuja hacia arriba; pero al disminuir la σ_3 , el pistón que se encuentra bloqueado

permanece aplicando la misma fuerza, que al disminuir σ_3 hace que el pistón baje y aplique un presión sobre la probeta.

5.1.4.2. Ensayo triaxial

La condición inicial fue $\sigma_3=11,45$ MPa; al iniciar la etapa de carga del σ_a , la probeta rápidamente fracturó, lo que duró solo 2 minutos. De este ensayo se obtuvo la gráfica esfuerzo vs deformación (Figura 5.11), donde se observa que ocurrió la fractura de la probeta. No se obtuvo suficientes datos como para realizar cálculos de las constantes elásticas; sin embargo los valores obtenidos son: *esfuerzo máximo* 4,41 MPa, *módulo de Young* 65,91 GPa, *relación de Poisson* -0.39; *módulo de rigidez* 42,69 GPa; *módulo de compresibilidad* -9,36 mstrain³/MPa y parámetro $A=0,010693$; el cual corresponde a valores encontrados para arcillas ligeramente sobre-consolidadas.

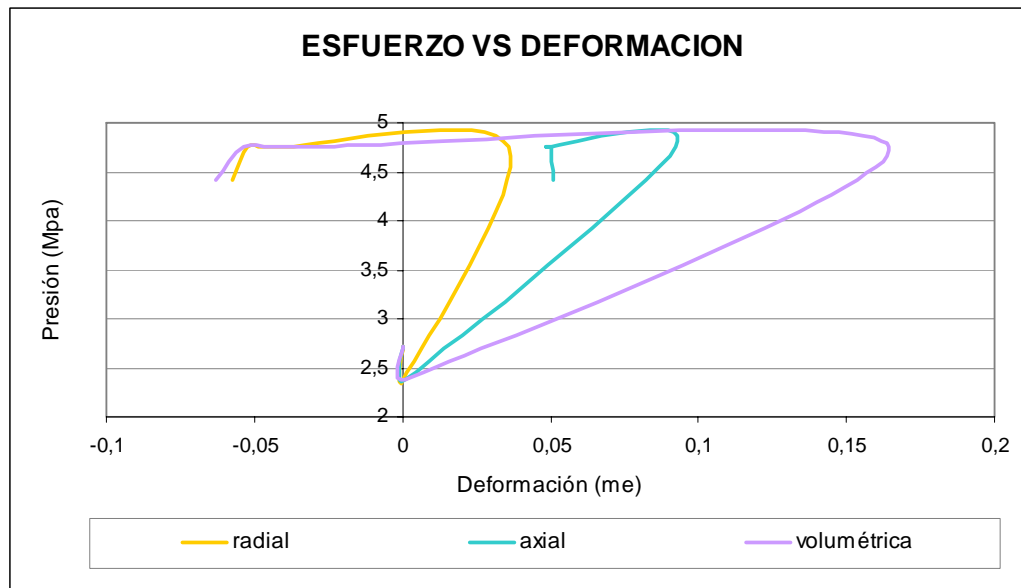


Figura 5.11. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 8. Fuente: Propia

5.1.5. Probeta 9

Esta probeta corresponde a la profundidad 12556'4"; a la cual se le realizó ensayo consolidado-no drenado, cuyos ensayos se realizaron de forma simultánea en dos etapas (Figura 5.12).

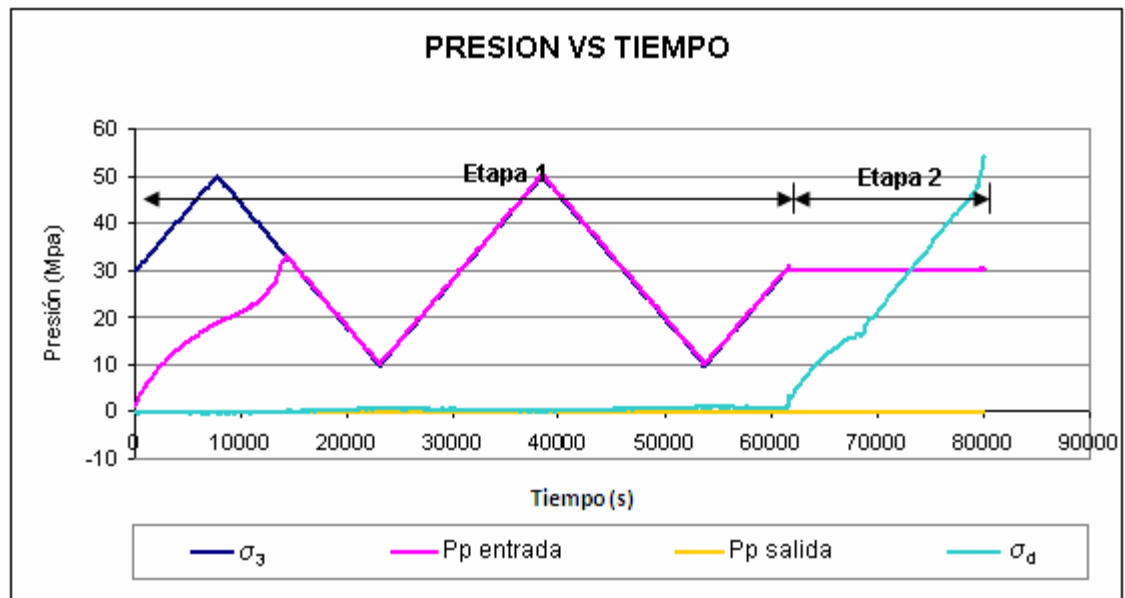


Figura 5.12. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 9. Fuente: Propia.

5.1.5.1. Ensayo hidrostático

Las condiciones iniciales de este ensayo son; $\sigma_3=30,00$ MPa con una tasa de aplicación de $2,58 \times 10^{-6}$ MPa/s y σ_d bloqueado; para dos ciclos de carga y descarga de σ_3 . El tiempo de duración del ensayo fue de 22 horas y 13 minutos. Se obtuvo un valor de $B=1,00$; pero se considera que la probeta no estuvo bien saturada porque el valor de u salida se mantuvo en cero, lo que indica que el fluido no se transmitió en toda la probeta. La u entrada al principio del ensayo fue mucho menor a la σ_3 , pero luego de un tiempo, casi a la mitad del primer ciclo la u entrada y σ_3 se hicieron

proporcionales en su incremento, siendo *u entrada* un poco mayor a σ_3 por la ley de acción y reacción.

5.1.5.2. Ensayo triaxial

Las condiciones iniciales fueron $\sigma_3=30,00$ MPa, la tasa de aplicación de σ_d es de $1,74 \times 10^{-6}$ MPa/s (mucho más alta que para los ensayos anteriores). Se obtuvo la gráfica esfuerzo vs deformación (Figura 6.13), a partir de la cual se calcularon los siguientes valores: *esfuerzo máximo* 54,14 Mpa, *módulo de Young* 40,35 GPa, *relación de Poisson* 1,34; *módulo de rigidez* 18,26 GPa; *módulo de compresibilidad* 660,25 mstrain³/MPa y *parámetro A*=0,004882; el cual corresponde a valores encontrados para arcillas ligeramente sobre-consolidadas.

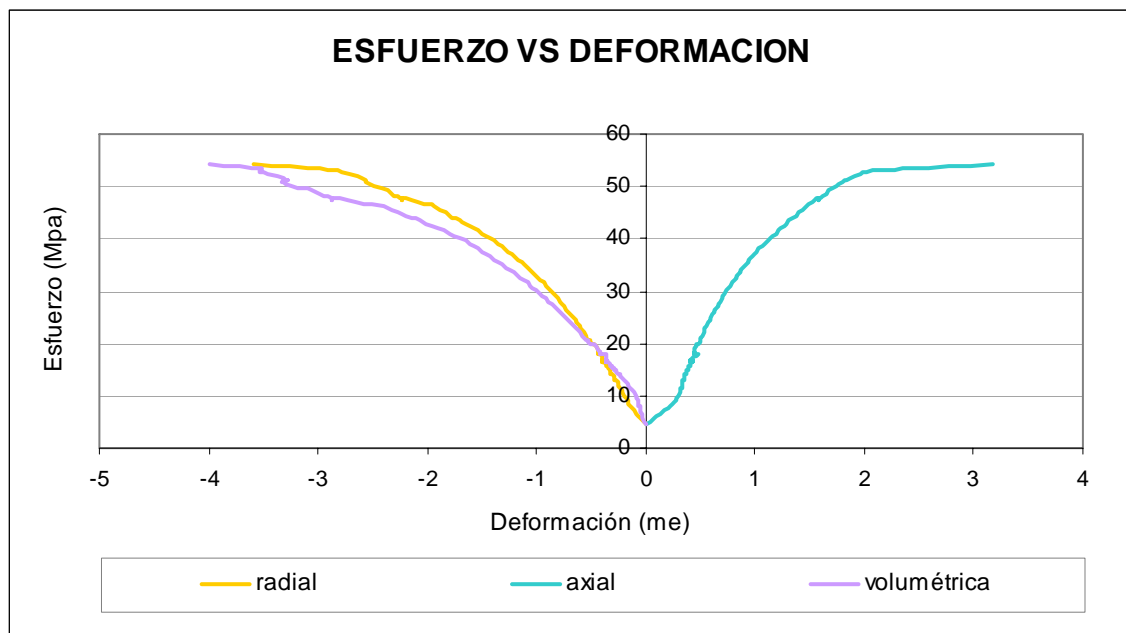


Figura 5.13. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 9. Fuente: Propia

5.1.6. Probeta 10

Corresponde a la profundidad 12558'9"; a la cual se le realizó ensayo consolidado-no drenado, cuyos ensayos se realizaron de forma simultánea en dos etapas (Figura 5.14).

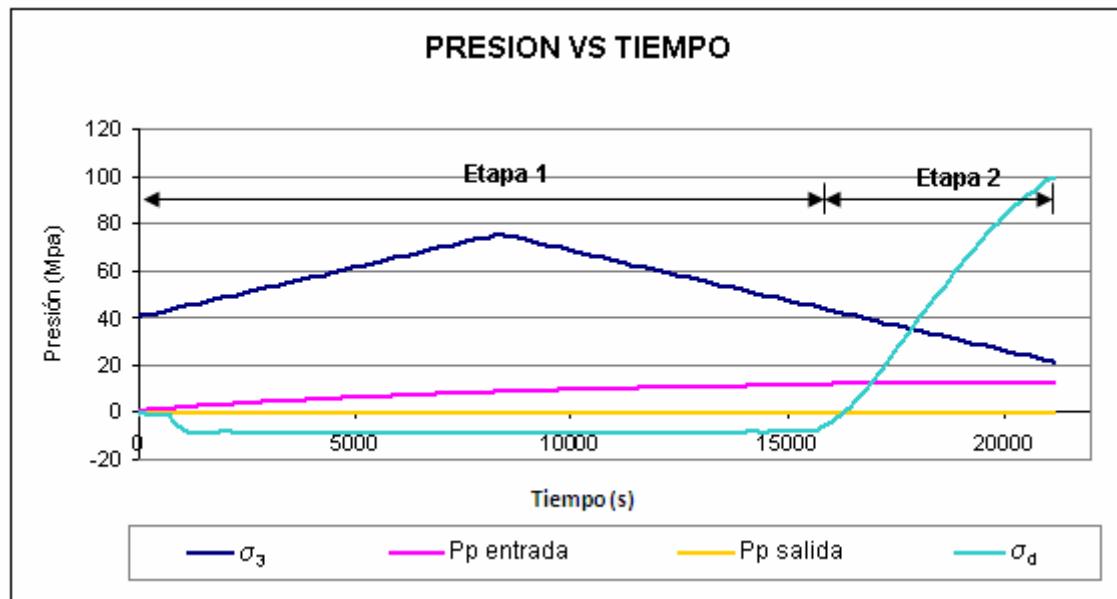


Figura 5.14. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 10. Fuente: Propia.

5.1.6.1. Ensayo hidrostático

Las condiciones iniciales de este ensayo son; $\sigma_3=40,50$ MPa con una tasa de aplicación de $4,2 \times 10^{-6}$ MPa/s y σ_a bloqueado; para medio ciclo de carga y descarga de σ_3 . El tiempo de duración del ensayo fue de 6 horas. Se obtuvo un valor de $B=-0,09$; por lo que se considera que la probeta no estuvo saturada y el valor de u salida se mantuvo en cero, lo que indica que no hubo permeabilidad. La u entrada en todo el ensayo fue mucho menor a la σ_3 y no fueron proporcionales.

5.1.6.2. Ensayo triaxial

Las condiciones iniciales son: tasa de aplicación de σ_d es de $21,5 \times 10^{-6}$ MPa/s, mucho más alta que para los ensayos anteriores; es $\sigma_3 = 12,54$ MPa y disminuyendo a una **tasa** $= 4,2 \times 10^{-6}$ MPa/s, de este ensayo se obtuvo la gráfica esfuerzo vs deformación (Figura 5.15) a partir de la cual se calcularon los siguientes valores; *esfuerzo máximo* 99,08 MPa, *módulo de Young* 22,73 GPa, *relación de Poisson* 0,37; *módulo de rigidez* 18,31 GPa; *módulo de compresibilidad* 225,00 mstrain³/MPa y *parámetro A* = 0,001647; el cual corresponde a valores encontrados para arcillas ligeramente sobre-consolidadas.

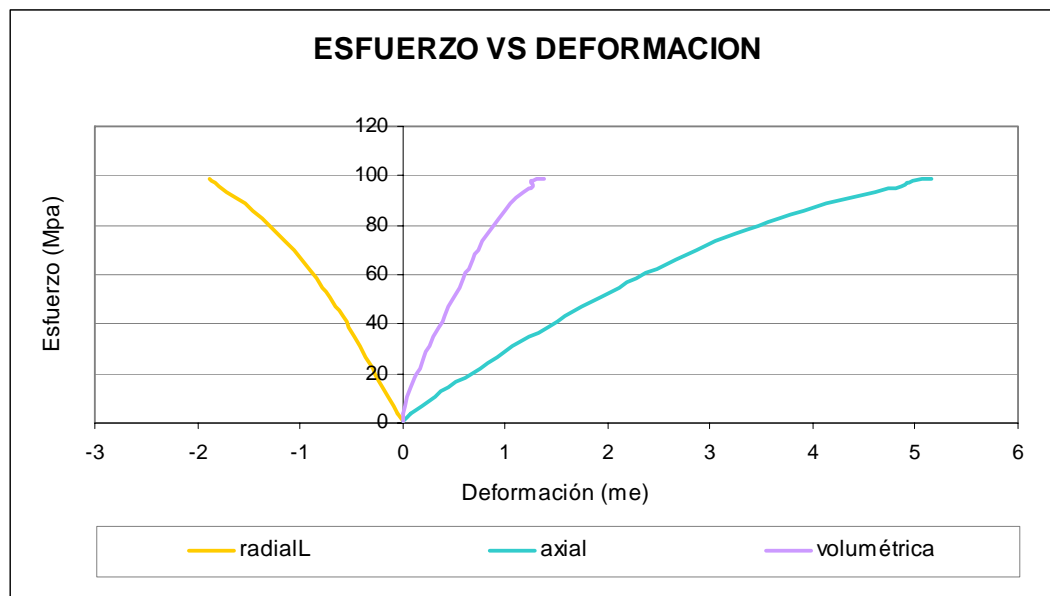


Figura 5.15. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 10. Fuente: Propia.

5.2. Ensayos sobre probetas horizontales

Estas probetas fueron extraídas horizontalmente con respecto al núcleo, y por ello la laminación de la probeta es paralela a la dirección en la que el fluido es inyectado (Figura 5.16).

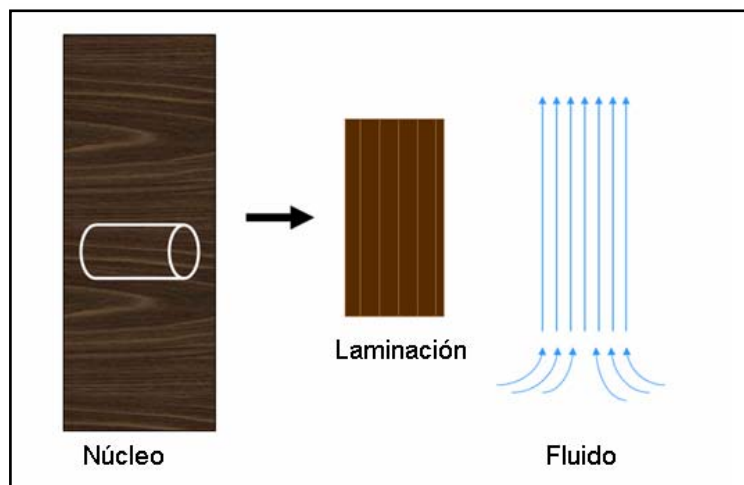


Figura 5.16. Laminación de la probeta horizontal y dirección del fluido. Fuente: Propia.

5.2.1. Probeta 1

Esta probeta corresponde a la profundidad 12537'2"; quien fue la única a la que se le realizó ensayo consolidado-drenado. Estos ensayos se realizaron de forma simultánea en dos etapas (Figura 5.17). El tiempo de duración del ensayo fue de 21 horas y 40 minutos.

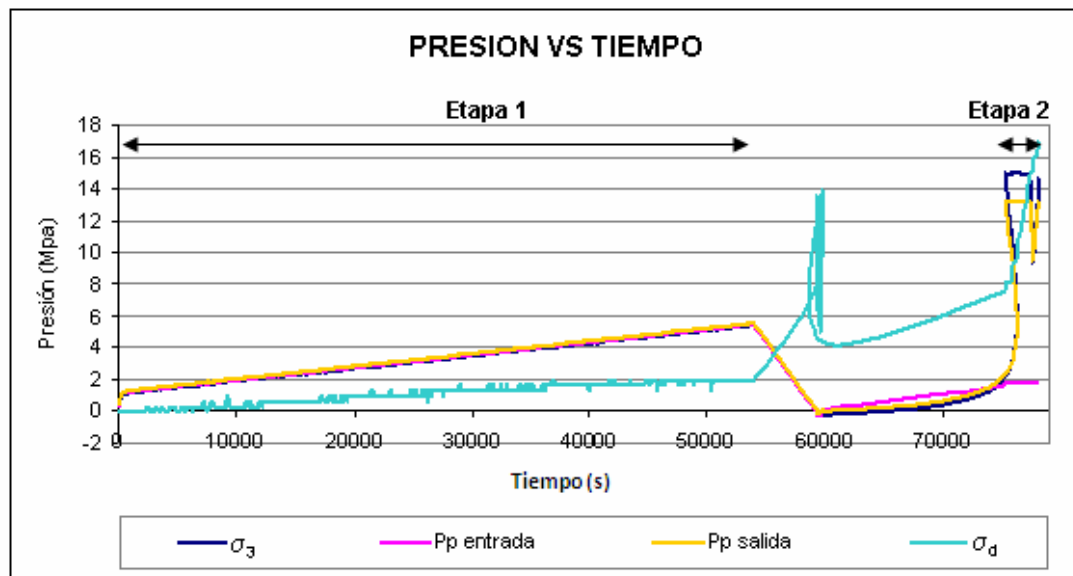


Figura 5.17. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 1. Fuente: Propia.

5.2.1.1. Ensayo hidrostático

Las condiciones iniciales de este ensayo son: $\sigma_3=0$ con una *tasa* $=8 \times 10^{-8}$ MPa/s y σ_d desbloqueado lo que causo el desplazamiento del pistón. Se obtuvo un valor de $B=1,00$; y se considera que la probeta estuvo saturada ya que el valor de *u salida* fue proporcional a la *u entrada*. Los valores *u entrada* y *u salida* durante todo el ensayo fueron un poco mayores a la σ_3 esto debido al principio de acción y reacción.

Entre la *etapa 1* y la *etapa 2* se pueden apreciar unas mediciones y oscilaciones en el σ_d , esto fue causado porque el ensayo fue desmontado, ya que se presumió que las *u* y σ_3 se hacían casi iguales por una posible mala colocación en los cabezales, por lo que se monto nuevamente el ensayo, pero en el transcurso de este tiempo el *Autolab2000* tomo algunas medidas.

5.2.1.2. Ensayo triaxial

Este ensayo fue muy corto y se obtuvo pocos datos, ya que la toma de estos se realizó cada 2 minutos. La condiciones iniciales son: $\sigma_3=15,00$ MPa, $\sigma_d= 8,15$ MPa, la cual debió iniciar en cero, esto porque el pistón al estar desbloqueado ya había llegado a este valor. El σ_d incrementó a una *tasa* $=3,8 \times 10^{-6}$ MPa/s; de este ensayo se obtuvo la gráfica esfuerzo vs deformación (Figura 5.18), a partir de la cual se calcularon los siguientes valores: *esfuerzo máximo* 16,97 MPa, *módulo de Young* 11,98 GPa, *relación de Poisson* 0,43; *módulo de rigidez* 8,36 GPa; *módulo de compresibilidad* 437,01 mstrain³/MPa y *A* $=0,006095$ valor que corresponde a una arcilla ligeramente sobre-consolidada.

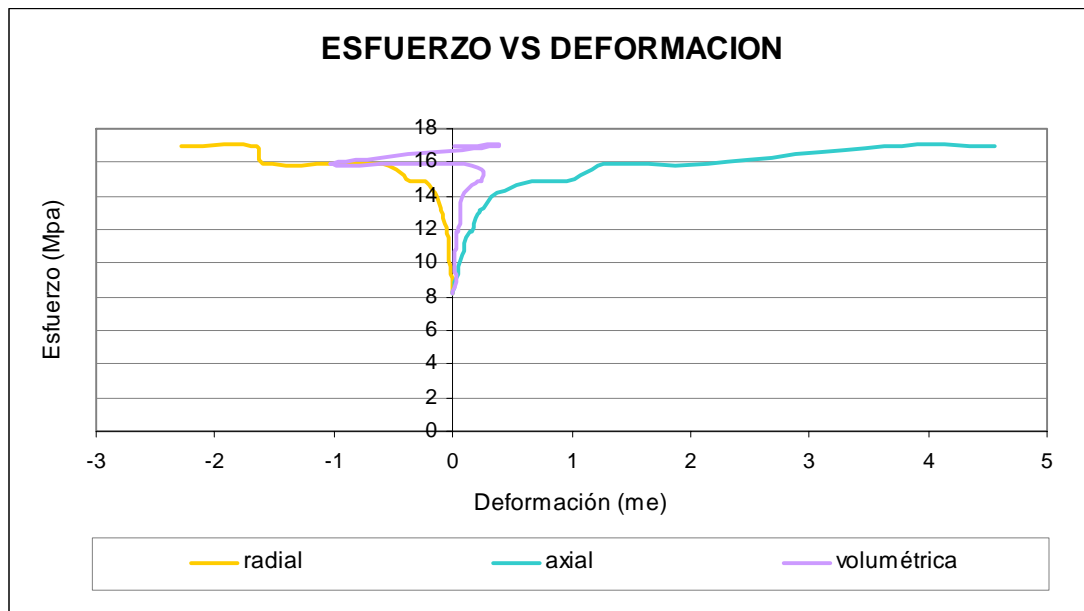


Figura 5.18. Esfuerzo vs deformación. Triaxial probeta 1. Fuente: Propia.

5.2.2. Probeta 5

Corresponde a la profundidad 12549'12"; a la cual solo se le realizo ensayo hidrostático (Figura 5.19). El tiempo de duración del ensayo fue de 21 horas y 34 minutos.

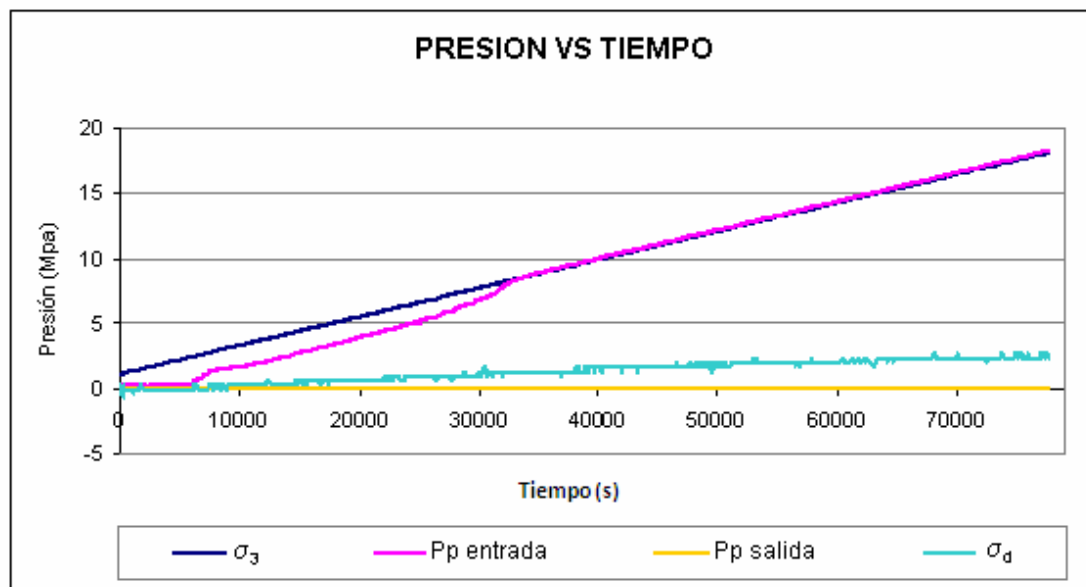


Figura 5.19. Presión vs tiempo. Ensayo probeta 5. Fuente: Propia.

5.2.2.1. Ensayo hidrostático

Las condiciones iniciales de este ensayo son; $\sigma_3=1,16$ MPa con incremento a una *tasa* $=2,2 \times 10^{-7}$ MPa/s y σ_a desbloqueado lo que causo el desplazamiento del pistón. Se considera que la probeta no estuvo saturada ya que el valor de *u salida* fue cero durante todo el ensayo, es decir, no hubo flujo de fluido en toda la probeta. Inicialmente la *u entrada* es cero, luego se registro un incremento que alcanzó una *tasa* $=2,3 \times 10^{-7}$ MPa/s la cual es mayor a la de σ_3 , hasta que *u entrada* alcanzó a la σ_3 . Se registraron valores *u entrada* que son un poco mayores a la σ_3 esto debido a la ley

de acción y reacción. Sin embargo estos dos valores fueron proporcionales en su incremento, obteniéndose $B=1$.

A esta probeta no se le realizó ensayo triaxial porque en el momento en que la u *salida* y la σ_3 se hicieron proporcionales se observa una gran deformación radial (Figura 5.20) y se presume inducción de fisuras a la probeta.

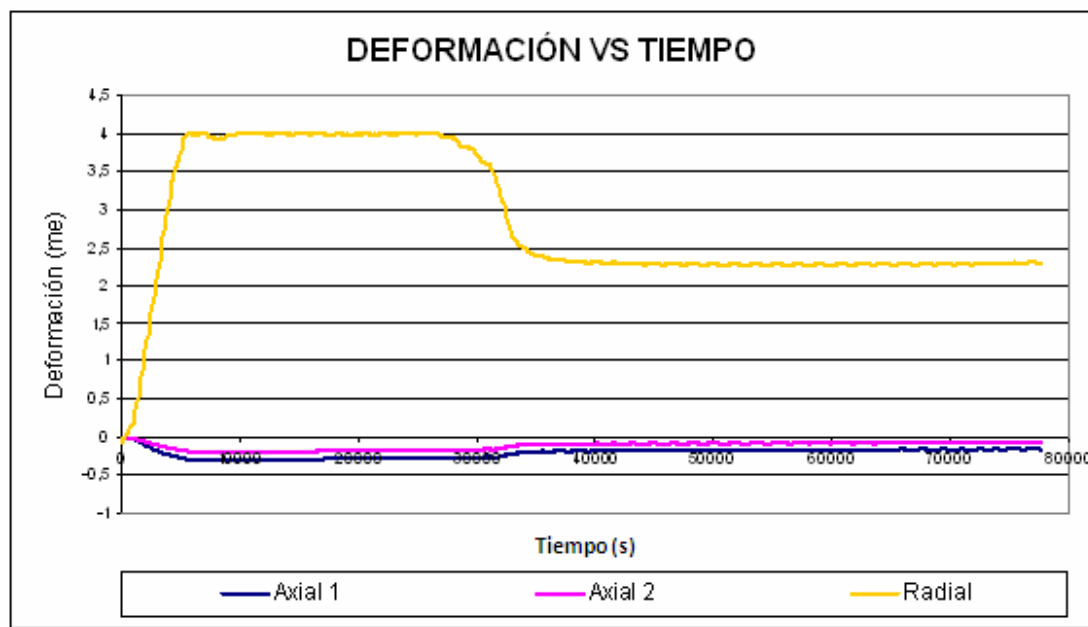


Figura 5.20. Deformación vs tiempo. Ensayo probeta 5. Fuente: Propia.

5.2.3. Probeta 15

Corresponde a la profundidad 12561'7"; a la cual solo se le realizó el ensayo hidrostático (Figura 5.21). El tiempo de duración del ensayo fue de 20 horas y 27 minutos.

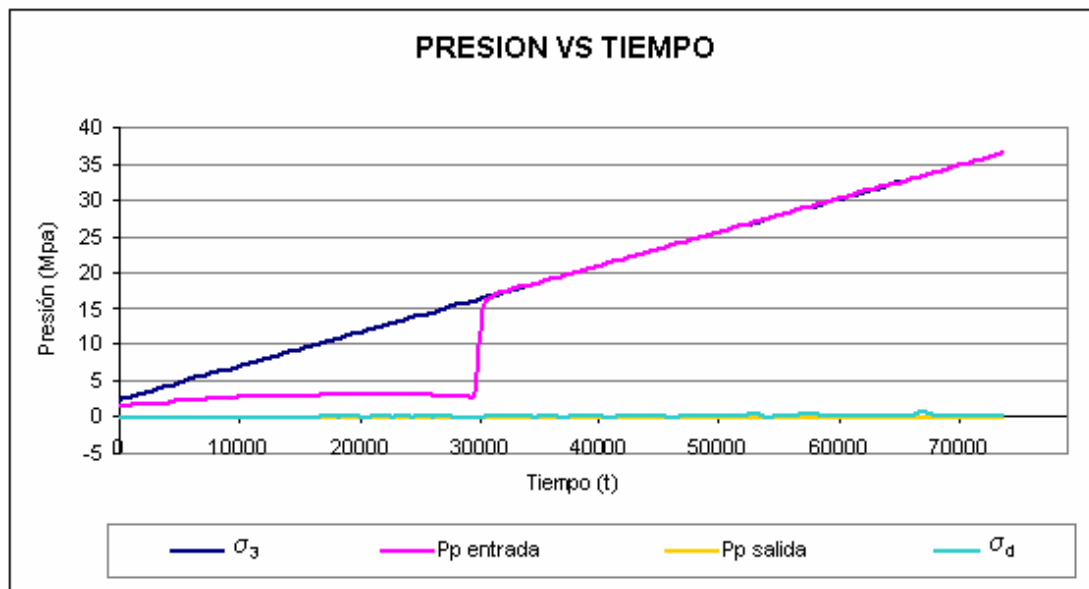


Figura 5.21. Presión vs tiempo. Ensayo muestra 15. Fuente: Propia.

5.2.3.1. Ensayo hidrostático

Las condiciones iniciales de este ensayo son; $\sigma_3=2,50$ MPa con incremento a una *tasa* $=4,6 \times 10^{-7}$ MPa/s y σ_d bloqueado para evitar el desplazamiento del pistón. Se obtuvo un valor de $B=1,00$; y se considera que la probeta no estuvo saturada ya que el valor de *u salida* fue siempre cero, por lo que se afirma que no hubo permeabilidad. Los valores *u entrada* al principio fueron muy bajos y ascendían a una *tasa* $=2 \times 10^{-9}$ MPa/s pero a los 3000 segundos ocurrió un incremento súbito que se aproximó a la σ_3 . Durante el tiempo restante los valores de *u salida* fueron un poco mayores a la σ_3 esto debido a la ley de acción y reacción.

En la Figura 5.22 se puede observar que a los 3000 segundos ocurre una gran deformación por lo que no se considero esta probeta buena candidata para un ensayo triaxial.

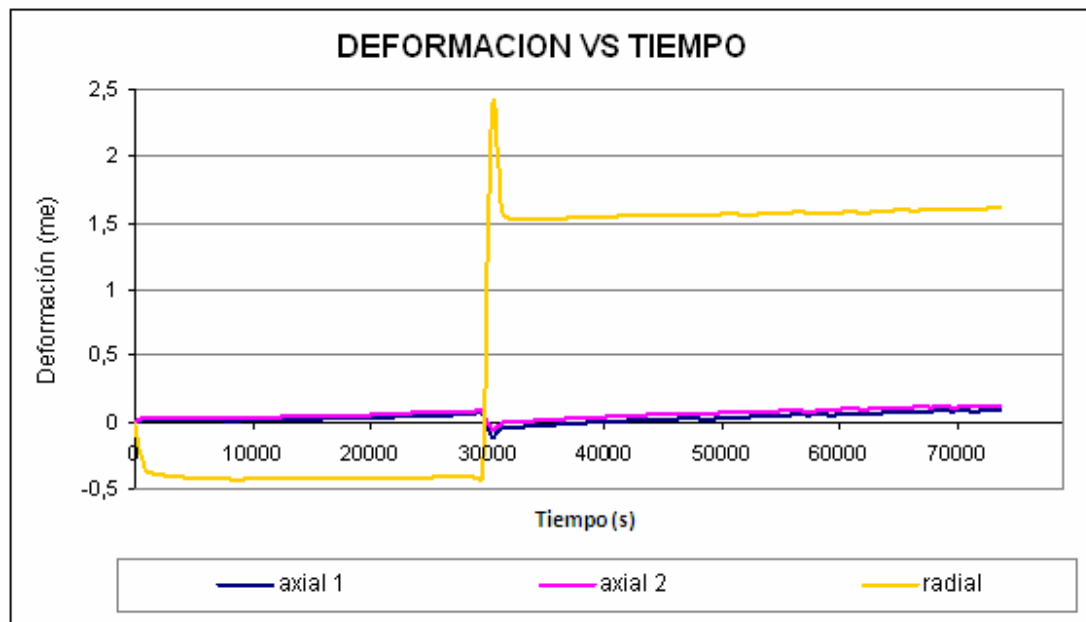


Figura 5.22. Deformación vs tiempo. Ensayo probeta 15. Fuente: Propia.

5.3. Resultados

Los resultados obtenidos de los ensayos se recopilaron en la Tabla 5.1; donde los valores que están resaltados en rojo son anómalos pues para materiales elásticos el módulo de Poisson es menor a 0,5 y esto es debido a que las deformaciones radiales para estas probetas fueron mucho mayores a las deformaciones axiales; y esto puede haber ocurrido por la aplicación de excesiva presión confinante durante la prueba hidrostática pues estos tres ensayos tienen en común que la presión confinante era aproximadamente 30 MPa; lo que puede significar que la lutita dejó de estar en un estado elástico para pasar a un estado plástico y comportarse de esa manera.

Los valores resaltados en gris fueron descartados de los análisis de los módulos pues a estas muestras no se les realizaron ensayos triaxiales; pero sin embargo los ensayos hidrostáticos estuvieron muy bien.

Tabla 5.1. Resultados de los ensayos. Fuente: Propia.

| H/V | PROF. pies | PROBETA | σ_3 MPa | MÓDULOS ELÁSTICOS ESTÁTICOS | | | | SKEMPTON | | σ MÁX MPa |
|------------|---------------|---------|-------------------|-----------------------------|--------------|------------|----------------------------------|----------|----------|------------------------|
| | | | | E GPa | ν adm | G GPa | K mstrain ³ /MPa | B | A | |
| VERTICAL | 12537,25 | 3 | 33,26 | 29,17 | 1,05 | 25,28 | 236,34 | 1,00 | -0,0015 | 81,44 |
| | 12549,75 | 4 | 29,00 | 155,80 | 3,26 | 38,39 | 912,49 | 1,00 | -0,00045 | 44,45 |
| | 12552,58 | 7 | 21,00 | 21,05 | 0,46 | 14,10 | 257,44 | 0,95 | -0,00457 | 72,96 |
| | 12552,58 | 8 | 11,45 | 65,91 | -0,39 | 42,69 | -9,36 | 1,00 | 0,010693 | 4,41 |
| | 12556,33 | 9 | 30,00 | 40,35 | 1,34 | 18,26 | 660,25 | 1,00 | 0,004882 | 54,14 |
| | 12558,75 | 10 | 13,12 | 22,73 | 0,37 | 18,31 | 225,00 | -0,09 | - | 99,08 |
| HORIZONTAL | 12537,17 | 1 | 15,00 | 11,98 | 0,43 | 8,36 | 437,01 | 1,00 | 0,006095 | 16,97 |
| | 12550 | 5 | - | - | - | - | - | 1,00 | - | - |
| | 12561,58 | 15 | - | - | - | - | - | 1,00 | - | - |

5.4. Círculos de Mohr y envolventes de falla

Con estos valores se dibujaron los círculos de Mohr para esfuerzos totales; obteniéndose unos círculos que no traducen ningún estado de esfuerzos (Figura 5.23).

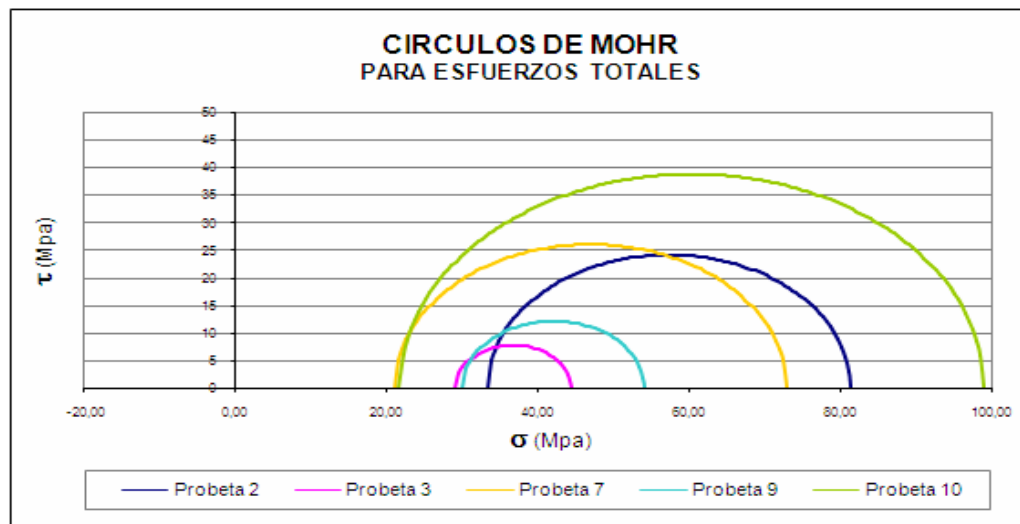


Figura 5.23. Círculos de Mohr para esfuerzos totales. Fuente: Propia.

Después de esto se dibujaron los círculos de Mohr para esfuerzos efectivos, que dieron como resultado el desplazamiento hacia la derecha de los círculos con un comportamiento más armónico; véase la Figura 5.24.

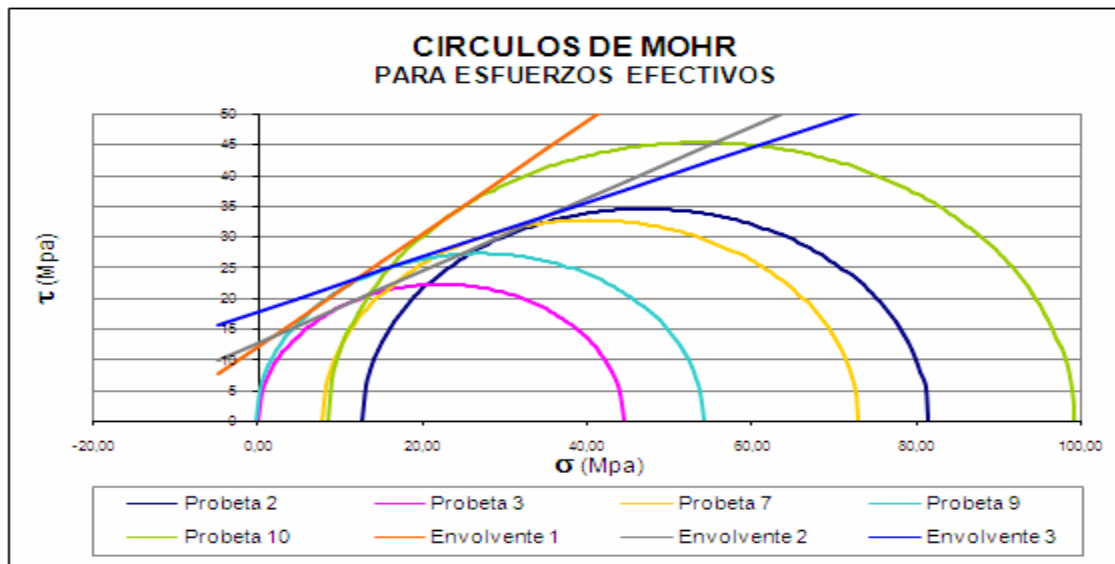


Figura 5.24. Círculos de Mohr para esfuerzos efectivos. Fuente: Propia.

A estos círculos para esfuerzos efectivos se les calcularon 3 envolventes de falla; dando como resultado los valores de c' y ϕ' mostrados en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Valores de c' y ϕ' resultantes. Fuente: Propia.

| ENVOLVENTE | c' MPa | ϕ' rad | ϕ' grados | PROBETAS |
|------------|-------------|----------------|-------------------|----------|
| 1 | 12,24 | 0,74 | 47,04 | 9 Y 10 |
| 2 | 12,71 | 0,53 | 33,84 | 3 Y 4 |
| 3 | 17,77 | 0,42 | 26,71 | 3 Y 9 |

Entonces; se construyeron las ecuaciones de la resistencia al esfuerzo cortante de las lutitas de este estudio; para las diferentes envolventes de fallas halladas de los ensayos.

$$\tau_{f1} = 12,24 + \sigma \tan 0,74$$

$$\tau_{f2} = 12,71 + \sigma \tan 0,53$$

$$\tau_{f3} = 17,77 + \sigma \tan 0,42$$

Se calculó un promedio de la cohesión obtenida para estas envolventes; obteniéndose $C=14,24$ MPa, el cual está en el rango establecido por González, L; 2002. promediando el ángulo de fricción se obtuvo $\phi=35,86^\circ$, un poco bajo con respecto a lo obtenido por González, L (40-60°).

5.5. Vestido y permeabilidad en las probetas

En la Tabla 5.3 se muestran los materiales utilizados para vestir las probetas, los cuales no funcionaron en estas lutitas para hacerlas permeables; pues nunca hubo buena *u salida*, lo que indica que aunque el parámetro **B** sea igual a 1, no significa que la muestra esté saturada o que sea permeable.

Tabla 5.3. Materiales utilizados para vestir las probetas. Fuente: Propia

| Nº DE PROBETAS | VESTIDO |
|----------------|-----------|
| 1 | TAMIZ 200 |
| 3 | TUL |

| | |
|----|-----------|
| 4 | ORGANZA |
| 5 | TUL |
| 7 | DOPIOVELO |
| 8 | TUL |
| 9 | DOPIOVELO |
| 10 | ORGANZA |
| 15 | LIENZO |

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

1. Relajar la muestra haciendo ensayos hidrostáticos de varios ciclos de carga y descarga de presión confinante no logró hacer a la probeta permeable.
2. El vestido en las probetas de lutitas no indujo una permeabilidad, porque después de ser ensayadas se les retiro la chaqueta y el vestido, yal triturarlas no contenían fluido de poros en su interior, este solo se situaba entre la chaqueta, el vestido y parte de la superficie de la chaqueta. Además el equipo *Autolab2000* no se registró presión de poros en la salida de la probeta. Lo que se registró como presión de poros u en realidad pudiese llamarse presión de chaqueta.
3. En algunos casos las deformaciones radiales fueron mucho mayores a las deformaciones axiales, esto debido a la aplicación de grandes presiones de confinamiento, las cuales hacen que el material entre en un rango plástico.
4. Existe gran diferencia entre la tasa de carga de un ensayo realizado en laboratorio y la tasa real ocurrida para le formación de la lutita (pasado geológico), las cuales son permanentes. Esto pudiese afectar la obtención de resultados confiables en ensayos triaxiales.
5. Los círculos de Mohr están fuertemente influenciados por la presión de poros, y en este caso por la presión de chaqueta. Para esta serie de ensayos los círculos para esfuerzos efectivos describen un comportamiento más armónico

que los círculos para esfuerzos totales. De los cuales se obtuvo para las lutitas del pozo ZG-349 los siguientes parámetros de resistencia para 3 envolventes encontradas:

| ENVOLVENTE | c' MPa | ϕ' grados | PROBETAS |
|------------|-------------|-------------------|----------|
| 1 | 12,24 | 47,04 | 9 Y 10 |
| 2 | 12,71 | 33,84 | 3 Y 4 |
| 3 | 17,77 | 26,71 | 3 Y 9 |

Al promediar los valores se obtuvo $c' = 14,24$ MPa, $\phi' = 35,86^\circ$.

6. El esfuerzo máximo es mayor para muestras horizontales y el mayor encontrado corresponde a la probeta 10 (horizontal). Lo cual indica que cuando la laminación es paralela a la inyección del fluido la resistencia al esfuerzo cortante aumenta.
7. En ensayos sobre muestras verticales, confinados a presiones que tienden a 30 MPa, se observa disminución de la resistencia al aumentar el tiempo rotura durante el ensayo triaxial.

| ORIENTACIÓN | PROF. pies | Nº DE PROB. | TIEMPO s | σ_{max} MPa | σ_3 MPa |
|-------------|---------------|----------------|-------------|-----------------------|-------------------|
| VER | 12537,25 | 3 | 640,00 | 81,44 | 33,26 |
| | 12549,75 | 4 | 15528,60 | 44,45 | 29,00 |
| | 12556,33 | 9 | 17773,40 | 54,14 | 30,00 |

Y ese grupo de ensayos la deformación radial es mucho mayor a la deformación axial, esto causado por la aplicación de excesiva presión confinante, lo que provocó que la muestra pasara del estado elástico al estado plástico.

8. Las probetas verticales confinadas a presiones menores a 30 MPa, fueron más resistentes que una probeta horizontal con la misma condición

| PROF. pies | N° DE PROB | TIEMPO s | σ_{\max} MPa | σ_3 MPa | E Gpa | ν adm | G Gpa | K mstrain ³ /MPa |
|------------|------------|----------|---------------------|----------------|---------|-----------|---------|-------------------------------|
| 12537,17 V | 1 | 2400,00 | 16,97 | 15,00 | 11,98 | 0,43 | 8,36 | 437,01 |
| 12552,58 H | 7 | 32027,30 | 72,96 | 21,00 | 21,05 | 0,46 | 14,10 | 257,44 |
| 12558,75 H | 10 | 4828,50 | 99,08 | 13,12 | 22,73 | 0,37 | 18,31 | 225,00 |

A medida que aumenta la profundidad se incrementa el módulo de Young, disminuye la relación de Poisson, aumenta el módulo de rigidez y disminuye el módulo de compresibilidad.

6.2. Recomendaciones

1. Instrumentar las muestras solo con chaqueta y sin vestido pues la lutita no es un material permeable y el vestido filtraría fluido de poros entre la chaqueta y la muestra sin este pasar por los espacios vacíos, pues estos no están interconectados.
2. Recolectar datos continuamente cada 2 segundos para tener suficiente información del ensayo. El ensayo hidrostático y el ensayo triaxial deben ser de larga duración, a una tasa muy lenta para permitir la disipación de la presión de poros y evitar el colapso de la muestra. Preferiblemente 24 horas.
3. Realizar ensayos con presiones geostáticas calculadas a partir de registros de la perforación, para que los ensayos emulen las condiciones in-situ y se realicen en un rango probable.
4. Estudiar al comportamiento de las lutitas según teorías de plasticidad, ya que las deformaciones son más plásticas que elásticas. Esto debido a que las lutitas son rocas provenientes de la litificación de granos del tamaño de lodo y arcillas.
5. Para probetas lutíticas realizar ensayo consolidado no-drenado, con medición de presión de poros. Es decir, permitiendo el drenaje durante la prueba hidrostática e impidiendo el drenaje durante la aplicación del esfuerzo desviador (ensayo triaxial).
6. En la práctica las muestras no son siempre verticales y horizontales, pues la dirección de la laminación con respecto al eje del pozo depende de la dirección de la sarta de perforación la cual se inclina. También depende del

buzamiento de los estratos. Por ello, se deben realizar ensayos sobre probetas con laminaciones inclinadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Jaimes G; Moreno N., “Estudio Geomecánico y Acústico de la Formación Pagüey y Miembro La Morita en Muestras de Núcleo del Pozo Bor-31”, PDVSA, Puerto La Cruz, Venezuela. (2007).
2. Blundun M; Graterol L., “Análisis Geomecánico para la Perforación de los Hoyos Intermedios y de Producción en los Campos Barúa y Motatán”, PDVSA, Los Teques, Venezuela. (2000).
3. Moreno N., “Estudio Geomecánico en Estabilidad, en Los Campos Caipe-Torunos-Maporal y Obispo en La Cuenca Barinas-Apure, y Análisis de Simulación Numérica por el Método de Elementos Finitos”, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. (2006).
4. Sánchez, E; Graterol L; Suárez J., “Metodología de Selección de Parámetros Óptimos de Perforación de Formaciones Lutíticas para Estabilidad de Hoyo. Parte I y III”, PDVSA, Los Teques, Venezuela. (2004).
5. Rodríguez, J; Martínez, M; Sánchez, M., “Determinación de los Parámetros Mecánicos Básicos en Lutitas, Formación Carapita, Oriente de Venezuela Mediante el Uso del Sistema TSI (Terratek Strength Index)”, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. (2004).
6. Vasquez, A; Sanchez, M. “Introducción a la Geomecánica Petrolera”. V.V.A. Consultores, C.A., Caracas, Venezuela (1997).

7. Escario, V; Justo, J. “Resistencia al Esfuerzo Cortante de los Suelos”, Editorial DOSSAT, S.A., Madrid, España (1970).
8. Bustamante, A. “Ensayos de Laboratorio para Determinar Parámetros de Resistencia al Corte en Suelos”. Seminario Mecánica de Suelos Experimental y sus Aplicaciones.
9. González, L; Ferrer, M; Ortuño, L; Oteo, C., “Ingeniería Geológica”, Editorial Prentice Hall, España (2002).
10. Mendoza, J., “Introducción a la Física de Rocas”, Editorial Equinoccio, Venezuela (1998).
11. Stagg, K.C., Zienkewicz, C. “Mecánica de Rocas en la Ingeniería Práctica”, Madrid, España (1968).
12. Delfino, I; Vidal, M., “Caracterización del Intervalo Inferior Prospectivo de la Formación Oficina en los Campos Zapatos y Mata R”, Universidad de Oriente, Anzoátegui, Venezuela (2000).
13. “WEC 1997 Evaluación de Pozos”. SCHLUMBERGER, Caracas, Venezuela (1997).
14. Jaeger, J.; Cook, N; Zimmerman, R., “Fundamentals of Rock Mechanics”, Editorial Blackwell Publishing, España (2007).

APÉNDICES

APÉNDICE A

Equipos



Figura A.1. Cortadora RAYTECH ALP-105, se utiliza para emparejar la muestra.



Figura A.2. Pulidora WILTON 52A PSG-68, se utiliza para pulir las caras de la muestra.



Figura A.3. Extensiómetro MITUTOYO, se utiliza para verificar que las caras estén paralelas, tiene una apreciación de $(0 \pm 0.0001'')$.



Figura A.4. Balanza Digital OHAUS, se utiliza para medir la masa de la muestra en gramos.



Figura A.5. Enchaquetadota, se utiliza para acoplar la chaqueta a la muestra.

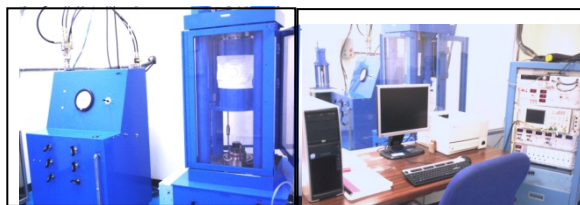


Figura A.6. Sistema AUTOLAB 2000, sistema de medición de ensayos acústicos, mecánicos y eléctricos emulando condiciones de yacimientos.

APÉNDICE B
Probetas Ensayadas



Figura B.1. Probeta 1.

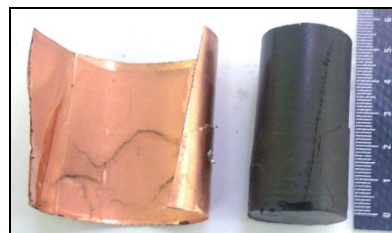


Figura B.2. Probeta 3.

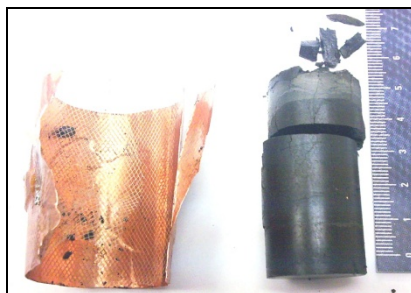


Figura B.3. Probeta 4.

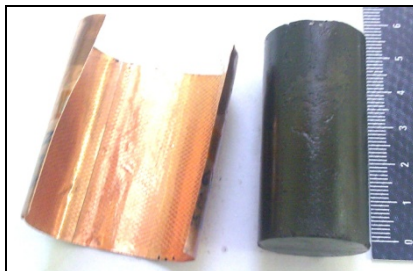


Figura B.4. Probeta 5.

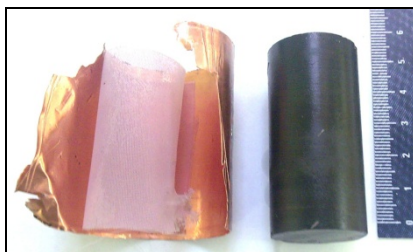


Figura B.5. Probeta 7.

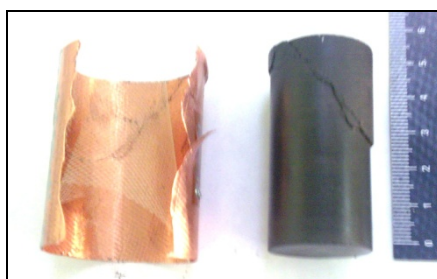


Figura B.6. Probeta 8

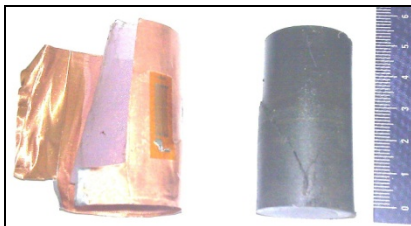


Figura B.7. Probeta 9.



Figura B.8. Probeta 10.



Figura B.9. Probeta 15.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO**

| | |
|------------------|---|
| TÍTULO | “ESTUDIO DE LA METODOLOGÍA DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN TRIAXIAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS MÓDULOS ELÁSTICOS SOBRE MUESTRAS DE LUTITAS DE POZOS PETROLEROS” |
| SUBTÍTULO | |

AUTOR (ES):

| APELLIDOS Y NOMBRES | CÓDIGO CVLAC / E MAIL |
|---------------------------------|--|
| Vitoria M., Laura Del V. | CVLAC: 16.701.580 EMAIL: laura_viloria_martinez@hotmail.com |

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Ensayo Triaxial

Lulita

Módulos Elásticos

Mohr Coulomb

Teoría de Elasticidad

Esfuerzo vs Deformación

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

| ÁREA | SUB ÁREA |
|---------------------------------|------------------|
| Ingeniería y Ciencias Aplicadas | Ingeniería Civil |

RESUMEN (ABSTRACT):

Las lutitas son rocas sedimentarias, que poseen baja permeabilidad y son las causantes de aproximadamente el 90% de los problemas relacionados con inestabilidades durante la perforación de pozos petroleros. En este trabajo se estudia la metodología para realizar ensayos de compresión triaxial para la obtención de módulos elásticos en este tipo de roca (lutitas). Estos se utilizan para la estimación de la ventana operacional de lodo para controlar los derrumbes y daños a la formación. En estos ensayos se utilizan las presiones de poros para determinar el esfuerzo efectivo de la roca; para esto se le inyecta un fluido y se calculan los parámetros A y B de Skempton. Se calcularon A y B en el estado transitorio, de igual manera se realizaron ensayos confinados no drenados sobre lutitas, para obtener todos estos valores. Los círculos de Mohr están fuertemente influenciados por la presión de poros, y en este caso por la presión de chaqueta, pues el fluido estuvo situado entre la chaqueta y la superficie de la muestra, no en su interior. Los círculos dibujados para esfuerzos efectivos describen un comportamiento más armónico que los círculos para esfuerzos totales. De los cuales se obtuvo $c' = 14,24$ MPa, $\phi' = 35,86^\circ$ para las lutitas del pozo ZG-349 al promediar los valores para 3 envolventes encontradas. El esfuerzo máximo es mayor para muestras horizontales, lo cual indica que cuando la laminación es paralela a la inyección del fluido la resistencia al esfuerzo cortante aumenta. En ensayos sobre muestras verticales, se observa disminución de la resistencia al aumentar el tiempo rotura durante el ensayo triaxial. A medida que aumenta la profundidad se incrementa el módulo de Young, disminuye la relación de Poisson, aumenta el módulo de rigidez y disminuye el módulo de compresibilidad.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**CONTRIBUIDORES:**

| APELLIDOS Y NOMBRES | ROL / CÓDIGO CVLAC / E-MAIL | | | | |
|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------|-----------|-------------|
| ULACIO IVÓN | ROL | CA | AS X | TU | JU |
| | CVLAC: | 12.337.648 | | | |
| | e-mail: | ivonulacio@yahoo.es | | | |
| SOSA JOSÉ | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | 15.679.474 | | | |
| | e-mail: | Josealejandros81@gmail.com | | | |
| MORENO, JESÚS | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | 15.416.474 | | | |
| | e-mail: | jamorenojr@gmail.com | | | |
| | ROL | CA | AS | TU | JU |
| | CVLAC: | | | | |
| | e-mail: | | | | |

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

| | | |
|-------------|------------|------------|
| 2009 | 08 | 10 |
| AÑO | MES | DÍA |

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

| NOMBRE DE ARCHIVO | TIPO MIME |
|--|-------------------------------|
| Tesis.Estudio_EnsayosTriaxiales_Lutitas.doc | Aplicación/ msword |
| | |
| | |

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O P Q
R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 .

ALCANCE

ESPACIAL: PDVSA – EXPLORACIÓN – LAB. GEOLÓGICO (OPCIONAL)

TEMPORAL: 8 Meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Civil _____

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado _____

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Civil _____

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui _____

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajo de Grado:

“Los Trabajos de Grado son exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

AUTOR

VILORIA LAURA

TUTOR

ULACIO IVÓN

JURADO

SOSA JOSÉ

JURADO

MORENO JESÚS

POR LA SUBCOMISION DE TESIS

PROF. SAAB, YASSER