

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(1)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	GUILLERMO ALEJANDRO MONCADA MORALES
FACULTAD	INGENIERÍAS
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERÍA CIVIL
DIRECTOR	ROMEL JESUS GALLARDO AMAYA
TÍTULO DE LA TESIS	ELABORACIÓN DE UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DESARROLLO DEL ENSAYO TRIAXIAL EN EL LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

RESUMEN

(70 palabras aproximadamente)

EL PRESENTE TRABAJO DE GRADO TIENE POR OBJETIVO LA CREACIÓN DE UNA GUÍA METODOLÓGICA EN BASE AL ENSAYO TRIAXIAL PARA EL LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA.

AL ESTABLECER LOS PROCEDIMIENTOS DETALLADOS DE CADA UNO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ENSAYOS TRIAXIALES Y LA DESCRIPCIÓN DE CADA UNA DE LAS PARTES DEL EQUIPO TRIAXIAL, Y POSTERIORMENTE RECOPILAR Y CLASIFICAR TODA LA INFORMACIÓN CIENTÍFICA EN BASE A ESTE ENSAYO SE REALIZÓ EL DISEÑO DE LA GUÍA METODOLÓGICA Y UNA GUÍA RÁPIDA PARA EL MANEJO ADECUADO DE ESTE ENSAYO EN EL LABORATORIO.

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 240	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:1
--------------	---------	----------------	----------



ELABORACIÓN DE UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL DESARROLLO DEL
ENSAYO TRIAXIAL EN EL LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS DE LA
UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

AUTOR

GUILLERMO ALEJANDRO MONCADA MORALES

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

I.C. Esp. M.Sc. ROMEL JESÚS GALLARDO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Septiembre de 2018

Dedicatoria

Esta tesis es el resultado de todo lo que me ha enseñado la vida, y con la sabiduría de Dios me ha enseñado a ser quien soy hoy. Gracias Dios por bendecirme siempre en mi vida y más en esta etapa que comienzo.

A mis padres, por ser los compañeros que me han ayudado a crecer, por estar siempre conmigo en todo momento. Gracias por la paciencia que me ha tenido para enseñarme, por el amor que me han dado, por los cuidados en el tiempo que hemos vivido juntos, por los regaños que merecía y que no entendía. Gracias padres por estar al pendiente durante toda esta etapa.

A mi hermano, Saul Guillermo, que con su amor me ha enseñado a salir adelante. Gracias por su paciencia, gracias por preocuparse por mí, gracias por compartir su vida a mi lado y, sobre todo, por estar en este momento tan importante de mi vida.

A Paula Rincón, mi prometida, siendo la mayor motivación en mi vida encaminada al éxito, fue el ingrediente perfecto para poder lograr alcanzar esta dichosa y muy merecida victoria en la vida, el poder haber culminado esta tesis con éxito, y poder disfrutar del privilegio de ser agradecido, ser grato con esa persona que se preocupó por mí en cada momento y que siempre quiso lo mejor para mi porvenir. Te agradezco por tantas ayudas y tantos aportes no solo para el desarrollo de mi tesis, sino también para mi vida; eres mi inspiración y mi motivación.

A mis compañeros Nathali Caamaño y Yesid Medina, a quien les debo muchísimo por su amistad y por haberme acompañado a lo largo de este camino que decidimos recorrer juntos, como ingenieros.

Agradecimientos

Doy mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que estuvieron involucradas en este proyecto de grado, inicialmente al ingeniero Romel Gallardo Amaya, por su apoyo y acompañamiento. Al ingeniero Agustín Armando Macgregor, por su tiempo y dedicación en la elaboración de este trabajo.

Al laboratorista Oliver Picón, quien estuvo al tanto de todo el proceso que se llevó a cabo en el proyecto, dando sus consejos y recomendaciones.

Contenido

CAPÍTULO 1: Elaboración de una guía metodológica para el desarrollo del ensayo triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña	1
1.1 Formulación del problema	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 General:	2
1.3.2 Específicos:	2
1.4 Justificación.....	3
1.5 Delimitaciones.....	4
1.5.1 Delimitación operativa:	4
1.5.2 Delimitación conceptual:.....	4
1.5.3 Delimitación temporal.....	5
1.5.4 Delimitación Geográfica	5
CAPÍTULO 2: Marco referencial	6
2.1 Antecedentes históricos.....	6
2.2 Marco Conceptual	11
2.2.1 Suelo.....	11
2.2.2 Angulo de fricción.....	13
2.2.3 Cohesión.....	14
2.2.4 Círculo de Mohr	14
2.3 Marco teórico	16
2.3.1 Resistencia al cortante en suelos	16
2.3.1.1 Criterio de falla de Mohr Coulomb	16
2.3.1.2 Inclinación del plano de falla causado por cortante	20
2.3.2 Teoría del esfuerzo efectivo	23
2.3.3 Permeabilidad.....	27
2.3.3.1 Factores que influyen en la permeabilidad de los suelos	29
2.3.4 Consolidación.....	30
2.3.5 Ensayo Triaxial.....	34
2.3.5.1 Pre-saturación de la muestra.....	37
2.3.5.2 Parámetros de presión intersticial en el ensayo Triaxial	37
2.3.5.3 Prueba consolidada drenada	39
2.3.5.4 Prueba consolidada no drenada	41
2.3.5.5 Prueba no consolidada no drenada	43
2.4 Marco Legal	45
CAPÍTULO 3: Diseño metodológico	46
3.1 Tipo de investigación	46
3.2 Población.....	46

3.3 Muestra.....	46
3.4 Técnicas de recolección de información.....	46
3.5 Proceso metodológico.....	47
CAPÍTULO 4: Administración del proyecto.....	49
4.1 Recursos.....	49
4.1.1 Recursos humanos.....	49
4.1.2 Recursos institucionales.....	49
4.1.3 Recursos financieros.....	49
4.1.3.1 Ingresos.....	49
4.1.3.2 Egresos.....	50
CAPÍTULO 5: Resultados.....	51
5.1 Resultados de laboratorio.....	51
5.1.1 Elaboración de una guía metodológica para el desarrollo del ensayo triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. 51	
5.1.1.1 Plantear el marco conceptual basándose en el desarrollo del ensayo Triaxial para la guía metodológica.	52
5.1.1.1.1 Conceptos relacionados con el ensayo triaxial.....	53
5.1.1.1.2 Teorías relacionadas con el ensayo triaxial.....	54
5.1.1.1.3 Fundamentos del ensayo Triaxial.....	64
5.1.1.2 Establecer el funcionamiento de cada una de las partes de la maquina Triaxial y construir los procedimientos detallados para la realización eficaz del ensayo Triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. 80	
5.1.1.2.1 Computador.....	80
5.1.1.2.2 Máquina de ensayos.....	82
5.1.1.2.3 Celda Triaxial.....	92
5.1.1.2.4 Unidad Triaxial automática.....	103
5.1.1.2.4.2.1 Tablero de indicación.....	105
5.1.1.2.5 Unidad de cambio de volumen automático.....	130
5.1.1.2.6 Encendido del equipo triaxial.....	131
5.1.1.2.7 Eliminación de burbujas de aire en tanque de agua.....	132
5.1.1.2.8 Revisión de piedras porosas.....	135
5.1.1.2.9 Eliminación del aire en las líneas de agua a presión (conductos).....	136
5.1.1.2.10 Montaje de la muestra de suelo en la celda Triaxial.....	136
5.1.1.2.11 Software Pinzuar.....	153
5.1.1.2.12 Etapa de saturación del espécimen.....	163
5.1.1.2.13 Proceso de medición de poros durante la fase de saturación y consolidación	166
5.1.1.2.14 Procedimiento para el calculo del parametro B de Skempton.....	171
5.1.1.2.15 Medición del cambio de volumen: método análogo o digital.....	172
5.1.1.2.16 Medición de presión de poros y cabezal análoga durante un ensayo.....	176
5.1.1.2.17 Descripción del registro de datos durante un ensayo.....	178
5.1.1.2.18 Algunas causas de error en el ensayo Triaxial.....	184
5.1.1.2.19 Etapa de finalización de ensayo.....	184

5.1.1.2.20	Desarrollo de los diferentes tipos de ensayos Triaxiales.....	189
5.1.1.3	Crear la guía metodológica para el desarrollo del ensayo Triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña	201
5.1.1.3.1	Estructuración de la guía metodológica	201
5.1.1.3.2	Guía rápida para el ensayo triaxial.....	204
5.1.2	Particularidades del funcionamiento del equipo triaxial	205
5.1.2.1	Ejecución de ensayos: Consolidado No drenado (CU) y Consolidado drenado (CD).....	205
5.1.2.2	Máquina de ensayos	205
5.1.3	Recomendaciones durante el desarrollo del ensayo	206
5.1.3.1	Líneas de agua a presión	206
5.1.3.2	Magnitudes de presión en 0 (cero)	206
5.1.3.3	Verificación de la saturación en las muestras de suelo	206
5.1.3.4	Aplicación de presiones.....	207
5.1.3.5	Muestras de suelo	207
5.1.3.6	Velocidad de aplicación de carga axial	207
5.1.3.7	Rango de presiones de confinamiento.....	208
5.1.4	Cuidados con los dispositivos del equipo triaxial	209
5.1.4.1	Unidad triaxial automática	209
5.1.4.2	Celda triaxial	210
5.1.4.3	Buretas.....	210
5.1.4.4	Bomba de vacíos	211
5.2	Limitantes.....	211
CAPÍTULO 6: Conclusiones		214
CAPÍTULO 7: Recomendaciones		218
Referencias		219

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Círculo de Mohr.	15
Figura 2. Dirección de los esfuerzos principales en la falla de un talud.....	15
Figura 3. Criterio de falla en un elemento de suelo.	17
Figura 4. Criterio de Falla de Mohr Coulomb.	19
Figura 5. Esfuerzos en la rotación del plano de referencia.	20
Figura 6. Criterio de falla Mohr Coulomb.....	21
Figura 7. Distribución de los efectos de una carga exterior sobre en una masa de suelo.	24
Figura 8. Estructura de suelo bajo nivel freático.	25
Figura 9. Definición de la ley de Darcy.	27
Figura 10. Naturaleza de la variación de v con el gradiente hidráulico i	29
Figura 11. Variación del esfuerzo total, presión de poro del agua y esfuerzo efectivo en un estrato de arcilla drenada arriba y abajo como resultado de un esfuerzo agragado $\Delta\sigma$	33
Figura 12. Esquema de un ensayo Triaxial.	35
Figura 13. Diagrama esquemático del equipo Triaxial.	36
Figura 14. Muestra sometida a carga axial para inducción de los parámetros de presión.	37
Figura 15. Ensayo consolidado drenado.	40
Figura 16. Círculo de Mohr, Prueba consolidada drenada.....	41
Figura 17. Ensayo consolidado no drenado.	42
Figura 18. Círculo de Mohr, Consolidada no drenada en términos de esfuerzos efectivos y normales.	43
Figura 19. Ensayo no consolidado no drenado.	44
Figura 20. Círculo de Mohr, Prueba no consolidada no drenada.....	44
Figura 21. Esquema de una porción de suelo.	55
Figura 22. Detalle de esfuerzos entre dos partículas de suelo.	56
Figura 23. Esfuerzos actuantes en un punto de suelo de un talud.....	57
Figura 24. Esfuerzos actuantes en un punto de suelo de un talud en el plano de un deslizamiento.	58
Figura 25. Sentido de giro del esfuerzo cortante en el plano X de una muestra de suelo.	59
Figura 26. Circulo de Mohr para los esfuerzos normales y cortantes.....	60
Figura 27. Circulo de Mohr para los esfuerzos normales y cortantes con diferentes planos.....	61
Figura 28. Circulo de Mohr con esfuerzos normales máximo y mínimo.	62
Figura 29. Celda Triaxial	65
Figura 30. Esfuerzo principal menor en celda Triaxial.....	65
Figura 31. Esfuerzo principal mayor y menor en la celda Triaxial	66
Figura 32. Circulo de Mohr para prueba de compresión no confinada	70
Figura 33. Circulo de Mohr para prueba de compresión no confinada. Estado de falla.....	70
Figura 34. Circulo de Mohr para prueba no consolidada no drenada.	71
Figura 35. Circulo de Mohr para prueba de compresión no confinada. Estado de Falla.....	72
Figura 36. Circulo de Mohr de pruebas: compresión no confinada y ensayo triaxial UU.	73
Figura 37. Envolvente de falla. Condición UU.....	74
Figura 38. Circulo de Mohr para condición CD.	75
Figura 39. Circulo de Mohr para condición CD en estado de falla.	75
Figura 40. Círculos de Mohr para condicion CD.....	76
Figura 41. Envolvente de falla. Condición CD.....	77

Figura 42. Circulo de Mohr para condición CU. Estado de falla.	78
Figura 43. Envolvente de falla. Condición CU en esfuerzos efectivos.	79
Figura 44. Computador de mesa JASUS	81
Figura 46. Marco de carga	82
Figura 47. Transductor de fuerza	83
Figura 48. Servomotor	84
Figura 49. Panel de control del marco de carga.....	85
Figura 50. Panel de control encendido.....	87
Figura 51. Menú principal máquina de ensayos	88
Figura 52. Menú: Tipo de ensayo	88
Figura 53. Opción muestra (espécimen)	89
Figura 54. Opción altura del espécimen	89
Figura 55. Opción diámetro del espécimen	90
Figura 56. Opción Velocidad de aplicación de carga	90
Figura 57. Carga límite	91
Figura 58. Selección de rango de carga	91
Figura 59. Celda acrílica	92
Figura 60. Piedras porosas	93
Figura 61. Membrana de látex	93
Figura 62. Presión y drenaje de cabezal.....	94
Figura 63. Presión y drenaje de poros.....	94
Figura 64. Válvulas de llenado y drenaje de cámara	95
Figura 65. Pedestal.....	95
Figura 66. Cabezal	96
Figura 67. Pistón de carga.....	96
Figura 68. Anillos de sellado	97
Figura 69. Filtros circulares	97
Figura 70. Filtros de drenaje	98
Figura 71. Perno.....	98
Figura 72. Perno ubicado en el pedestal	99
Figura 73. Herramienta para colocación de membrana	99
Figura 74. Herramienta para colocación de anillos de sellado	100
Figura 75. Llave doble punta	100
Figura 76. Base de celda triaxial.....	101
Figura 77. Interruptor de encendido y apagado Unidad Triaxial.....	104
Figura 78. Unidad triaxial automática	104
Figura 79. Tablero de indicación de la Unidad triaxial automática.....	105
Figura 80. Tablero de indicación de la Unidad Triaxial Automática encendido	106
Figura 81. Menú principal Unidad triaxial automática.....	107
Figura 82. Menú de ajustes Unidad Triaxial Automática.....	108
Figura 83. Rangos de medición Unidad Triaxial Automática	108
Figura 84. Submenú de ajustes de escala de la unidad triaxial automática	109
Figura 85. Submenú de cambio de presiones de la unidad triaxial automática	110
Figura 86. Válvulas de distribución hidráulica	111
Figura 87. Bombillos LED del control automático de presiones.....	112
Figura 88. Bombillo LED verde	112

Figura 89. Bombillo LED rojo.....	113
Figura 90. Válvulas en posición incorrecta.....	113
Figura 91. Válvulas de control hidráulico.....	114
Figura 92. Válvulas de control de cambio volumétrico.....	115
Figura 93. Válvulas en correcta posición para medición de cambio de volumen. Posición 1: entrada de presión por arriba y salida de presión por abajo.....	116
Figura 94. Válvulas en correcta posición para medición de cambio de volumen. Posición 2: entrada de presión por abajo y salida de presión por arriba.....	117
Figura 95. Válvula de control de vacío.....	117
Figura 96. Perillas de control de presión para cámara, cabezal y poros.....	118
Figura 97. Válvulas en posición para cargar bomba hidráulica.....	119
Figura 98. Tornillo de seguridad de bomba hidráulica.....	120
Figura 99. Interruptor de emergencia para las perillas de presión.....	121
Figura 100. Bomba de vacíos.....	123
Figura 101. Componentes de la bomba de vacíos.....	124
Figura 102. Interruptor de bomba de vacíos.....	125
Figura 103. Unidad de cambio de volumen automático.....	130
Figura 104. Multiplexor.....	131
Figura 104. Tanque de almacenamiento de agua.....	132
Figura 105. Válvula del tanque de agua para aplicación de vacío.....	133
Figura 106. Válvula para el paso de aire del tanque de agua.....	133
Figura 107. Válvula de vacíos en posición para tanque de almacenamiento de agua.....	134
Figura 108. Válvulas de tanque de almacenamiento cerradas.....	134
Figura 109. Manómetro del tanque de agua.....	135
Figura 110. Posicionamiento de piedra porosa en pedestal.....	138
Figura 111. Piedra porosa en pedestal.....	138
Figura 112. Papel filtro colocado en piedra porosa.....	139
Figura 113. Muestra de suelo con papel filtro lateral ubicado en pedestal.....	139
Figura 114. Papel filtro circular y piedra porosa superior.....	140
Figura 115. Membrana de látex colocada en su accesorio.....	141
Figura 116. Tubo de aplicación de vacíos a membrana (tubo del extremo derecho).....	141
Figura 117. Accesorio colocador de membrana conectado al tubo de aplicación de vacíos.....	142
Figura 118. Colocación de membrana a muestra de suelo.....	142
Figura 119. Cabezal colocado en la muestra de suelo.....	143
Figura 120. Membrana en la muestra de suelo.....	144
Figura 121. Anillo O-ring colocado en su herramienta.....	144
Figura 122. Colocador de anillo O-ring en parte inferior de la muestra.....	145
Figura 123. Anillo O-ring inferior en muestra.....	145
Figura 124. Colocador de anillo O-ring en parte superior de la muestra.....	146
Figura 125. Anillo O-ring superior en muestra.....	146
Figura 126. Posición de membrana y conducto de cabezal en correcta posición.....	147
Figura 127. Montaje de celda triaxial con espécimen para ensayo.....	148
Figura 128. Marco de carga alineado con el pisto de carga de la celda triaxial.....	148
Figura 129. Tornillo de celda triaxial.....	149
Figura 130. Válvulas de drenaje y llenado de celda triaxial.....	150
Figura 131: Flujo y posición de válvulas para llenado de celda.....	151

Figura 132. Válvulas de poros y cabezal en posición de drenaje	152
Figura 133. Icono del software Triaxial.....	153
Figura 134. Ventana de inicio del software Triaxial.....	154
Figura 135. Validación usuario.....	155
Figura 136. Interfaz de trabajo de software Triaxial.....	155
Figura 137. Ventana grafica para registrar dimensiones de las muestras	157
Figura 138. Barra de opciones del software Triaxial.....	157
Figura 139. Opción para escoger ensayo	158
Figura 140. Opción No consolidado - No drenado	158
Figura 141. Opción Consolidado - No drenado	158
Figura 142. Pestaña archivos del software triaxial	159
Figura 143. Opción ensayos de la pestaña archivos	160
Figura 144. Ventana de consulta de ensayos	160
Figura 145. Opción clientes de la pestaña archivos.....	161
Figura 146. Ventana gráfica para crear nuevos clientes	161
Figura 147. Opción Proyectos de la pestaña archivos	161
Figura 148. Opción materiales de la pestaña archivos.....	162
Figura 149. Ventana gráfica para registrar nuevos materiales.....	162
Figura 150. Ventana gráfica para consultar usuarios.....	162
Figura 151. Válvulas en posición para aplicación de presión en cámara	165
Figura 152. Posición de válvulas y flujo para presión en cabezal y poros	165
Figura 153. Posición de válvulas para presión de cabezal y poros en control hidráulico.....	166
Figura 154. Barra de herramientas del software Triaxial	169
Figura 155. Ventana para el cálculo del parámetro B.....	169
Figura 156. Sistema de flujo para medición de volumen digital. Opción 1.....	172
Figura 157. Sistema de flujo para medición de cambio de volumen digital. Opción 2	173
Figura 158. Sistema de flujo para medición de cambio de volumen análogo	174
Figura 159. Bureta para medición de cambio de volumen	175
Figura 160. Medición de presión de contrapresión (poros y cabezal)	176
Figura 161. Posición de válvulas para medición de presión de poros en bureta	177
Figura 162. Posición de válvulas para medición de presión de cabezal en bureta	177
Figura 163. Posición de válvulas para medición de presión de poros y cabezal en bureta	178
Figura 164: Hoja 1: Inicio. Registro de datos ensayos triaxiales.....	180
Figura 165. Hoja 2: consolidación.....	182
Figura 166. Hoja 3: datos de fase de rotura	183
Figura 167. Grafico esfuerzo-deformación de muestra de suelo	185
Figura 168. Curvas esfuerzo de corte-desplazamiento en un ensayo de Corte directo.....	187
Figura 169. Cero para el registro del cambio de volumen.....	195
Figura 170. Ventana grafica de pregunta para el cálculo de parámetro B	195
Figura 171. Ventana grafica de pregunta para el inicio de la consolidación	196
Figura 172. Esquema de flujo para drenaje por poros	196
Figura 173. Esquema de flujo para drenaje por cabezal	197
Figura 174. Esquema de flujo para drenaje por poros y cabezal	197
Figura 175. Drenaje por poros en fase de rotura.....	200
Figura 176. Drenaje por cabezal en fase de rotura.....	200

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de los gastos para el desarrollo del proyecto	50
Tabla 2. Tabla de problemas de la bomba, sus posibles causas y sus soluciones.....	128

INTRODUCCIÓN

El suelo es por excelencia una de las principales variables a considerar en la concepción, ejecución y puesta en marcha de algún proyecto de infraestructura, por ello no es de extrañar que, se destine gran parte de los recursos y del tiempo, para establecer las condiciones de este. El suelo constituye una de las variables que como ingenieros no podemos controlar, y con esto nos referimos al hecho de que no podemos decidir el tipo de suelo en el cual cimentaremos nuestros proyectos, sin embargo está claro que podemos modificar las condiciones de este, para que se ajuste a las necesidades del proyecto, y al respecto se han desarrollado varias teorías, métodos y procedimientos. El punto al que vamos es que las condiciones locales del suelo intervienen en forma directa con la infraestructura, por ende es de supremo interés el conocimiento de estas condiciones, que permitan la toma de decisiones respecto a la planeación y curso de nuestros proyectos (Martínez y Sepúlveda, 2017).

Con el fin de establecer las condiciones de los suelos y a su vez realizar estudios académicos en base a ello, el programa de Ingeniería Civil y el grupo de investigación y medio ambiente GIGMA de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña realiza un proceso de aprendizaje práctico en el laboratorio, en base a normas y estándares, permitiendo al estudiante o investigador reforzar los conceptos aprendidos en sus estudios. Siendo de esta manera, en el área de formación relacionada con la geotecnia, el proceso de enseñanza en el laboratorio es crucial para entender de manera adecuada los fenómenos físicos mecánicos que ocurren en el suelo y las condiciones de los mismos, mediante la aplicación de metodologías analíticas, extrapolar apropiadamente ese comportamiento a estructuras geotécnicas reales. Es así como el ensayo de triaxial representa de manera adecuada la respuesta de una masa de suelo en profundidad, bajo la

acción de esfuerzos geostáticos y/o inducidos, permitiendo determinar la resistencia al corte del mismo para trayectorias de esfuerzos en los tres ejes principales de análisis (Restrepo, Tellez, & Tribín).

Por tal motivo, nace la necesidad de crear una guía metodológica para desarrollar el ensayo triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos, debido su complejidad de ejecución y donde el estudiante o investigador estudie y profundice los temas relacionados con éste e interactúe directamente con el equipo y sea capaz de aplicar los conceptos adecuadamente. Además, el equipo triaxial disponible en el laboratorio, presenta múltiples funciones de manejo técnico, que solo por personas especialistas en la materia pueden realizar. De allí también radica la importancia de establecer la guía para que, tanto el estudiante o investigador, pueda realizar los diferentes ensayos triaxiales para el análisis de los parámetros de resistencia del suelo en estudio y evaluar sus condiciones.

CAPÍTULO 1: Elaboración de una guía metodológica para el desarrollo del ensayo triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad

Francisco de Paula Santander Ocaña

1.1 Formulación del problema

¿La elaboración de una guía metodológica para el desarrollo del ensayo Triaxial, facilitará el desarrollo de prácticas académicas e investigativas en el laboratorio de suelos y pavimento de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña?

1.2 Planteamiento del problema

El diseño de una estructura se ve influenciado por la resistencia al corte del suelo, la cual nos permite conocer el comportamiento de éste en diferentes situaciones, como por ejemplo, la capacidad de soporte del suelo en las cimentaciones superficiales y profundas o la estabilidad de un talud.

Dentro de los estudios de la ingeniería geotécnica, el ensayo de corte directo, el ensayo Triaxial o las correlaciones obtenidas con los resultados del ensayo SPT nos permiten determinar la resistencia al corte del suelo, obteniendo parámetros importantes como la cohesión y el ángulo de fricción interna de las partículas y la relación esfuerzo-deformación, siendo el ensayo Triaxial el que nos brinda la información más representativa de la resistencia al cortante que sufre una masa de suelo al ser cargada. Aunque la ejecución de este ensayo en el laboratorio es bastante compleja, ya que la Máquina Triaxial posee múltiples funciones y pasos, esta nos permite asemejar las condiciones del espécimen (muestra de suelo) a las que se encuentran en campo.

La Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña en su laboratorio de suelos y pavimentos cuenta con la máquina Triaxial, que actualmente está apta para su uso y que además

los profesores del área de Geotecnia en presencia con el laboratorista fueron capacitados para su correcto manejo. Sin embargo, la maquina no se encuentra a disposición de los estudiantes de ingeniería civil o para clientes externos y, en su defecto, para la investigación. Esto se debe a que por la complejidad de los procedimientos es necesaria la documentación técnica que estandarice el ensayo con las normas internacionales que rigen su realización y el laboratorio de suelos y pavimentos no cuenta con ellos.

1.3 Objetivos

1.3.1 General:

Elaborar una guía metodológica para el desarrollo del ensayo Triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

1.3.2 Específicos:

- Plantear el marco conceptual basándose en el desarrollo del ensayo Triaxial para la guía metodológica.
- Establecer el funcionamiento de cada una de las partes de la maquina Triaxial y construir los procedimientos detallados para la realización eficaz del ensayo Triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- Crear la guía metodológica para el desarrollo del ensayo Triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

1.4 Justificación

La norma sismo resistente colombiana NSR-10 (2010) en el Título H, capítulo H.2.2.2 sobre los estudios geotécnicos definitivos establece que: “El ingeniero geotécnico debe precisar todo lo relativo a las condiciones físico-mecánicas del subsuelo y las recomendaciones particulares para el diseño y construcción de las obras relacionadas...” “su presentación es obligatoria ya que en este se definen el tipo de suelo, el diseño y las recomendaciones de la cimentación y del proceso constructivo”. Entre su contenido en el H.2.2.2.1 (d) de los análisis geotécnicos especifica que: “se deben incluir los análisis de estabilidad y deformación de las alternativas de excavación y construcción, teniendo en cuenta, además de las características de resistencia y deformabilidad de los suelos, la influencia de la factores hidráulicos.”

Como podemos observar la norma establece que en los estudios geotécnicos para los proyectos de obras civiles es importante e imprescindible conocer las características de resistencia del suelo, entre los cuales se encuentra la resistencia al corte. Para conocer los parámetros asociados a esta resistencia, el ensayo Triaxial es uno de los más importantes y empleados, debido a que la información que proporciona es la más acercada al comportamiento real del suelo en estudio cuando es sometido a cargas.

Debido a esta importancia teórica y práctica para la academia, sus estudiantes y la región, es necesaria la realización de una guía metodológica para el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, que presente de manera clara y concisa el funcionamiento de los diferentes componentes del equipo y los procedimientos a seguir para un adecuado manejo de la máquina Triaxial. Así mismo, se incluirán las normas y teorías involucradas, los tipos de ensayos triaxiales y los formatos para la presentación de resultados. Cabe resaltar que este ensayo es fundamental para estudiantes de Ingeniería Civil en el área de

Geotecnia, de modo que comprendan de manera práctica el comportamiento del suelo en los proyectos de ingeniería.

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Delimitación operativa:

Para llevar a cabo la creación de la guía metodológica se utilizará la máquina Triaxial que se encuentra en el laboratorio de suelos y pavimentos de la UFPSO, el cual nos permitirá realizar el estudio de cada uno de los elementos involucrados en el ensayo y los diferentes tipos de ensayos que se realizarán a diferentes muestras de suelos.

Para lo anterior se requerirá del acceso de manera frecuente al espacio físico donde se tiene instalado el equipo Triaxial.

Adicionalmente, se necesitará buscar asesoría con técnicos y laboratoristas de otras universidades que tengan un amplio conocimiento del desarrollo del ensayo Triaxial.

1.5.2 Delimitación conceptual:

En la guía metodológica a desarrollar estarán involucrados los conceptos fundamentados en el ensayo Triaxial, como: Consolidación, resistencia al corte, presión intersticial y esfuerzo efectivos. A su vez, variables con más importancia a analizar son la cohesión y ángulo de fricción interna de las partículas del suelo. El ensayo Triaxial comprende varias fases durante su ejecución el cual será de estudio. Las fases son: la primera y fundamental llamada saturación. Después de esta fase, procede la etapa de consolidación; es de suma importancia para la obtención de excelentes resultado del ensayo que la muestra (espécimen) esté 100% saturado o superior a 96%. Una tercera fase es la llamada Prueba de corte. Dependiendo de las condiciones

que se encuentre el suelo en campo existen varios tipos de ensayo triaxiales, como los son: prueba no consolidada-no drenada (llamada por sus siglas UU), prueba consolidada-drenada (llamada CD) y prueba consolidada- no drenada (llamada CU).

1.5.3 Delimitación temporal

El proyecto se desarrollará en un periodo que comprende desde Enero hasta Junio del 2018.

1.5.4 Delimitación Geográfica

El proyecto se llevará a cabo en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y los resultados de la guía metodológica podrán usarse en cualquier parte donde cuenten con el equipo Triaxial de las mismas especificaciones.

CAPÍTULO 2: Marco referencial

2.1 Antecedentes históricos

Antes del desarrollo de la Mecánica Aplicada a los suelos, posible a su vez gracias a las grandes contribuciones científicas de los teóricos, todos los principales problemas de la Ingeniería Civil eran resueltos en forma intuitiva o por tanteos. Ello aparejaba serios riesgos en lo referente tanto a seguridad como a economía. (Juárez y Rico, 2005).

Uno de los principales problemas de la Ingeniería Civil y componente fundamental de la Mecánica de suelos es la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. De la misma forma, una valoración correcta de ese concepto constituye un paso previo imprescindible para intentar, con esperanzas de éxito, cualquier aplicación de la Mecánica de Suelos al análisis de la estabilidad de las obras civiles. Por consiguiente, para el estudio de la resistencia de los suelos, el equipo de ensayo de compresión Triaxial se fue desarrollando a través del tiempo, el cual ha tenido un avance vertiginoso en casi cien años de existencia, con diversas variaciones y extensiones dependiendo de las exigencias de diseño y control de las estructuras geotécnicas de la actualidad.

A continuación aclararemos un poco la historia del estudio de la Mecánica de Suelos como ciencia y lo que involucró la investigación para la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

Todo comienza gracias al francés Charles Augustin de Coulomb. Matemático, físico e ingeniero destacado por haber realizado la primera investigación orientada al estudio de la resistencia de los suelos. Entre sus hallazgos está en deducir que el corte de los suelos está directamente relacionado con el coeficiente de fricción entre las partículas.

En su investigación, Coulomb encontró que en primer lugar los suelos fallan por esfuerzo cortante a lo largo de un plano de deslizamiento, esto basado en la teoría de la mecánica en donde se sabe que sobre un cuerpo actúa una fuerza normal y si es deslizado sobre una superficie con rugosidad sobre el cuerpo, actúa una fuerza en contra proporcional a la fuerza aplicada para el deslizamiento. En este caso tuvo que encontrar el coeficiente de fricción entre las superficies de contacto.

Automáticamente encontró la ley de la resistencia sobre la cual rige, que se produce la falla cuando el esfuerzo cortante alcanza su máximo valor y, la constante de proporcionalidad la definió en términos del ángulo de fricción interna del material.

En el caso particular de las arcillas presentan resistencia al esfuerzo cortante incluso en situaciones en que el esfuerzo normal exterior es nulo; a los materiales con estas características Coulomb les estableció otro principio de resistencia al corte al cual designó como cohesión y determino también una constante para esos materiales. (Crespo, 2004).

La denominada ley de Coulomb fue la base de muchas otras teorías y métodos de estudio en cuantos a terraplenes, presas en tierra, análisis de estabilidad de taludes, etc.

Avanzando en la época, más exactamente en el siglo XX, nace en forma general la Mecánica de Suelos. Siempre resulta arriesgado atribuir a la obra de un hombre cualquier logro de la ciencia, pero en este caso parece bastante justificado mencionar el nombre del hombre que ha hecho posible el nacimiento de esa parte de la ingeniería, como fundador y guía, el nombre del Dr. Ing. Karl Terzaghi.

Terzaghi, baso sus investigaciones en la teoría de Coulomb y realizo importantes observaciones sobre deducciones experimentales sobre la presión o esfuerzo normal o también llamado esfuerzo vertical en suelos. Estos son causados por varios tipos de carga.

Ya sea del mismo suelo o por una fuerza externa. Por su parte también estudio que fracción del esfuerzo normal a una profundidad dada en una masa de suelo es tomada por el agua en los espacios vacíos del mismo y cual es tomada por el esqueleto de partículas del suelo. A esto se le denominó esfuerzo efectivo. Es por ello que estos esfuerzos intervienen con los fenómenos de resistencia al esfuerzo cortante (Juárez y Rico, 2005).

Durante la vida del Dr. Ing. Karl Terzaghi como profesor de universidad comenzó una experimentación sistemática con los suelos, a partir de arenas. Construyó un laboratorio de pruebas, utilizando cualquier material disponible; Con un equipo primitivo y recursos limitados, comenzó a sentar las bases de su disciplina. De este modo Terzaghi obtuvo absoluta confianza en sí mismo y en su ingenio. Con un profundo sentido del destino, se convenció de que había llegado el momento de una revolución en la ingeniería de suelos y que, de hecho, él era el instrumento mediante el cual se desarrollaría esta revolución. El futuro lo confirmaría (...).

El comportamiento de las arcillas sometidas a la presión, entre los fenómenos más impredecibles en Mecánica de Suelos, consumió el interés inmediato de Terzaghi. Fabricando los aparatos necesarios; hizo un sencillo consolidómetro de un anillo de metal con dos filtros de arena intercalando una muestra de arcilla y manteniéndolo saturado de agua. Sometió a presión discos circulares de arcilla de alrededor de 3,4 pulgadas de diámetro y 0,4 pulgadas de espesor en las condiciones que teórica y estrechamente replican a las existentes en el seno de una masa de arcilla húmeda debajo del nivel freático. Al aplicar una carga constante a la muestra, tomó las observaciones de la compresión resultante a intervalos frecuentes. La representación gráfica de las lecturas produjo curvas de compresión para varias arcillas bajo cargas distintas en diferentes

períodos de tiempo. A partir de estos sencillos experimentos Terzaghi concluyó acertadamente que la compresibilidad y la permeabilidad eran factores determinantes en el asentamiento de las arcillas y que estos pueden variar considerablemente, incluso en suelos con idéntico tamaño de grano (...).

Estas y otras investigaciones llevaron a Terzaghi a formular su primera y más fundamental contribución a la teoría de la Mecánica de Suelos: el principio de esfuerzo efectivo. Coordinando las influencias del tamaño de grano, tipo de suelo, y contenido de agua en un conjunto integrado, la presión efectiva proporcionó el método más preciso y completo para predecir fallas del suelo y asentamientos (...).

Paralelamente en la época, en 1932 más exactamente, la División de Investigación de Suelos de la Estación Experimental de Estructuras Hidráulicas y Construcción Naval de Prusia desarrolló un "dispositivo de celda" que abarcaba las características esenciales del aparato que hoy día se llama: Máquina Triaxial. Leo Jürgenson describió un dispositivo que utilizaba aire comprimido para desarrollar presiones laterales en las muestras de suelo y, como nota destacada, Rendulic desarrolló un dispositivo similar en el laboratorio de suelos de Terzaghi en Viena. M. Juul Hvorslev, también trabajando con Terzaghi en Viena, hizo observaciones seminales sobre los ensayos triaxiales (...).

Gracias a todas las investigaciones realizadas por los anteriores científicos para el año 1939 la OCE (Office of the Chief of Engineers), ordenó un estudio experimental a gran escala de la prueba Triaxial, además de las investigaciones de otros problemas de Mecánica de Suelos. Con este fin, el OCE designó un "Comité de Investigación de Pruebas de Compresión Triaxial", que se reunió en la oficina del Distrito de Boston. El

consenso del comité fue que las pruebas triaxiales y otros estudios de suelos, con la escorrentía subsuperficial en particular y el análisis de celdas de presión, justificaban una intensa investigación (Fatherree, 2012).

Como se observó anteriormente, a partir del siglo XX se empezó a desarrollar los estudios de la resistencia de los suelos y, como parte fundamental de estos estudios el ensayo Triaxial dio un gran aporte a la Mecánica de Suelos. Donde instituciones de investigación geotécnica, empresas relacionadas a la fábrica de equipos para ensayos en laboratorio de suelos y demás entes comenzaron en la evolución constante de la máquina Triaxial.

Finalmente, como consecuencia del constante desarrollo evolutivo de la Máquina Triaxial, cada vez se hace más complejo el operar de dicha máquina. Es así, como en Colombia, tenemos dos referencias importantes; implementaron un manual de operación para el adecuado manejo del Equipo Triaxial en los laboratorios de suelos de las universidades que contaban con el equipo.

Primeramente, para el año 2003, en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, la Universidad Francisco de Paula Santander implementó un manual de operación para educar al estudiante en el correcto manejo de la máquina Triaxial que contaba dicha universidad. Este manual fue el producto final como proyecto de grado por parte de los estudiantes de Ingeniería Civil, Luz Marina Sanjuán Durán y Andrea Jovanna Cacique Arias. Este proyecto de grado estuvo dirigido por el Ingeniero Civil José Ricardo Pineda Rodríguez y lleva por nombre: Manual para la ejecución del ensayo Triaxial de corte en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Francisco de Paula Santander.

Un segundo trabajo de grado, se realizó en la universidad militar nueva granada, de la ciudad de Bogotá D.C., en el año 2015. Este proyecto fue realizado por el estudiante de Ingeniería Civil, Alex Fabián Ramos Moreno y, dirigido por el Doctor Javier Fernando Camacho Tauta. El nombre del proyecto llevó como título: Manual de funcionamiento del Triaxial automático del Laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Militar Nueva Granada.

2.2 Marco Conceptual

Antes de abordar las teorías que se encuentran involucradas en este proyecto de grado es indispensable aclarar algunos conceptos que nos permitirán entender de una manera más precisa en que consiste un ensayo Triaxial y como desarrollarlo en el laboratorio.

2.2.1 Suelo

En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales. Por esto, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga, y otras más (Das, 2001).

Es así, como afirma Rico y Del Castillo (1976) el comportamiento ingenieril de un suelo no deben ser olvidadas dos propiedades esenciales que presentan el conjunto de partículas del mismo:

El conjunto posee una organización definida y propiedades que varían “vectorialmente”. En general, los valores de las propiedades, verticalmente ocurren cambios mucho más rápidos que horizontalmente.

La organización de las partículas minerales es tal que el agua, que como se sabe está presente en todo suelo en mayor o menor cantidad, puede, si hay la suficiente, tener “continuidad”, en el sentido de distribución de presiones. El agua no ocupa huecos aislados, sin intercomunicación; puede llenar todos los poros que dejan entre sí las partículas minerales y que se intercomunican, de manera que el agua forma una masa continua que contiene al mineral en su seno. (pág. 18)

Por otro lado, los suelos pueden ser residuales o transportados, según se le encuentre en el mismo lugar en que se han generado o en lugar diferente. El transporte por aire y agua y la sedimentación en esos dos medios constituyen el mecanismo usual que da lugar a un suelo transportado. Es evidente que la estructuración y la “distribución interna” de las propiedades tienen que ser completamente diferentes en un suelo residual que en un suelo transportado. En el primero, el ataque mecánico y la desintegración química tienden a producir un resultado final que en estructura y disposición recuerda, aunque sea lejanamente, a la roca madre. Los suelos transportados y depositados en aire o agua generan estructuras que están regidas únicamente por los mecanismos propios de la deposición y en nada por la disposición, características y condiciones iniciales de la roca original (Rico y Del Castillo, 1976, pág. 18).

2.2.2 *Angulo de fricción.*

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:

Coeficiente de rozamiento: $\tan \varphi$

El ángulo de fricción en suelos granulares secos coincide con el ángulo de reposo.

Todos los suelos poseen fricción. Sin embargo, a los suelos arcillosos con fricción muy baja o despreciable, se les denomina suelos cohesivos: $\varphi = 0$.

El ángulo de fricción (φ) depende de una gran cantidad de factores; algunos de los más importantes son:

- Tipo de mineral constitutivo de las partículas.
- Tamaño de los granos o partículas. A mayor tamaño de partículas, mayor es φ .
- Forma de los granos o partículas. φ es mayor para partículas angulosas.
- Distribución de los tamaños de granos o partículas. En los suelos bien gradados, φ es mayor que en los suelos uniformes.
- Fábrica o microestructura (organización de las partículas).
- Densidad.
- Permeabilidad (Facilidad de drenaje).
- Presión normal o de confinamiento.
- Presión de pre consolidación.

El ángulo de fricción es el resultado de la combinación de todos los factores. Por ejemplo, el ángulo de fricción es mayor al aumentar la densidad, pero si las presiones normales son muy altas, el ángulo de fricción tiende a disminuir. En arcillas, el ángulo de fricción depende de las condiciones de pre consolidación (Suarez, 1998, págs. 76-77).

2.2.3 *Cohesión*

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en la mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas, mientras que en la física, este término se utiliza para representar la resistencia a la tensión.

En los suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina suelos friccionantes o “no cohesivos” ($C = 0$).

En los suelos no saturados, la tensión debida a la succión del agua en los poros, produce un fenómeno de adherencia entre partículas por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión “aparente” desaparece con la saturación (Suarez, 1998, pág. 77).

2.2.4 *Círculo de Mohr*

El diagrama de Mohr es el método más común para representar los resultados de los ensayos de corte en los suelos. El círculo de Mohr representa un ensayo Triaxial y la envolvente de los círculos de Mohr representa el estado de los esfuerzos en el momento de una falla al cortante.

En el análisis en dos dimensiones, los esfuerzos de un punto, pueden ser representados por un elemento infinitamente pequeño sometido a los esfuerzos σ_x , σ_y y τ_{xy} . Si estos esfuerzos se dibujan en unas coordenadas $\tau - \sigma$, se puede trazar el círculo de esfuerzos de Mohr.

En este círculo se los valores de σ máximo (σ_1) y σ mínimo (σ_3), conocidos como esfuerzos principales (ver Figura 1).

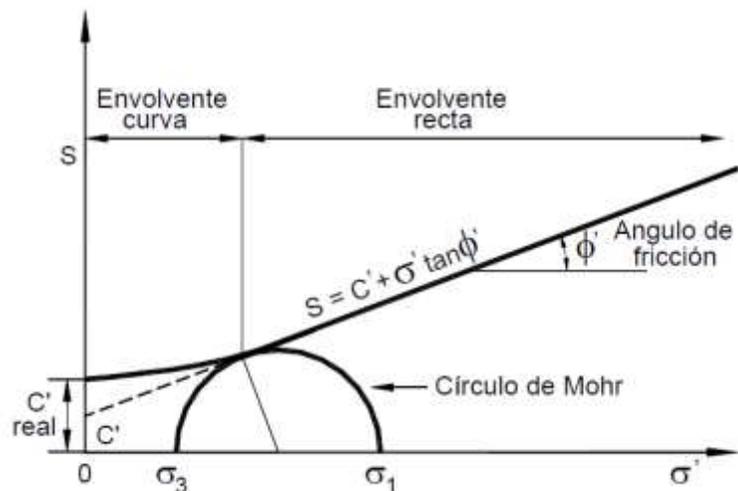


Figura 1. Círculo de Mohr.

Fuente: Obtenida de Suarez (1998, pág. 82)

Para interpretar correctamente el fenómeno de falla al cortante en un talud, debe tenerse en cuenta cuál es la dirección de los esfuerzos principales en cada sitio de la superficie de falla. El esfuerzo σ_1 es vertical en la parte superior de la falla y horizontal en la parte inferior (ver Figura 2).

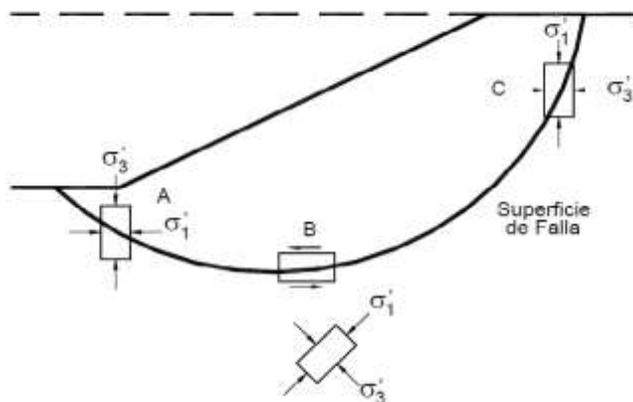


Figura 2. Dirección de los esfuerzos principales en la falla de un talud

Fuente: Obtenida de Suarez (1998, pág. 82)

2.3 Marco teórico

2.3.1 Resistencia al cortante en suelos

La resistencia al corte de un suelo determina factores tales como la estabilidad de un talud, la capacidad de carga admisible para una cimentación y el empuje de un suelo contra un muro de contención. El conocimiento de la resistencia al corte es requisito indispensable para cualquier análisis relacionado con la estabilidad de una masa de suelo (Berry y Reid, 1996, pág. 181).

2.3.1.1 Criterio de falla de Mohr Coulomb

Los suelos, como la mayoría de los materiales sólidos, rompen por tracción o por corte. Las tensiones de tracción pueden causar la abertura de grietas que, bajo algunas circunstancias de importancia práctica, son indeseables o dañinas. Pero la mayoría de los problemas de ingeniería solo la resistencia a rotura por corte merece ser considerada.

La rotura por corte comienza en un punto de una masa de suelo, cuando en alguna superficie que pasa por dicho punto se alcanza una combinación crítica entre la tensión normal y la tangencial o de corte. (Terzaghi y Peck, 1973, pág. 99)

Es así, como en 1976 Coulomb observó que si el empuje que produce un suelo contra un muro de contención produce un ligero movimiento del muro, en el suelo que está retenido se forma un plano de deslizamiento esencialmente recto. Él postuló que la máxima resistencia al corte τ_f , en el plano de falla está dada por la siguiente ecuación 1:

$$\tau_f = c + \sigma \tan\varphi \quad (1)$$

Donde

σ = Es el esfuerzo normal total en el plano de falla

φ = Es el ángulo de fricción del suelo

c = Es la cohesión del suelo

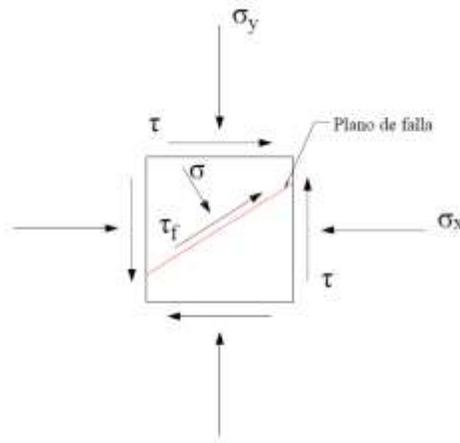


Figura 3. Criterio de falla en un elemento de suelo.

Fuente: Adaptada de Das (2001).

La utilización de la ecuación Coulomb no condujo siempre a diseños satisfactorios de estructuras de suelos. La razón para ello no se hizo evidente hasta que Terzaghi publicó el principio de esfuerzos efectivos, $\sigma = \sigma' + \mu$ (Berry y Reid, 1996, pág. 182).

Gracias a esta publicación nacen dos nuevas ecuaciones (ecuación 2 y 3), tanto para suelos saturados como para suelos no saturados (parcialmente saturados):

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \varphi' \quad (\text{Para suelos saturados}) \quad (2)$$

A la presión resultante $\sigma - \mu$, se le conoce como presión efectiva σ' . A las nuevas variables, bajo la condición de esfuerzos efectivos, como c' y φ' se les llama: Cohesión para presiones efectivas y ángulo de fricción para presiones efectivas respectivamente.

Ahora, cuando el grado de saturación es mayor del 85%, se puede utilizar la ecuación de Coulomb para suelos saturados. Sin embargo, para suelos con saturación menor del 85%, se deben aplicar los principios de la mecánica de suelos no saturados.

Para el caso de suelos no saturados, la ecuación de Coulomb se expresa de la siguiente forma:

$$\tau = c' + (\sigma_n - \sigma_a)\tan\varphi' + (\mu_a - \mu_w)\tan\varphi^b \quad (3)$$

Donde

σ_n = Esfuerzo normal total

μ_a = Presión en el aire de los poros

μ_w = Presión en el agua de los poros, lo cual es comúnmente negativa

φ^b = Ángulo de fricción igual a la pendiente de la curva de succión matricial

$(\mu_a - \mu_w)$ contra resistencia al cortante τ cuando $(\sigma_n - \sigma_a)$ se mantiene constante.

El ángulo de fricción efectiva φ' permanece igual para todos los valores de succión φ^b es generalmente igual o menor que φ' y se puede obtener en ensayos triaxiales o de corte no saturados (Suarez, 1998, pág. 76).

Como se apreció anteriormente, la primera ecuación 1 es la precedente al criterio de falla de Mohr Coulomb. Las ecuaciones 2 y 3 son condiciones para suelos en estados saturados y no saturados. Bajo esta premisa, Coulomb traza una gráfica para entender más su criterio, y es de allí el nombre que lleva su teoría (ver Figura 4):

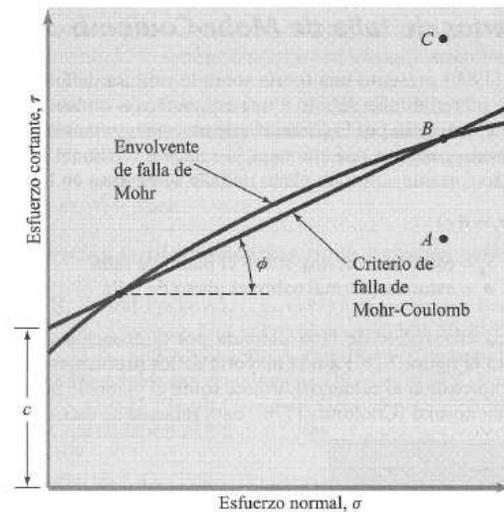


Figura 4. Criterio de Falla de Mohr Coulomb.

Fuente: Obtenida de Das (2001).

El significado de la envolvente de falla se explica como sigue: si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano en una masa de suelo son tales que son representados por el punto *A* en la figura 4., entonces no ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano son representados por el punto *B* (que se encuentra sobre la envolvente de falla), entonces ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Un estado de esfuerzo sobre un plano representado por el punto *C* no existe porque éste queda por arriba de la envolvente de falla y la falla cortante ya habría ocurrido en el suelo (Das, 2001).

2.3.1.2 *Inclinación del plano de falla causado por cortante*

Como se establece en el criterio de falla de Mohr-Coulomb, la falla por cortante ocurrirá cuando el esfuerzo cortante sobre un plano alcanza un valor dado por la ecuación (1). Veamos este comportamiento en la gráfica del círculo del Mohr.

Un punto del círculo de Mohr define el estrés normal y el esfuerzo cortante en un cierto plano. Las tensiones en todos los planos juntos forman el círculo, porque cuando el plano de referencia gira, los puntos de tensión atraviesan el círculo. Parece que la relación entre el esfuerzo cortante y el estrés normal varía a lo largo del círculo, es decir, esta relación es diferente para diferentes planos. Es posible que, para ciertos planos, se satisfaga el criterio de falla (ver Figura 5 y Figura 6) (Verruijt, 2001).

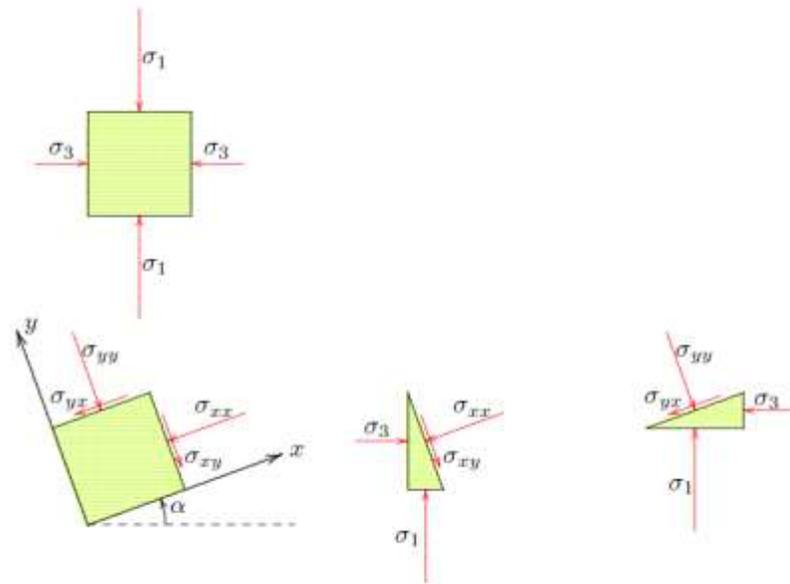


Figura 5. Esfuerzos en la rotación del plano de referencia.

Fuente: Obtenida de Verruijt (2001)

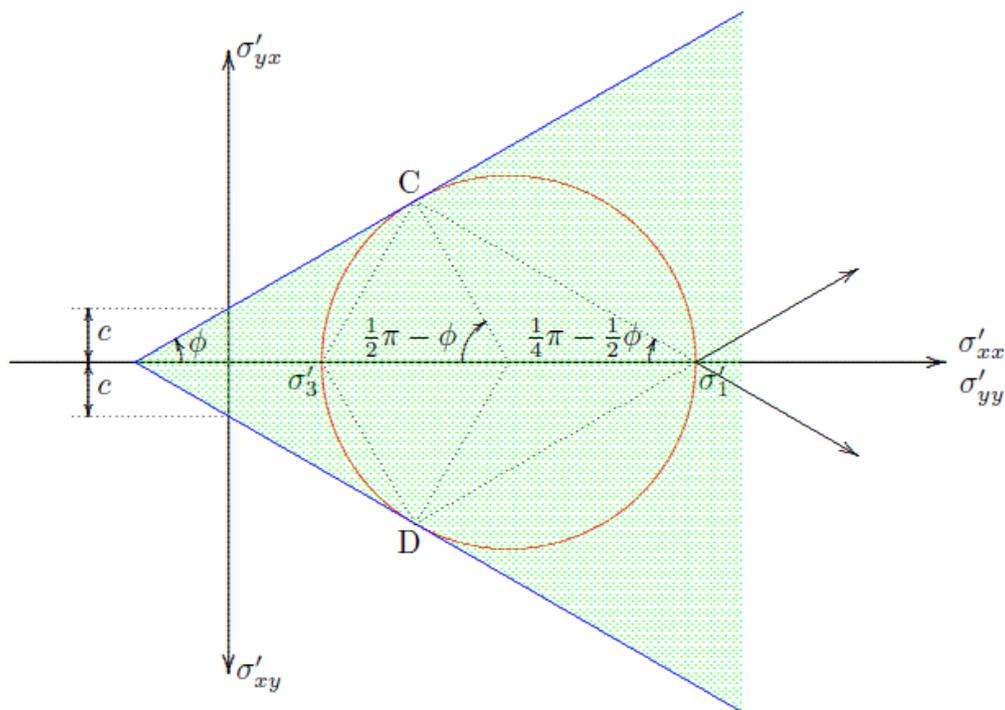


Figura 6. Criterio de falla Mohr Coulomb

Fuente: Obtenida de Verruijt (2001)

Este criterio de falla también ha sido indicado, en forma de dos líneas rectas, formando un ángulo ϕ con el eje horizontal. Sus intersecciones con el eje vertical están a una distancia c . Para mostrar esa falla de un suelo, se encuentra determinado por los esfuerzos efectivos; los esfuerzos se han indicado como σ' . Hay dos planos, definidos por los puntos C y D de la figura 6, en el que el estado de esfuerzos es crítico. En todos los otros planos el esfuerzo cortante permanece por debajo del valor crítico. Por lo tanto se puede predecir que la falla comenzará a ocurrir cada vez que el círculo de Mohr toca la línea azul (ver Figura 6). Esto se llama el criterio de falla de Mohr-Coulomb. Si el círculo de esfuerzos está completamente por debajo de la línea de falla (o por encima de la línea azul en el punto D), esta no ocurrirá, porque en todos los planos el esfuerzo cortante permanece muy por debajo del valor crítico, según lo dado por la ecuación 1.

Los círculos parcialmente sobre la línea de falla son imposibles, ya que el esfuerzo cortante en algunos planos sería mayor que el valor crítico.

Cuando el círculo toca la envolvente de falla hay dos planos, haciendo ángulo de $\frac{1}{4}\pi - \frac{1}{2}\phi$ con la dirección del esfuerzo principal mayor, el cual el esfuerzos es crítico. La falla deslizante puede ocurrir en estos planos. Se puede esperar que el suelo pueda deslizarse en las direcciones de estos dos planos críticos. En el caso representado por las figura 5, en el que se supone que la dirección vertical es la dirección del esfuerzo principal mayor, los planos en los que los esfuerzos son más críticas forman un ángulo de $\frac{1}{4}\pi - \frac{1}{2}\phi$ con la dirección vertical. Por lo tanto, se puede esperar que la falla por deslizamiento ocurra en planos que son algo más empinados que 45° . Si por ejemplo, $\phi = 30^\circ$, es un valor normal para las arenas, la falla ocurrirá deslizándose a lo largo de planos que forman un ángulo de 30° con la dirección vertical (Verruijt, 2001).

La formulación matemática del criterio de falla de Mohr-Coulomb se puede encontrar al observar que el radio del círculo de Mohr es:

$$\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \quad (4)$$

Y que la distancia desde el origen al centro es:

$$\frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \quad (5)$$

La falla ocurrirá si:

$$\sin \phi = \frac{\frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{c \cot \phi + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)} \quad (6)$$

Esto también se puede escribir como:

$$\left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}\right) - \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}\right) \sin \phi - c \cos \phi = 0 \quad (7)$$

Usando la ecuación anterior para evaluar el valor de σ'_3 en el estado de falla en términos de σ'_1 se puede expresar la ecuación así:

$$\sigma'_3 = \sigma'_1 \frac{1-\sin \phi}{1+\sin \phi} - 2c \frac{\cos \phi}{1+\sin \phi} \quad (8)$$

Por otro lado, también podemos expresar el valor de σ'_1 en el estado de falla en términos de σ'_3 :

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \frac{1+\sin \phi}{1-\sin \phi} + 2c \frac{\cos \phi}{1-\sin \phi} \quad (9)$$

2.3.2 Teoría del esfuerzo efectivo

Primeramente, definamos el término esfuerzo. El cual se conoce comúnmente, una fuerza ejercida por unidad de área.

Ya conociendo este concepto, entendamos esta premisa: Los suelos son sistemas de fase múltiple. En un volumen dado de suelo, las partículas de sólidos están distribuidas al azar con espacios vacíos entre ellas. Los espacios vacíos son continuos y están ocupados por agua, aire o ambos. Para analizar problemas tales como la compresibilidad de suelos, la capacidad de carga de cimentaciones, la estabilidad de terraplenes y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras, los ingenieros necesitan conocer la naturaleza de la distribución de los esfuerzos a lo largo de una sección transversal dada del perfil del suelo, es decir, qué fracción del esfuerzo normal a una profundidad dada en una masa de suelo es tomada por el agua en los espacios vacíos y cuál es tomada por el esqueleto del suelo en los puntos de contacto de las partículas del suelo. A esto se denomina concepto del esfuerzo efectivo (Das, 2001).

Para entender el anterior concepto, veamos un ejemplo grafico el cual ilustra los esfuerzos y el comportamiento que este tiene en los suelos:

Consideremos una carga P uniformemente distribuida sobre la placa de area A , la cual se apoya sobre un conjunto de particulas minerales, de forma irregular con vacios entre ellas (ver Figura 7).

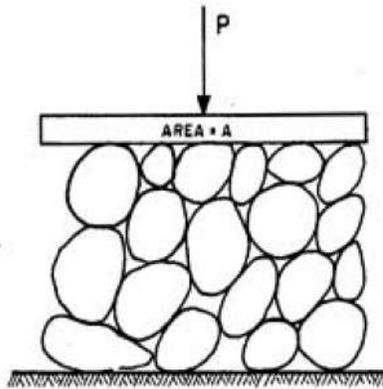


Figura 7. Distribución de los efectos de una carga exterior sobre en una masa de suelo.

Fuente: Obtenida de Rico y Del Castillo (1976).

La carga total actuante con el area total cubierta con la placa ($\sigma = \frac{P}{A}$), se le llama esfuerzo total. Ahora, consideremos un suelo saturado, en el cual queremos saber los esfuerzos a una profundida dada; en la siguiente figura se muestra un suelo que se encuentra bajo un nivel freatico, y evaluaremos los esfuerzos en el punto A (ver Figura 8).

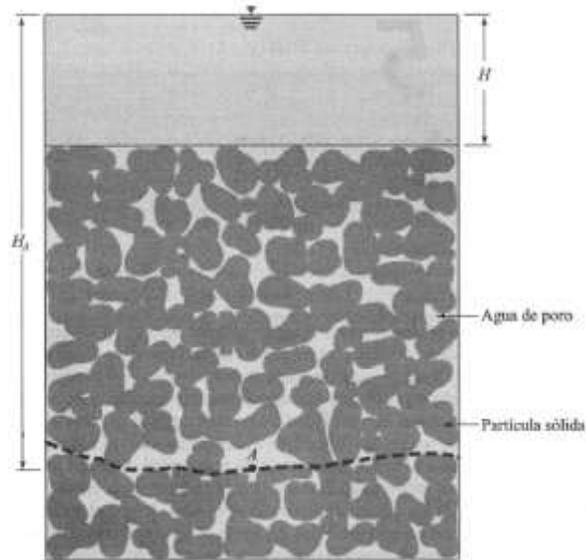


Figura 8. Estructura de suelo bajo nivel freático.

Fuente: Obtenida de Das (2001)

El esfuerzo total en la elevación del punto A se obtiene a partir del peso específico saturado del suelo y del peso específico del agua arriba de él. Será entonces:

$$\sigma = H\gamma_w + \gamma_{sat}(H_A - H) \quad (10)$$

Donde γ_w = Peso específico del agua

γ_{sat} = Peso específico del suelo saturado

H = Altura del nivel del agua desde la parte superior de la columna de suelo

H_A = Distancia entre el punto A y el nivel del agua freática

El esfuerzo total σ se divide en dos partes:

- Una porción es tornada por el agua en los espacios vacíos, y actúa con igual intensidad en todas direcciones. Llamada presión intersticial
- El resto del esfuerzo total es tornado por los sólidos del suelo en sus puntos de contacto. La suma de las componentes verticales de las fuerzas desarrolladas en

los puntos de contacto de las partículas de sólidos por área de sección transversal unitaria de la masa del suelo se llama *esfuerzo efectivo* (Das, 2001).

Bajo esta consideración se plantea la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (11)$$

Donde $\sigma' =$ Esfuerzo efectivo

$\sigma =$ Esfuerzo total

$\mu =$ Presión intersticial

La ecuación 11 también se puede expresar de la siguiente forma:

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (12)$$

Ahora evaluando las condiciones que se tiene de la Figura 8 por medio de la ecuación 12, se tiene:

$$\sigma' = H\gamma_w + \gamma_{sat}(H_A - H) - H_A\gamma_w \quad (13)$$

Despejándola se obtiene:

$$\sigma' = (H_A - H)(\gamma_{sat} - \gamma_w) \quad (14)$$

Como se puede apreciar en la ecuación 14, sería el resultado para hallar el esfuerzo efectivo en el punto A ubicado debajo del nivel del suelo. De esta misma ecuación se puede apreciar el término $\gamma_{sat} - \gamma_w$, que en la mecánica de suelos este término es llamado peso específico sumergido y se denota γ' .

2.3.3 Permeabilidad

El flujo de agua a través de medios porosos, de gran interés en la Mecánica de Suelos, está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Henri Darcy en 1856. (Juárez y Rico, 2005)

En mecánica de suelos e ingeniería de cimentaciones se debe saber cuanta agua fluye a través del suelo en un tiempo unitario (Das, 2001). Es así, como denominamos este fenómeno en los suelos, permeabilidad.

Darcy propuso la siguiente ecuación:

$$v = ik \quad (15)$$

Donde v = velocidad de Darcy

k = Permeabilidad hidráulica de suelo

i = Gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico i se define como (ver Figura 9):

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (16)$$

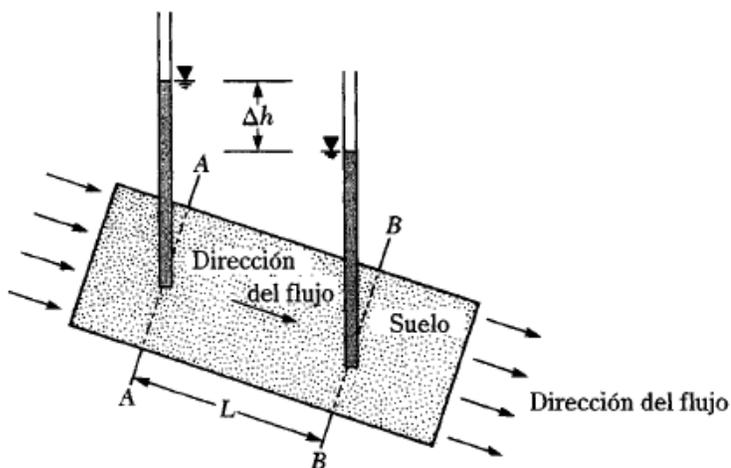


Figura 9. Definición de la ley de Darcy.

Fuente: Obtenida de Das (2001)

Donde Δh es la diferencia de carga piezométrica entre las secciones AA y BB y L es la distancia entre las secciones AA y BB de la figura anterior.

El coeficiente de permeabilidad k de un suelo es un dato cuya determinación correcta es de fundamental importancia para la formación del criterio del proyectista en algunos problemas de mecánica de suelos y, en muchos casos, para la elaboración de sus cálculos.

Hay varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos: una *directos* así llamados porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros *indirectos*, proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines (Juárez y Rico, 2005). Estos métodos son los siguientes:

a. Directos:

- Permeámetro de carga constante
- Permeámetro de carga variable.
- Prueba directa de los suelos en el lugar.

b. Indirectos:

- Cálculos a partir de curva granulométrica.
- Cálculo a partir de la prueba de consolidación
- Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad
- Ensayo triaxial

Paralelo a lo anterior, generalmente el agua fluye a través de los suelos por gravedad. El régimen de flujo se dice que es laminar cuando las líneas de flujo permanecen sin juntarse entre sí, excepción hecha del efecto microscópico de mezcla molecular; cuando las líneas de flujo se

entremezclan y dan lugar a turbulencias características se dice que el flujo es turbulento (Rico y Del Castillo, 1976).

Es así, como la variación de la velocidad v con el gradiente hidráulico i se muestra en la siguiente Figura 10, donde muestra tres zonas: zona de flujo laminar, zona de transición, zona de flujo turbulento (Das, 2001).

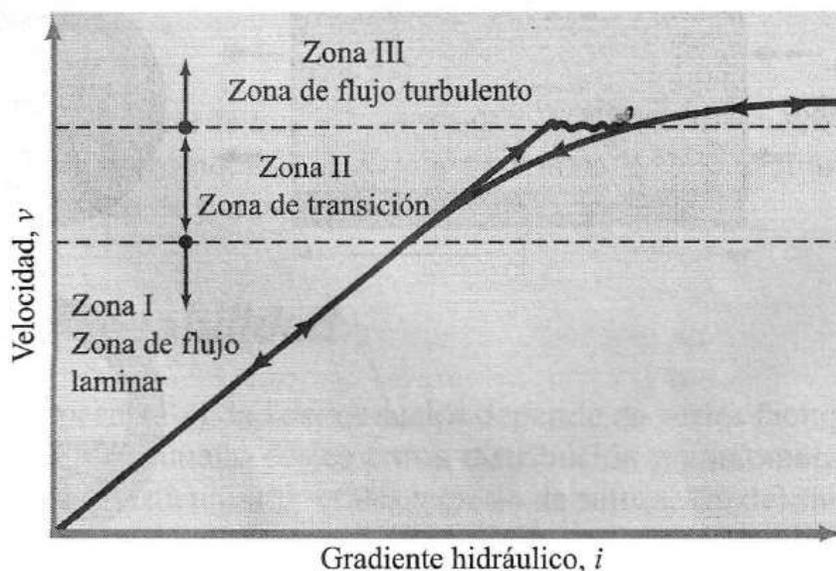


Figura 10. Naturaleza de la variación de v con el gradiente hidráulico i .

Fuente: Obtenida de Das (2001)

2.3.3.1 Factores que influyen en la permeabilidad de los suelos

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a características del agua circulante (Juárez y Rico, 2005). Los principales de estos factores son:

1. La relación de vacíos del suelo
2. La temperatura del agua
3. La estructura y estratificación del suelo
4. La existencia de agujeros, fisuras, etc., en el suelo.

2.3.4 Consolidación

Cuando un depósito de suelo se somete a un incremento de esfuerzos totales, por ejemplo, como resultado de la carga aplicada por la construcción de un edificio o un terraplén, se produce en el suelo un exceso de presión intersticial. Puesto que el agua no puede resistir esfuerzos cortantes, el exceso de presión intersticial se disipa mediante un flujo de agua hacia el exterior. La velocidad a la cual se produce este proceso depende principalmente de la permeabilidad de la masa de suelo.

La disipación del exceso de presión intersticial debida al flujo de agua hacia el exterior se denomina consolidación, proceso que tiene dos consecuencias importantes:

- Conduce a una reducción del volumen de poros y, por tanto, a una reducción del volumen total de la masa de suelo, lo cual se manifiesta en el asentamiento de la superficie del terreno y, por consiguiente en un asentamiento de la estructura.
- Durante la disipación del exceso de presión intersticial, el esfuerzo efectivo en la masa de suelo aumenta y por tanto se incrementa su resistencia al cortante. La consolidación y la resistencia al cortante son, por tanto, procesos que se relacionan mutuamente.

De lo anterior se deduce que cuando un suelo se consolida se produce una disminución de la relación de vacíos acompañada por un incremento del esfuerzo efectivo.

En un suelo granular, tal como una arena, la permeabilidad es relativamente alta y por ello el exceso de presión intersticial puede disiparse al instante. En consecuencia, el asentamiento de la estructura por lo general se termina al final de la construcción. En contraste, los depósitos de arcilla a menudo tienen una permeabilidad muy baja y por ello la disipación del exceso de

presión intersticial es un proceso muy lento. En consecuencia, una estructura puede continuar asentándose durante varios años después de terminada la construcción.

El proceso de consolidación se aplica a todos los suelos, pero en la práctica solo tiene interés en el caso de estructuras cimentadas en depósitos de arcilla. En tales casos se necesita predecir:

- El asentamiento total de la estructura, y
- La velocidad a la cual se produce dicho asentamiento.

Estas predicciones pueden hacerse mediante una teoría apropiada para la consolidación.

En general, el proceso de la consolidación involucra en tres dimensiones el flujo del agua intersticial y las deformaciones de la masa de suelo. Sin embargo, las teorías tridimensionales son muy complejas y difíciles de aplicar en la práctica. El caso más simple que puede tratarse matemáticamente es el caso unidimensional. Esta es la teoría que se utiliza con mayor frecuencia en la práctica y es la base de la casi totalidad de los cálculos de asentamientos (Berry y Reid, 1996).

El asentamiento del suelo causado por cargas se divide en tres amplias categorías:

1. *Asentamiento inmediato*, provocado por la deformación elástica del suelo seco y de suelos húmedos y saturados sin ningún cambio en el contenido de agua. Los cálculos de los asentamientos inmediatos se basan, generalmente, en ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad.

2. *Asentamiento por consolidación primaria*, es el resultado de un cambio de volumen en suelos saturados cohesivos debido a la expulsión del agua que ocupa los espacios vacíos.

3. *Asentamiento por consolidación secundaria*, se observa en suelos saturados cohesivos y es resultado del ajuste plástico de la estructura del suelo. Éste sigue al asentamiento por consolidación primaria bajo un esfuerzo efectivo constante (Das, 2001).

Analizando la deformación de un estrato de arcilla saturada sometida a un incremento de esfuerzos en el tiempo, la siguiente Figura 11 resalta como los esfuerzos se comportan en la misma dando paso a dicha deformación:

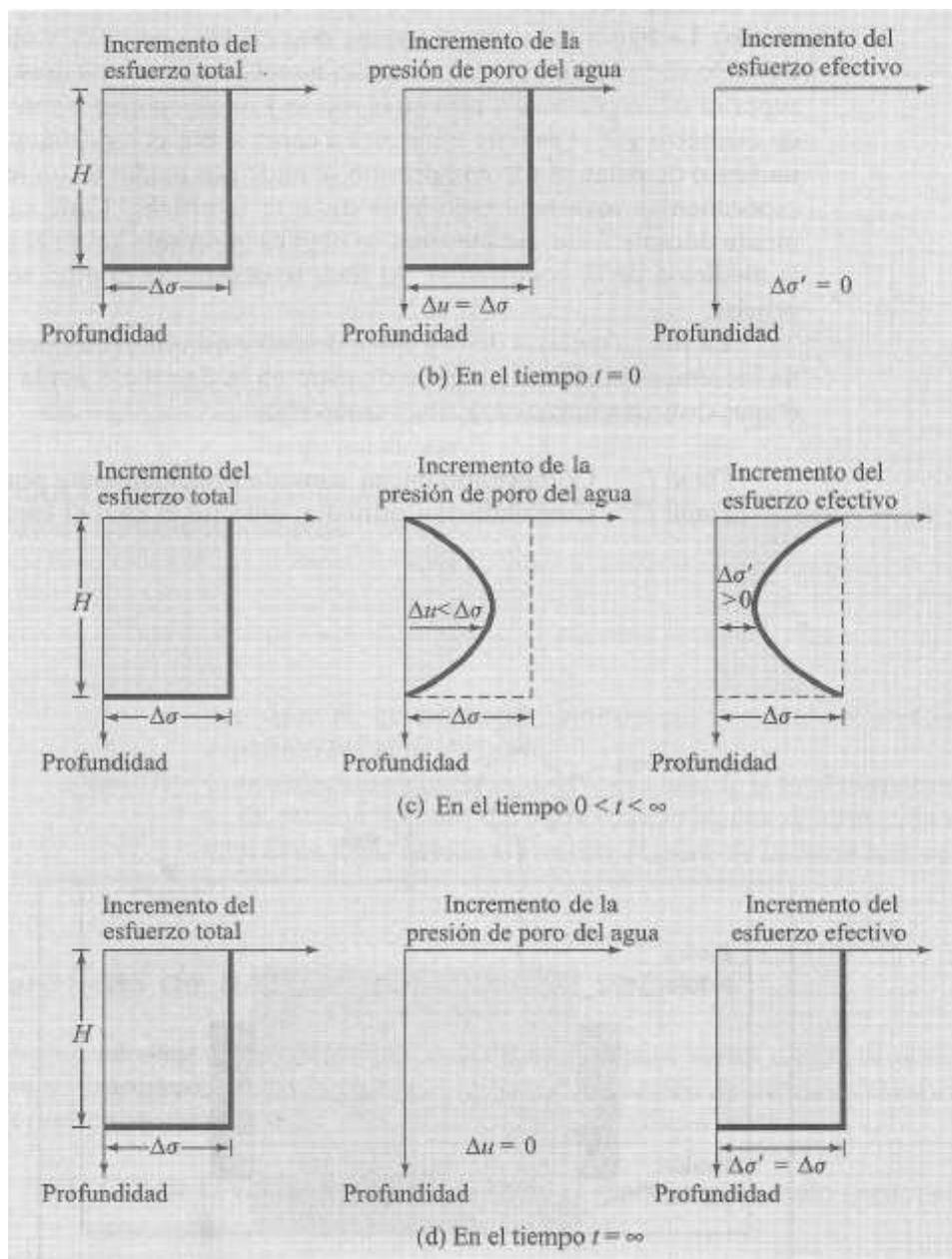


Figura 11. Variación del esfuerzo total, presión de poro del agua y esfuerzo efectivo en un estrato de arcilla drenada arriba y abajo como resultado de un esfuerzo agragado $\Delta\sigma$.

Fuente: Obtenida de Das (2001)

Por otro lado, un suelo en el campo a cierta profundidad ha estado sometido a una cierta presión efectiva máxima en el pasado de su historio geológica. Esta presión efectiva máxima pasada puede ser igual o mayor que la presión de sobrecarga existente en el tiempo de muestreo. La reducción de la presión en el campo es causada por procesos geológicos naturales o por procesos humanos. Durante el muestreo del suelo, la presión de sobrecarga efectiva existente es también liberada, resultando cierta expansión. Cuando el espécimen está sometido a una prueba de consolidación, una pequeña cantidad de compresión (es decir, un pequeño cambio en la relación de vacíos) ocurrirá cuando la presión total aplicada es menor que la presión de sobrecarga efectiva máxima en el campo a la que el suelo fue sometido en el pasado. Cuando la presión total aplicada sobre el espécimen es mayor que la presión efectiva máxima en el pasado, el cambio en la relación de vacíos es mucho mayor.

Esto nos conduce a dos definiciones básicas de la arcilla con base a la historia de su esfuerzo:

- **Arcilla normalmente Consolidada:** La presión de sobrecarga efectiva presente es la presión máxima a la que el suelo fue sometido en el pasado.
- **Arcilla pre-consolidada (P.C.).** La presión de sobrecarga efectiva presente es menor que la que el suelo experimentó en el pasado. La presión efectiva máxima en el pasado se llama esfuerzo de preconsolidación (Das, 2001).

2.3.5 Ensayo Triaxial

La prueba de ensayo Triaxial es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de la resistencia al cortante. (Salas, 2011, pág. 15). Además podemos medir la rigidez, las características de deformación de las muestras, consolidación y permeabilidad.

La prueba Triaxial consiste en colocar una muestra de suelo confinada por una membrana de caucho en una cámara de Lucita y luego se aplica una presión de confinamiento (σ_3) alrededor de la muestra mediante un fluido en la cámara (por lo general, agua o glicerina). También se puede aplicar un esfuerzo agregado ($\Delta\sigma$) a la muestra en la dirección axial para causar la falla ($\Delta\sigma = \Delta\sigma_f$ a la falla). Puede permitirse el drenaje de la muestra o detenerse, dependiendo de la condición de la prueba (ver Figura 12 y Figura 13). (Das B. , 2012, pág. 49)

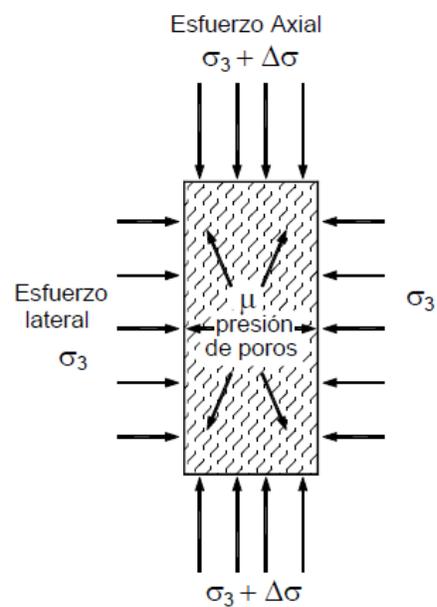


Figura 12. Esquema de un ensayo Triaxial.

Fuente: Obtenida de Suarez (1998, pág. 90)

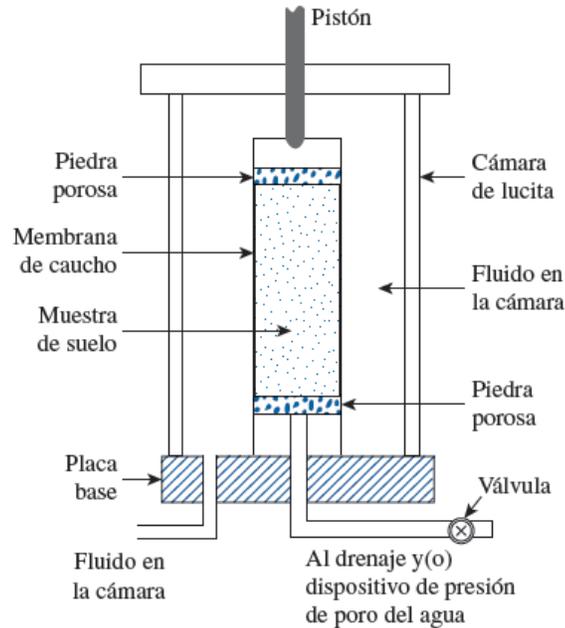


Figura 13. Diagrama esquemático del equipo Triaxial.

Fuente: Obtenida de Das (2012)

Las pruebas de compresión Triaxial se pueden realizar en arenas y arcillas. Para arcillas, se pueden efectuar tres tipos de pruebas con el equipo Triaxial:

- Prueba consolidada drenada (prueba CD)
- Prueba consolidada no drenada (prueba CU)
- Prueba no consolidada no drenada (prueba UU)

Antes de realizar cualquier ensayo de los anteriores nombrados, es muy importante que la muestra de suelo se encuentre en estado de saturación. Es decir, como valor óptimo es que este la muestra 100% saturada, pero en muchos textos y por recomendaciones de profesionales en el tema, se puede ensayar a porcentajes mayores o iguales del 96%.

2.3.5.1 Pre-saturación de la muestra

Puede tomar entre 2 horas a un día, el proceso completo de saturación que a su vez, depende del tipo de suelo.

Debe asegurarse que el aire no se acumule entre la muestra y la membrana de caucho. Durante la saturación, se pueden requerir presiones de confinamiento que ayuden en el proceso, pero estas presiones se deben mantener a un nivel bajo para evitar la pre consolidación de la muestra (Suarez, 1998, pág. 91).

2.3.5.2 Parámetros de presión intersticial en el ensayo Triaxial

Además de determinar los parámetros de resistencia al corte de un suelo, el ensayo Triaxial también puede utilizarse para obtener datos destinados a predecir el exceso de presión intersticial inicial que se produce en una masa de suelo cuando ocurre un cambio en las condiciones de esfuerzos totales (ver Figura 14). Tales predicciones son necesarias conjuntamente con los análisis de estabilidad en esfuerzos efectivos y se hacen mediante los parámetros de presión intersticial que se determinan experimentalmente.

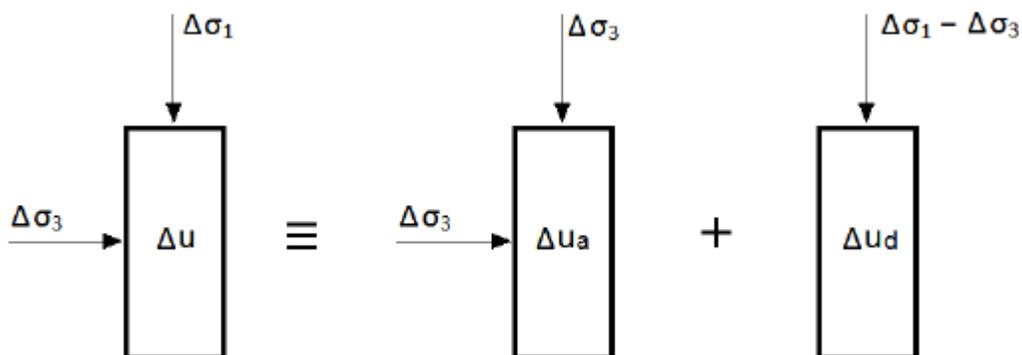


Figura 14. Muestra sometida a carga axial para inducción de los parámetros de presión.

Fuente: Obtenida de Berry y Reid (1996, pág. 198)

Para introducir la idea de los parámetros de presión intersticial, es bueno considerar el elemento de suelo que se mostró en la figura anterior, donde el elemento se somete a una carga Triaxial en la cual $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$. Es posible considerar que este estado de esfuerzos se compone de un cambio de esfuerzos isotrópicos $\Delta\sigma_3$ más un cambio uniaxial del desviador de esfuerzo $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$. Éste, por supuesto, es el estado de esfuerzos que se impone en el ensayo Triaxial y es claro que el exceso de presión intersticial que se genera al interior del elemento resulta, en primer lugar, del cambio en el esfuerzo isotrópico que reina alrededor del elemento y, en segundo lugar, del cambio del esfuerzo desviador. Si $\Delta\mu_a$ significa el exceso de presión intersticial inducido en el elemento por la aplicación de $\Delta\sigma_3$, y $\Delta\mu_d$ aquel que induce $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ entonces si se supone que estas presiones intersticiales están relacionadas linealmente con los esfuerzos aplicados puede escribirse:

$$\Delta\mu_a = B\Delta\sigma_3 \quad (16)$$

$$\Delta\mu_d = A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (17)$$

Donde A y B son los parámetros de presión intersticial que se determinan experimentalmente. Si $\Delta\mu$ significa el exceso de presión intersticial total en el elemento, entonces si se aplica el principio de superposición tenemos:

$$\Delta\mu = \Delta\mu_a + \Delta\mu_d \quad (18)$$

Entonces:

$$\Delta\mu = B\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (19)$$

Los parámetros de presión intersticial se obtienen con un ensayo de compresión Triaxial. El parámetro B se determina midiendo el incremento de presión intersticial que resulta del incremento de la presión de cámara, y varía desde 1 en los suelos completamente saturados hasta 0 en los suelos secos. El parámetro A, se determina midiendo la presión intersticial que induce

en la muestra la aplicación del desviador de esfuerzos. El valor A depende del estado de esfuerzos de consolidación inicial (que puede ser isotrópico o anisotrópico), de la historia de esfuerzos (que está dada por el grado de pre consolidación), de la proporción del esfuerzo de falla aplicado (es decir, la deformación de la muestra) y del tipo de cambio de esfuerzos (puede ser en carga o en descarga) (Berry y Reid, 1996, págs. 197-198-199).

2.3.5.3 Prueba consolidada drenada

La característica fundamental de la prueba es que los esfuerzos aplicados al espécimen son efectivos. Primeramente se aplica al suelo una presión hidrostática, manteniendo abierta la válvula de comunicación con la bureta y dejando transcurrir el tiempo necesario para que haya consolidación completa bajo la presión actuante. Cuando el equilibrio estático interno se haya restablecido, todas las fuerzas exteriores estarán actuando sobre la fase sólida del suelo, es decir, producen esfuerzos efectivos, en tanto que los esfuerzos neutrales en el agua corresponden a la condición hidrostática. La muestra se lleva a la falla a continuación aplicando la carga axial en pequeños incrementos, cada uno de los cuales se mantiene el tiempo necesario para que la presión en el agua, en exceso de la hidrostática, se reduzca a cero (ver Figura 15).

Los ensayos consolidados drenados (CD) se utilizan esencialmente en suelos granulares (arenas), sin embargo, se puede aplicar en suelos finos, pero los ensayos requieren tiempos prolongados del orden de semanas. (Salas, 2011, pág. 16)

Los ensayos drenados generalmente son preferidos para los ensayos rutinarios (GEO, 1979), debido a la facilidad de su ejecución y son los más utilizados para el análisis de laderas y taludes.

La velocidad de ensayo debe ser tal, que las fluctuaciones en la presión de poros sean despreciables y en cualquier caso, que no sean superiores al 5% de la presión efectiva de confinamiento. Este ensayo se le conoce como ensayo S o ensayo lento. (Suarez, 1998)

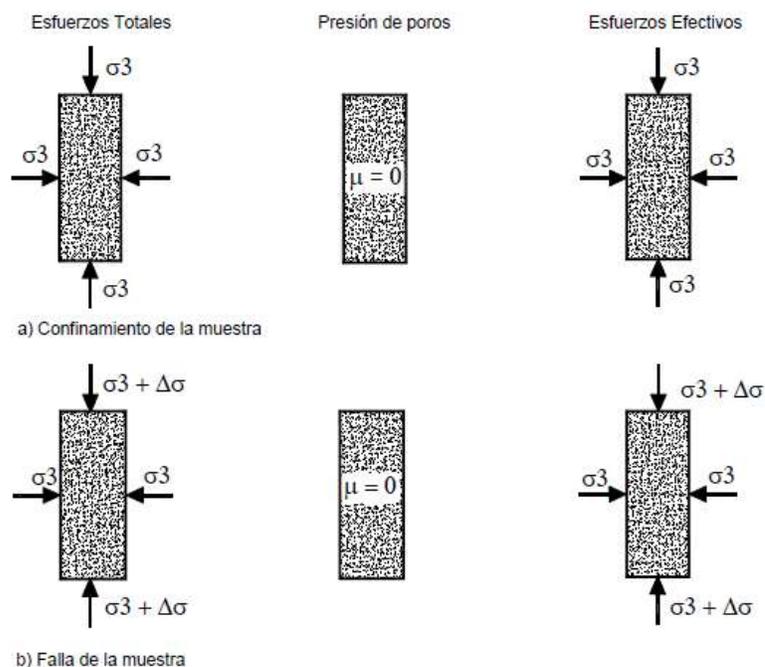


Figura 15. Ensayo consolidado drenado.

Fuente: Obtenida de Suarez (1998)

Veamos a continuación, en la Figura 16, como resulta graficar los esfuerzos aplicados a un suelo en términos de esfuerzos efectivos teniendo en cuenta el Círculo de Mohr:

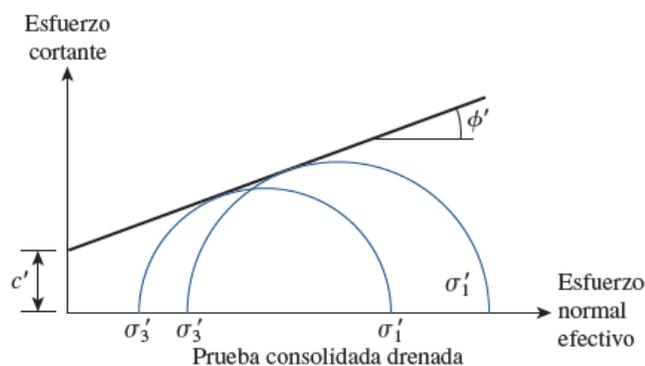


Figura 16. Círculo de Mohr, Prueba consolidada drenada.

Fuente: Obtenida de Das (2001)

2.3.5.4 Prueba consolidada no drenada

En este tipo de prueba, el espécimen se consolida primeramente bajo la presión hidrostática; así el esfuerzo llega a ser efectivo, actuando sobre la fase sólida del suelo. En seguida, la muestra se lleva a la falla por un rápido incremento de la carga axial, de manera que no se permita cambio de volumen. El hecho esencial de este tipo de prueba es el no permitir ninguna consolidación adicional durante el periodo de falla, de aplicación de la carga axial. Esto se logra fácilmente en una cámara de compresión Triaxial cerrando la válvula de salida de las piedras porosas a la bureta (ver Figura 17 y Figura 18).

En la segunda etapa de una prueba rápida consolidada podría pensarse que todo el esfuerzo desviador fuera tomado por el agua de los vacíos del suelo en forma de presión neutral, ello no ocurre así y se sabe que parte de esa presión axial es tomada por la fase sólida del suelo, sin que hasta la fecha, se hayan dilucidado por completo ni la distribución de esfuerzos, ni las razones que lo gobiernan. De hecho no hay ninguna razón en principio para

que el esfuerzo desviador sea íntegramente tomado por el agua en forma de presión neutral, si la muestra estuviese lateralmente confinada, como el caso de una prueba de consolidación.

El ensayo consolidado no drenado (CU) se realiza generalmente con medición de la presión de poros o neutra con el fin de determinar los parámetros de “c” y “ ϕ ” en términos de esfuerzos totales y esfuerzos efectivos (Salas, 2011, pág. 16).

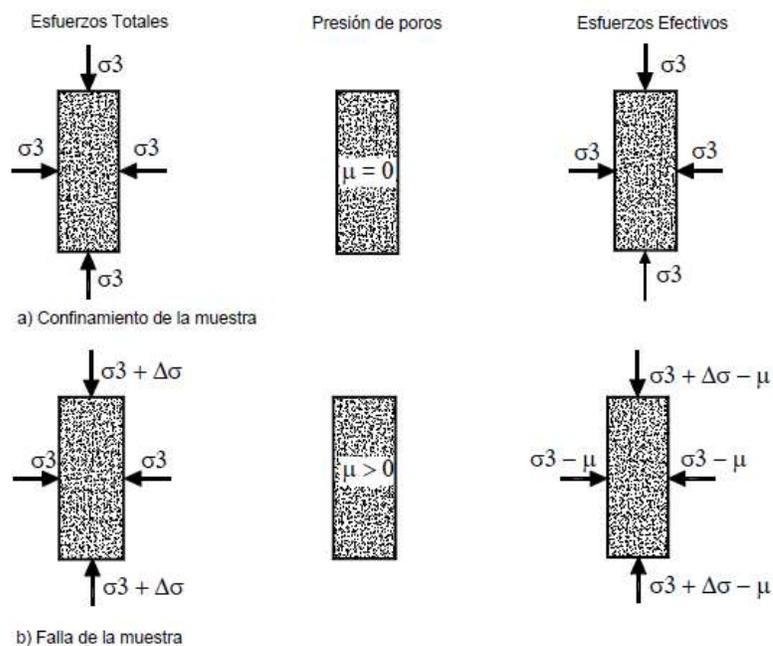


Figura 17. Ensayo consolidado no drenado.

Fuente: Obtenida de Suarez (1998)

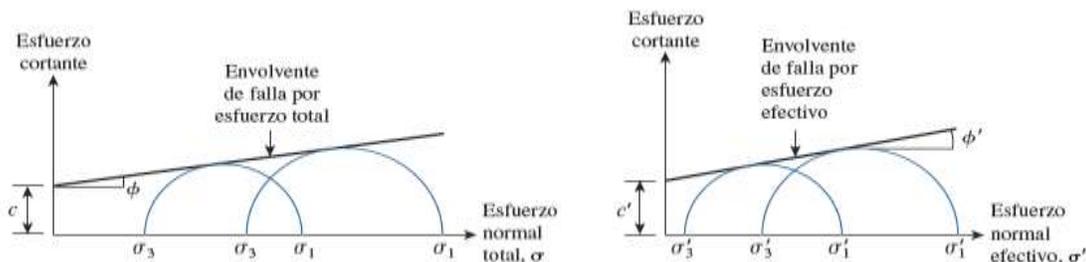


Figura 18. Círculo de Mohr, Consolidada no drenada en términos de esfuerzos efectivos y normales.

Fuente: Obtenida de Das (2001)

2.3.5.5 Prueba no consolidada no drenada

En este tipo de prueba no se permite en ninguna etapa la consolidación de la muestra. La válvula de comunicación entre el espécimen y la bureta permanece siempre cerrada impidiendo el drenaje. En primer lugar, se aplica al espécimen una presión hidrostática y de inmediato, se falla el suelo con la aplicación rápida de la carga axial. Los esfuerzos efectivos en esta prueba no se conocen bien (ver Figura 19).

El ensayo UU es usualmente llevado a cabo sobre especímenes de arcilla, enmarcando la realización del ensayo dentro del concepto de resistencia para suelos cohesivos saturados, en donde se expresan los resultados en términos de esfuerzos totales. La envolvente de falla para los criterios de Mohr del esfuerzo total se convierte en una línea horizontal, con una condición de $\phi = 0$ (ángulo de fricción) y $\tau_f = C_u$, siendo C_u , la resistencia al cortante no drenada, la cual es igual al radio de los círculos de Mohr (ver Figura 20) (Salas, 2011, pág. 16).

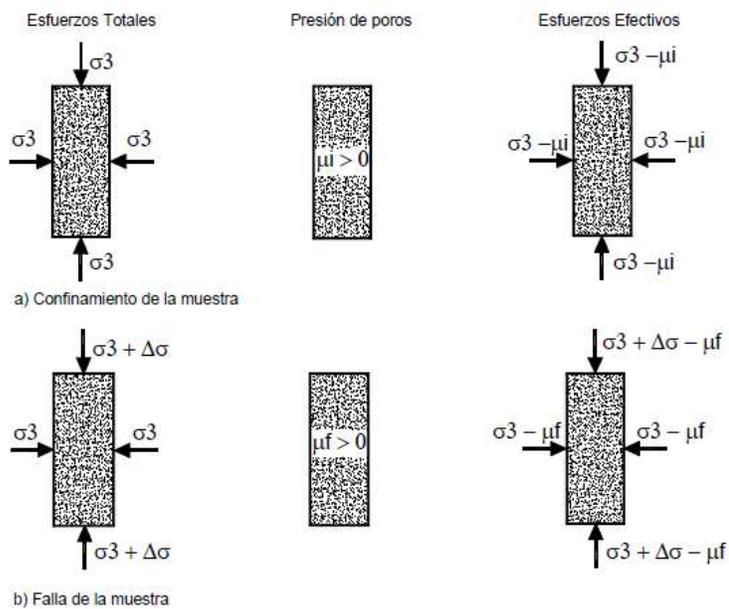


Figura 19. Ensayo no consolidado no drenado.

Fuente: Obtenida de Suarez (1998)

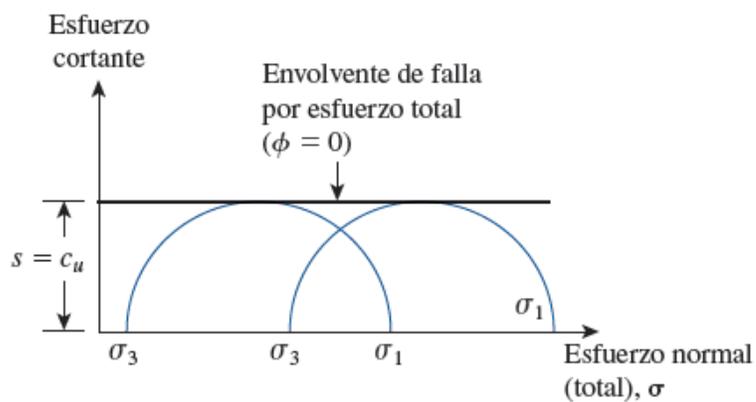


Figura 20. Círculo de Mohr, Prueba no consolidada no drenada.

Fuente: Obtenida de Das (2001)

2.4 Marco Legal

American Society for Testing and Materials, ASTM D - 2850 -03^a (2007), Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils, EEUU.

American Society for Testing and Materials, ASTM D 4767- 11, Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils, EEUU.

Norma técnica colombiana: NTC 2041 Suelos. Determinación de la resistencia a la compresión Triaxial no consolidada no drenada en suelos cohesivos.

Norma técnica colombiana: NTC 1936 Suelos. Método de ensayo para determinar el esfuerzo de compresión Triaxial de especímenes cilíndricos de núcleo de roca no drenados, sin medición de presión en los poros

Norma técnica colombiana de diseño y construcción sismo-resistente 2010 (NSR-10).
Titulo H: Estudios Geotécnicos.

Norma colombiana del instituto nacional de vías (INVIAS): I.N.V.E – 153 – 07.
Parámetros de resistencia del suelo mediante compresión Triaxial.

CAPÍTULO 3: Diseño metodológico

3.1 Tipo de investigación

La investigación que se desarrollará en el presente proyecto se puede clasificar como descriptiva y explicativa, debido a que busca, como primera instancia, la observación, identificación, clasificación, análisis y descripción de todos los componentes del equipo Triaxial y sus diferentes procesos de manejo y, como segunda instancia, el objetivo es crear modelos explicativos en el que puedan observarse los procedimientos adecuados para la realización de los diferentes tipos de ensayos triaxiales.

3.2 Población

Este proyecto se desarrollará en el laboratorio de suelos y pavimentos de la institución, por lo tanto, tendremos una población que abarca los ensayos de suelos y pavimentos que se realizan en dicho laboratorio.

3.3 Muestra

La muestra objeto de estudio en este proyecto es el ensayo Triaxial que se realizará con el equipo de comprensión Triaxial de marca PINZUAR, máquina con la que cuenta la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

3.4 Técnicas de recolección de información

Las técnicas de recolección de información para crear el presente proyecto serán recopilación documental, de fuentes primarias y secundarias, así como el uso del internet.

Además se analizarán y estudiarán procedimientos de otros equipos triaxiales para aplicarlos, si es posible, al equipo que se cuenta como muestra.

3.5 Proceso metodológico

El objetivo principal de este proyecto de grado es la implementación de una guía metodológica para el desarrollo del ensayo Triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Para dar cumplimiento a este objetivo se plantean 4 procedimientos básicos el cual se enfocan en el desarrollo de la siguiente estructura:

Inicialmente se recolectará y posteriormente se hará una revisión del estado del arte, tal fin se realizará para clasificar toda la documentación de importancia teórica y práctica relacionada a los ensayos Triaxiales.

Como segundo procedimiento, consiste en la observación, identificación, análisis y estudio del equipo Triaxial ubicado en el laboratorio de suelos y pavimentos de la UFPSO. Esta etapa es de mucha importancia, el cual teniendo claro el funcionamiento de la máquina, se realizarán varios ensayos, a diversos tipos de suelos, abarcando los diferentes tipos de ensayos triaxiales.

El tercer procedimiento, se relaciona con el procesamiento de los datos obtenidos en los ensayos triaxiales a los diferentes especímenes o muestras de suelo, y se relacionarán con la información recolectada en el estado del arte. El cual busca analizar, redactar y documentar de manera clara todos los procedimientos para el correcto manejo de la máquina Triaxial.

El cuarto y último procedimiento, se desarrollará la guía metodológica, que incluye toda la documentación literaria del Ensayo Triaxial, normas que lo rigen, descripción de la máquina y procedimientos de manejo para los diferentes ensayos Triaxiales.

CAPÍTULO 4: Administración del proyecto

4.1 Recursos

4.1.1 Recursos humanos

- Guillermo Alejandro Moncada Morales, autor del proyecto de grado y estudiante de Ingeniería Civil.
- Msc. Romel Jesús Gallardo Amaya, director del proyecto de grado.
- Esp. Agustín Armando Macgregor, Ingeniero Civil asesor.
- Oliver Picón Vacca, laboratorista UFPSO.
- Paula Andrea Rincón, Ingeniera Civil.

4.1.2 Recursos institucionales

- Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- Biblioteca “Argemiro Bayona Portillo” de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

4.1.3 Recursos financieros

4.1.3.1 Ingresos

Aportes personales del investigador serán de \$ 800,000.00 pesos.

4.1.3.2 Egresos

Descripción de los gastos para el desarrollo del proyecto se aprecian en la siguiente tabla:

Tabla 1. Descripción de los gastos para el desarrollo del proyecto

Rubros	Recursos
Papelería	\$150,000.00
Transporte	\$300,000.00
Internet	\$150,000.00
Imprevistos	\$200,000.00
Total	\$800,000.00

Nota: Tabla en donde se puede observar los recursos necesarios para cubrir los rubros indispensables para la realización del presente proyecto. Fuente: Autor, 2018.

CAPÍTULO 5: Resultados

5.1 Resultados de laboratorio

5.1.1 Elaboración de una guía metodológica para el desarrollo del ensayo triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

La guía metodológica desarrollada para este proyecto describe de manera clara y precisa, los temas relacionados con el ensayo triaxial para la determinación de los parámetros de resistencia de los suelos, que se desarrollará en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. Dicha guía lleva una estructuración por capítulos en los cuales abarca, desde la creación del equipo triaxial evolucionando en la época gracias al estudio de la mecánica de los suelos, hasta el procedimiento para realizar los diferentes tipos de ensayos triaxiales con la máquina disponible en el laboratorio.

La creación de la guía metodológica para realizar los diferentes tipos de ensayos triaxiales en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, requirió del desarrollo de los objetivos específicos como se describe a continuación:

5.1.1.1 Plantear el marco conceptual basándose en el desarrollo del ensayo Triaxial para la guía metodológica.

En el planteamiento del marco conceptual para la guía metodológica, se explicaron los conceptos, teorías y fundamentos más importantes a tener en cuenta para el estudio del ensayo triaxial. Cabe resaltar que para el desarrollo de este objetivo se incluyeron los antecedentes históricos que llevaron a la creación del equipo triaxial y su evolución gracias al nacimiento de la mecánica de suelos y su estudio.

Antes de establecer el marco conceptual de la guía metodológica se realizó una investigación del estado del arte, el cual se inició con la revisión bibliográfica de trabajos previamente realizados en distintos entes académicos y, además, en textos científicos. Gracias a esto se logró precisar los fundamentos teóricos con respecto a definiciones y conceptos, con el fin de consolidar las teorías y saberes, en relación al ensayo triaxial.

En relación con lo anterior, se estableció el marco referencial de este proyecto de grado, y brindó los conocimientos necesarios para comprender el comportamiento de los suelos sometidos a esfuerzos y como el ensayo triaxial permite simular esta condición y determinar las características y los parámetros de resistencia mientras esto ocurre.

5.1.1.1.1 *Conceptos relacionados con el ensayo triaxial*

Suelo: En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. (Das, 2001).

Fricción interna: Componente de la resistencia al corte de un suelo o de una roca indicada por el término en la ecuación de Coulomb: normalmente se considera que la fricción interna se debe al entrelazamiento de las partículas de suelo o de roca y a la resistencia al deslizamiento (fricción) entre las partículas.

Cohesión: La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo.

Compresión Triaxial: La causada por la aplicación simultánea de esfuerzos normales en tres direcciones perpendiculares entre sí; normalmente los esfuerzos en dos de estas direcciones son iguales (Normas ASTM D2850 y D4767).

Carga Isotrópica: Carga aplicada de modo que los incrementos totales de esfuerzos en las tres direcciones principales son iguales. No se desarrollan esfuerzos cortantes en el suelo.

Esfuerzos Principales: Esfuerzos (deformaciones) normales a cada uno de los tres planos, mutuamente perpendiculares, en los que los esfuerzos de cizalladura o de corte son nulos.

Círculo de Esfuerzos de Mohr: Representación gráfica de los componentes de los esfuerzos que actúan a través de diferentes planos en un punto dado, trazados respecto a los ejes de los esfuerzos normal y de cizalladura.

5.1.1.1.2 *Teorías relacionadas con el ensayo triaxial*

Esfuerzos en el suelo: Primeramente, hay dos categorías principales de esfuerzos en el suelo: los esfuerzos geostáticos y los inducidos.

Los esfuerzos geostáticos se deben al suelo en sí y son causados por el peso de él mismo sobre un punto en el suelo de su origen natural, pero pueden ser afectados por fenómenos geológicos y por acciones de los humanos.

Los esfuerzos inducidos son por contraste causados por cargas externas en el suelo; cargas superficiales como las generadas por una cimentación de una casa o un vehículo que pasa. Así que, ¿Cómo se calcula los esfuerzos geostáticos?

Exactamente sería como se muestra en la ecuación 20:

$$\sigma_z = \sum H_i \cdot \gamma_i \quad (20)$$

Donde las variables σ_z , H_i , γ_i son el esfuerzo geostático a una profundidad dada en el suelo, la altura de cada estrato del suelo y el peso específico de cada estrato respectivamente.

La anterior sumatoria se podría reemplazar por una integral, dando la ecuación 21:

$$\sigma_z = \int_0^z \gamma \cdot dz \quad (21)$$

Donde z es la profundidad del estrato de suelo en estudio. Sin embargo, en la práctica, generalmente se usa la ecuación de la sumatoria porque divide el suelo en capas finitas.

Principio del esfuerzo efectivo: Gracias a las contribuciones realizadas por Terzaghi, el cual hace un gran aporte a la mecánica de suelos y de ello se destaca el esfuerzo efectivo, es

indispensable entender que este esfuerzo está involucrado en el suelo debido a sus condiciones naturales en campo.

Como sabemos, un suelo es un material articulado, hecho de partículas sólidas y espacios vacíos (ver Figura 21). Cuando se le aplica un esfuerzo al suelo, parte de ese esfuerzo se transmite a través de las partículas sólidas (línea roja), es decir, de partícula a partícula. Si el espacio vacío se llena de agua, parte de ese esfuerzo se transmite a través del agua intersticial.

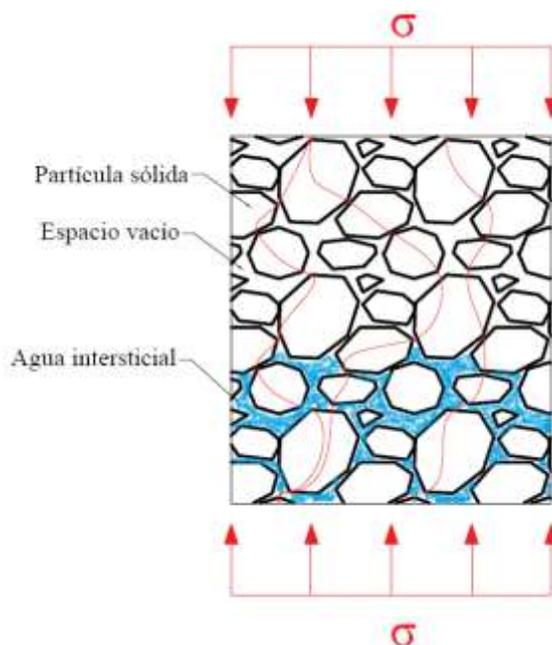


Figura 21. Esquema de una porción de suelo.

Fuente: Autor, 2018.

Si se hace un zoom en un lugar donde dos partículas están en contacto, podemos ver que los esfuerzos se llevan a cabo a través del contacto de partículas con partículas y la presión de los poros o presión intersticial actúa como un empuje para separarlas (ver Figura 22).

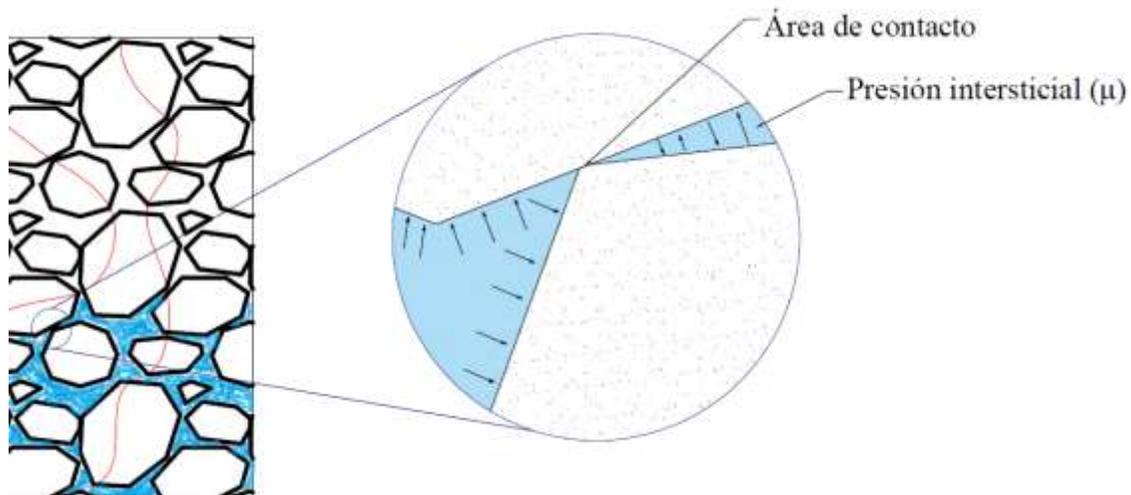


Figura 22. Detalle de esfuerzos entre dos partículas de suelo.

Fuente: Autor, 2018.

Este fenómeno es el concepto que se denomina esfuerzo efectivo. Donde, este esfuerzo es la porción que porta el esqueleto del suelo representado anteriormente por el esfuerzo de contacto entre las partículas.

El esfuerzo efectivo σ' se define como, el esfuerzo normal o total σ (esfuerzo entre las partículas), menos la presión intersticial μ (ver ecuación 22):

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (22)$$

Nota: Recuerde que el concepto de esfuerzo efectivo y su ecuación, es tal vez la más importante en toda la ingeniería geotécnica.

Círculo de Mohr: El círculo de Mohr es muy importante en el análisis geotécnico, el cual nos ayuda a graficar los esfuerzos a los que el suelo está sometido, como se apreció anteriormente. A su vez, este gráfico se aplica al ensayo Triaxial y se determinan los parámetros de cohesión y ángulo de fricción de las partículas del suelo.

Para explicar porque el círculo de Mohr puede ser tan importante, se ilustró el siguiente ejemplo: se tiene un punto A debajo de la pendiente de un talud determinado (ver Figura 23) e inicialmente se podría conocer los esfuerzos que actúan en la superficie horizontal y vertical como se aprecia a continuación:

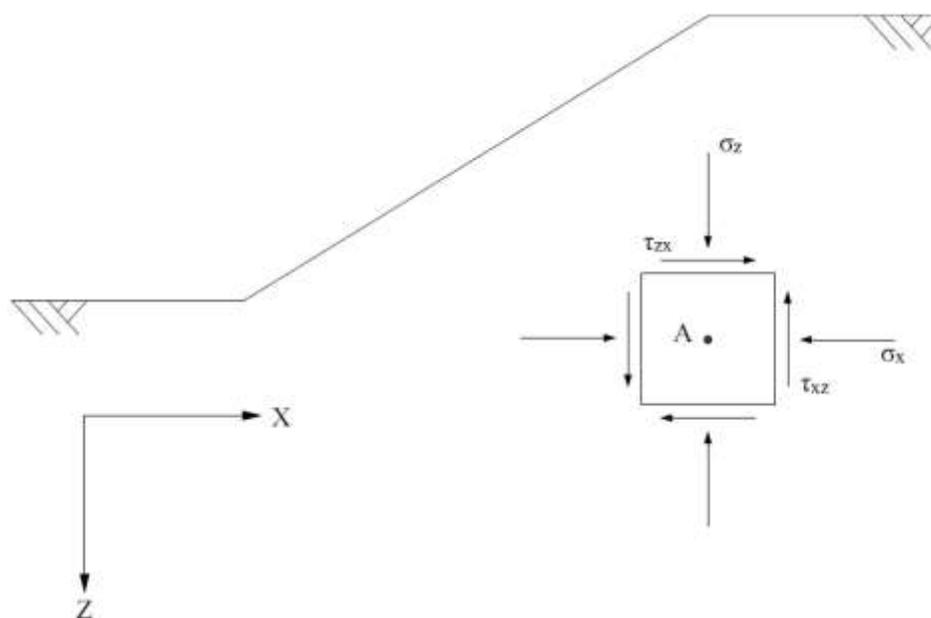


Figura 23. Esfuerzos actuantes en un punto de suelo de un talud.

Fuente: Autor, 2018.

Sin embargo, podría ser importante conocer los esfuerzos que actúan en algún otro plano en el punto A (ver Figura 24). Por ejemplo, se puede analizar una superficie de deslizamiento potencial y, querer saber los esfuerzos que actúan tangente a la superficie deslizante:

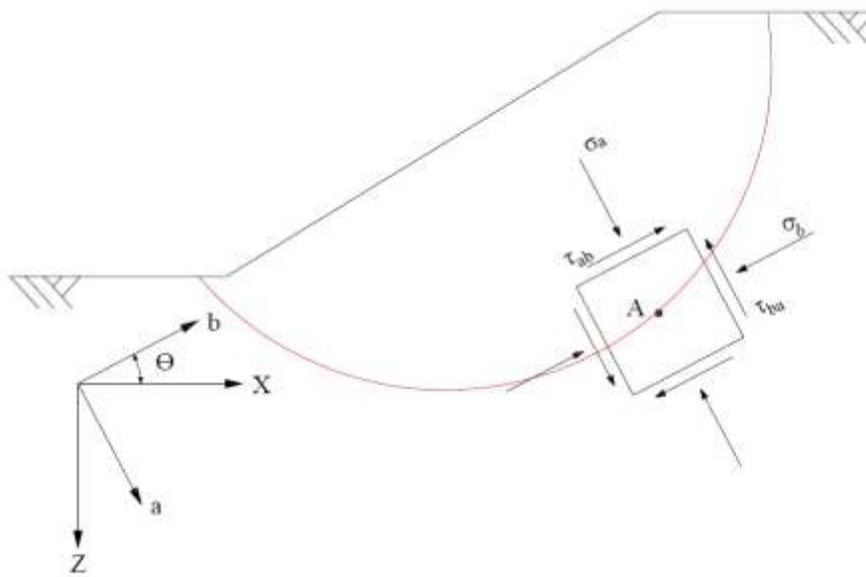


Figura 24. Esfuerzos actuantes en un punto de suelo de un talud en el plano de un deslizamiento.

Fuente: Autor, 2018.

Si se conoce los esfuerzos que actúan en la dirección X y Z originales, se puede determinar los esfuerzos actuando en las nuevas direcciones a y b , siempre que se conozca el ángulo Θ (theta) entre estas dos orientaciones. Se usará el análisis del círculo de Mohr para hacer los cálculos correspondientes.

El círculo de Mohr es una representación gráfica de los esfuerzos en un punto de un sólido, en este caso en una masa de suelo. Se dibuja un gráfico de ejes coordenados, donde el eje de las abscisas es el esfuerzo normal (compresión) y, el eje de las ordenadas, el esfuerzo cortante. En ingeniería geotécnica define la compresión como positiva, porque los suelos trabajan a compresión; esto es opuesto a la convención de signos en la mayoría de otras disciplinas de la ingeniería. Ahora, se traza los esfuerzos que actúan en el plano de X como un punto X . La

coordenada x representa el esfuerzo normal (σ_x) que actúa en el plano X, y la coordenada y representa los esfuerzos cortantes (τ_{xz}) que actúan en el plano x .

Tener en cuenta que el esfuerzo de corte en el plano X (τ_{xz}) tiende a girar el elemento en el sentido contrario a las manecillas del reloj (ver Figura 25), lo que indica que es un esfuerzo de corte positivo:

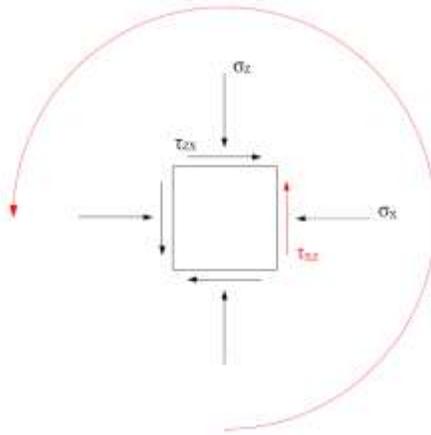


Figura 25. Sentido de giro del esfuerzo cortante en el plano X de una muestra de suelo.

Fuente: Autor, 2018.

A continuación, se traza el punto Z, el cual representa los esfuerzos en el plano Z (σ_z, τ_{zx}). Una vez se grafica los dos puntos, se unen con una línea recta. Esta línea representa el diámetro del círculo de Mohr, con su centro en el eje x . Luego se dibuja el círculo como se aprecia en la Figura 26.

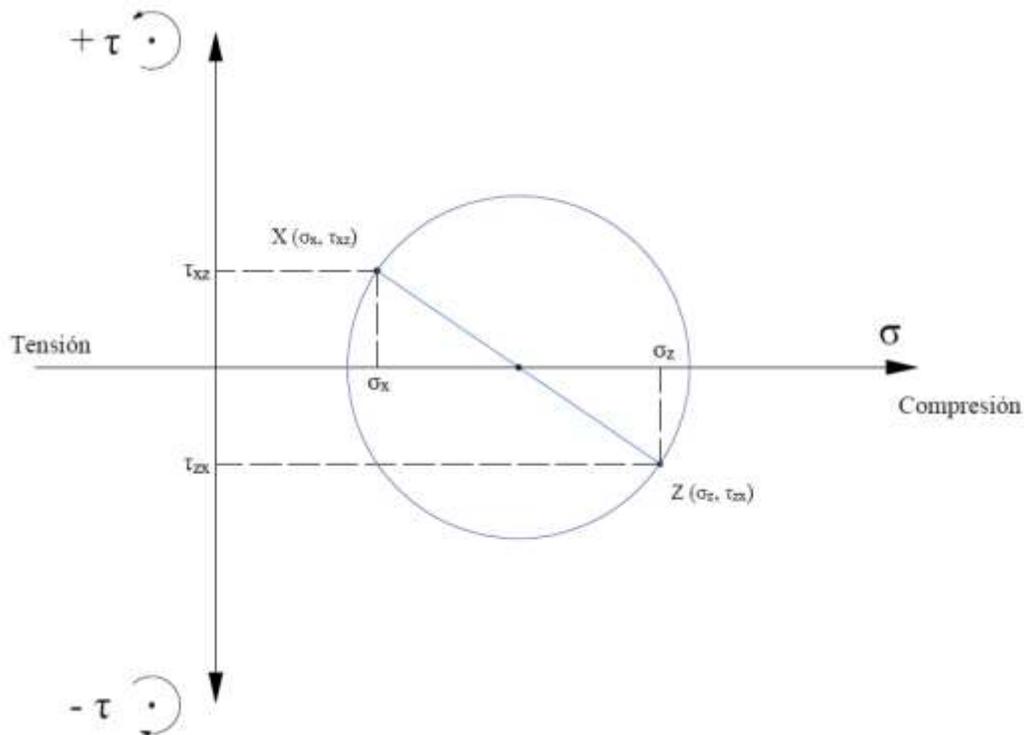


Figura 26. Círculo de Mohr para los esfuerzos normales y cortantes.

Fuente: Autor, 2018.

El centro del círculo representa el esfuerzo normal medio, σ_m . Definiendo sus coordenadas será: $(\sigma_m, 0)$. Por otro lado, usando Pitágoras, podremos calcular el diámetro del círculo. La ecuación 23 representa dicho cálculo:

$$\text{Diametro } (\phi) = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + (2\tau_{zx})^2} \quad (23)$$

Cada par de puntos opuestos en el círculo de Mohr, representa los esfuerzos en dos planos ortogonales en el espacio XY originalmente, por lo que todos estos pares de puntos representan los esfuerzos en el punto A (ver Figura 27), pero con diferentes orientaciones en el espacio XY. Las coordenadas de los pares de puntos representan esfuerzos normales y cortantes en diferentes planos:

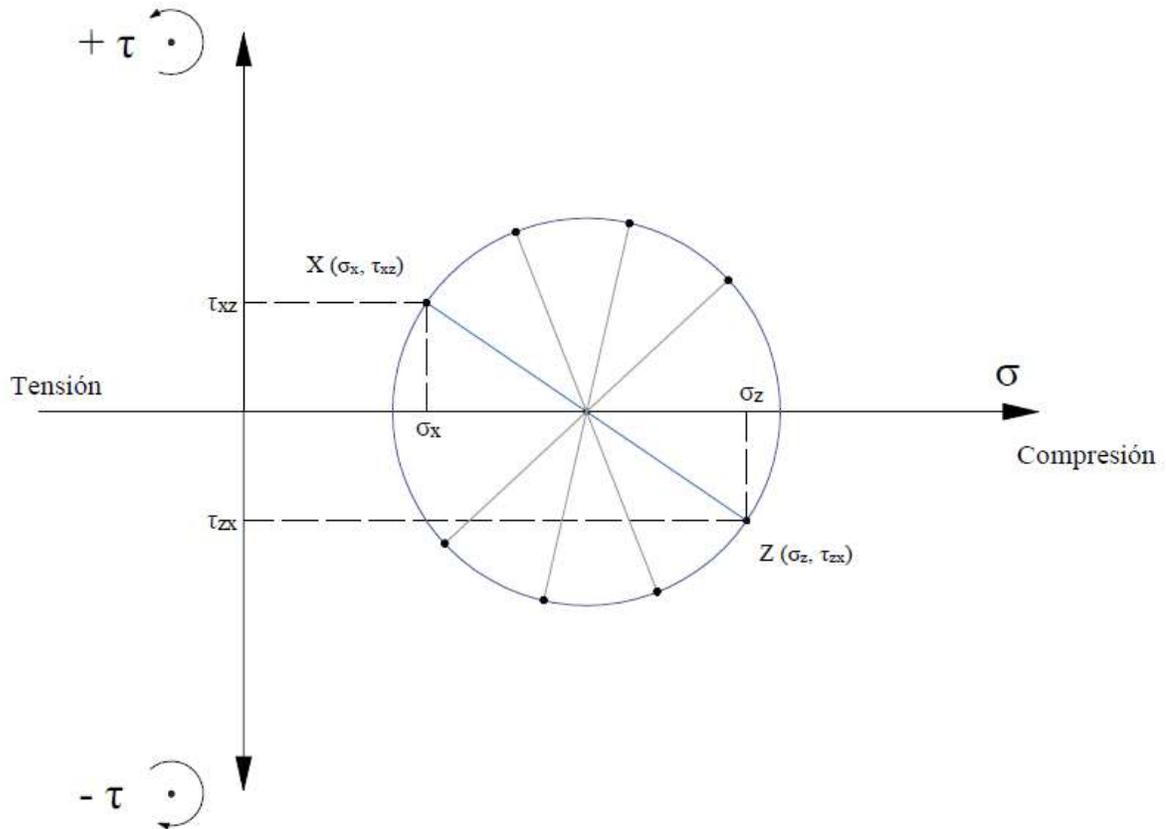


Figura 27. Círculo de Mohr para los esfuerzos normales y cortantes con diferentes planos.

Fuente: Autor, 2018.

Es importante señalar que el trazado del círculo de Mohr, está en el espacio σ (*sigma*) – τ (*tau*). En el diagrama, el eje horizontal representa el esfuerzo normal y el eje vertical, representa el esfuerzo cortante; no son las direcciones X y Z en el espacio físico.

Por otro lado, se puede usar el círculo de Mohr para determinar la magnitud del esfuerzo principal y la orientación de los planos principales. Como se sabe, en la mecánica de los materiales, los planos principales son aquellos donde no hay esfuerzo cortante. Ellos son también los planos donde las tensiones normales están en valores máximos y mínimos.

Solo hay dos lugares en el círculo de Mohr donde los esfuerzos cortantes son cero, el cual son los puntos donde el círculo se cruza con el eje horizontal (ver Figura 28). El punto de la derecha, representa el esfuerzo principal o σ_1 , con un valor de esfuerzo cortante en 0. El punto de la izquierda, representa el esfuerzo principal menor o σ_3 . De nuevo con esfuerzo cortante nulo para este punto.

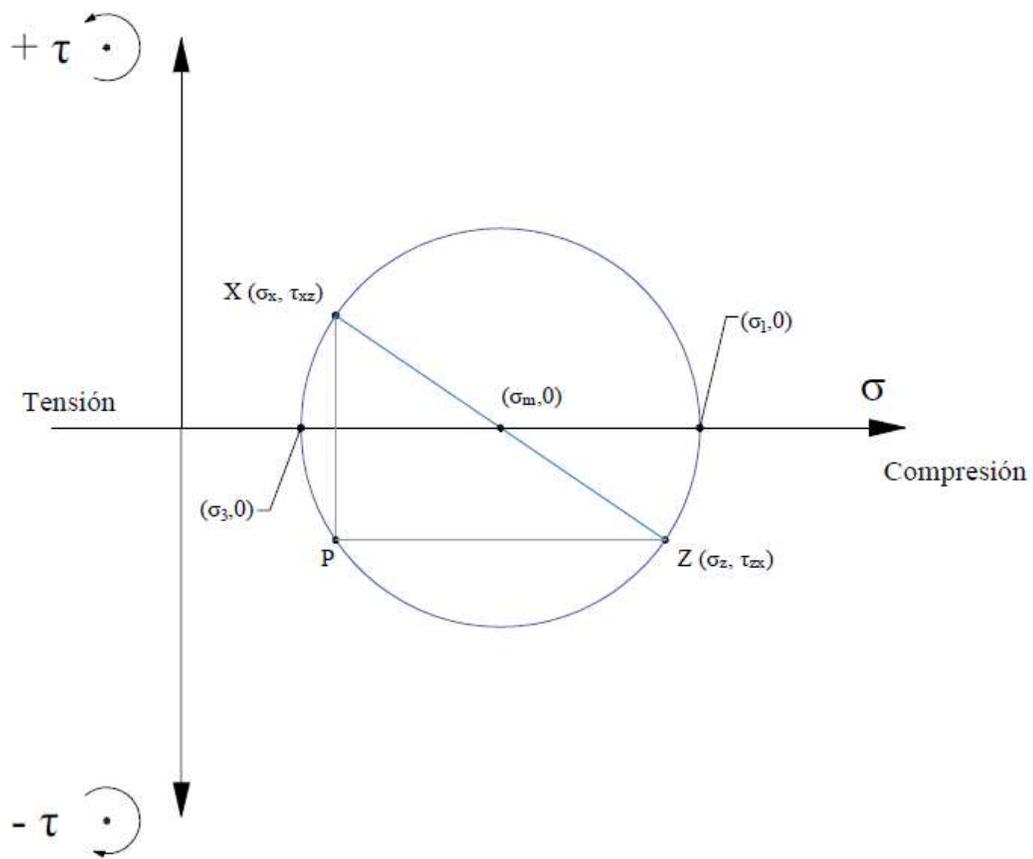


Figura 28. Círculo de Mohr con esfuerzos normales máximo y mínimo.

Fuente: Autor, 2018

Podemos usar fórmulas para calcular los esfuerzos en cualquier plano que se presente. Las ecuaciones (24), (25), (26) y (27) son las más utilizadas:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} \quad (24)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + (\tau_{xz})^2} \quad (25)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + (\tau_{xz})^2} \quad (26)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cos^{-1} \sqrt{\frac{1}{1 + \left[\frac{2\tau_{zx}}{(\sigma_z - \sigma_x)}\right]^2}} \quad (27)$$

Como se explicó anteriormente, el círculo de Mohr se aplica para esfuerzos en un elemento de suelo, es así como su uso se puede aplicar para los esfuerzos normales y efectivos del mismo.

Una vez determinado el círculo de Mohr para un punto en el terreno en esfuerzos totales, y que ese punto está por debajo del nivel freático con un resultado positivo de presión intersticial o de poros, se puede aplicar la ecuación 22 para determinar dicho círculo pero en términos de esfuerzos efectivos. Es así, como su uso es indispensable en el ensayo triaxial, ya que involucra esfuerzos en una masa de suelo, con tal fin de estudiar el comportamiento del mismo para aplicaciones ingenieriles.

5.1.1.1.3 Fundamentos del ensayo Triaxial

La prueba de ensayo Triaxial es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de la resistencia al cortante. (Salas, 2011, pág. 15). Además puede medir la rigidez, las características de deformación de las muestras, consolidación y permeabilidad.

El ensayo Triaxial consta de una celda Triaxial (ver figura 9), el cual aplica unos esfuerzos a la muestra de suelo y controla las condiciones de drenaje. El espécimen se sienta sobre un pedestal dentro de la celda con una tapa de carga en la parte superior. A su vez, está rodeado por una membrana de látex impermeable que separa el suelo del fluido que llena la célula. Posee dos medidores de presión conectados a la celda; uno mide la presión del fluido dentro de la célula y el otro la presión de poros (presión intersticial) dentro de la muestra.

Hay una válvula que controla el drenaje dentro de la muestra misma. Esta puede estar cerrada, evitando así el drenaje y, abierta, permitiendo el mismo. Un pistón de carga en la parte superior de la celda permite que se aplique una fuerza axial a la muestra de suelo. Además, un indicador de presión conectado en la parte superior de la muestra permite medir la fuerza axial que se le está ejerciendo a ésta, como se aprecia en la Figura 29.

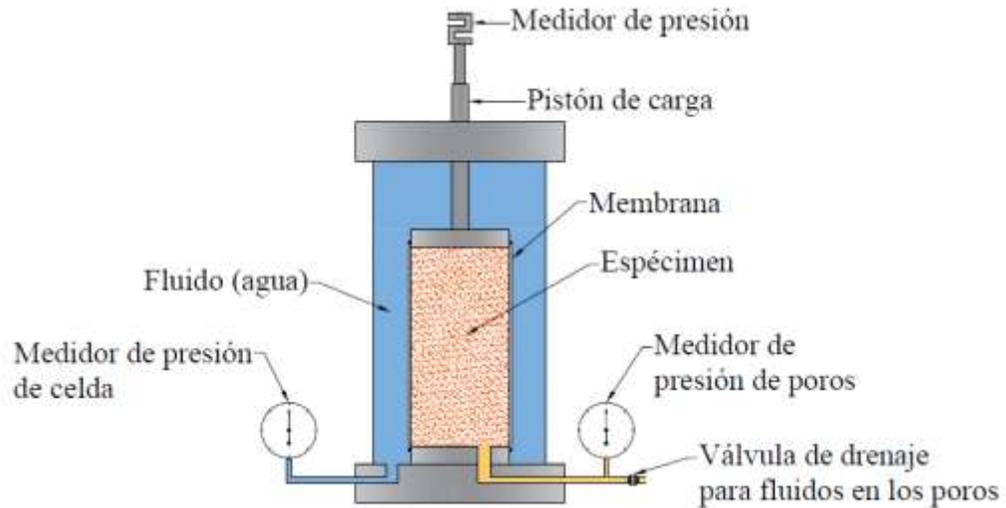


Figura 29. Celda Triaxial

Fuente: Autor, 2018.

Hay dos fases distintas de cualquier prueba triaxial. La primera fase es la consolidación, durante la cual se aumenta la presión en la celda (ver Figura 30). Esto proporciona un esfuerzo de confinamiento uniforme alrededor del espécimen igual al esfuerzo principal menor σ_3 :

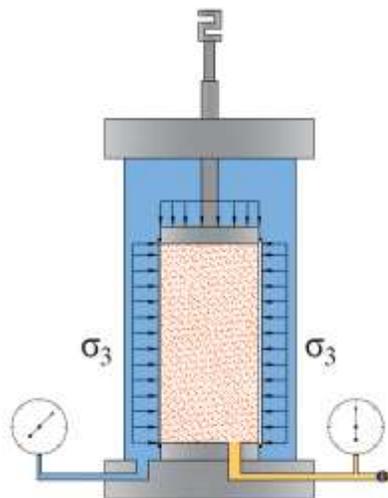


Figura 30. Esfuerzo principal menor en celda Triaxial.

Fuente: Autor, 2018.

Durante esta fase, el suelo puede consolidarse según el tipo de prueba que se realice. La segunda fase de la prueba es la fase de rotura; durante esta fase se aplica una carga al pistón de la celda Triaxial. Esta carga aumenta el esfuerzo en la parte superior de la muestra. Como no hay esfuerzo de corte en la parte superior o lateral de la muestra, estos son planos principales.

El principal esfuerzo mayor σ_1 , se aplica a la parte superior de la muestra y la presión de la celda proporciona el esfuerzo principal menor σ_3 , a los lados (ver Figura 31). El esfuerzo vertical se incrementa gradualmente hasta que la muestra falla.

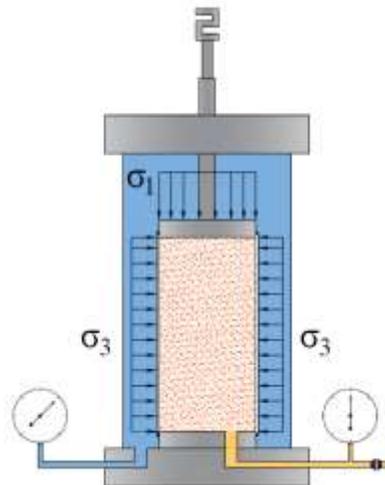


Figura 31. Esfuerzo principal mayor y menor en la celda Triaxial

Fuente: Autor, 2018.

Nota: El anterior esquema es relativamente simple de una celda triaxial. Las células reales son más complicadas y tienen líneas de drenaje adicionales. Sin embargo, este esquema cubre los componentes esenciales de una celda triaxial.

En las pruebas de laboratorio reales hay una fase que precede a la fase de consolidación. Esta fase anterior es la saturación. Es crítico que durante la prueba el suelo esté 100% saturado y los detalles de una muestra a este estado de saturación es parte importante de las pruebas.

Hay varios tipos diferentes de pruebas Triaxiales y se distinguen por las condiciones de drenaje aplicadas durante la consolidación y fase de rotura de la prueba.

En la fase uno, se agrega presión al agua que rodea al espécimen para proporcionar un confinamiento o esfuerzo de consolidación (σ_3). Durante la consolidación, la válvula de drenaje puede estar abierta permitiendo el drenaje o cerrada, creando una condición no drenada. Si la válvula está cerrada, se llama la prueba no consolidada y se usa la letra U para etiquetar esta fase. Como la muestra está saturada al comienzo de la fase de consolidación, no puede haber cambio en el volumen de la muestra cuando la válvula está cerrada y el exceso de presión de poros (presión intersticial) se genera durante esta fase. Si la válvula está abierta, la muestra está libre de drenaje y se define a esta fase consolidada y se usa la letra C para etiquetarla. En este caso, se permitirá que el suelo cambie de volumen y todas las presiones de poros excedentes sean disipadas al final de la fase de consolidación.

Durante la fase dos, la fase de corte, nuevamente la válvula de drenaje puede abrirse o cerrarse. Si la válvula está abierta, se denomina la fase drenada y se usa la letra D como etiqueta. En esta prueba drenada la suposición es que no hay exceso de presión de poros generadas durante la fase de rotura. Para asegurar que este sea el caso, se debe ejecutar la prueba muy lentamente para corregir cualquier presión de poros que podría generarse durante el corte y tenga tiempo para disiparse. Esto es particularmente importante para los suelos arcillosos, que tienen una baja conductividad hidráulica. Si se cierra la válvula de drenaje durante la fase de rotura, se

tiene una prueba no drenada representada por la letra U. En este caso no habrá cambio de volumen en la muestra y consecuentemente se generará presiones de poros excesos inducidas por la rotura. Esto permite calcular el esfuerzo efectivo dentro de la muestra.

Como se apreció anteriormente, se usa una designación de dos letras para identificar los diferentes tipos de pruebas Triaxiales. La primera letra especifica las condiciones de drenaje durante la fase de consolidación y la segunda letra, especifica las condiciones de drenaje durante la fase de rotura.

5.1.1.1.3.1 *Tipos de pruebas Triaxiales*

La prueba UU es una prueba no consolidada no drenada. En esta prueba, la válvula de drenaje siempre está cerrada. Esta es una prueba de esfuerzo total y generalmente no implica medir las presiones de poros generadas. También es llamada Q o prueba rápida, porque no se tiene que esperar a la consolidación ni al drenaje durante la fase de rotura.

La prueba CD es una prueba consolidada drenada. En esta prueba, la válvula de drenaje siempre está abierta. Además, es una prueba de esfuerzo efectivo ya que no se permite la acumulación de exceso de presión de poros. También se denomina prueba S o lenta, por lo que se debe esperar a que se complete la consolidación durante la primera fase y se tiene que aplicar lentamente el esfuerzo principal mayor σ_1 durante la fase dos, para que no exista exceso de presión de poros por presiones generadas.

La prueba CU es una prueba consolidada no drenada. Esta prueba, la válvula de drenaje está abierta durante la consolidación, pero cerrada durante la fase de rotura. También es llamada prueba R, presumiblemente porque es más rápida que la prueba S pero más lento que la Q.

Durante la fase de rotura, normalmente medimos las presiones de poro generadas. Esto nos permite calcular los esfuerzos totales y efectivos durante la fase de rotura.

Finalmente, a veces se realiza pruebas de compresión no confinadas en suelos cohesivos. Esta prueba no pertenece a una prueba Triaxial; no se realiza en una celda Triaxial. Es una prueba de compresión simple sin consolidación ni presión de confinamiento. Es similar a una prueba de compresión no confinada a un cilindro de concreto. Dado que esta prueba no se realiza en una celda Triaxial, no se tiene control sobre las condiciones de drenaje; se le aplica al espécimen una fase de rotura muy rápidamente y se supone que no hay drenaje. Esta prueba es equivalente a una prueba UU con σ_3 igual a cero.

5.1.1.1.3.2 *Representación en el círculo de Mohr de los diferentes tipos de ensayo Triaxial*

A continuación, se analizará el círculo de Mohr aplicado a los diferentes ensayos Triaxiales, graficando la envolvente de falla y determinados los parámetros de resistencia de los suelos, como los son: el ángulo de fricción y la cohesión.

Ensayo de compresión no confinada: En la prueba de compresión no confinada, se aplica un esfuerzo vertical a la muestra de suelo sin ningún esfuerzo confinante lateral. Ese es el esfuerzo principal menor σ_3 , que es igual a cero (ver Figura 32). Por lo tanto, todos los círculos de Mohr para esta prueba son todos tangentes al eje del esfuerzo cortante τ . El esfuerzo vertical se incrementa hasta que falla la muestra.

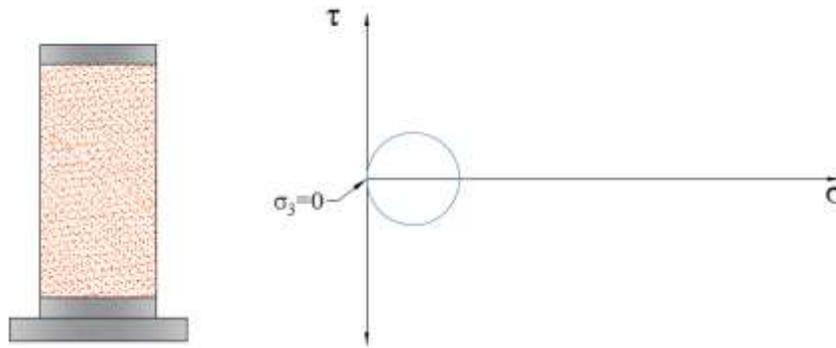


Figura 32. Circulo de Mohr para prueba de compresión no confinada

Fuente: Autor, 2018.

En caso de falla, el máximo esfuerzo de denomina σ_1 (ver Figura 33). Este es una prueba de esfuerzo total, no se tiene medida de las presiones de poros y no se puede determinar los esfuerzos efectivos en el suelo. El pico de esfuerzo de rotura o cortante en caso de falla es una medida de la fuerza de corte no drenada. No hay envolvente de falla para la prueba de compresión no confinada ya que solo se tiene un círculo de Mohr en esta prueba.

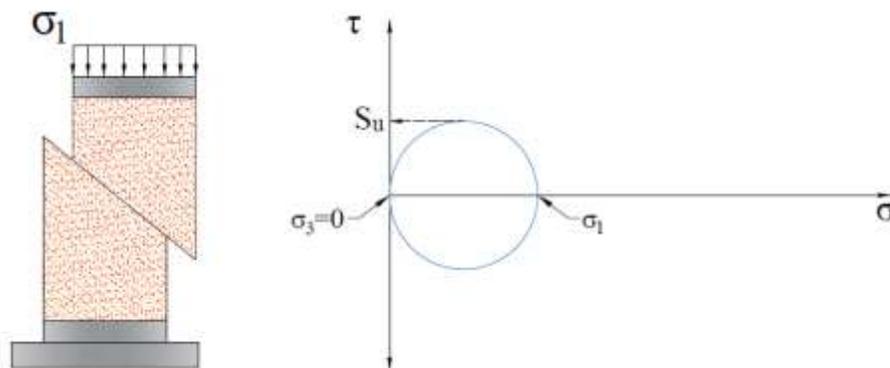


Figura 33. Circulo de Mohr para prueba de compresión no confinada. Estado de falla.

Fuente: Autor, 2018.

Ensayo no consolidado no drenado (UU): La prueba UU es otra prueba de esfuerzo total. Al igual que la prueba de compresión no confinada, en algunos casos, no se mide la presión de poros y no se calcula las tensiones efectivas. El propósito de la prueba UU es determinar la fuerza de rotura no drenada. La válvula de drenaje se cierra durante la prueba. Inicialmente, no hay esfuerzo en la muestra y los círculos de Mohr aparecen como un punto en el origen del diagrama del Mohr-Coulomb. A medida que se aplica la presión en la celda, el círculo de Mohr sigue siendo un punto porque σ_1 y σ_3 son ambos iguales a la presión de la celda (ver Figura 34). Sin embargo, el círculo de Mohr se mueve a la derecha a lo largo del eje horizontal a medida que la presión de la celda aumenta.

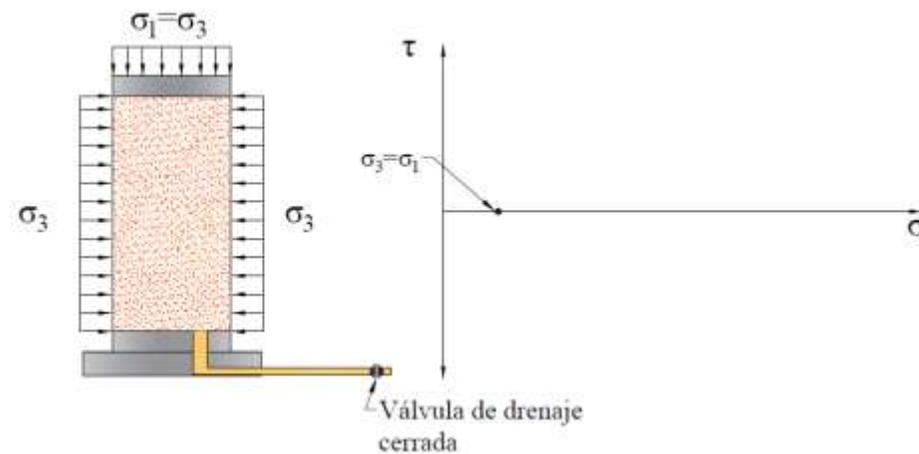


Figura 34. Círculo de Mohr para prueba no consolidada no drenada.

Fuente: Autor, 2018.

Una vez que se llegue a la carga deseada en la celda triaxial o fase de consolidación sin drenaje, la fase de rotura comienza aumentando el esfuerzo vertical aplicado en la muestra. El esfuerzo principal menor σ_3 , no cambia a medida que se incremente dicho esfuerzo vertical. Se

seguirá aumentando el esfuerzo hasta que la muestra falle (ver Figura 35). De nuevo, el esfuerzo máximo principal en la falla es σ_1 , y el suelo tiene una resistencia al corte no drenado.

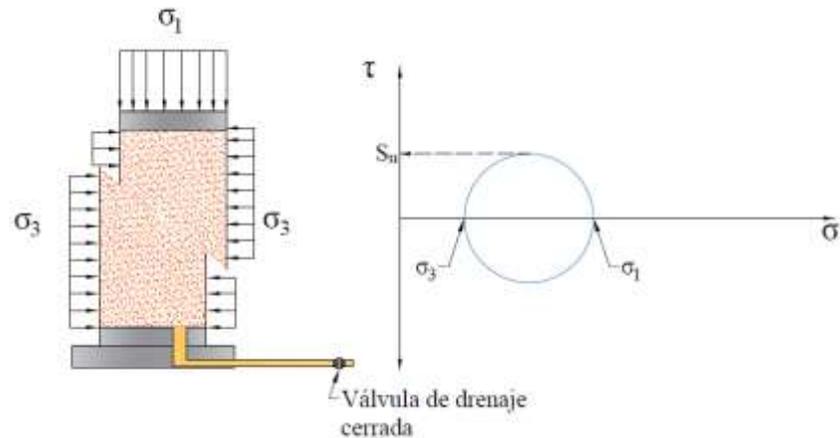


Figura 35. Círculo de Mohr para prueba de compresión no confinada. Estado de Falla.

Fuente: Autor, 2018.

Debido a que la válvula de drenaje se cerró durante la fase de consolidación, no ocurrió este proceso y el suelo no ganó ninguna fuerza durante esta fase. Por lo tanto, la resistencia al cortante no drenado bajo un esfuerzo limitante no es mayor que la resistencia medida en una prueba de compresión no confinada del mismo suelo como se muestra en la Figura 36.

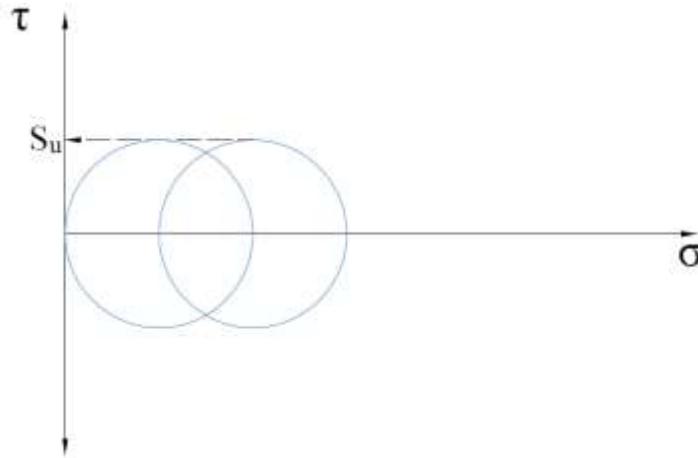


Figura 36. Circulo de Mohr de pruebas: compresión no confinada y ensayo triaxial UU.

Fuente: Autor, 2018.

Del mismo modo, si se realiza otra prueba en una muestra de suelo idéntica, pero σ_3 es mayor durante la fase de consolidación, el suelo aún no gana fuerza porque no se permite la consolidación. Una tercera prueba también tendría la misma fuerza no drenada que las dos pruebas anteriores. Luego, si se traza la envolvente de falla de esfuerzo total para esta prueba, tendrá una pendiente de cero e intercepta al eje vertical τ , en S_u (ver Figura 37). Esto se conoce como la condición $\phi = 0$ (ángulo de fricción igual a cero). Los suelos arcillosos saturados cargados en condiciones no drenadas fallan en condiciones $\phi = 0$:

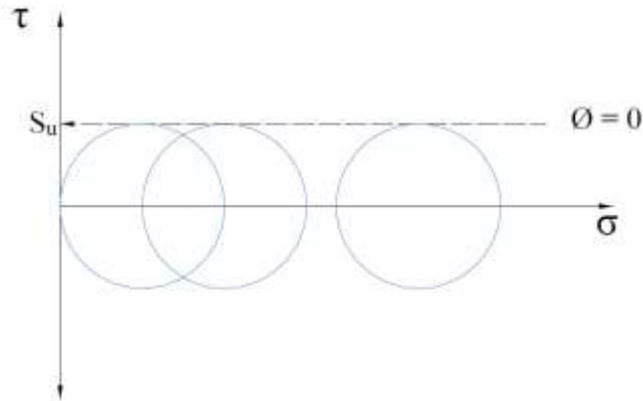


Figura 37. Envolvente de falla. Condición UU.

Fuente: Autor, 2018.

Ensayo consolidado drenado (CD): En esta prueba, la válvula de drenaje permanece abierta durante las fases de consolidación y corte y cualquier exceso de presión de poros que puede generarse, se disipará. Por lo tanto, el esfuerzo efectivo y esfuerzo total son iguales. Esta es entonces, una prueba de esfuerzo efectivo.

Durante la consolidación, el círculo de Mohr se mueve de nuevo desde un punto en el origen hasta un punto en el esfuerzo de consolidación σ_3 (ver Figura 38), pero en este caso este es el esfuerzo efectivo de consolidación porque no hay presiones de poros y el suelo se consolidará y aumentará su fuerza.

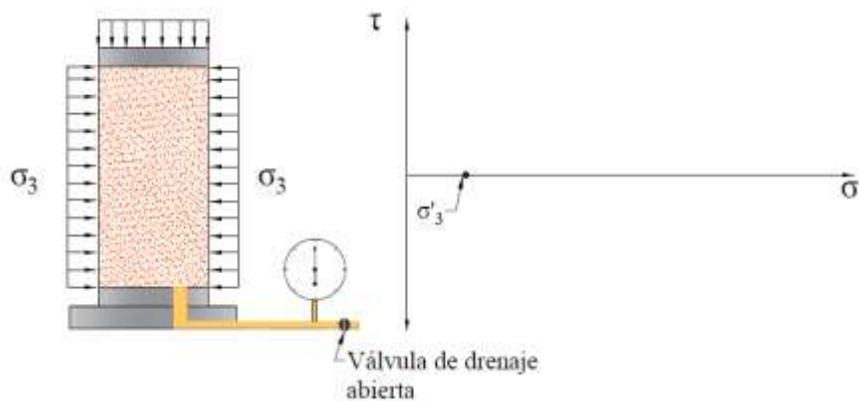


Figura 38. Circulo de Mohr para condición CD.

Fuente: Autor, 2018.

El esfuerzo principal mayor σ_1 se incrementa hasta que el suelo falle, pero en esta prueba se realiza el corte tan lentamente que no se generan presiones de poros. Por lo tanto, el esfuerzo principal mayor en la falla también está en términos de esfuerzo efectivo σ'_1 , como se puede ver en la Figura 39.

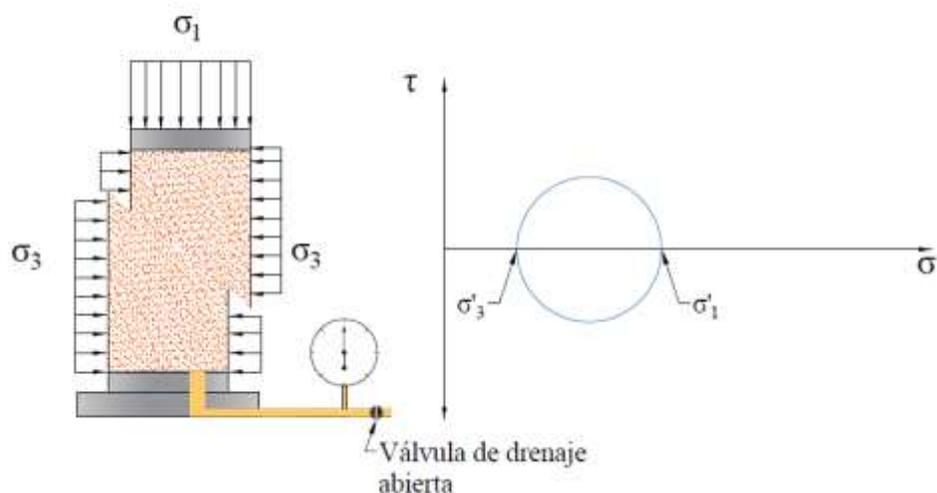


Figura 39. Circulo de Mohr para condición CD en estado de falla.

Fuente: Autor, 2018.

Si se prueba un segundo espécimen, pero se consolida a un esfuerzo de confinamiento efectivo más alto, el suelo ganará fuerza durante el proceso de consolidación. Luego, cuando la muestra de suelo llega a la falla, se tendrá un círculo de Mohr más grande (ver Figura 40).

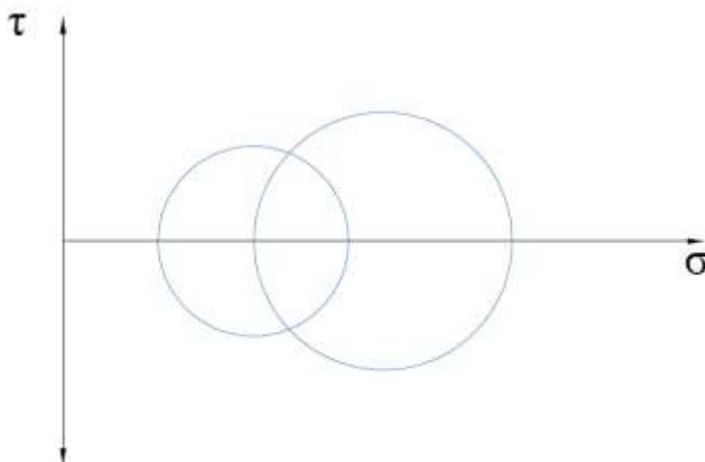


Figura 40. Círculos de Mohr para condición CD.

Fuente: Autor, 2018.

Del mismo modo, si se realiza una tercera prueba con un esfuerzo de confinamiento aun mayor, nuevamente el suelo se consolidará y se tiene un círculo de Mohr más grande cuando la muestra falle. Utilizando los tres círculos de falla, se puede trazar la envolvente de falla como una línea tangente a los círculos y se podrá calcular el ángulo de fricción ϕ' y cohesión c' (ver Figura 41). Para este caso, este será una envolvente de falla de esfuerzos efectivos y tanto el ángulo de fricción y cohesión serán parámetros de fuerza efectivos según lo observado por el uso del símbolo principal.

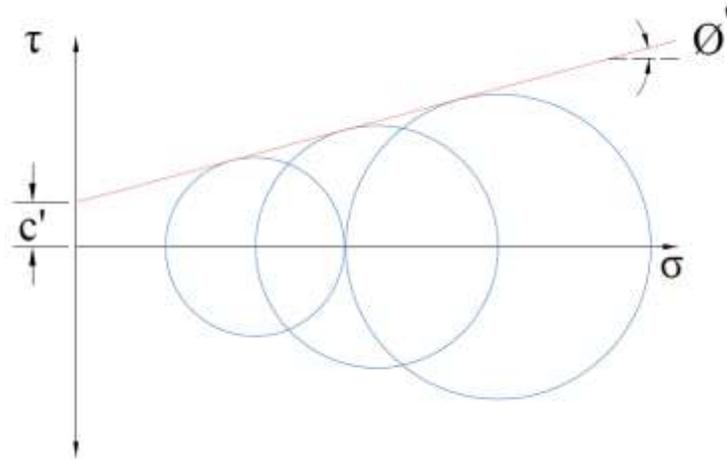


Figura 41. Envolvente de falla. Condición CD

Fuente: Autor, 2018.

Ensayo consolidado no drenado (CU): En esta prueba, la válvula de drenaje está abierta mientras se aplica el esfuerzo de confinamiento y permanece así hasta que el suelo se consolide; todas las presiones de poros se disipan. Luego, la válvula de drenaje se cierra para crear una condición no drenada para la fase de rotura de la prueba y, se medirá cualquier exceso de presión de poros que se genere durante esta fase. El esfuerzo vertical se incrementa hasta que falle el suelo.

Dado que se está midiendo las presiones de poro durante la prueba, se conocerá el cambio en la presión como Δu . Conociendo todos los esfuerzos totales, como la presión de poros en caso de falla, se puede calcular los esfuerzos efectivos y graficarlos en el círculo de Mohr como se muestra en la Figura 42.

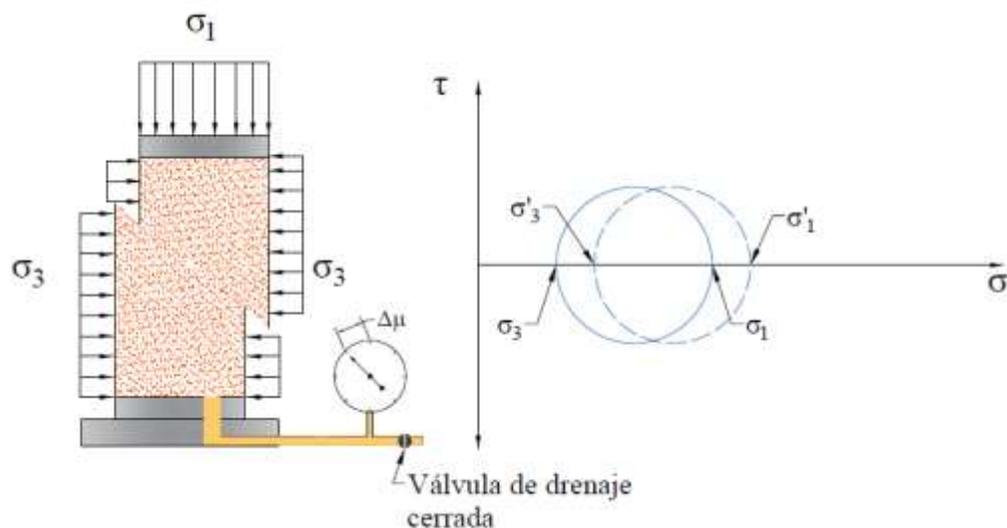


Figura 42. Circulo de Mohr para condición CU. Estado de falla.

Fuente: Autor, 2018.

En el caso que se mostró anteriormente, se tiene un exceso negativo de presión de poros por lo que el esfuerzo efectivo es mayor que el esfuerzo total, desplazándose el círculo a la derecha (línea punteada).

Como en pruebas anteriores, se puede probar una segunda muestra con un esfuerzo de consolidación mayor. Luego se lleva la muestra a estado de falla y se determina el círculo de esfuerzos total. Como también se conoce la presión de poros en la falla, se puede trazar el círculo de esfuerzo efectivo. Finalmente, se ensaya un tercer espécimen con esfuerzo de confinamiento mayor y en efecto dará un esfuerzo de falla aún más grande. Se traza el tercer círculo tanto de esfuerzo total como efectivo.

Al graficar los círculos, se tiene dos conjuntos de falla. Los círculos en línea continua, representan los esfuerzos totales y los círculos discontinuos representan los esfuerzos efectivos en caso de falla para ambos casos.

Si se considera solo los círculos de esfuerzos efectivos se puede trazar la envolvente de falla y determinar los parámetros ϕ' y c' (ver Figura 43). Por lo tanto a partir de una prueba CU con medición presión de poro, se puede determinar los parámetros efectivos de resistencia aunque la fase de rotura está bajo condiciones no drenadas.

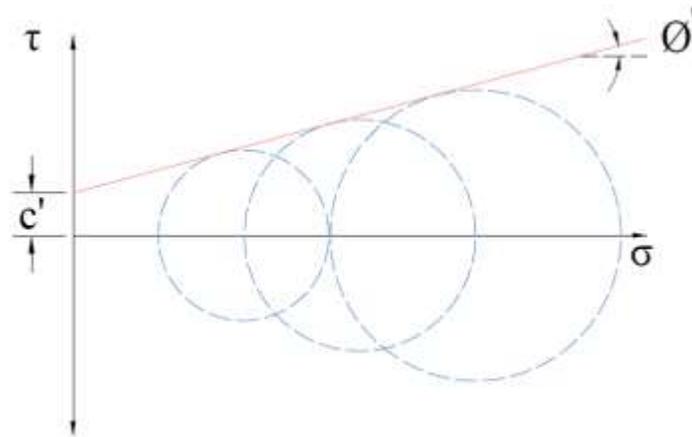


Figura 43. Envolvente de falla. Condición CU en esfuerzos efectivos.

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2 Establecer el funcionamiento de cada una de las partes de la maquina Triaxial y construir los procedimientos detallados para la realización eficaz del ensayo Triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

La máquina triaxial ubicada en el laboratorio de suelos y pavimentos consta de 5 (cinco) partes fundamentales, como lo son: Computador, máquina de ensayos, celda triaxial, Unidad triaxial automática y unidad de cambio de volumen digital. A continuación se describen sus características y, más adelante se explicará el procedimiento a seguir para realizar cada uno de los diferentes ensayos triaxiales.

5.1.1.2.1 Computador

Todos los componentes del computador actualmente instalado con el equipo Triaxial son de Marca Janus (ver Figura 44). Los componentes son: Monitor Led de 19.5”, Mouse USB, Teclado USB y Torre (CPU).



Figura 44. Computador de mesa JASUS

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.1.1 *Especificaciones técnicas del hardware*

- Procesador: AMD E-350D APU with Radeon™ HD Graphics 1.60 GHz
- Memoria RAM: 2,00 GB (1,60 GB utilizable)
- Disco Duro: 461 GB (Gigabytes)

5.1.1.2.1.2 *Especificaciones técnicas del Software*

- Sistema operativo de 32 bits
- Windows 7 Professional

5.1.1.2.2 *Máquina de ensayos*

La máquina de ensayos consta de un marco de dos columnas con viga transversal ajustable (marco de carga (ver Figura 45)), con dimensiones de 470 mm x 215 mm x 840 mm, además una capacidad máxima de fuerza de 27 kN (2700 kgf – 6000 lbf) y un sistema de medición digital de fuerza por transductor de fuerza de alta resolución (ver Figura 46), con un rango de medición de 5kN con resolución de 0,1 N (opcional hasta 27 kN).



Figura 45. Marco de carga

Fuente: Autor, 2018.



Figura 46. Transductor de fuerza

Fuente: Autor, 2018.

El sistema de aplicación de carga vertical se realiza por medio de un sistema mecánico llamado servomotor (ver Figura 47), operado y controlado por microprocesadores que garantizan la constancia de la velocidad de deformación para todo el rango de trabajo del marco de carga. Tiene velocidad programable con medición de desplazamiento. La velocidad de desplazamiento esta entre 0,00001mm/min hasta 10mm/min, con un recorrido máximo de 75 milímetros.

El sistema mecánico tiene interruptores de seguridad, finales de carrera instalados internamente que protegen el mecanismo en las dos direcciones.



Figura 47. Servomotor

Fuente: Autor, 2018.

El panel de control del marco de carga (ver Figura 48) es el sistema electrónico que sirve de interface operador-máquina. Su operación fácil y rápida permite la programación de la máquina junto con los parámetros de las muestras a ensayar.

Además, el panel de control consta de las siguientes partes que se encuentran referenciadas en la Figura 48:

- Encendido general de la máquina (1)
- Parada de emergencia (2)
- Teclado de membrana (3)
- Pantalla de cristal líquido (4)



Figura 48. Panel de control del marco de carga

Fuete: Autor, 2018.

El equipo de ensayo triaxial está dotado de un botón para detener la operación, en caso de emergencia. El botón de Parada de emergencia es el botón rojo ubicado e identificado en el frente, del panel de control de la máquina. Para accionar la parada de emergencia presione hasta el tope el botón de Parada de emergencia. La parada de emergencia no apaga la unidad de cómputo.

Las posibles situaciones en la que se requiera el uso del botón de parada de emergencias durante un ensayo triaxial son las siguientes:

- Movimientos inadecuados tanto en el pistón de la celda triaxial como en el transductor de fuerza
- Ruidos inadecuados en el servomotor
- Fisuras en la celda triaxial debido a las presiones
- Desajuste de piezas en la celda triaxial
- Escape o fugas de agua en tubos de drenaje (tubos plásticos) de la maquina triaxial

- Sonidos de emergencia de la máquina triaxial
- Activación de interruptores de emergencia de la unidad triaxial automática.

Por otro lado, y siguiendo con el panel de control del marco de carga, el teclado de membrana tiene las siguientes funciones:

- 1: Entrada de un valor numérico
- 2: Entrada de un valor numérico
- 3: Entrada de un valor numérico
- 4: Entrada de un valor numérico
- 5: Entrada de un valor numérico
- 6: Entrada de un valor numérico
- 7: Entrada de un valor numérico
- 8: Entrada de un valor numérico
- 9: Entrada de un valor numérico
- 0: Entrada de un valor numérico
- . : Entrada de un valor numérico
- Menú/Borrar: Inicia funciones de programación
- FIN: Regresa al menú anterior y durante el ensayo esta tecla lo detiene
- ↵: Inicia el ensayo
- ↑: Pulsar, el plato de carga sube
- ↓: Pulsar, el plato de carga baja

Una vez encendida la maquina encontrará en la pantalla de cristal líquido la siguiente información:

- Rango máximo de medición de fuerza establecido.
- Fuerza actual medida por el transductor de fuerza.
- Nota: Al encender la máquina el transductor registra una fuerza muy pequeña; Esto no alterará los ensayos a realizar, ya que esta máquina se encuentra calibrada por la empresa fabricante y por ende registra una fuerza aún sin este dispositivo recibir cualquier presión.
- Ensayo configurado. Para este manual debe estar siempre establecido en la opción TRIAXIAL.
- Diámetro de la celda

Como se puede ver en la Figura 49, es la configuración inicial que se debe encontrar la máquina para realizar cualquiera de los ensayos Triaxiales:



Figura 49. Panel de control encendido

Fuente: Autor, 2018.

Para el ajuste y posicionamiento de la altura inicial de la máquina, utilice las teclas marcadas con las flechas arriba (↑) y/o abajo (↓). Si se sostiene más de cuatro segundos el motor operará continuamente; para detener pulse la tecla FIN.

En el menú principal de la maquina encontraremos las opciones de Ensayo, Muestra y Maquina representados por los numero uno (1), dos (2) y tres (3) respectivamente (ver Figura 50). Para ingresar en esta opción presionamos el botón Menú/Borrar.

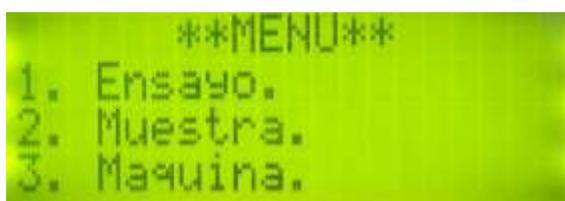


Figura 50. Menú principal máquina de ensayos

Fuente: Autor, 2018.

Para ingresar en la opción ensayos presionamos la tecla numérica 1, donde se encontrará que tipo de ensayo se desea realizar (ver Figura 51), en este caso siempre será triaxial (en caso de que encuentre en la característica ensayo “otro ensayo” al encender la máquina se deberá ingresar a este menú y escoger la opción 1, el cual es para ensayos triaxiales). Además aparecerá una opción para ver el registro final del último ensayo que se realizó. Para ver esta opción presione la tecla numérica 3.



Figura 51. Menú: Tipo de ensayo

Fuente: Autor, 2018.

Ahora en la opción muestra (presionando la tecla numérica 2) del menú principal se encuentran las características del espécimen a ensayar, como son: altura, diámetro y velocidad de aplicación de carga (ver Figura 52).

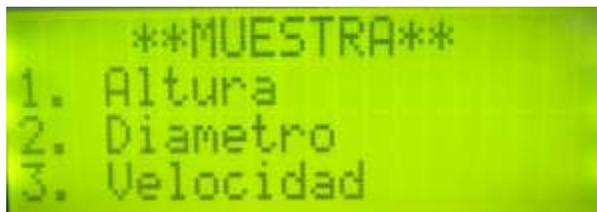


Figura 52. Opción muestra (espécimen)

Fuente: Autor, 2018.

Al presionar las teclas numéricas de cada uno de los números correspondientes a estas características se ingresa al menú de su modificación. Siempre encontrará en pantalla al ingresar, la característica seleccionada actual y si se desea, cambiarla a una nueva.

Es por eso que si se desea realizar alguna modificación a la altura y/o diámetro del espécimen, y a su vez la velocidad de aplicación, se digita el nuevo valor seguido de la tecla Enter (↵). A continuación en las Figura 53, Figura 54 y Figura 55, se muestra cada una de las opciones del menú “muestra”.

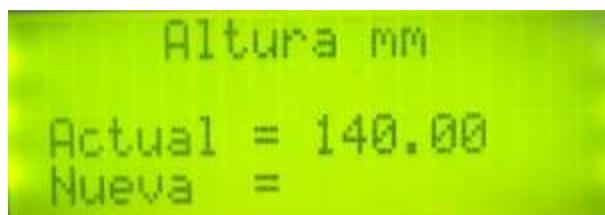


Figura 53. Opción altura del espécimen

Fuente: Autor, 2018.

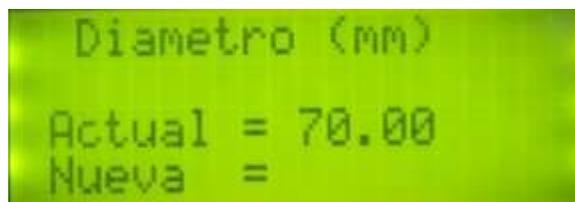


Figura 54. Opción diámetro del espécimen

Fuente: Autor, 2018.

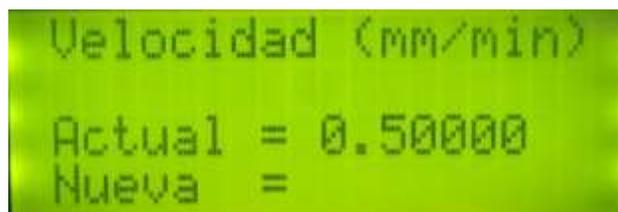
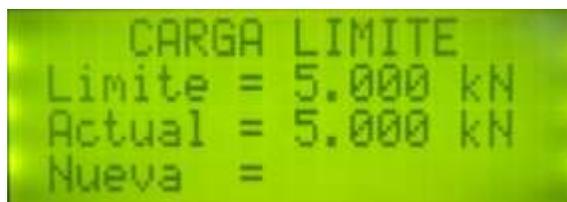


Figura 55. Opción Velocidad de aplicación de carga

Fuente: Autor, 2018.

Nota importante: tenga en cuenta las unidades de medida utilizadas para las características de la muestra al momento de verificarlas o modificarlas. En el caso de la altura y el diámetro son en milímetros y la velocidad de aplicación de carga son en milímetros por minuto.

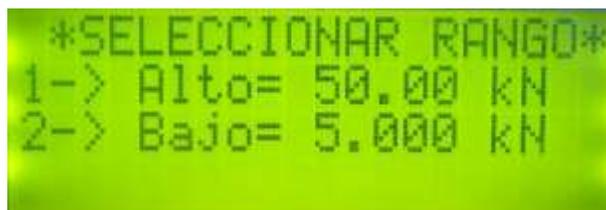
Volviendo al menú principal se encontrará la última opción, llamada “máquina”. Acá se visualiza el rango máximo de medición de carga preestablecida y los posibles de selección (ver Figura 56 y Figura 57).



```
CARGA LIMITE
Limite = 5.000 kN
Actual = 5.000 kN
Nueva =
```

Figura 56. Carga límite

Fuente: Autor, 2018.



```
*SELECCIONAR RANGO*
1-> Alto= 50.00 kN
2-> Bajo= 5.000 kN
```

Figura 57. Selección de rango de carga

Fuente: Autor, 2018.

Advertencia: esta opción por precaución y para evitar cualquier inconveniente con la máquina es recomendable no ingresar sin la supervisión del laboratorista, ya que puede alterar su funcionamiento y los resultados de la muestra ensayada.

Por último y muy importante si se desea volver a algunos de los menús anteriores cuando se visualice o modifique alguna de las características del ensayo triaxial solo basta con presionar la tecla FIN, esta llevará al menú inmediatamente anterior el cual se estaba visualizando.

5.1.1.2.3 Celda Triaxial

5.1.1.2.3.1 Especificaciones técnicas de la celda Triaxial

- Tamaño máximo de la muestra: 70 mm de diámetro-140 mm de altura (2,8" x 5,6")
- Presión máxima de trabajo: 1700 kPa
- Carga máxima sobre el pistón: 45 kN
- Altura libre necesaria: 430 mm
- Peso aproximado: 7,3 kg

5.1.1.2.3.2 Composición de la Cámara Triaxial

Celda acrílica para ensayos triaxiales: es un cilindro elaborado con material acrílico que trabaja como interface aire/agua. La celda tiene fijada la placa base del pistón mediante pernos, tal como se aprecia en la Figura 58.



Figura 58. Celda acrílica

Fuente: Autor, 2018.

Piedras porosas: permite el flujo del agua hacia afuera o dentro del espécimen (ver Figura 59).



Figura 59. Piedras porosas

Fuente: Autor, 2018.

Membrana de látex: protección para la muestra de suelo al momento del llenado de la cámara con agua (ver Figura 60). Con esta membrana evitamos el desprendimiento de partículas de suelo en el agua y a su vez, le da confinamiento a la muestra para poder aplicarle las presiones deseadas.



Figura 60. Membrana de látex

Fuente: Autor, 2018.

Tubos de drenaje: Por estos tubos de material plástico, se lleva el flujo de agua tanto a la muestra como a la cámara triaxial (ver Figura 61 y Figura 62).



Figura 61. Presión y drenaje de cabezal

Fuente: Autor, 2018.

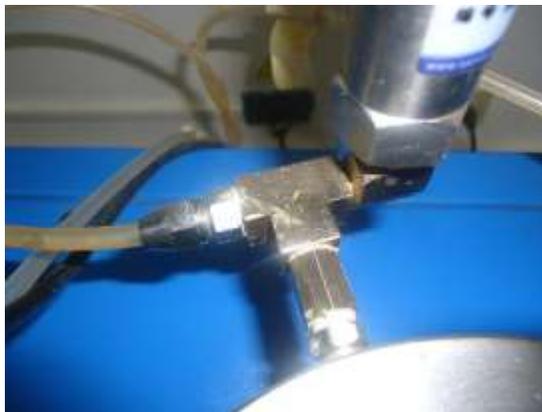


Figura 62. Presión y drenaje de poros

Fuente: Autor, 2018.

Válvulas: estas permiten el flujo de agua o en efecto, quitarlo para las diferentes condiciones que se requiera para el ensayo triaxial (ver Figura 63).



Figura 63. Válvulas de llenado y drenaje de cámara

Fuente: Autor, 2018.

Pedestal: Como se aprecia en la Figura 64, es lugar donde se apoyará la muestra de suelo para su respectiva aplicación de carga. Este a su vez, contiene todas las conexiones para las presiones que se le aplicarán a la muestra.

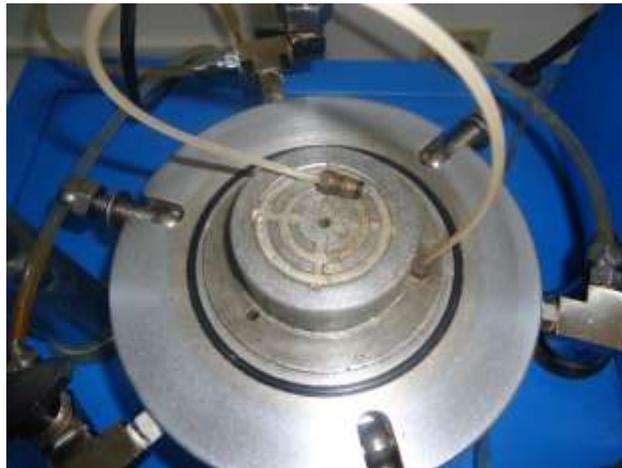


Figura 64. Pedestal

Fuente: Autor, 2018.

Cabezal: Consiste en un cilindro acrílico que ayudará a aplicarle a la muestra una fuerza en la cara superior de la misma, de manera que sea repartida la fuerza equilibradamente en su cara mencionada. Este contiene un orificio para permitir el flujo de agua y una ranura para la ubicación del pistón de carga de la cámara triaxial (ver Figura 65).



Figura 65. Cabezal

Fuente: Autor, 2018.

Pistón de carga: Le proporciona al espécimen compresión (fuerza axial) para llegar al estado de falla de la muestra (ver Figura 66).



Figura 66. Pistón de carga

Fuente: Autor, 2018.

Anillos de sellado (O-Ring) de caucho: como se aprecia en la Figura 67, son sellos que impiden la entrada o salida del agua de la muestra.



Figura 67. Anillos de sellado

Fuente: Autor, 2018.

Filtros circulares: Son papeles de filtro que impiden el paso de partículas de suelo a las piedras porosas, estos a su vez, solo permiten el paso del agua (ver Figura 68).

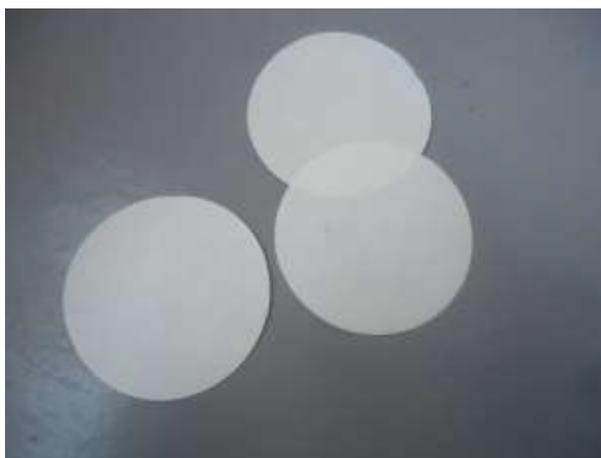


Figura 68. Filtros circulares

Fuente: Autor, 2018.

Filtros de drenaje: Son papeles de filtro laterales para el espécimen, estos cumple la función de dar un flujo de agua constante a la muestra para saturarla (ver Figura 69).



Figura 69. Filtros de drenaje

Fuente: Autor, 2018.

Pernos: Dan el ajuste entre la celda acrílica y el pedestal de la cámara necesario para evitar las fugas de agua al momento del llenado de la misma y la aplicación de cargas (ver Figura 70 y Figura 71).



Figura 70. Perno

Fuente: Autor, 2018.



Figura 71. Perno ubicado en el pedestal

Fuente: Autor, 2018.

Además de los anteriores componentes la celda triaxial, ésta posee accesorios muy indispensables para el montaje de las muestras:

Herramienta para la colocación de membranas: Esta herramienta nos permite expandir la membrana de látex para posterior colocación en el espécimen y evitar que este sufra deformaciones indeseadas y presiones que puedan alterar su estructura (ver Figura 72).



Figura 72. Herramienta para colocación de membrana

Fuente: Autor, 2018.

Herramienta para la colocación de anillos de sellado (Junta tórica o o-ring): como se aprecia en la Figura 73, esta herramienta permite expandir los anillos de sellado (ver Figura 67) para brindar un hermetismo a la muestra de suelo y evitar filtraciones de agua.



Figura 73. Herramienta para colocación de anillos de sellado

Fuente: Autor, 2018.

Llave doble punta: Permite enroscar o desenroscar los pernos para ajuste de la celda triaxial (ver Figura 74).



Figura 74. Llave doble punta

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.3.3 Operación de la celda Triaxial

Las celdas Triaxiales son fabricadas con precisión y con materiales muy resistentes a esfuerzos, ya que esta recibe todas las presiones y se encarga de transferírselas a las muestras de suelo a ensayar.

En el montaje final hay que tener mucho cuidado con la celda porque ésta incluye la instalación de un sello de anillo "O" y el uso de un lubricante especial para reducir la fricción al mínimo y prevenir las fugas de agua. Por otro lado, la capacidad de carga del pistón está diseñada para aceptar altas fuerzas horizontales, presentes durante las etapas finales del ensayo.

La base celda triaxial tiene tres conexiones perforadas en la base de la misma como se aprecia en la Figura 75, las cuales son: presión y drenaje de poros, cabezal y de cámara:

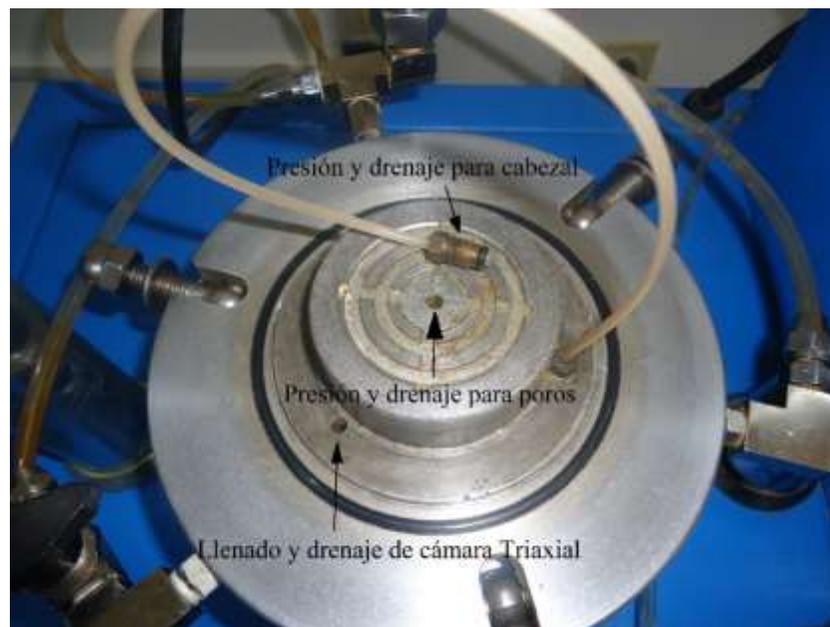


Figura 75. Base de celda triaxial

Fuente: Autor, 2018.

Nota importante: los componentes no deben mezclarse con equipos similares, de lo contrario esto produciría efectos negativos en el funcionamiento de la máquina y en el resultado de las muestras ensayadas.

Si fuera necesario reemplazar partes, se deberá informar inmediatamente al laboratorista o a la persona encargada del manejo de la máquina triaxial, ya que tiene la responsabilidad de tomar las medidas correspondientes para la buena ejecución del ensayo.

Advertencia: La celda no debe llenarse de aire u otros gases, sólo con el agua como medio de presión.

5.1.1.2.3.4 *Configuración de la celda Triaxial para un ensayo*

Desenrosque las tuercas de los pernos con la llave hexagonal suministrada, lo suficiente para permitir que giren y se libere la parte superior de la celda. Levante la pared de la celda acompañada del pistón de carga y colóquelos sobre una superficie limpia.

Luego inspeccione los agujeros para la presión de poros y de cámara en la base de la celda, verificando que no se encuentren obstruidos y estén completamente limpios. Así mismo, si el anillo de sellado ubicado en el pedestal está en buen estado, colocarle una ligera capa de grasa o vaselina y vuelva a colocarlo en la base. Si el anillo está desgastado o dañado debe ser sustituido.

Por otro lado, asegurarse de que el pistón de la celda este uniformemente cubierto con grasa o vaselina, luego se debe aplicar la fuerza suficiente para moverla hasta arriba y abajo. Si nota alguna interrupción en el movimiento, lubríquelo lo suficiente para lograr un buen desempeño del pistón.

Nota: El ajuste entre la pared de la celda con la base y la tapa está diseñada para proporcionar el sellamiento necesario y así mismo la alineación del pistón, por lo que no debería

ser necesario usar fuerza alta para apretar las tuercas. La falta de sellamiento bajo condiciones normales indica la presencia de material extraño o daño en el anillo de sello.

5.1.1.2.4 Unidad Triaxial automática

La unidad Triaxial automática que se aprecia en la Figura 77, está compuesta por los siguientes sistemas (sistemas enumerados con referencia en dicha figura):

- Sistema de medición digital de presión de cámara (1)
- Sistema de medición digital de presión de cabezal (contrapresión) (2)
- Sistema de medición digital de presión de poros (3)
- Sistema de ajuste y control automático de la presión de cámara (4)
- Sistema de ajuste y control automático de la presión de cabezal (5)
- Sistema análogo para medición de cambio de volumen (6)
- Depósito de agua des-aireada (7)
- Válvulas hidráulicas direccionales (8)
- Perillas de control de presión para cámara y cabezal (9)
- Sistema de medición análoga para cámara (10)
- Sistema de medición análoga para cabezal y poros (11)

5.1.1.2.4.1 Encendido de la unidad Triaxial

Encienda la unidad pulsando el interruptor principal ubicado en la parte superior izquierda del tablero de indicación como se muestra en la Figura 76.



Figura 76. Interruptor de encendido y apagado Unidad Triaxial

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.4.2 Configuración de la Unidad Triaxial

Como se puede apreciar en la Figura 77, se muestra la unidad triaxial automática.



Figura 77. Unidad triaxial automática

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.4.2.1 Tablero de indicación

Mediante este tablero se configuran todas las presiones que actuarán en el espécimen y a su vez, indica el valor de las mismas actuales en cualquier tipo de ensayo triaxial (ver Figura 78).



Figura 78. Tablero de indicación de la Unidad triaxial automática

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.4.2.2 Funciones del teclado

- 1: Entrada de un valor numérico
- 2: Entrada de un valor numérico
- 3: Entrada de un valor numérico
- 4: Entrada de un valor numérico y sube la presión en cámara
- 5: Entrada de un valor numérico
- 6: Entrada de un valor numérico y sube la presión de cabezal
- 7: Entrada de un valor numérico y baja la presión en cámara
- 8: Entrada de un valor numérico
- 9: Entrada de un valor numérico y baja la presión de cabezal
- 0: Entrada de un valor numérico

- . : Entrada de un valor numérico
- Menú/Borrar: Inicia funciones de programación
- Fin: Regresa al menú anterior y durante el ensayo esta tecla lo detiene
- ↵: Enter
- ON/OFF Control Cámara: Activa/Desactiva control automático de la presión de cámara
- ON/OFF control Cabezal: Activa/Desactiva control automático de la presión de cabezal

5.1.1.2.4.2.3 Operación del tablero de control de la unidad triaxial

Al encender la unidad triaxial se activa la pantalla de inicio en la que se muestra el estado de configuración actual del equipo que mantiene en memoria: los valores de la presión de cámara y presión de cabezal y su control automático programados. También muestra los valores de las presiones de cabezal, poros y cámara que se encuentran en ese momento en la celda triaxial como se puede ver en la Figura 79.



Figura 79. Tablero de indicación de la Unidad Triaxial Automática encendido

Fuente: Autor, 2018.

Toda operación de la unidad triaxial se realiza desde el tablero de control pulsando las teclas necesarias. Algunas teclas, tiene funciones diferentes si se encuentra en operaciones de programación o en operaciones durante los ensayos.

5.1.1.2.4.2.3.1 Menú principal

Las funciones de programación se inician pulsando la tecla Menú/Borrar, el cual muestra el “MENU” principal (ver Figura 80).



Figura 80. Menú principal Unidad triaxial automática

Fuente: Autor, 2018.

- **Ajustes:** Funciones para calibración, posicionamiento de pistones y selección de rangos de medición.
- **Presión de Cámara (Referencia):** Se establece el valor de la presión de cámara que se mantendrá durante el ensayo.
- **Presión de Cabezal (Referencia):** Se establece el valor de la presión de cabezal (Back pressure) que se mantendrá durante el ensayo.

Nota: para ingresar a cada una de las funciones anteriores se deben oprimir la tecla correspondiente al número de dicha función.

5.1.1.2.4.2.3.2 Menú de ajustes

En este menú, se establecen los rangos de medición y los ajustes de escala para las presiones que se desean manejar (ver Figura 81).



Figura 81. Menú de ajustes Unidad Triaxial Automática

Fuente: Autor, 2018.

Los rangos de medición permiten seleccionar el rango de medición para cada uno de los sensores de la unidad. (Solo es necesario si se remplazan los transductores originales). Pulsando la tecla 1 se puede ingresar al submenú rangos de medición (ver Figura 82) y observar los rangos límites para cada una de las presiones con las que cuenta la cámara triaxial:

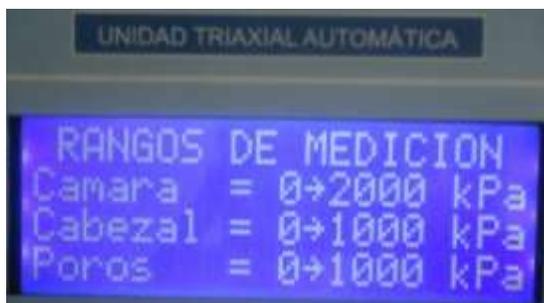


Figura 82. Rangos de medición Unidad Triaxial Automática

Fuente: Autor, 2018.

El submenú 2, ajuste de escala, nos dará la opción de cambiar la escala de medición de los sensores de cámara, cabezal y poros (ver Figura 83). Para ingresar a este submenú presione la tecla número 2 estando en el menú de ajustes:



Figura 83. Submenú de ajustes de escala de la unidad triaxial automática

Fuente: Autor, 2018

Advertencia: No intente ingresar al menú de ajustar las escalas de los diferentes sensores que posee el equipo triaxial. Esto estará a cargo del personal autorizado. Si intenta ingresar, la configuración le pedirá un pin, ya que usted no se encuentra autorizado en la manipulación de este tipo de ajustes no intente ingresar ningún número, la máquina podría bloquearse.

5.1.1.2.4.2.3.3 Menú presión de cámara y cabezal

En este submenú, configuramos las presiones tanto de cámara como de cabezal del control automático si se activan desde el menú principal. Acá se configura las presiones que se desean durante el ensayo triaxial, el cual la maquina podrá estabilizar dichas presiones automáticamente por si estas se suben o bajan. El control automático maneja un error de $\pm 0,9$ en la presión preestablecida.

Para ingresar las presiones deseadas ingrese a la configuración de presión de cámara tecleando en número 2 en el menú principal o a la presión de cabezal tecleando 3 del mismo menú.

Al momento de ingresar, le aparecerá una ventada especificándole la presión en kPa actual configurada y le da la opción de ingresar una nueva, como se aprecia en la Figura 84.



Figura 84. Submenú de cambio de presiones de la unidad triaxial automática

Fuente: Autor, 2018.

Si desea cambiar la presión que está establecida, solo opima el número (magnitud) en el teclado numérico el cual se desea preestablecer, seguido de la tecla Enter (↵). Luego de que realice este procedimiento, puede salir del menú pulsando la tecla FIN.

Note que una vez que cambio las presiones, estas aparecerán en pantalla, indicándole que están establecidas para el control automático si se activa.

5.1.1.2.4.3 *Válvulas de Control*

Mediante las válvulas hidráulicas direccionales, se realizan las conexiones necesarias para los ensayos en cada una de sus etapas; habilitando o deshabilitando entradas y/o salidas de presión necesarias a cada una de las partes de la celda Triaxial.

En el tablero, siguiendo el diagrama, ubicando las válvulas en la dirección deseada (hacia donde apunta la flecha) se establece el circuito hidráulico requerido.

5.1.1.2.4.3.1 Válvulas de distribución hidráulica

Mediante estas válvulas, que se aprecia en la Figura 85, se distribuyen las presiones para cámara, poros y cabezal. Utilizando las posiciones con dirección en las líneas indicadoras de flujo en el tablero, sabremos el recorrido del fluido (agua) desde donde se desea, hacia donde se quiere un flujo continuo.



Figura 85. Válvulas de distribución hidráulica

Fuente: Autor, 2018.

Note que en tablero se encuentran dos pares de bombillos LED (ver Figura 86), el cual le indicarán que esta encendido en control automático de presiones para cabezal y cámara. Si está iluminado el de color verde, como se aprecia en la Figura 87 (bombillo LED superior de ambos pares), indica que la presión superó el rango de error por debajo de la preestablecida y la maquina está subiendo la presión. Si de lo contrario está iluminado el de color rojo (ver Figura

88) (bombillo LED inferior de ambos pares), es que la presión está por encima del rango de error permitido y la maquina está bajando las presiones.



Figura 86. Bombillos LED del control automático de presiones

Fuente: Autor, 2018.



Figura 87. Bombillo LED verde

Fuente: Autor, 2018.



Figura 88. Bombillo LED rojo

Fuente: Autor, 2018.

Advertencia: nunca deben estar cerradas las válvulas que llevan el fluido del depósito de agua siguiendo el flujo indicado, con las válvulas inmediatamente siguientes, es decir, el par de válvulas de la izquierda y las de la derecha que son las que suministran el fluido desde el tanque del agua hacia la distribución de presión, no pueden estar ambos pares en posición vertical.

Siempre una de ellas, de los diferentes pares debe, al menos una, estar en posición horizontal. Si esto sucede podría ocasionar daños en la máquina, así no se esté realizando ningún ensayo. En la Figura 89 se aprecia la condición anterior.



Figura 89. Válvulas en posición incorrecta

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.4.3.2 Válvulas de control hidráulico

Las válvulas de control hidráulico (ver Figura 90), son las que permiten controlar las presiones que se le suministran a la muestra de forma vertical y, así mismo, el drenaje de las muestras para las diferentes condiciones en los diferentes tipos de ensayos triaxiales. La presión que se le induce por medio del cabezal, es llamada Presión de cabezal. La presión que se ejerce por medio del pedestal a la muestra es llamada presión de poros; esta válvula a su vez, nos mide la presión intersticial o de poros durante el ensayo.

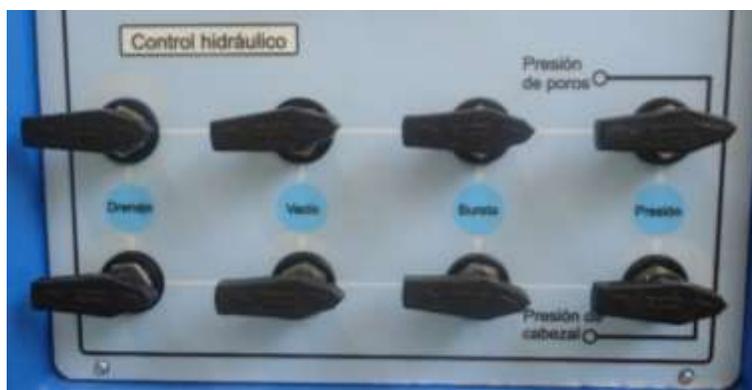


Figura 90. Válvulas de control hidráulico

Fuente: Autor, 2018.

Las dos presiones (presión de poros y presión de cabezal), constan de 4 (cuatro) válvulas que nos permiten simular las condiciones en campo como se apreció en la Figura 90. La primera válvula (de izquierda a derecha) es de drenaje: nos permite drenar la muestra para evitar acumulación de presiones durante un ensayo y, así mismo, evacuar toda el agua que se encuentre en todo el tubo, el cual se encuentra conectado desde la cámara hasta unidad triaxial automática y luego hacia el exterior.

La segunda válvula es de vacíos: por medio de esta válvula y con la bomba de vacíos podemos succionar o en efecto aplicar un vacío a la muestra para eliminar aire en sus poros.

La tercera válvula es la de Bureta: esta se encuentra conectada a una de las dos buretas ubicadas en la unidad triaxial automática. Su función es medir, si se desea, las presiones en las que se encuentra la muestra tanto por cabezal como por presión de poros.

Nota: Esta válvula es de uso opcional, ya que la unidad triaxial automática nos mide en tiempo real las presiones a las que está sometida la muestra de suelo.

La cuarta y última válvula es la de Presión: su función es esencial, ya que nos permite aplicarle las presiones deseadas a la muestra, tanto en presión de cabezal como de poros. Esta permite el paso de la presión que se controla en la unidad triaxial automática.

5.1.1.2.4.3.3 Válvulas de control de cambio volumétrico

Mediante estas válvulas, como se aprecia en la Figura 91, se registran los cambios de volumen que presenta la muestra durante un ensayo en la etapa de consolidación y falla.



Figura 91. Válvulas de control de cambio volumétrico

Fuente: Autor, 2018.

Para medir el cambio de volumen, se tiene que pasar la válvula de Bypass de la posición horizontal a la vertical. A su vez, debemos también cambiar las válvulas de la entrada de control y la salida de presión. Estas dos válvulas juegan en sentido contrario, es decir, si se desea que la presión de control pase a la función arriba como lo indica la Figura 92, la válvula de salida de presión debe salir por abajo. Esta posición también se puede realizar de forma inversa: entrada de control de presión por abajo, la salida de presión por arriba (ver Figura 93).

Como se describen las posiciones de las válvulas del control de cambio volumétrico anteriormente, crea un paso del fluido con cierta presión hacia el modo Bypass (medidor de cambio volumétrico) pasando la presión por un orden especificado y saliendo hacia la unidad triaxial automática.

Nota: Si las válvulas se encuentran en la posición indicada en la Figura 91, no hay medida de cambio de volumen.



Figura 92. Válvulas en correcta posición para medición de cambio de volumen. Posición 1: entrada de presión por arriba y salida de presión por abajo.

Fuente: Autor, 2018.



Figura 93. Válvulas en correcta posición para medición de cambio de volumen. Posición 2: entrada de presión por abajo y salida de presión por arriba

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.4.3.4 Válvula de control de vacíos

Esta válvula cumple una función específica y es dar paso al vacío (succión de aire) que aplica la bomba de vacíos (ver Figura 94).



Figura 94. Válvula de control de vacío

Fuente: Autor, 2018.

Posee tres posiciones de flujo:

- Hacia arriba, sentido vertical: la válvula se encuentra cerrada. Acá no hay paso del vacío. Sin función alguna.
- Hacia la derecha, sentido horizontal: como en el esquema lo indica, es la función para colocar la membrana de látex que recubrirá la muestra de suelo.
- Hacia abajo, sentido vertical: conecta la bomba de vacíos con el control hidráulico.

5.1.1.2.4.4 *Perillas de control de presión para cámara y cabezal*

Como se puede ver en la Figura 95, estas perillas aplican presiones de forma manual a la cámara, cabezal y poros.



Figura 95. Perillas de control de presión para cámara, cabezal y poros.

Fuente: Autor, 2018.

Para aplicar cualquier presión deseada, primero se debe cargar el sistema hidráulico interno. Inicialmente se debe pasar las válvulas para el paso de presión de la muestra en modo

cerrado o transversal al flujo del sistema, y las válvulas de que suministran el fluido al sistema, como es el paso del tanque de agua hacia la bomba hidráulica deben estar abiertas (ver Figura 96).



Figura 96. Válvulas en posición para cargar bomba hidráulica

Fuente: Autor, 2018.

Como se aprecia en la unidad triaxial automática, cuenta con dos perillas de control de presión manual. La izquierda, suministra solamente la presión a la cámara. La derecha, presión a cabezal y poros.

Luego de colocar las válvulas correctas en la posición indicada de la Figura 96, se procede a retirar el tornillo de seguridad que asegura el eje de la perilla para evitar movimientos giratorios durante un ensayo (ver Figura 97).



Figura 97. Tornillo de seguridad de bomba hidráulica

Fuente: Autor, 2018.

Luego, se gira la perilla en sentido anti horario para cargar la bomba de presión hidráulica con agua. La cantidad de giros deben ser suficientes como para que el eje de la perilla sobresalga entre 12 a 15 cm por fuera de la unidad triaxial automática.

Una vez realizado este proceso, vuelva a colocar el tornillo de seguridad en su posición y verifique que la perilla tenga el movimiento giratorio restringido. Si es así, el tornillo está correctamente puesto.

Repita el proceso anterior para la perilla de aplicación de presión de cabezal y poros.

5.1.1.2.4.4.1 Interruptores de emergencia para las perillas de presión

Debajo de las perillas de aplicar presión tanto a cámara como a cabezal y poros se encuentran unos interruptores de emergencia (ver Figura 98) que desactiva el control automático de presiones.



Figura 98. Interruptor de emergencia para las perillas de presión

Fuente: Autor, 2018.

Estos interruptores se activan cuando las perillas llegan a su tope final de presión durante un ensayo, ya que no posee más presión dentro de sus compartimientos y, por tanto, se hace imposible seguir con su función: aplicación de presión de confinamiento y contrapresión a la muestra de suelo.

A pesar de que las estas perillas poseen un tornillo de seguridad para evitar movimientos durante un ensayo, estas se mueven durante el mismo para poder manejar las presión deseadas durante un ensayo, pero su movimiento es hacia el interior o exterior de la máquina, ya que el movimiento giratorio es el que se encuentra restringido.

Al activarse uno de los interruptores de emergencia, la maquina tiene incorporados unos parlantes que advertirán de su activación y, además, en la pantalla de la unidad triaxial automática se mostrará un aviso de error.

Nota importante: para evitar la parada de emergencia de los controles automáticos debido a los interruptores de las perillas, es indispensable cargarlas muy bien con el agua desairada que esta comunicada con el tanque de agua, como se explicó anteriormente. En caso de que se active

el aviso emergencia en la máquina, el ensayo en curso se terminará y se tendrá que empezar con un nuevo ensayo.

5.1.1.2.4.5 *Rangos de presión para cámara, cabezal y poros*

Los rangos máximos de presión que se pueden emplear en la maquina triaxial son los siguientes:

- Rango de presión de confinamiento de hasta 1700 kPa (presión en cámara)
- Rango de contrapresión de hasta 1000 kPa (presión de cabezal)
- Rango de presión de poros de hasta 1000 kPa y el sistema de medición con una resolución de 0,1 kPa

5.1.1.2.4.6 *Bomba de vacíos*

La bomba de vacío (ver Figura 99) es un equipo diseñado para extraer gases del interior de recipientes, redes de tuberías o en cualquier proceso donde se requiera reducir la presión interior de un sistema, a valores inferiores a la atmosférica. El funcionamiento es similar al de su compresor homólogo, pero con la diferencia de que está pensada para aspirar y no para comprimir el aire o gas que aspira.



Figura 99. Bomba de vacíos

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.4.6.1 Componentes de la bomba de vacío

Como se aprecia en la Figura 100, se muestran los componentes de la bomba de vacíos:

- Manila de transporte (1)
- Gas-ballast (2)
- Carga de aceite y expulsión (3)
- Visor de nivel de aceite (4)
- Tapón de drenaje de aceite (5)
- Cáster (6)
- Base con regatones antideslizantes (7)
- Brida acople de motor (8)
- Motor eléctrico con protector térmico incorporado (9)
- Filtro (10)

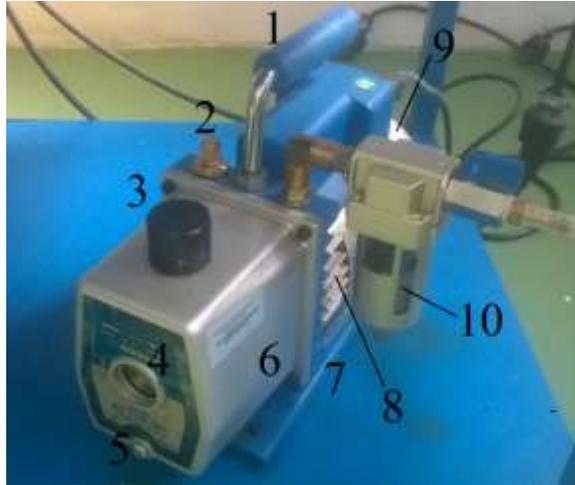


Figura 100. Componentes de la bomba de vacíos

Fuente: Autor, 2018

Gas-ballast: permite introducir en la bomba una pequeña cantidad de aire atmosférico, previniendo la condensación de la humedad y ayudando a prolongar la vida útil del aceite. A su vez, el empleo del gas-ballast mejora la eficiencia operativa de la bomba.

Precauciones: Antes de conectar la bomba al sistema elimine el gas remanente que se encuentra presurizando el mismo. Nunca comience la evacuación de un sistema que se halle bajo presión, podrían producirse daños en la bomba por mala lubricación.

5.1.1.2.4.6.2 *Uso del Gas-ballast*

Al realizar vacío a un sistema, el vapor de agua extraído tiende a condensarse en la bomba mezclándose con el aceite. Esto hace que el rendimiento de la unidad baje, no logrando alcanzar el máximo vacío final para el cual ha sido diseñada.

La finalidad del Gas-ballast es permitir el ingreso de una pequeña cantidad de aire en la cámara de escape con el fin de evitar la condensación ya mencionada y la consiguiente contaminación.

Para la utilización del Gas-ballast y aproximadamente a la mitad del proceso, proceda de la siguiente forma: desenrosque éste con una vuelta permitiendo el ingreso de aire durante 1 minuto, luego enrosque nuevamente, dejando que la bomba alcance el vacío final.

5.1.1.2.4.6.3 Encendido de la bomba

Para su encendido dependiendo de cualquier uso de las especificadas para el ensayo Triaxial, se realiza mediante un interruptor ubicado en el tablero de control de la unidad Triaxial automática.

El interruptor está debajo del interruptor de encendido general de la unidad triaxial; se encuentra especificado con el nombre de “VACÍO”, como se observa en la Figura 101.



Figura 101. Interruptor de bomba de vacíos

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.4.6.4 Apagado de la bomba

1. Cierre la válvula del manifold entre la bomba y el sistema.
2. Lleve el interruptor a la posición apagado (O).
3. Desconecte la manguera inmediatamente para romper el vacío.
4. Tape la conexión de entrada para prevenir el ingreso de partículas en la bomba.
5. Verifique el nivel de aceite. Complete hasta la marca o drene el excedente, si es necesario.

5.1.1.2.4.6.5 Mantenimiento

Es aconsejable cambiar el aceite de la bomba después de haber finalizado la evacuación de un sistema. No obstante, se recomienda cambiar el aceite como máximo después de 10 (diez) servicios.

El aceite utilizado en una bomba de vacío es de fundamental importancia para la máxima calidad de vacío alcanzable.

Recurra siempre a aceites especialmente indicados para esta aplicación (baja presión de vapor), viscosidad grado ISO 46 del tipo hidráulico.

El tipo de aceite provisto con la bomba está especialmente formulando para trabajar a alto vacío, manteniendo prestaciones de excelente viscosidad tanto a altas como a bajas temperaturas, lo que facilita el arranque en época invernal.

5.1.1.2.4.6.6 Procedimiento para el cambio de aceite

1. Asegúrese de que la bomba esté caliente (luego de haber funcionado por un período).
2. Quite el tapón de drenaje y drene el aceite usado en un recipiente apropiado.

3. Incline siempre la bomba y también hágala funcionar un instante, para asegurarse de que se drene todo el contenido de aceite contaminado o en mal estado.

4. Coloque el tapón de drenaje y quite el tapón de carga / expulsión.

5. Llene con ayuda de un embudo el cárter de aceite hasta que la misma alcance la mitad del visor de nivel de aceite.

6. Ponga en marcha la bomba por espacio de un minuto, luego revise el nivel, si ha bajado complete hasta la mitad del visor.

7. Coloque el tapón de carga / expulsión nuevamente en su posición y asegúrese de que el tapón de drenaje esté correctamente ajustado.

Nota: Si al drenar el aceite éste sale muy contaminado (lodos por mezcla de agua y aceite) será conveniente quitar el cárter de aceite para limpiarlo.

5.1.1.2.4.6.7 Solución de Problemas

En la Tabla 2. se puede apreciar todos los problemas que se pueden presentar en el funcionamiento correcto de la bomba de vacíos

Tabla 2. *Tabla de problemas de la bomba, sus posibles causas y sus soluciones*

Problema	Causa probable	Solución
	Aceite contaminado, inapropiado o bajo nivel	Reemplace o complete
	Perdidas en conexiones	Revise conexiones, ajuste
Ruido Inusual	Tornillos del motor flojos	Ajuste los tornillos
	Cojinetes del motor gastados	Reemplace
	Bajo voltaje	Chequee tensión
Temperatura elevada	Bajo nivel de aceite	Complete
	Aceite hidratado	Reemplace aceite
	Cojinetes gastados	Reemplace
	Perdidas en el sistema	Chequee/solucione
Baja calidad de vacío final	Entrada de aire por las conexiones	Verifique/solucione
	Bajo nivel de aceite	Complete
	Aceite contaminado	Reemplace
	Entrada de aire por el retén	Reemplace

Perdidas de aceite	Salida de aceite por la expulsión	Nivel de aceite elevado
	Bomba volcada	Enderece, complete nivel
	Perdidas por las juntas del cárter	Ajuste los tornillos
La bomba no arranca	Falta suministro eléctrico	Revise conexiones
	Fuera de servicio por térmico	Enfriar motor
	Motor dañado	Reemplace
Salida por térmico	Bajo voltaje/incorrecto	Chequee voltaje
	Clima muy frío	Abra el gas-ballast y encienda por un minuto
	Aceite sucio	Reemplace

Nota. La tabla muestra todos los posibles problemas que se puedan presentar al poner en marcha su funcionamiento. También se encuentra acompañado los problemas, sus causas y soluciones para cada uno de ellos.

5.1.1.2.5 *Unidad de cambio de volumen automático*

El sistema de medición de cambio de volumen es un sistema llamado Bypass, que cuenta con un transductor de desplazamiento para medición lineal (ver Figura 102).



Figura 102. Unidad de cambio de volumen automático

Fuente: Autor, 2018.

La unidad de cambio de volumen automático está diseñada para transformar en cambio de volumen, cualquier cambio de presión, por medio del desplazamiento del transductor. La máxima medición del cambio de volumen es de 150 cm^3 con resolución de $0,01 \text{ cm}^3$.

Además, El transductor se encuentra conectado a un multiplexor que recibe los cambios de desplazamiento, por medio de un cable protegido con PVC con conector M12.

El multiplexor mostrado en la Figura 103, se encuentra conectado con el equipo de cómputo que registra los cambios de volúmenes en cm^3 . Este posee un interruptor de encendido en la parte derecha, junto a las conexiones para los conectores M12.



Figura 103. Multiplexor

Fuente: Autor, 2018.

A continuación, se describirán todos los procedimientos fundamentales para la ejecución de los diferentes ensayos triaxiales.

5.1.1.2.6 Encendido del equipo triaxial

Para encender el equipo triaxial se hace mediante los interruptores de cada uno de sus componentes principales:

- Interruptor de encendido del computador (CPU)
- Interruptor de la máquina de ensayo triaxial
- Interruptor de la unidad triaxial automática
- Interruptor del multiplexor

5.1.1.2.7 Eliminación de burbujas de aire en tanque de agua

Este procedimiento se debe realizar antes de cualquier tipo de ensayo triaxial. El procedimiento consiste en extraerle al agua todas las burbujas de aire que se encuentra en el tanque de almacenamiento de la unidad triaxial automática, mediante la bomba de vacíos. El agua desairada se utilizará tanto en la celda triaxial, como en los conductos para la aplicación de presiones a la muestra.

Primeramente, se debe llenar el tanque con agua (ver Figura 104) a una altura de $\frac{3}{4}$ de su capacidad total.



Figura 104. Tanque de almacenamiento de agua

Fuente: Autor, 2018.

Nota: Verifique que el tanque una vez lleno de agua hasta la medida indicada quede muy bien tapado. Si queda su tapa en una posición incorrecta, no se podrá realizar el procedimiento de desairar, porque el vacío a aplicar no se obtendrá en óptimas condiciones. Además este posee una válvula que restringe o permite el paso de aire, lo cual debe estar cerrada.

Las válvulas del tanque de agua el cual permiten el flujo de aire, se deben encontrar en las siguientes posiciones: la válvula que conecta la bomba de vacíos con el tanque (ver Figura 105) debe estar abierta (posición vertical); la válvula para permitir el paso de presión atmosférica (ver Figura 106) debe encontrarse cerrada (posición horizontal).



Figura 105. Válvula del tanque de agua para aplicación de vacío

Fuente: Autor, 2018.



Figura 106. Válvula para el paso de aire del tanque de agua

Fuente: Autor, 2018.

Luego, se verifica la válvula del control de vacíos, el cual se debe encontrar en la posición de control automático, como se aprecia en la Figura 107.



Figura 107. Válvula de vacíos en posición para tanque de almacenamiento de agua
Fuente: Autor, 2018.

Una vez lleno el tanque en la medida especificada y la válvula de vacíos colocada en la posición correspondiente, se debe cerrar las válvulas que conducen del tanque al sistema de conductos de la unidad triaxial automática, indicado en la Figura 108.



Figura 108. Válvulas de tanque de almacenamiento cerradas
Fuente: Autor, 2018.

Por último, se activa la bomba de vacíos mediante su interruptor, ubicado por su nombre (vacío) en el tablero de indicaciones de la unidad triaxial automática. Al encender la bomba de vacíos, se debe registrar una presión negativa en su manómetro (ver Figura 109), el cual se encuentra ubicado en la tapa del mismo:



Figura 109. Manómetro del tanque de agua

Fuente: Autor, 2018.

Nota Importante: Este proceso se debe dejar como mínimo durante 2 horas para garantizar que el agua quede desairada, es decir, sin burbujas de aire en un contenido.

5.1.1.2.8 *Revisión de piedras porosas*

Una recomendación muy importante acerca de las piedras porosas es que estas se deben encontrar en perfecto estado; sin fisuras, malgastadas y/o material de suelo obstruido en su interior.

De acuerdo con lo anterior, antes de empezar cualquier tipo de ensayo triaxial, se deben limpiar y verificar muy bien. Como procedimiento útil para su limpieza, es colocarlas en un recipiente metálico o de aluminio con suficiente agua. Luego, se deben colocar en una estufa y se

dejan por diez minutos a partir que el agua empiece a hervir. Esto se hace con el fin de que las partículas finas retenidas en el interior de sus poros logren ser expulsadas y queden estos medios libres para el flujo del agua.

5.1.1.2.9 *Eliminación del aire en las líneas de agua a presión (conductos)*

Este procedimiento es muy importante realizarlo, debido a que se requiere únicamente aplicar esfuerzos al espécimen con las presiones de agua desairada desde el tanque de almacenamiento.

Para ello se verificará que en los conductos por donde el agua desairada fluirá se deben encontrar sin ningún contenido de aire atrapado. Se deben abrir las válvulas de la distribución hidráulica para permitir el paso del agua desde el tanque hacia los conductos que van a la cámara triaxial.

De paso al agua desairada por medio de la distribución hidráulica hacia los conductos de presión de poros y cabezal. Al momento de abrir estas válvulas el agua desairada saldrán por los orificios diseñados para estas dos presiones. Luego, verifique que el conducto que transporta este flujo, solamente este lleno con agua y que ya se haya eliminado el aire atrapado. Tenga especial cuidado de secar el agua que saldrá del sistema.

5.1.1.2.10 *Montaje de la muestra de suelo en la celda Triaxial*

5.1.1.2.10.1 *Materiales a utilizar*

Los materiales con los que se deben contar antes de iniciar el montaje de la muestra de suelo son:

- Membrana de látex

- Papel de filtro: Circulares y lateral
- Piedras porosas
- Agua desairada
- Lubricante para celda triaxial

5.1.1.2.10.2 *Montaje de muestra*

Teniendo listo los materiales mencionados en el ítem anterior, se procede seguir las siguientes indicaciones:

- a. Humedecimiento de los papeles de filtro: se deben humedecer muy bien tanto los papeles filtros circulares como el lateral.
- b. Piedras porosas en recipientes con agua: se deben tener las piedras porosas sumergidas en agua para eliminar cualquier vacío de aire en sus poros interiores.
- c. Conductos de agua sin aire: tanto los conductos de presión de poros y cabezal deben estar sin ningún contenido de aire. Deben estar absolutamente en su interior con agua desde el tanque de almacenamiento. Siga las recomendaciones realizadas en el ítem “Eliminación del aire en las líneas de agua a presión (conductos)” de este capítulo.

Después de realizado las indicaciones anteriores, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Se debe colocar una piedra porosa húmeda en el pedestal de la celda triaxial (ver Figura 110 y Figura 111).



Figura 110. Posicionamiento de piedra porosa en pedestal

Fuente: Autor, 2018.



Figura 111. Piedra porosa en pedestal

Fuente: Autor, 2018.

2. Luego de posicionado la piedra porosa en el pedestal se procede a la colocación del papel filtro circular húmedo encima de la misma (ver Figura 112).

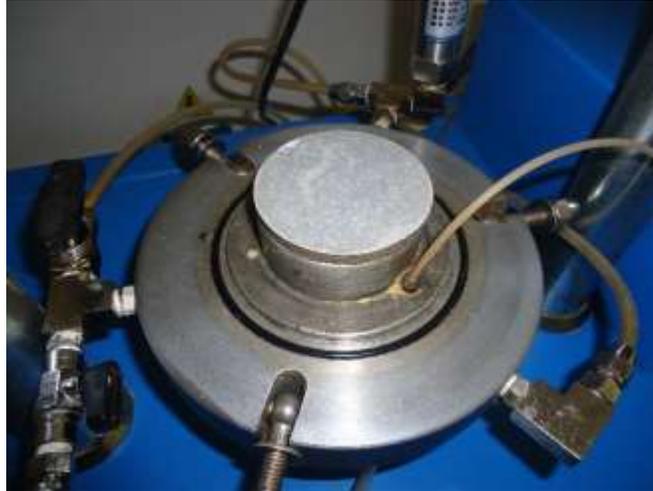


Figura 112. Papel filtro colocado en piedra porosa

Fuente: Autor, 2018.

3. Papel filtro lateral a la muestra de suelo y a su vez el montaje en el pedestal (ver Figura 113).



Figura 113. Muestra de suelo con papel filtro lateral ubicado en pedestal

Fuente: Autor, 2018.

4. Colocación de papel filtro circular superior y luego la piedra porosa (ambos elementos húmedos) (ver Figura 114).



Figura 114. Papel filtro circular y piedra porosa superior

Fuente: Autor, 2018.

5. Después de realizado los procedimientos del 1 al 4, se pasará al montaje de la membrana de látex a la muestra. Para ello, se utiliza el accesorio de colocador de membranas; primeramente se introducirá la membrana en el accesorio y sus sobrantes se doblaran hacia los extremos del accesorio, como se aprecia en la Figura 115.



Figura 115. Membrana de látex colocada en su accesorio

Fuente: Autor, 2018.

Una vez colocado la membrana en la posición indicada anteriormente, se conecta el tubo de aplicador de vacíos al accesorio (ver Figura 116 y Figura 117).



Figura 116. Tubo de aplicación de vacíos a membrana (tubo del extremo derecho)

Fuente: Autor, 2018.



Figura 117. Accesorio colocador de membrana conectado al tubo de aplicación de vacíos
Fuente: Autor, 2018.

Luego, se pasará a aplicarle un vacío a la membrana para eliminar el aire interior acumulado entre la misma y el accesorio. Para ello, se procede a encender la bomba de vacíos con su respectiva válvula colocada en la posición horizontal o como lo indica su tablero: “Colocador de membrana”.

Una vez la membrana se encuentre adherida a la pared lateral de su accesorio se procede a insertarla en la muestra (ver Figura 118).



Figura 118. Colocación de membrana a muestra de suelo
Fuente: Autor, 2018.

Después de cubrir la muestra con la membrana, apagamos la bomba de vacíos y se coloca el cabezal en la parte superior de la muestra (ver Figura 119).



Figura 119. Cabezal colocado en la muestra de suelo

Fuente: Autor, 2018.

Con mucho cuidado se retiran los extremos de la membrana del accesorio (ver Figura 120). Esto se debe hacer de tal manera que los extremos se extiendan en su misma dirección y luego se retira el colocador de membranas.

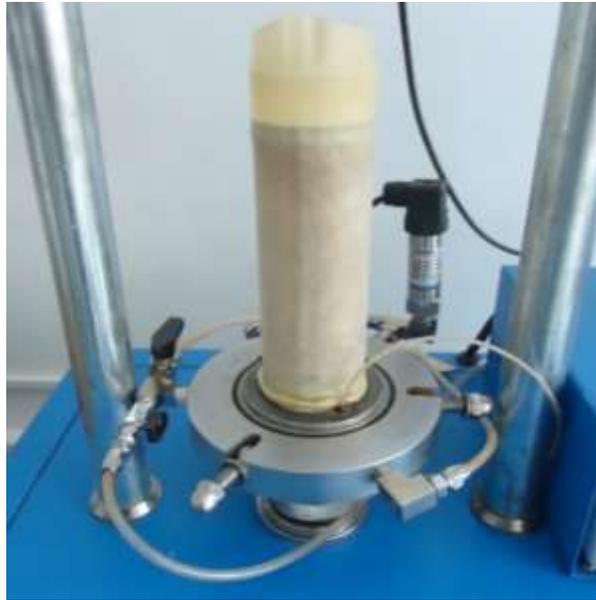


Figura 120. Membrana en la muestra de suelo

Fuente: Autor, 2018.

6. En este procedimiento se utilizara otro accesorio del equipo triaxial, y es el colocador de anillos de sellado; se necesitan dos anillos “O-ring” para la muestra de suelo. Se procede a tensar un anillo y colocarlo en su accesorio, como se muestra en la Figura 121.



Figura 121. Anillo O-ring colocado en su herramienta

Fuente: Autor, 2018.

Luego, se debe colocar uno entre la membrana y el pedestal (base de la muestra de suelo) y el otro entre la membrana y el cabezal (ver Figura 122, Figura 123, Figura 124 y Figura 125).



Figura 122. Colocador de anillo O-ring en parte inferior de la muestra

Fuente: Autor, 2018.



Figura 123. Anillo O-ring inferior en muestra

Fuente: Autor, 2018



Figura 124. Colocador de anillo O-ring en parte superior de la muestra

Fuente: Autor, 2018.



Figura 125. Anillo O-ring superior en muestra

Fuente: Autor, 2018

Una vez colocados los dos anillos en sus posiciones se doblan los extremos sobrantes de la membrana con el fin de proteger los anillos O-ring y se conecta el conducto de presión de cabezal en la parte superior de la muestra enroscándolo (ver Figura 126).



Figura 126. Posición de membrana y conducto de cabezal en correcta posición

Fuente: Autor, 2018.

7. Como paso final para el montaje de la muestra de suelo, es la colocación de la celda triaxial (ver Figura 127). Para ello debemos seguir las recomendaciones realizadas en el ítem **5.1.1.2.3 Celda Triaxial**. Luego de este proceso, se deben asegurar el pistón de carga dentro de la celda a través de la guía, el cual se debe descender hasta que esté en contacto y alineado con el cabezal, el cual permitirá la correcta aplicación de carga axial (ver Figura 128) y, a su vez, ajustar los pernos para evitar cualquier fuga del fluido (agua) que será utilizado para el llenado de la cámara. Después, se debe descender el marco de carga y ajustarlo con el pisto de la celda, con el objetivo de que el transductor de fuerza registre todos los esfuerzos aplicados al espécimen de suelo durante cualquier tipo de ensayo.



Figura 127. Montaje de celda triaxial con espécimen para ensayo

Fuente: Autor, 2018.



Figura 128. Marco de carga alineado con el pisto de carga de la celda triaxial

Fuente: Autor, 2018.

Nota Importante: Al momento de ajustar el marco de carga con el pisto de carga de la celda triaxial, no se debe aplicar mucha fuerza para su ajuste. Esto puede alterar la muestra o aplicarle esfuerzos indeseables.

5.1.1.2.10.3 *Llenado de celda triaxial*

Para el llenado de la celda, debe soltar el tornillo superior de la celda (ver Figura 129) para liberar cualquier presión que se encuentre en la misma a causa de su ajuste con los pernos y dar paso al agua desairada. También se debe cerrar la válvula de drenaje y abrir la válvula de llenado que se encuentran incorporada en la base de la misma (ver Figura 130).

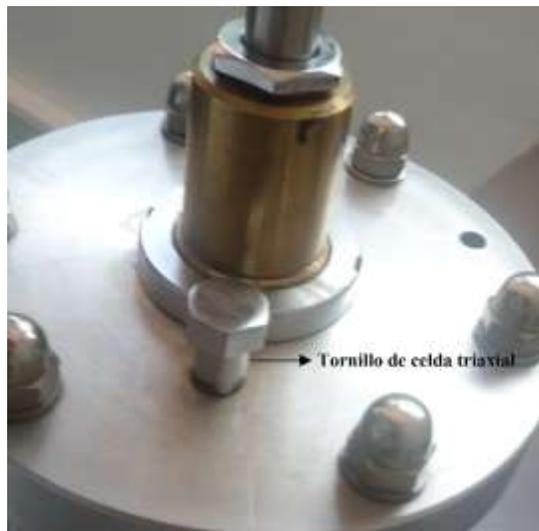


Figura 129. Tornillo de celda triaxial

Fuente: Autor, 2018.



Figura 130. Válvulas de drenaje y llenado de celda triaxial

Fuente: Autor, 2018.

El llenado de la celda se realiza manipulando las válvulas para el flujo del agua desairada desde el tanque de almacenamiento hacia la misma (procedimiento descrito anteriormente). En la Figura 131, se muestra un esquema del flujo de agua y la posición de las válvulas para el llenado correspondiente de la celda.

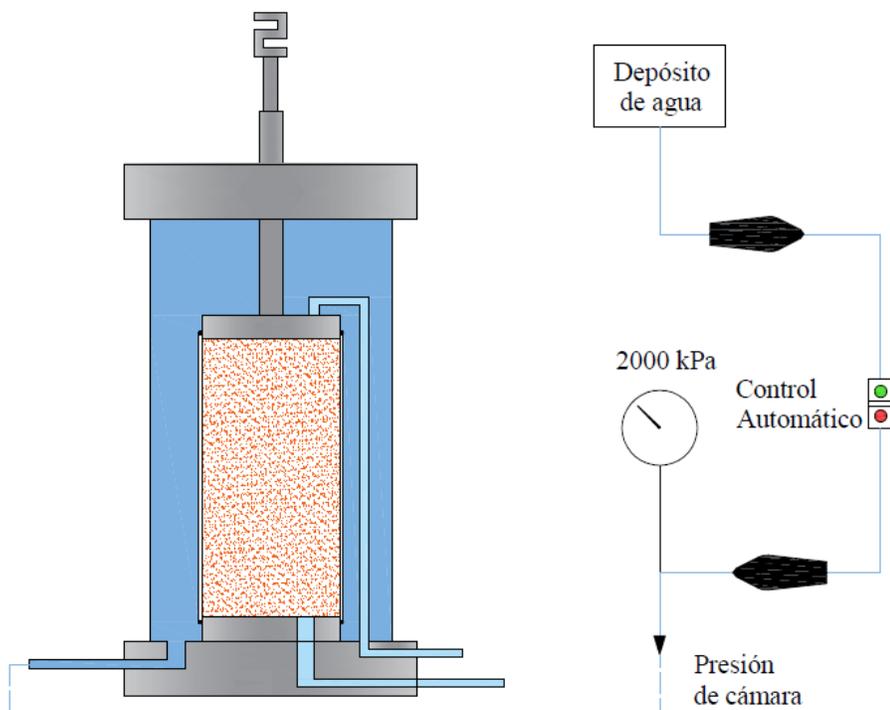


Figura 131: Flujo y posición de válvulas para llenado de celda

Fuente: Autor, 2018.

Una vez realizada la total expulsión de aire dando paso al agua dentro de la celda se debe asegurar nuevamente el tonillo superior de la misma para posteriormente realizar la aplicación de presiones.

5.1.1.2.10.4 *Desmote de celda triaxial*

Cuando se termina cualquier tipo de ensayo triaxial, es importante realizar el desmote de la celda ya que esta se necesitará nuevamente para realizar otro ensayo. Por ello se deben hacer todos los drenajes posibles para liberar las presiones que se tienen en la muestra de suelo y a su vez, evacuar el agua desairada que se encuentra en esta.

Primero, se deben drenar las presiones de poros y cabezal pasado las válvulas en posición de drenaje (ver Figura 132).

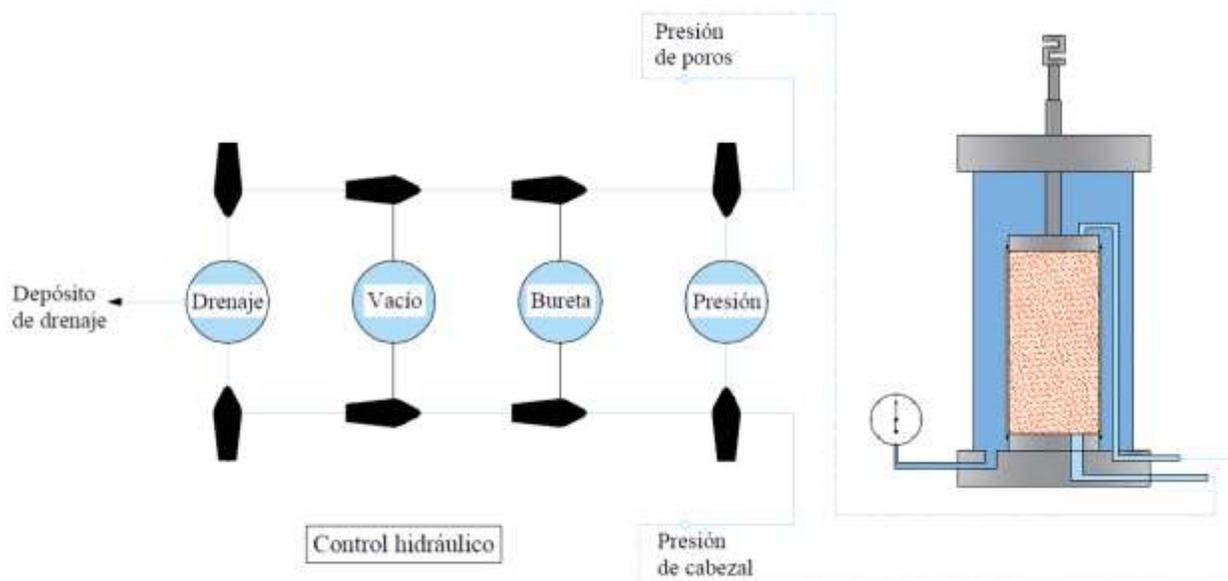


Figura 132. Válvulas de poros y cabezal en posición de drenaje

Fuente: Autor, 2018.

Nota: En el esquema anterior se aprecia que las válvulas de presión también están en posición para el paso de flujo (posición vertical) como las de drenaje, esto con el fin de drenar las presiones de la muestra de suelo y así mismo las que se encuentran en la unidad triaxial automática.

Luego de haberse drenado todas las presiones en poros, cabezal y en la unidad triaxial automática, procedemos a realizar esta operación para la celda. Para ello, se abre la válvula de drenaje (posición paralela al flujo) y se cierra la de llenado (posición perpendicular al flujo) que se encuentran en el pedestal de la misma (ver Figura 130). Así mismo se procede a desenroscar el tornillo de liberador de presión ubicado en la parte superior (ver Figura 129).

El paso a seguir, es desajustar los pernos de la misma con la llave adecuada para esta operación. Luego, libere la celda y desmonte la muestra de suelo quitando la conexión del cabezal y retirándola del pedestal.

Puede reutilizar los materiales utilizados en un ensayo, como lo son la membrana de látex, y los papeles filtros.

Nota: Lave muy bien la membrana de látex y los papeles filtros para su reutilización. Si observa deterioro o daño total de estos materiales, se deben utilizar unos nuevos para el siguiente ensayo. No olvide limpiar también las piedras porosas (ítem descrito anteriormente: “ 5.1.1.2.8 Revisión de piedras porosas”).

5.1.1.2.11 Software Pinzuar

Para ejecutar el software que está diseñado para la maquina triaxial, se debe tener previamente encendido el equipo de cómputo. Buscamos en la interfaz gráfica del escritorio de Windows, el icono de PINZUAR (archivo de acceso directo llamado Registro TRIAXIAL) (ver Figura 133) y se le da doble clic.



Figura 133. Icono del software Triaxial

Fuente: Autor, 2018.

Una vez realizada la acción anterior, aparecerá una ventana gráfica de inicio de software (ver Figura 134).



Figura 134. Ventana de inicio del software Triaxial

Fuente: Autor, 2018.

De esta ventana gráfica, aparecen tres opciones:

- **INICIAR:** en esta opción se inician los registros programados para el ensayo triaxial.
- **CONSULTAS:** entrar a la base de datos de todos los ensayos triaxiales realizados.
- **SALIR:** opción para salir del software.

Si se desea empezar cualquier ensayo triaxial, se debe dar clic en la opción INICIAR. Al ingresar en esta opción aparecerá una ventana el cual se ingresarán datos de usuario, de los cuales son: Código y nombre de usuario y clave de acceso (ver Figura 135).

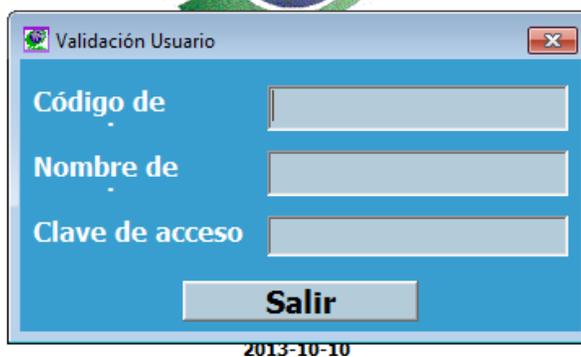


Figura 135. Validación usuario

Fuente: Autor, 2018.

Nota: Los anteriores datos son de uso restringido.

Después de ingresar los datos de usuario, aparecerá la ventana grafica diseñada para ver en tiempo real los parámetros que registran los diferentes dispositivos en la maquina triaxial (ver Figura 136).

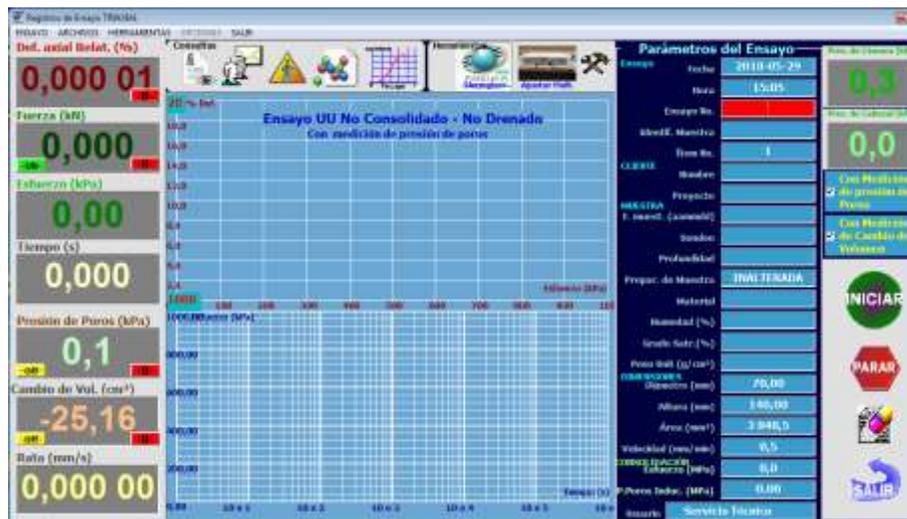


Figura 136. Interfaz de trabajo de software Triaxial

Fuente: Autor, 2018.

Como se puede apreciar en la figura anterior, la interfaz gráfica del software nos proporciona información muy precisa y de uso necesario para la ejecución del ensayo triaxial. Dicha información está relacionada con los medidores de presión y fuerza del equipo, tiempo y cambio de volumen (parte izquierda), gráficos de esfuerzo vs deformación y esfuerzo vs tiempo del ensayo a realizar (parte central). Al costado derecho de la graficas tenemos parámetros fundamentales del ensayo y, en el extremo derecho de la interfaz, presión de cámara y cabezal y opciones para activar el registro de presión de poros y cambio de volumen. Por último, en la parte inferior derecha, iconos con las funciones de iniciar, parar, borrar y salir del ensayo en proceso.

Los parámetros del ensayo se dividen en cinco categorías:

- Ensayo
- Cliente
- Muestra
- Dimensiones
- Consolidación

Estos parámetros son indispensables registrarlos en cada ensayo. Para ello, solo basta con hacer clic en la casilla y digitar el dato especificado. En la opción preparación de la muestra solo se debe hacer clic una vez y se cambiará la opción que se encuentra; solo hay dos opciones: inalterada o remodelada (alterada).

Para los parámetros de la dimensión de la muestra, al hacer clic en tanto en diámetro o en altura, nos aparecerá una ventana que registra dichas dimensiones para las tres muestras mínimas que se deben ensayar (ver Figura 137).

	(1)	(2)	(3)	Promedio
Diámetro arriba (mm):	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Diámetro medio (mm):	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Diámetro abajo (mm):	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Altura (mm):	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

ACEPTAR

Figura 137. Ventana grafica para registrar dimensiones de las muestras

Fuente: Autor, 2018.

Nota importante: Esta opción se debe registrar solo la primera vez que se quiera realizar un ensayo y obtener los parámetros de resistencia del suelo. La configuración queda guardada para los próximos dos ensayos.

En el parámetro consolidación se debe digitar el valor que se le aplicará a la muestra para dicho proceso. Ingrese este valor en unidades de kPa, aunque en la interfaz gráfica se encuentre indicado en MPa. Por otro lado, el valor presión de poros inducido se registrará automáticamente al realizar la etapa de consolidación de la muestra, por lo que no se debe ingresar ningún valor.

En la barra de opciones de la parte superior de la ventana principal del software se configura todas las características anexas y especificaciones de qué tipo de ensayo se desea realizar (ver Figura 138).

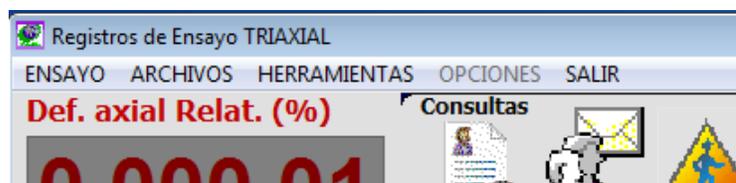


Figura 138. Barra de opciones del software Triaxial

Fuente: Autor, 2018.

En la opción ENSAYO se encontrará los tres tipos de ensayos triaxiales a realizar. Por tanto, para escoger el ensayo a realizar se le da clic a la pestaña y aparecerán las tres opciones para escoger (ver Figura 139, Figura 140 y Figura 141). A su vez, en el ensayo UU y CU pide escoger si se desea o no registrar la presión de poros.

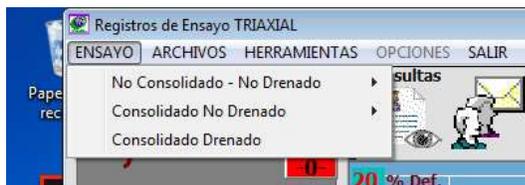


Figura 139. Opción para escoger ensayo

Fuente: Autor, 2018.



Figura 140. Opción No consolidado - No drenado

Fuente: Autor, 2018.

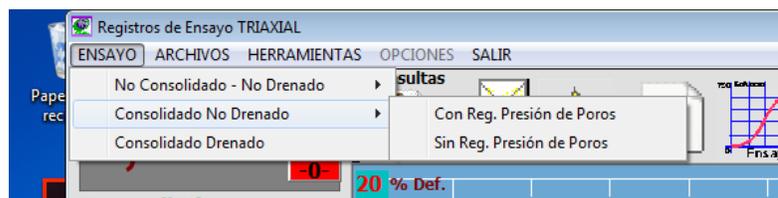


Figura 141. Opción Consolidado - No drenado

Fuente: Autor, 2018.

En la siguiente pestaña se encuentra la opción ARCHIVO (ver Figura 142). En esta opción se encuentran características complementarias al ensayo triaxial, y a su vez las características de los ensayos realizados anteriormente.



Figura 142. Pestaña archivos del software triaxial

Fuente: Autor, 2018.

En esta opción se encuentra:

- **Opción Ensayo:** consultar todos los ensayos realizados (ver Figura 143 y Figura 144).
- **Opción Cliente:** Registro de las personas con interés en el ensayo triaxial (ver Figura 145 y Figura 146).
- **Opción Proyectos:** asignación de proyectos a clientes creados (ver Figura 147).
- **Opción Materiales:** registrar las características de las muestras a ensayar (ver Figura 148 y Figura 149).
- **Opción Usuarios:** cambio de usuario para manipulación del software (ver Figura 150).



Figura 143. Opción ensayos de la pestaña archivos

Fuente: Autor, 2018.

CONSULTA DE REGISTROS

CONSULTA DE ARCHIVOS

Consecutivo	FechaEnsay	Hora	EnsayoNum	IdentMuest	ItemNo	FechaMuest	Cliente	Proyecto	Localizacion	Mat.
1	2018-04-26	14:58:00	15	15		1 2012-12-30	Tess	tess	0	a-a
2	2014-08-15	17:27:00	998	213		1 00:00:00			0	
3	2014-08-15	17:30:00	98465	11		1 00:00:00			0	
4	2014-08-15	17:31:00	654	1		1 00:00:00			0	
5	2014-08-15	17:32:00	321	13		1 00:00:00			0	
6	2014-08-15	17:35:00	998	1235		1 00:00:00			0	
7	2015-05-12	10:52:00	1	1256		1 00:00:00	CL	UF	0	ARC
8	2015-10-09	10:35:00	1	008		1 2015-10-09	CL	UFP5	0	ARC
9	2016-09-16	09:47:00	1	1		1 2016-03-15	UFP5	PRUEBAS DI	0	ARC
10	2016-09-16	10:22:00	1	1		1 2016-03-01	UFP5	PRUEBAS DI	0	ARC
11	2016-09-16	10:46:00	1	1		1 2016-03-01	UFP5	PRUEBAS DI	0	CL
12	2016-09-16	10:46:00	1	1		2 2016-03-01	UFP5	PRUEBAS DI	0	CL
13	2016-11-02	08:04:00	1	1		1 1899-12-31	998	1235	0	CL
14	2016-11-02	08:04:00	1	1		6 1899-12-31	998	1235	0	CL
15	2016-11-03	11:02:00	123	1		1 00:00:00			0	
16	2016-11-09	09:56:00	1	3		1 2341-02-04	1	1235	0	CL
17	2016-11-09	11:21:00	2	1		1 2341-02-04	1	1235	0	CL
18	2016-11-09	14:28:00	3	1		1 2341-02-04	1	1235	0	CL
19	2017-02-14	11:04:00	1	1		1 2014-02-17	SC	1260	0	
20	2017-02-15	08:05:00	1	1		1 2015-02-17	sc	1260	0	arer
21	2017-02-15	08:27:00	2	2		1 2015-02-17	arena	1260	0	SC
22	2017-02-15	14:16:00	3	3		1 2014-02-17	arena	1260	0	sc
23	2017-02-15	15:55:00	4	4		1 2015-02-17	arena	1260	0	sc
24	2017-04-27	10:51:00	18	1		1 00:00:00	grupo 1	Nambar	0	
25	2017-04-29	10:48:00	256	1		1 2017-04-29	oliver	1256	0	SC
26	2017-04-29	16:57:00	1	1		11 2017-04-29	jesus	1285	.99804687	sc
27	2017-04-29	16:57:00	1	1		11 2017-04-29	jesus	1285	.99804687	sc

Ver Ensayo Borrar Refrescar Salir

Figura 144. Ventana de consulta de ensayos

Fuente: Autor, 2018.

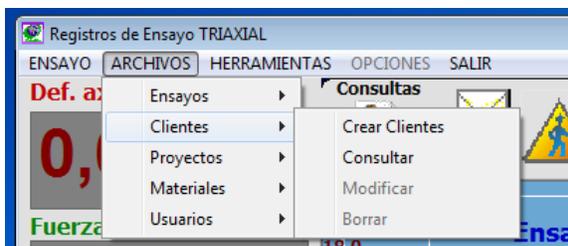


Figura 145. Opción clientes de la pestaña archivos

Fuente: Autor, 2018.

Figura 146. Ventana gráfica para crear nuevos clientes

Fuente: Autor, 2018.



Figura 147. Opción Proyectos de la pestaña archivos

Fuente: Autor, 2018.



Figura 148. Opción materiales de la pestaña archivos

Fuente: Autor, 2018.

The image shows a dialog box titled "Crear Nuevos materiales". It has a blue background and a standard Windows-style title bar with a close button. The dialog contains three input fields: "Código" with the value "0", "Nombre" (empty), and "Descripción" (empty). At the bottom, there are two buttons: "Cancelar" (blue) and "Aceptar" (light blue).

Figura 149. Ventana gráfica para registrar nuevos materiales

Fuente: Autor, 2018.

The image shows a dialog box titled "Consulta de Usuarios". It has a light blue background and a standard Windows-style title bar with a close button. The dialog contains five input fields: "Código" with a dropdown menu showing "1", "Nombre" with the value "Servicio Técnico", "Identificación" with the value "123456", "Dependencia" with the value "Labo", and "Clave" with the value "***". At the bottom, there are two buttons: "Cancelar" (dark blue) and "Aceptar" (light blue).

Figura 150. Ventana gráfica para consultar usuarios

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.12 Etapa de saturación del espécimen

El objetivo de la fase de saturación del ensayo es llenar todos los vacíos de la muestra con agua sin que se apliquen esfuerzos indeseables a ella, o permitiendo que la muestra se expanda (INVIAS, I. N., 2007). Es así como afirma Restrepo, Tellez y Tribín (s.f.) que: “Para un ensayo triaxial tradicional se debe garantizar una saturación total de la muestra para mitigar los posibles errores en la estimación del cambio de volumen y presión intersticial”.

Tal procedimiento se realiza aplicando presiones tanto en cámara como en poros y cabezal de manera controlada, para que la muestra no sufra ninguna alteración. Los valores de presión a aplicar a la muestra dependen del tipo de suelo, la magnitud del esfuerzo geostático in situ y los posibles esfuerzos que ha sufrido la muestra en su edad geológica.

Para realizar esta etapa siga los siguientes pasos:

1. Registrar en el control automático de presión de cámara la magnitud requerida para esta fase. Tenga en cuenta las recomendaciones anteriormente mencionadas.
2. Aplicar la presión en cámara registrada en el control automático con la perilla izquierda de la unidad triaxial automática. En la Figura 151, se muestra un esquema de las válvulas en la posición correspondientes para este paso.
3. Verificar que la presión deseada este medida en su manómetro o en la pantalla digital, el cual es más preciso.
4. Después de la aplicación de la carga, asegurar la perilla con su tornillo de seguridad y encender el control automático.

5. Luego, se deben colocar las válvulas para la aplicación de presión en poros y cabezal en la posición correspondiente. En la Figura 152, se muestra un esquema de estas posiciones.
6. Realice los mismos pasos descritos del 1 al 3 pero para la aplicación de presión en poros y cabezal. No se olvide de asegurar el tornillo de seguridad con la que se aplica esta presión.
7. Luego abrir lentamente las válvulas de poros y cabezal para suministrar la presión registrada en la unidad triaxial automática a la muestra. Tales válvulas se pueden apreciar en la Figura 153.
8. Por ultimo encienda el control automático para estas presiones.

Nota: al momento de realizar el paso 7, las presiones en poros y cabezal descenderán, y es debido a que la presión se encontraba en la unidad triaxial automática y no en la muestra de suelo (espécimen); esto se realiza con el fin de no dañar la muestra. Al momento de realizar el paso 8, el equipo triaxial (exactamente la unidad triaxial automática) se encarga de subir las presiones a la requerida.

Nota importante: el valor de presión de confinamiento (presión de cámara) debe ser mayor que la presión de poros y cabezal. Esto con el fin de no dañar, fracturar o crear deformaciones indeseadas en la muestra de suelo.

Según sean las características de permeabilidad y porosidad del suelo es el tiempo que se requiere dejar el espécimen en esta etapa y lograr un alto grado de saturación.

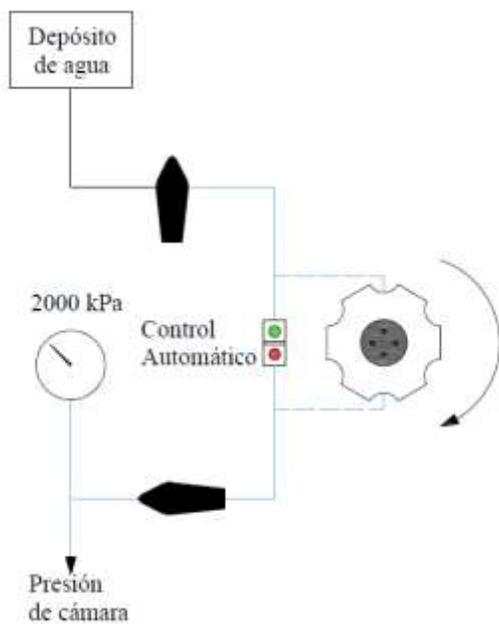


Figura 151. Válvulas en posición para aplicación de presión en cámara

Fuente: Autor, 2018.

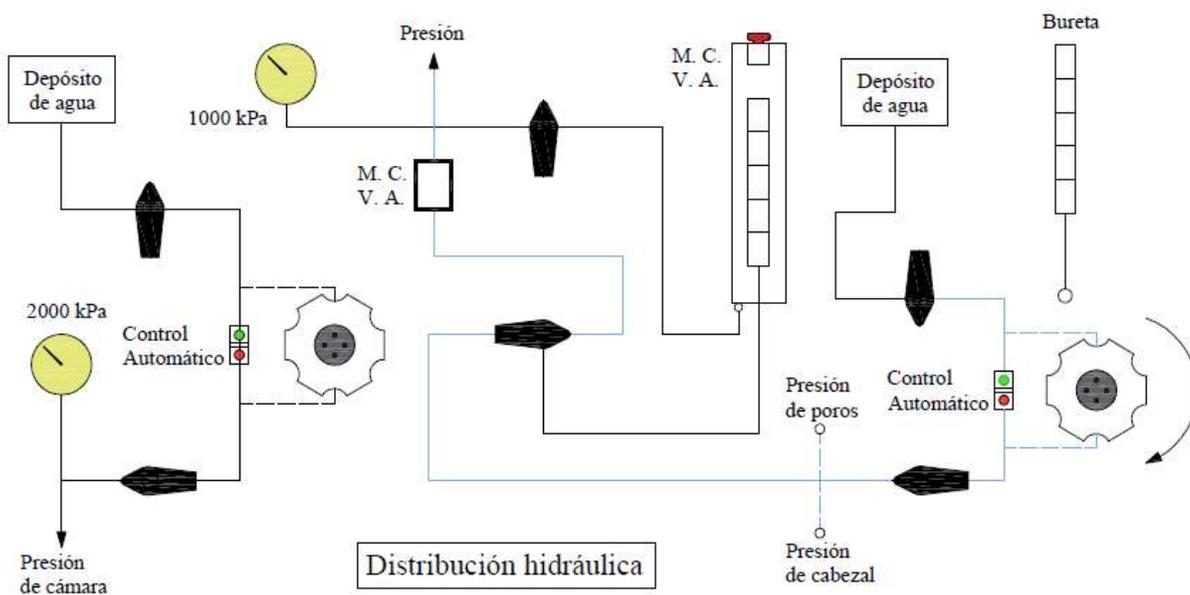


Figura 152. Posición de válvulas y flujo para presión en cabezal y poros

Fuente: Autor, 2018.

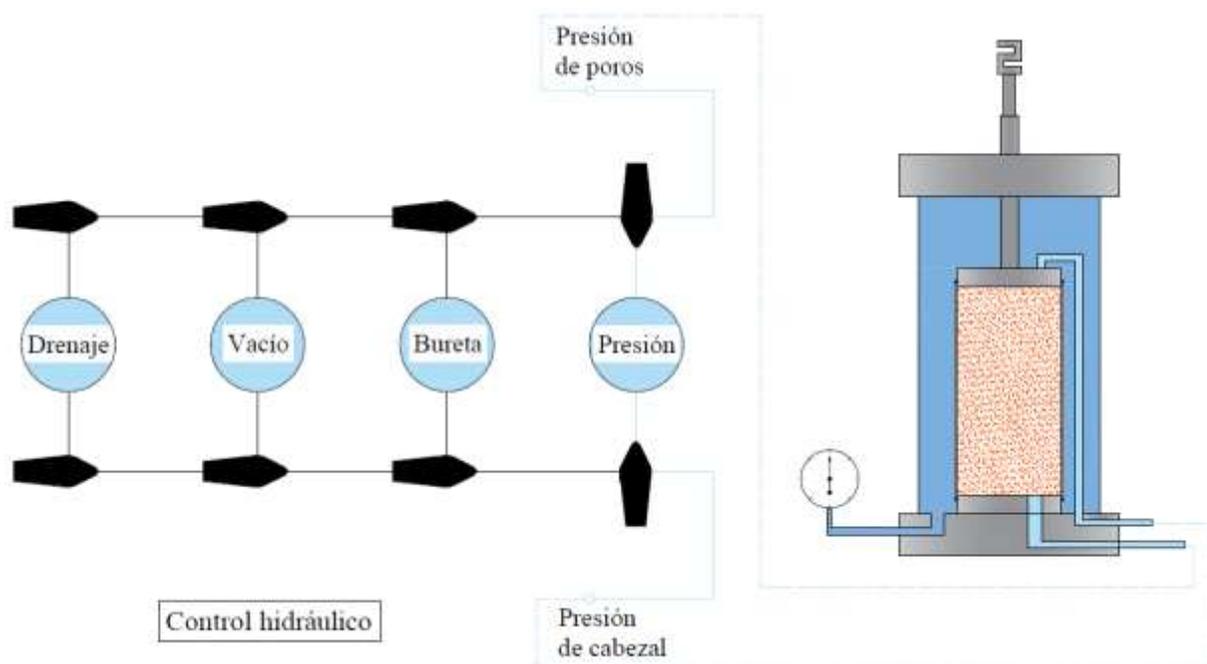


Figura 153. Posición de válvulas para presión de cabezal y poros en control hidráulico

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.13 Proceso de medición de poros durante la fase de saturación y consolidación

Las presiones de poros pueden ser estimadas si se determinan los cambios de esfuerzo dentro del suelo. Cuando un suelo se carga o se descarga por la construcción de un terraplén o una excavación, el cambio de volumen de suelo trae como resultado un cambio en la presión de poros Δu . Este cambio en la presión de poros puede aumentar o disminuir con el tiempo, dependiendo del tipo de suelo y del tipo de esfuerzos involucrados. Bajo las condiciones completamente drenadas (Condición a largo plazo) Δu se disipa y se convierte en $\Delta u = 0$.

Para las condiciones parcialmente drenadas o no drenadas, la evaluación de u depende de la rata relativa de carga, comparada con la rata de drenaje del agua dentro del suelo (Suarez, 1998).

La magnitud del cambio de presión de poros que se desarrolla como resultado del cambio de esfuerzos en los suelos de baja permeabilidad, fue propuesta por Skempton (1954) utilizando los parámetros A y B. Estos parámetros de presión de poros, permiten calcular las presiones de poros en exceso (ver ecuación 28).

$$\Delta_u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (28)$$

Donde:

Δ_u = Exceso de presión de poros.

A = Parámetros de presión de poros A

B = Parámetros de presión de poros B

$\Delta\sigma_1$ = Cambio en el esfuerzo principal mayor

$\Delta\sigma_3$ = Cambien en el esfuerzo principal menor

Los parámetros A y B deben ser determinados a partir de ensayos de laboratorio o seleccionados de la experiencia. Para los suelos saturados, B se acerca a 1.0 pero su valor desciende drásticamente con la disminución en el grado de saturación.

Los valores del parámetro A varían con la magnitud de las deformaciones de cortante, densidad inicial y relación de consolidación del suelo y generalmente, alcanzan valores máximos en el momento de la falla. A es positivo para aquellos suelos que tienden a comprimirse al cortarse, por ejemplo arena suelta o arcilla, normalmente consolidada. A es negativo para aquellos suelos que tienden a dilatarse al cortarse, por ejemplo, arena densa y arcillas sobreconsolidadas.

Los valores de A permiten tener en cuenta el fenómeno según el cual los suelos normalmente consolidados tienden a generar excesos de presión de poros positiva durante el

corte y en contraste, los suelos sobreconsolidados pueden generar presiones en exceso negativas (Suarez, 1998).

El valor de A está muy influenciado por el nivel del suelo donde ha sido previamente deformado el esfuerzo inicial, la historia y la trayectoria de estos esfuerzos, tales como carga y descarga (Lambe y Whitman, 1969).

Ahora, el valor de B es posible determinarlo en la etapa de saturación. Por lo que este parámetro debe dar un valor muy cercano, o en efecto, a 1 o 100%. El Instituto Nacional de Vías (INVIAS, I. N., 2007) exige que: “Se considera que la saturación de la muestra se ha completado si el valor de B es igual o mayor a 0,95 o si este parámetro se vuelve invariante al realizar incrementos de contrapresión”.

Mediante la ecuación (29), determinada gracias a los estudios de Skempton se logra determinar dicho valor.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (29)$$

Donde:

Δu = cambio en la presión de poros debido al incremento de presión de confinamiento o cámara aplicados a la muestra cuando las válvulas de esta se encuentran cerradas.

$\Delta \sigma_3$ = Cambio en la presión de cámara inducido

Para determinar dicho valor con el equipo triaxial, una vez montada la muestra y haberle aplicado las presiones para saturación, y transcurrido un tiempo determinado, en el software se debe abrir la herramienta llamada Skempton. Esta función se encuentra en la barra de herramientas de acceso rápido (ver Figura 154).



Figura 154. Barra de herramientas del software Triaxial

Fuente: Autor, 2018.

Al dar clic en la función se abrirá la ventana para el cálculo del parámetro B de Skempton (ver Figura 155).

 A screenshot of a software window titled 'CÁLCULO DEL PARÁMETRO B - (Skempton)'. The window has a light blue background and contains the following elements:

	PRES. DE CÁMARA	PRES. DE POROS	Tiempo
INICIAL	-1,7 kPa	0,1 kPa	0 s
Incr. 1	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> s
Incr. 2	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> s
Incr. 3	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> s
Incr. 4	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> s
Decr. 1	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> s
Decr. 2	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> s
Decr. 3	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> s
Decr. 4	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> kPa	<input type="text"/> s
FINAL	-1,7 kPa	0,1 kPa	<input type="text"/> s

 To the right of the table, there is a 'Registrar' button, a 'PARÁMETRO B' section with 'Incr.' and 'Decr.' input fields, and a 'SALIR' button. A graph on the right side shows a grid with a blue line representing data points. The y-axis is labeled 'Δu (kPa)' and the x-axis is labeled 'Δσ (kPa)'.

Figura 155. Ventana para el cálculo del parámetro B

Fuente: Autor, 2018.

Para calcular dicho parámetro, se deben establecer incrementos de presión que se le realizarán al esfuerzo de confinamiento $\Delta\sigma_3$ (presión en cámara) como se explicó en la ecuación 11, y el software automáticamente registrará las lecturas de los nuevos valores en presión de poros debido a estos incrementos.

Estos incrementos (al igual que los decrementos) se realizan debido a que al aumentar (o disminuir) la presión en cámara $\Delta\sigma_3$, ésta confina la muestra de suelo, generando una presión intersticial. Este cambio de presión intersticial o presión de poros es registrada en tiempo real por el equipo y mostrado en el software.

Al realizar los cambios de presión en cámara (incrementos y decrementos), también se deben apreciar en la presión de poros, fenómeno que determina que la muestra se encuentra con un porcentaje de saturación. Como se describió anteriormente, gracias a los estudios de Skempton, en la ecuación (11) se puede apreciar que los cambios de presión en cámara $\Delta\sigma_3$ deben ser iguales a los cambios de presión de poros Δu , para que el parámetro B de un valor de 1 (uno). Lo que indicaría que la muestra se encuentra totalmente saturada.

Para empezar a calcular el parámetro B con el software “TRIAXIAL”, se deben establecer 4 incrementos y 4 decrementos. Gracias a esto, se calcula una saturación más precisa. Aprecie esto en la primera fila de la ventana gráfica para el cálculo del parámetro (ver Figura 155).

Nota: para realizar este procedimiento deben estar mínimo dos personas en el laboratorio. Una persona realizará los incrementos de presión y la otra registrará dichos incrementos.

5.1.1.2.14 Procedimiento para el calculo del parametro B de Skempton

Una vez ejecutado la herramienta Skempton del software “TRIAXIAL” se deben seguir los siguientes pasos para el cálculo de dicho parámetro:

1. Se deben apagar los controles automáticos de presiones. Debido a que se encontraban encendidos durante la etapa de saturación.
2. Cerrar las válvulas de presión de cabezal y poros
3. Desajustar el tornillo de seguridad de la perilla de aplicación de presión en cámara
4. Digitar el primer incremento en la primera fila de la herramienta Skempton, es decir, si la presión en cámara se encontraba en 30kPa, y se realizarán incrementos de 10 kPa, se debe anotar 40.
5. Una vez, registrado el primer incremento, se debe girar la perilla de aplicación de presión de cámara y llevarla hasta la establecida en el primer incremento del software.
6. En el momento que se llegue a la presión en cámara deseada y se estabilice, dar clic en el botón “REGISTRAR”.
7. Realizar el siguiente incremento, siguiendo los pasos 5 y 6.
8. Luego, se realizan los decrementos en un intervalo igual al de los incrementos para finalizar con las mismas presiones antes de iniciar el paso 5.
9. Chequee los valores B calculados por el software, uno para el incremento y el otro para el decremento.

Después de terminado el anterior procedimiento, el software automáticamente calcula el parámetro B y graficará la curva observándose el comportamiento de las presiones. Se calculan dos datos para la saturación; uno para el incremento y otro para el decremento. Recuerde seguir las recomendaciones descritas en este ítem para determinar si la muestra ya se encuentra en

óptimas condiciones de saturación para un ensayo triaxial. De lo contrario, se debe dejar más tiempo en estado de saturación para lograr la magnitud recomendada.

5.1.1.2.15 Medición del cambio de volumen: método análogo o digital

El equipo triaxial posee dos sistemas de medición de cambio de volumen: análogo y digital, siendo el sistema de medición digital el más preciso y de mayor facilidad para realizar la medición.

Para medir digitalmente el cambio de volumen en una muestra de suelo, se deben manipular las válvulas correspondientes en la distribución hidráulica de presiones.

A continuación, se muestran en las Figura 156 y Figura 157, dos esquemas de la posiciones de las válvulas para la respectiva medición.

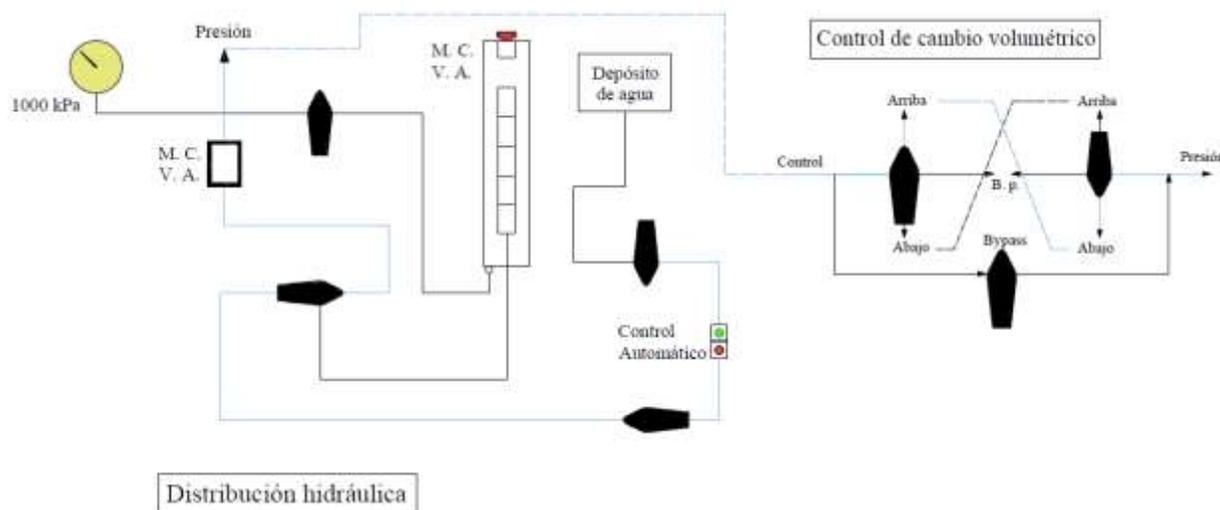


Figura 156. Sistema de flujo para medición de volumen digital. Opción 1

Fuente: Autor, 2018.

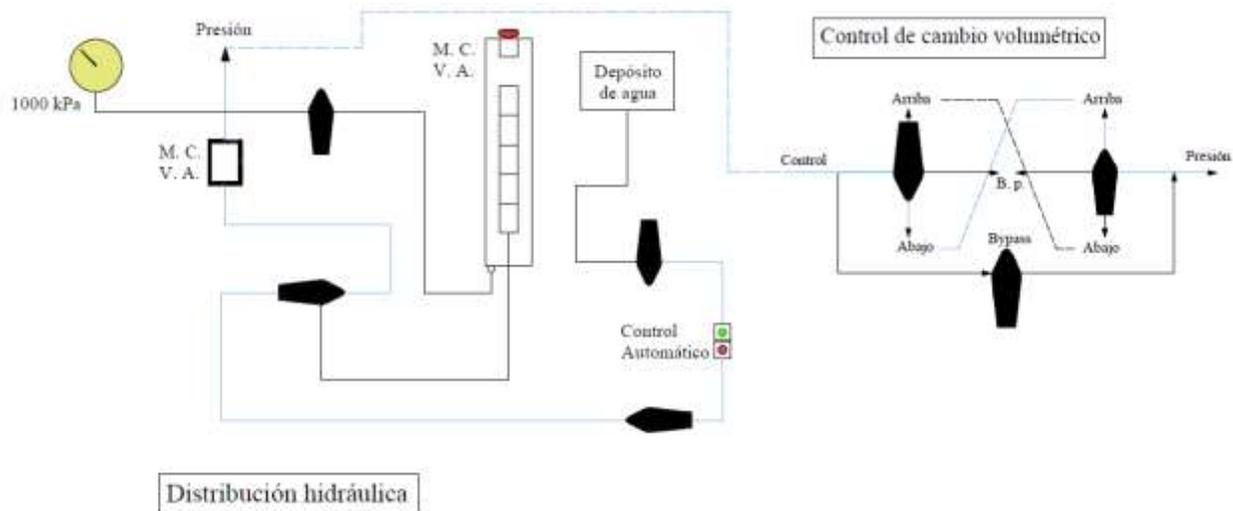


Figura 157. Sistema de flujo para medición de cambio de volumen digital. Opción 2

Fuente: Autor, 2018.

Por otro lado, el sistema de medición de cambio de volumen análogo se realiza mediante buretas conectadas al sistema de distribución hidráulica. Es así como la realización de este proceso se deben manipular igualmente las válvulas correspondientes para esta función. En la Figura 158 se muestra un esquema de la posición de las válvulas.

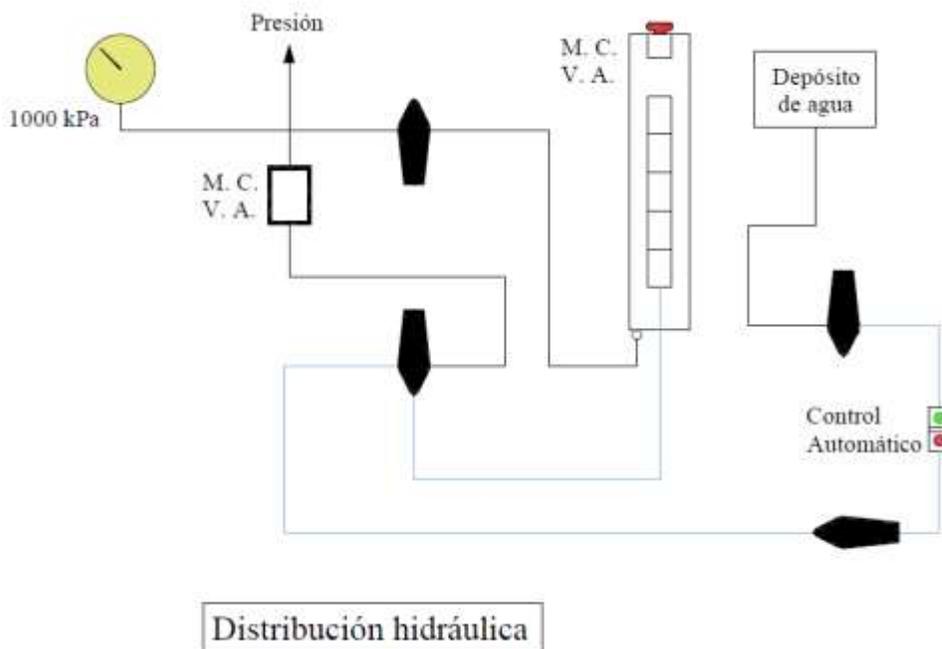


Figura 158. Sistema de flujo para medición de cambio de volumen análogo

Fuente: Autor, 2018.

Como se observa en la Figura 158, en la posición de las válvulas, solo se manipuló la válvula central del sistema de distribución hidráulico, y como elemento de medición a estas válvulas, es la bureta central del sistema de buretas de la unidad triaxial automática (en la Figura 159, la bureta de la izquierda).

Nota: la bureta de la derecha (Figura 159) se explicará más adelante su función.

La bureta exterior, se utiliza básicamente para medir la presión que se le suministrará a la muestra tanto en cabezal como en poros, por ello se debe manipular así mismo su válvula en el control hidráulico (ver Figura 160). Su fin es poder medir la presión aplicada en la contrapresión en caso tal de que la medición en el manómetro de la unidad triaxial automática se encuentre averiado.



Figura 159. Bureta para medición de cambio de volumen

Fuente: Autor, 2018.

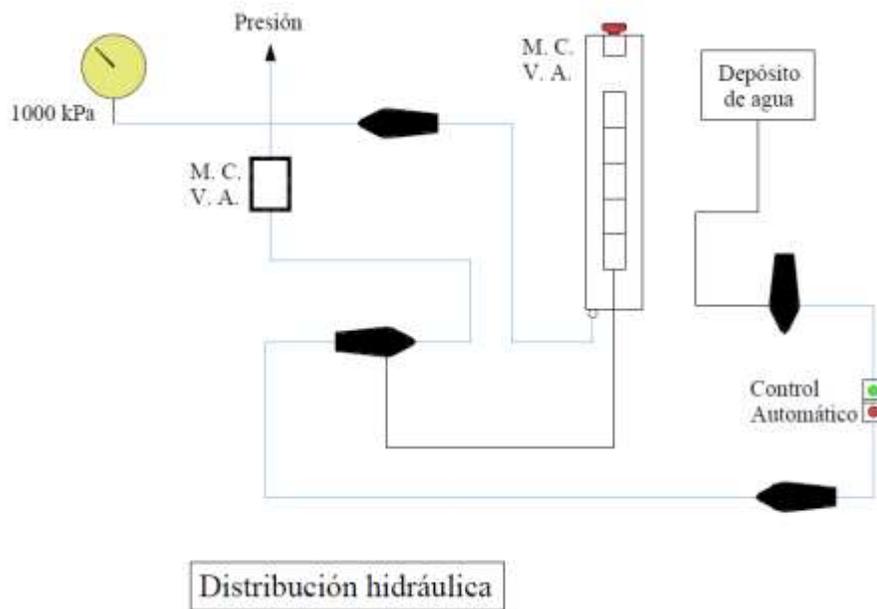


Figura 160. Medición de presión de contrapresión (poros y cabezal)

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.16 Medición de presión de poros y cabezal análoga durante un ensayo

Como se apreció en la Figura 159 hay una bureta (bureta de la derecha) adicional que tiene incorporada la unidad triaxial automática. Su función es medir los cambios de presión tanto en cabezal como en poros durante un ensayo. En especial, en un ensayo UU o CD, el cual se requiere medir los cambios de presión de poros para el análisis respectivo de los parámetros de resistencia de los suelo.

De acuerdo con lo anterior, se debe manipular las válvulas correspondientes para medir dichas presiones en la bureta, tal como se muestra en los esquemas de las Figura 161, Figura 162 y Figura 163.

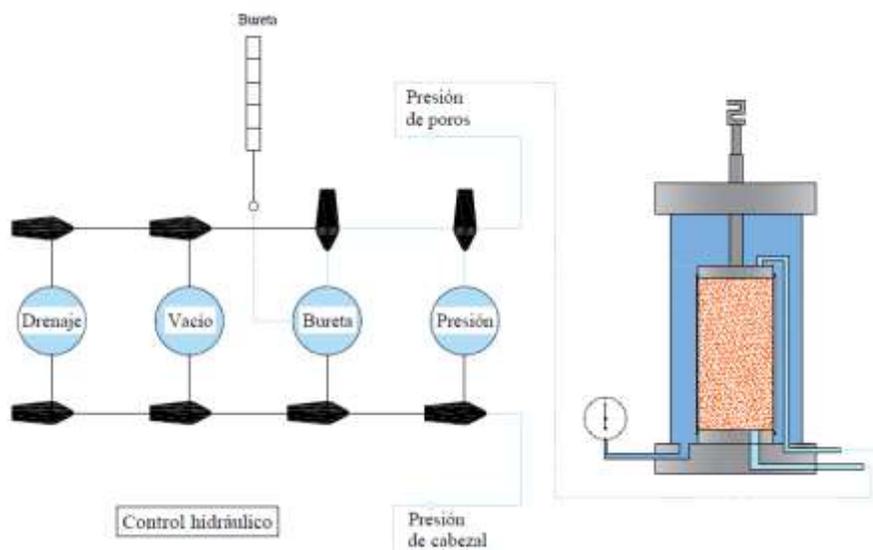


Figura 161. Posición de válvulas para medición de presión de poros en bureta

Fuente: Autor, 2018.

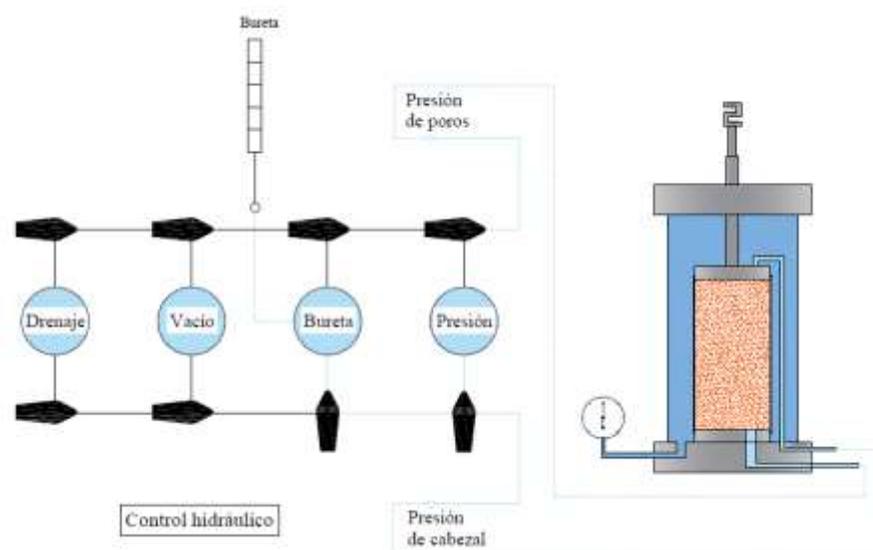


Figura 162. Posición de válvulas para medición de presión de cabezal en bureta

Fuente: Autor, 2018.

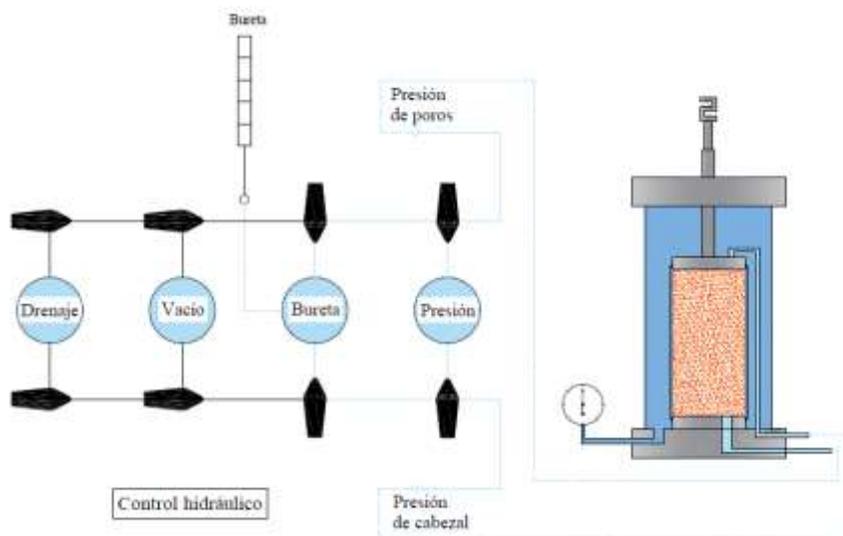


Figura 163. Posición de válvulas para medición de presión de poros y cabezal en bureta

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.17 Descripción del registro de datos durante un ensayo

Durante los ensayos, el software “TRIAXIAL” registra en tiempo real todos los datos necesarios e indispensables para el análisis y cálculo de los parámetros de resistencia del suelo.

Nota importante: Tenga en cuenta de suministrar de manera correcta los datos de ensayo, cliente, muestra, dimensiones y consolidación (descrito en el ítem llamado “Software Pinzuar” de este capítulo) para una correcta identificación de las muestras ensayadas.

Al momento de iniciar cualquiera de los tipos de ensayos triaxial, el software abre automáticamente una hoja de Excel, el cual tiene programada toda la información y registro de datos durante un ensayo. En dicho documento, se muestran 4 hojas de registro de información para 4 muestras a ensayar.

Para la primera hoja (llamada “Inicio), que se aprecia en la Figura 164, lleva en su encabezado el nombre del ensayo y a su vez, acompañado del escudo de la empresa PINZUAR. Más abajo se presenta la información que se registró inicialmente con las características de la muestra. Luego aparecen los parámetros de la muestra y tipo, parámetros y resultado del ensayo. Finalmente se muestran dos graficas que describen el comportamiento de las muestras como lo son: Esfuerzo vs. Deformación y círculo de Mohr.

 PINZUAR <small>LABORATORIO DE ENSAYOS</small>	LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES				Rev 1.3
	ENSAYO TRIAXIAL - ASTM D-2850 / D-4767				2013-06-16
	Formato de registro de ensayos		Código: Formatos-0016/Inicio		Pág 1 de 3

Cliente: _____ Proyecto: _____ Sonda: _____ Profundidad: _____ Material: _____ Descripción: _____	Ensayo No.: _____ Identific. de la muestra: _____ Fecha de ensayo: _____ Fecha de muestreo: _____ Fecha de recepción: _____
--	---

Rango de la máquina 5 kN

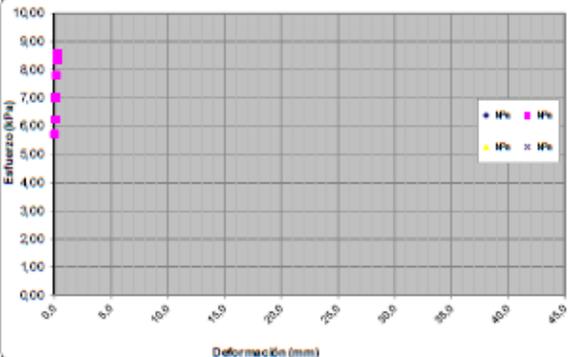
Parámetros de la muestras				
	Ítem 1	Ítem 2	Ítem 3	Ítem 4
Diámetro superior (mm)				
Diámetro medio (mm)				
Diámetro inferior (mm)				
Altura Inicial (mm)				
Esbeltez (L/D)				
Humedad (%)				
Grado de saturación (%)				
Peso seco (g)				
Peso unitario (g/cm ³)				
Diámetro promedio D _o (mm)				
Área A _o (mm ²)				
Volumen (mm ³)				

Parámetros de ensayo				
σ_3 (kPa)				
P _o (kPa)				
σ_1 (kPa)				
p (kPa)				
q (kPa)				
Esf Consolidación (kPa)				
Velocidad (mm/min)				

Tipos de Ensayo				
No Consolidado				
Sin medición de presión de poros				
Sin medición de cambio de volumen				
MUESTRA INALTERADA				

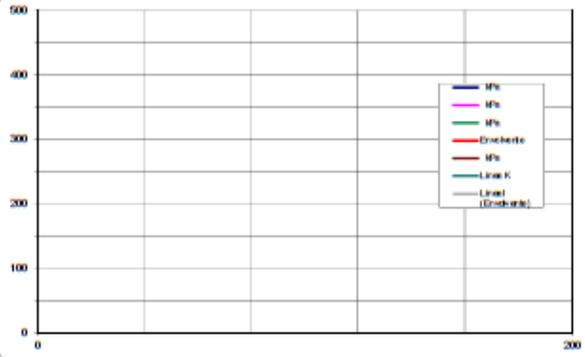
Resultados de ensayo				
Muestra (Ítem #)	1	2	3	4
Deformación Máxima (%)				
Esfuerzo Máximo (kPa)				
σ_3 (kPa)	0,000	0,000	0,000	0,000
P _c (kPa)	0,000	0,000	0,000	0,000
Cohesión (kPa)				
Ángulo fricción				
a (kPa)				
Presión de Poros (kPa)				
Cambio de Volumen (%)				
Tiempo de ensayo (s)				

Esfuerzo Principal **0,000** kPa **Deformación ΔH** **0,00** mm **Tiempo** **0** s



Esfuerzo (kPa)

Deformación (mm)



Esfuerzo (kPa)

Deformación (mm)

Observaciones:

Técnico: _____

Máquina de ensayo: Marca: Pinzar Lics. Modelo: PS-04 No. Serie: 103

Dir. Laboratorio: _____

Rango de medida: 5 Cert. Calibración: 907

Figura 164: Hoja 1: Inicio. Registro de datos ensayos triaxiales.

Fuente: Adaptado de registro de Software Triaxial.

En la segunda hoja del documento de Excel (llamada “DatosConsol”), muestra la información relacionada con la fase de consolidación para los ensayos CD y CU. En la cual muestra el grado de saturación de la muestra al momento de medirlo mediante la opción “Skempton”, acompañado de una tabla para el registro de los cambios de volumen en cm^3 con su respectivo tiempo en minutos. Esta hoja de Excel tiene programada todas las formulas necesarias para graficar los resultados.

En la Figura 165 se muestran las tablas y los gráficos para los datos de la fase de la consolidación.

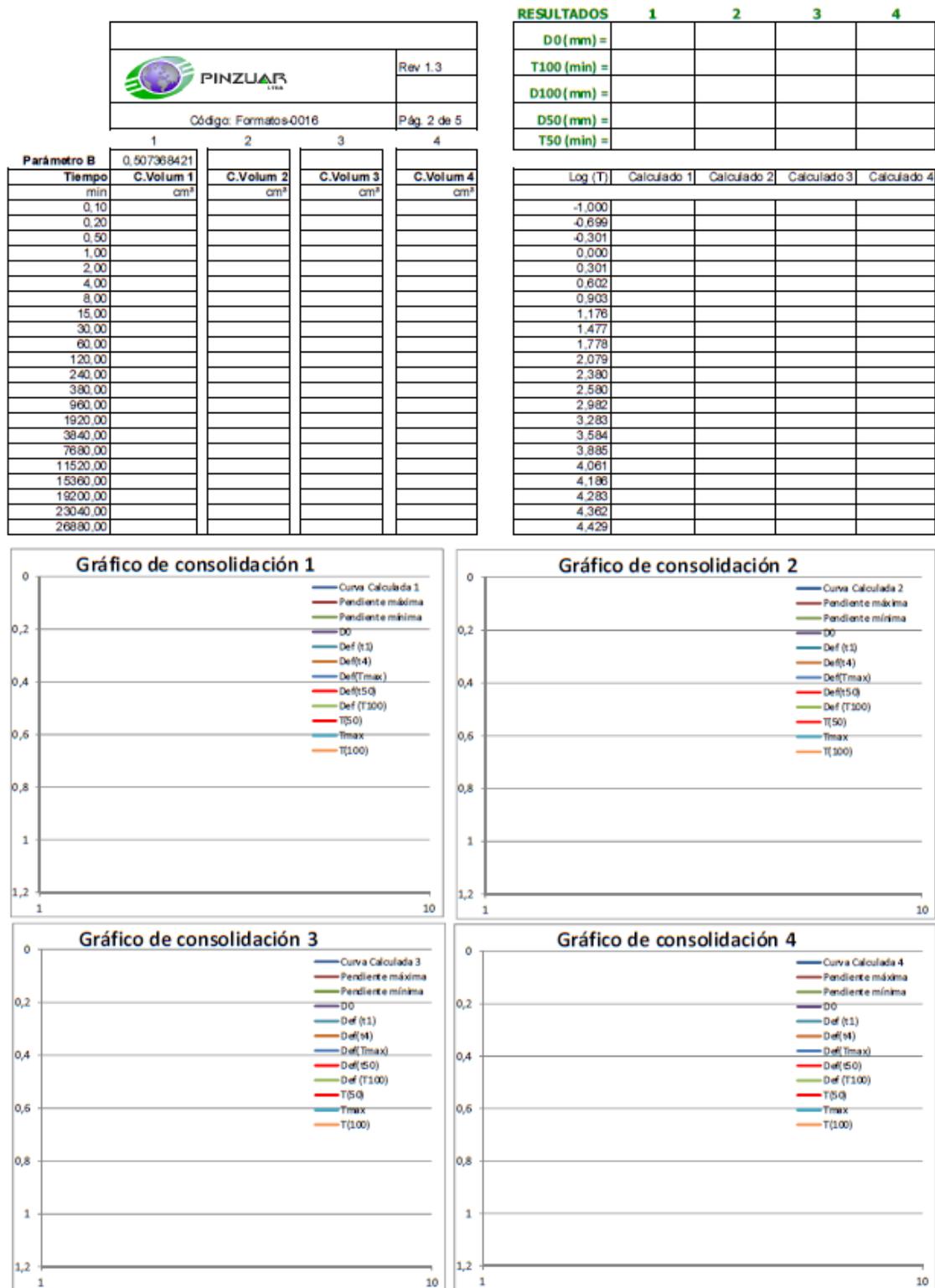


Figura 165. Hoja 2: consolidación.

Fuente: Adaptado de registro de Software Triaxial

5.1.1.2.18 Algunas causas de error en el ensayo Triaxial

Fell y Jeffery (1987) indican una serie de errores comunes que se cometen en el manejo del ensayo triaxial:

- **Ensayo a un nivel muy alto de esfuerzos:** La envolvente del círculo de Mohr tiene una forma curva y si se trabaja con niveles altos de esfuerzos se puede sobreestimar la resistencia para el caso real de esfuerzos menores; por ejemplo, para esfuerzos de confinamiento entre 100 y 400 kPa, las resistencias se pueden sobreestimar hasta en un 300 %. Por lo tanto, es importante que el ensayo Triaxial se realice al nivel de esfuerzos de confinamiento reales en el talud analizado.
- **Saturación incompleta:** Comúnmente, las muestras inalteradas no son ensayadas con saturación total debido a que por gravedad es difícil obtener la saturación. El resultado es un aumento en el valor de la resistencia de laboratorio, comparativamente con la resistencia real en campo, para el caso saturado.
- **Ensayo a una rata muy alta de deformación:** Las ratas altas de deformación no permiten disipar la presión de poros en el ensayo consolidado drenado.

5.1.1.2.19 Etapa de finalización de ensayo

5.1.1.2.19.1 Gráficos

Como se pudo apreciar anteriormente en los ítems: “Software Pinzuar” y “Descripción del registro de datos durante un ensayo” de este capítulo, hay graficas que ayudan a entender el comportamiento del suelo durante un ensayo triaxial y, su respectivo y riguroso análisis después de este.

Con la ayuda de estas gráficas y con los requerimientos de estudio del suelo a ensayar, se puede establecer el momento de terminación del ensayo triaxial. Es así como en la gráfica de Esfuerzo vs. Deformación, tanto del software o del documento de Excel, se puede establecer la finalización del ensayo, el cual nos brinda la deformación axial a la que se encuentra el suelo en un momento dado y bajo qué esfuerzo está sufriendo éste en ese instante.

Como se puede apreciar en la Figura 167, corresponde a la gráfica de esfuerzo-deformación del documento de Excel que genera el software TRIAXIAL. Como se puede ver, el suelo en estudio, llegó a una deformación máxima de 30,50 mm justo antes de finalizar el ensayo. A su vez, se puede ver que éste alcanzó un esfuerzo máximo de 65,91 kPa en el momento que llega a una deformación 21 mm.

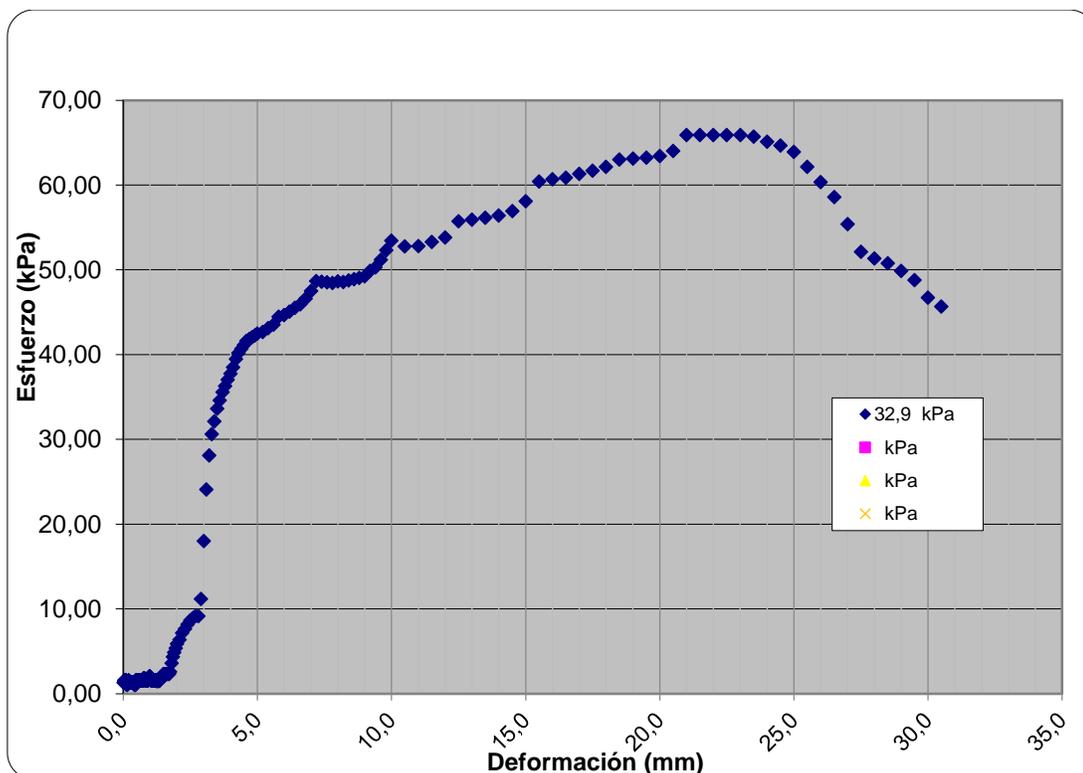


Figura 167. Gráfico esfuerzo-deformación de muestra de suelo

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.2.19.2 *Terminación de ensayos con referencia a la norma INVIAS*

El Instituto Nacional de Vías (INVIAS), establece una recomendación importante a la hora de establecer durante un ensayo triaxial, la finalización de éste. También cabe resaltar, que de acuerdo con las características del suelo y el estudio a realizar, determina el momento en que el ensayo, en la fase de rotura, debe parar.

Pero, ¿Qué variables determina la finalización del ensayo triaxial? Estas variables se llaman: Resistencias Pico y Residual.

Resistencia máxima o resistencia pico: Es la máxima resistencia al corte que posee el material, el cual no ha sido fallado previamente y corresponde al punto más alto en la curva esfuerzo – deformación (Suárez, s.f.).

Resistencia residual: Es la resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla (Suárez, s.f.).

En la Figura 168, se puede observar una gráfica el cual describe la resistencia pico y la resistencia residual en un ensayo de corte directo.

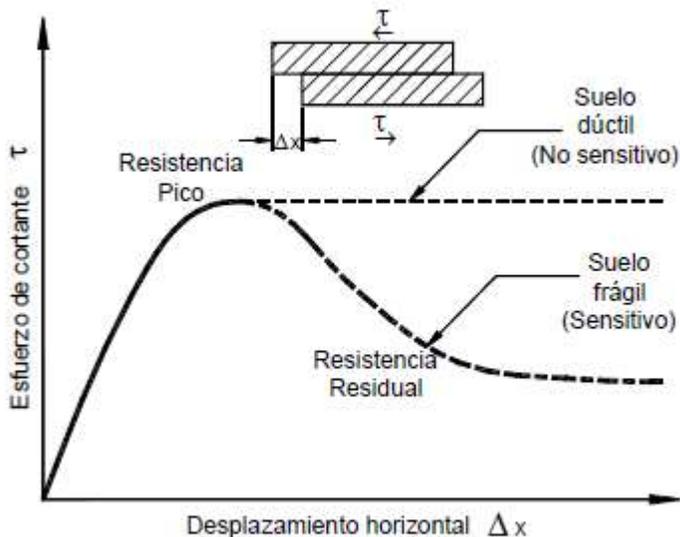


Figura 168. Curvas esfuerzo de corte-desplazamiento en un ensayo de Corte directo

Fuente: Duncan y Wright, 2005.

Nota: La pérdida de resistencia en el momento de la falla al cortante, está relacionada principalmente con una disminución de la cohesión.

Gracias a estas variables, como lo son la resistencia pico y residual, se puede establecer la finalización del ensayo triaxial. Es por ello que, en la norma “PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO MEDIANTE COMPRESIÓN TRIAXIAL” de (INVIAS, I. N., 2007), afirma: “Se continúa la carga hasta el 15% de la deformación axial, excepto cuando no se haya alcanzado el máximo esfuerzo desviador, en este caso se llevará hasta el 20% de la deformación axial o hasta un 5% más de deformación axial a partir de donde el máximo esfuerzo desviador ocurrió” (2007).

De acuerdo con lo anterior, se tiene un claro ejemplo sobre que porcentaje de deformación se le puede aplicar al suelo, logrando obtener una grafica precisa y confiable para su respectivo analisis geotécnico al sitio de estudio.

5.1.1.2.19.3 *Información generada en la plantilla de EXCEL*

Después de realizar cualquier tipo de ensayo triaxial y como se explicó anteriormente, el software “TRIAXIAL” genera un archivo de Excel el cual registra todos los datos del ensayo. Es por ello que al momento de finalizar el ensayo y se desea cerrar este y realizar otro, el documento de Excel, se debe cerrar sin efectuar cambios. Es decir, al momento de dar clic en la pestaña cerrar archivo, aparecerá una ventana gráfica en la que pregunta si desea guardar el documento, lo que se le dará clic en “NO”. Esta operación se debe realizar para no alterar el funcionamiento correcto de la plantilla de datos programada.

El software está diseñado para guardar automáticamente todos los ensayos que se realicen con la máquina.

Para abrir cualquier tipo de ensayo triaxial realizado solo basta con ir a la base de datos del software (Se explicó anteriormente el ítem: “Software Pinzuar” de este capítulo).

5.1.1.2.20 *Desarrollo de los diferentes tipos de ensayos Triaxiales*

Como se pudo apreciar en los capítulos 2 y 3 de esta guía metodológica, describe la máquina triaxial que se encuentra en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y como se deben manejar las muestras de suelo para posteriormente realizar los diferentes ensayos triaxiales deseados.

Ahora, se describirá como realizar cada ensayo basándose en el capítulo 2, el cual describe los procedimientos detallados de cada función, herramienta y procesos para el manejo de la máquina triaxial.

Nota: Para realizar cada ensayo se debe previamente hacer el montaje de la muestra y etapa de saturación (opcional para el ensayo UU si se requiere) para determinar los parámetros de resistencia del suelo.

5.1.1.2.20.1 *Ensayo triaxial: No consolidado no drenado (UU)*

En este tipo de prueba no se permite en ninguna etapa la consolidación de la muestra. La válvula de comunicación entre el espécimen y drenaje permanece siempre cerrada. Debido a esto, es opcional saturar o no la muestra de suelo; el cual no se permite la consolidación. Pero, para situaciones críticas en campo es recomendable saturar la muestra para determinar los parámetros de resistencia en términos del suelo en estado saturado.

El ensayo UU es usualmente llevado a cabo sobre especímenes de arcilla, enmarcando la realización del ensayo dentro del concepto de resistencia para suelos cohesivos saturados, en donde se expresan los resultados en términos de esfuerzos totales. La envolvente de falla para los criterios de Mohr del esfuerzo total se convierte en una línea horizontal, con una condición de

$\phi = 0^\circ$ (ángulo de fricción) y $\tau_f = C_u$, siendo C_u la resistencia al cortante no drenado, la cual es igual al radio de los círculos de Mohr (Salas, 2011).

Para dar inicio al ensayo, se escoge la opción Ensayo No Consolidado No drenado, en la pestaña “ENSAYO” de la barra de opciones del Software TRIAXIAL. A su vez, se debe tener claro si requiere un ensayo con registro de presión de poros como si no.

Luego, se deben llenar toda la información requerida en la columna de Parámetros del ensayo para poder llevar un registro exacto de la muestra que se ensayará. A su vez, escoger la velocidad de ensayo en la máquina de ensayos.

Nota: en los parámetros de consolidación no se debe registrar ningún dato, debido a que en este ensayo no se lleva a cabo dicho proceso.

Una vez registrado toda la información, se debe colocar tanto la presión hidrostática en la celda Triaxial, como la contrapresión (presión de cabezal y poros), con el fin de aplicar el esfuerzo principal menor en la muestra de suelo, para posteriormente comenzar el ensayo dando clic en “INICIAR” (icono de color verde en la interfaz gráfica del software).

Nota importante: Recuerde que toda la descripción de los procesos de aplicación de presiones de confinamiento y contrapresión están descritas en el capítulo 2 “Generalidades de la maquina triaxial” de esta guía metodológica.

Detalle que en la Figura 151, se aprecia la posición de las válvulas de aplicación de presión con la perilla de aplicación de las mismas y, en la Figura 152, el paso de estas presiones a la muestra.

Para iniciar el ensayo siga los siguientes pasos:

1. Registre las presiones en cámara y cabezal en el control automático.
2. Mueva las válvulas de aplicación de presiones a la muestra, como se observan en el esquema de la Figura 151.
3. Eleve las presiones registradas con las perillas de aplicación de presión al mismo tiempo. Siempre llevando la presión de cámara un poco por encima de las de cabezal y poros.
4. Asegure las perillas con su tornillo de seguridad
5. Encienda el control automático de presión de cámara
6. Abra muy lentamente las válvulas de presión de cabezal y poros, como se muestra en la Figura 152.
7. Encienda el control automático cabezal

Nota: al momento de girar estas válvulas, las presiones descenderán un poco, debido a que estas pasan de la unidad triaxial automática a la muestra.

Después de un tiempo, las presiones se estabilizarán de acuerdo con las registradas en el control automático y es allí cuando se puede iniciar el ensayo UU. Tenga cuidado antes de iniciar el ensayo, colocar la velocidad del mismo en la más óptima y tener claro el momento de terminar el ensayo de acuerdo con el porcentaje de deformación deseado para muestra de suelo en estudio.

Una vez finalizado el ensayo, recuerde seguir los pasos descritos en los ítems: “Desmante de celda triaxial” y “Información generada en la plantilla de EXCEL” como último paso para disponer de la maquina triaxial para el próximo ensayo.

5.1.1.2.20.2 *Ensayo triaxial: Consolidado no drenado (CU)*

En este tipo de prueba, el espécimen se consolida primeramente bajo la presión hidrostática; así el esfuerzo llega a ser efectivo, actuando sobre la fase solida del suelo. En seguida, la muestra se lleva a la falla por un rápido incremento de carga axial, de manera que no se permita el cambio de volumen. El hecho esencial de este tipo de prueba es el no permitir ninguna consolidación adicional durante el periodo de falla, de aplicación de la carga axial. Esto se logra fácilmente en una cámara de compresión triaxial cerrando la válvula de salida de las piedras porosas a la bureta.

En la segunda etapa de una prueba rápida consolidada podría pensarse que todo el esfuerzo desviador fuera tomado por el agua de los vacíos del suelo en forma de presión neutral, ello no ocurre así y se sabe que parte de esa presión axial es tomada por la fase solida del suelo, sin que hasta la fecha, se haya dilucidado por completo ni la distribución de esfuerzos, ni las razones que lo gobiernan. De hecho no hay ninguna razón en principio para que el esfuerzo desviador sea íntegramente tomado por el agua en forma de presión neutral, si la muestra estuviese lateralmente confinada como el caso de una prueba de consolidación (Salas, 2011).

El ensayo CU (consolidado no drenado) se realiza generalmente con medición de la presión de poros o neutra con el fin de determinar los parámetros de C (cohesión) y ϕ (ángulo de fricción) en términos de esfuerzos totales y esfuerzos efectivos.

Así mismo, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) afirma: “Con este método de prueba se obtendrá el esfuerzo total, el esfuerzo efectivo y la presión de agua de los poros, así como también datos útiles para determinar las propiedades de esfuerzo y deformación del suelo como la envolvente de esfuerzos de Morh y el módulo de Young” (2017).

Como se apreció anteriormente, este ensayo es un poco más lento que la prueba UU, ya que requiere que la muestra de suelo se consolide. Por ello, a continuación se presenta el proceso de consolidación para llevar a cabo con el equipo triaxial estudiado en esta guía metodológica:

Después del montaje de la muestra, en este tipo de ensayo triaxial es indispensable realizar la fase de saturación (seguir las recomendaciones que establece el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) explicado en el ítem “Etapa de saturación del espécimen” de este capítulo), debido a que en esta prueba, como se explicó anteriormente, ocurre el proceso de consolidación.

Una vez comprobado el parámetro B de Skempton y que haya cumplido con el valor recomendado, se procede a realizar la fase de consolidación aplicando el esfuerzo hidrostático o de confinamiento y el de contrapresión. Se debe tener en cuenta, que en esta fase se debe llevar un registro de cambio de volumen; lea las recomendaciones realizadas en el ítem “**5.1.1.2.15 Medición del cambio de volumen: método análogo o digital**” anteriormente expuesto. Así mismo, se debe escoger la opción consolidado no drenado, explicado en el ítem: “**5.1.1.2.11 Software Pinzuar**” de este capítulo.

Siga los pasos descritos a continuación para iniciar el ensayo explicado:

1. Registre la presión en cámara (esfuerzo principal menor σ_3) para el proceso de consolidación en el control automático.
2. Incrementar la presión con la perilla de aplicación de presión para cámara. Recuerde que ya se encontraba una presión aplicada debido a la fase de saturación.
3. Registrar en el control automático y aplicar la presión en cabezal. Esto es opcional según sean las condiciones de drenaje para la consolidación de la muestra.
4. Asegurarse de estar en posición correcta las válvulas para la medición del cambio de volumen.
5. colocar en 0 el registro del cambio de volumen digital en el software, dando clic en el 0 de esta opción de la ventana grafica (ver Figura 169).
6. Dar clic en el botón “INICIAR”

Antes de realizar el paso 6, anteriormente descrito, lea atentamente las siguientes observaciones:

- a. Después de dar clic en “INICIAR”, El software automáticamente, mostrará una ventana grafica que preguntará si desea revisar el parámetro B (ver Figura 170). Lo cual es opcional, ya que antes de empezar el ensayo, se realizó esta fase y se revisó dicho parámetro. Luego de esta ventana, aparecerá otra que indica si desea iniciar la consolidación (ver Figura 171), se aceptará dando clic en SI.
- b. Recuerde que al momento de aplicar las presiones tanto en cámara como la contrapresión, su diferencia debe dar como resultado el esfuerzo de consolidación efectivo para dicha prueba.

c. Para que este proceso de consolidación ocurra se debe drenar la muestra. Es por ello que existen dos maneras de realizar este proceso según sean las condiciones en campo:

- Drenaje un solo sentido: se permite el drenaje ya sea por el cabezal o por poros (ver Figura 172 y Figura 173).
- Drenaje doble sentido: se permite el drenaje por cabezal y por poros (ver Figura 174).



Figura 169. Cero para el registro del cambio de volumen

Fuente: Autor, 2018.

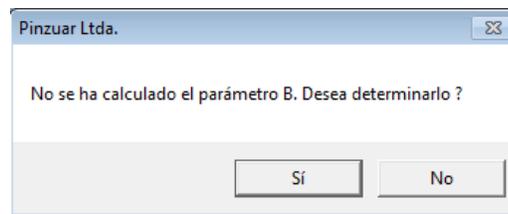


Figura 170. Ventana grafica de pregunta para el cálculo de parámetro B

Fuente: Autor, 2018.

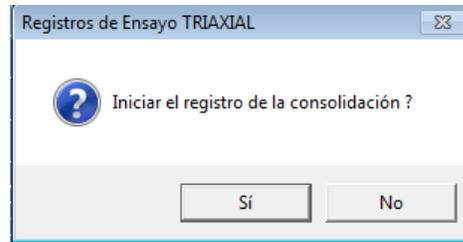


Figura 171. Ventana grafica de pregunta para el inicio de la consolidación

Fuente: Autor, 2018.

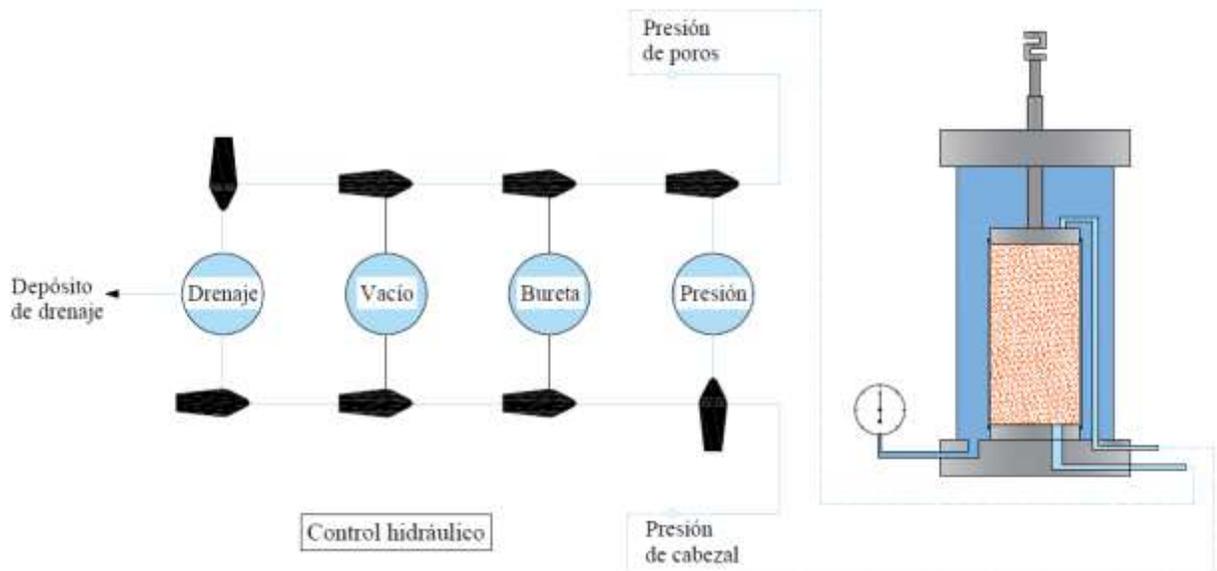


Figura 172. Esquema de flujo para drenaje por poros

Fuente: Autor, 2018.

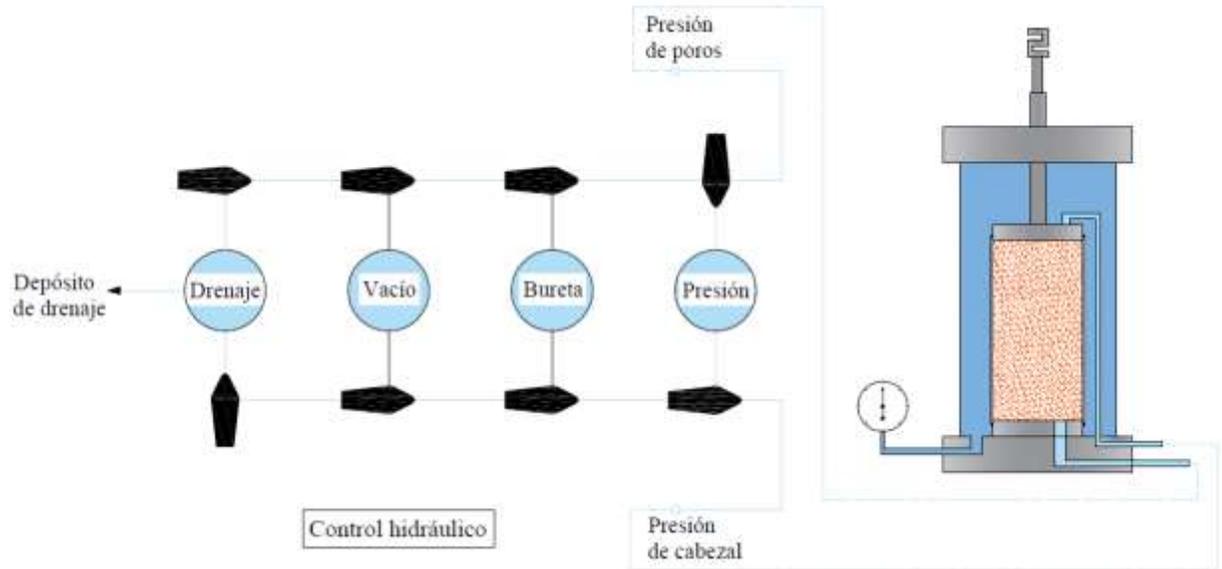


Figura 173. Esquema de flujo para drenaje por cabezal

Fuente: Autor, 2018.

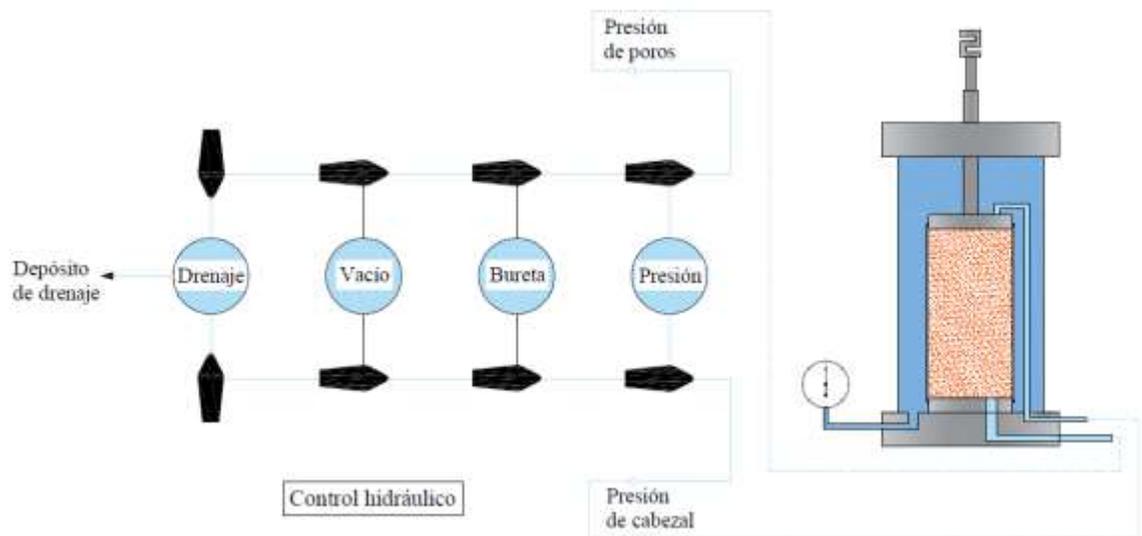


Figura 174. Esquema de flujo para drenaje por poros y cabezal

Fuente: Autor, 2018.

7. Al momento de empezar el registro de la consolidación se debe(n) abrir la(s) válvula(s) para el drenaje respectivo. El software, registrará automáticamente los cambios de volumen del espécimen si se activa el cambio de volumen digital (Bypass) o mediante el sistema de medición análoga (bureta).

Este proceso de consolidación, se deberá registrar en los intervalos de tiempo 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, y 30 minutos y a las 1, 2, 4, y 8 horas o más (o menos) tiempo si es requerido, hasta alcanzar el 100% de la consolidación más un ciclo del logaritmo del tiempo, se registrarán las lecturas de la bureta. Adicionalmente se deberá obtener el tiempo necesario para obtener el 50% de la consolidación primaria (t_{50}) (INVIAS, I. N., 2007).

Como se menciona anteriormente en la norma de INVIAS sobre los intervalos de tiempo para la consolidación, ya viene programado en el software, registrando los cambios de volumen con el respecto tiempo en la plantilla de Excel. En la Figura 165 se puede apreciar dicho registro. Y una vez terminado esta fase, procede la de rotura.

Para el inicio de esta fase, el software presenta un problema de programación, por lo se debe terminar el ensayo y realizarla en el tipo de ensayo UU. Para esto se debe seguir todos los pasos descritos en el sub ítem “Ensayo triaxial: No consolidado no drenado” de este ítem en curso.

Nota: Recuerde registrar los datos del ensayo con los mismos digitados en la consolidación, pero solo se debe cambiar algunos caracteres para identificar cual es el ensayo de consolidación y el otro de rotura o fase de corte.

5.1.1.2.20.3 *Ensayo triaxial: Consolidado drenado (CD)*

La característica fundamental de la prueba es que los esfuerzos aplicados al espécimen son efectivos. Primeramente se aplica al suelo una presión hidrostática, manteniendo abierta la válvula de comunicación con la bureta y dejando transcurrir el tiempo necesario para que haya consolidación completa bajo la presión actuante. Cuando el equilibrio estático interno se haya restablecido, todas las fuerzas exteriores estarán actuando sobre la fase sólida del suelo, es decir, producen esfuerzos efectivos, en tanto que los esfuerzos neutrales en el agua corresponden a la condición hidrostática. La muestra se lleva a la falla a continuación aplicando la carga axial en pequeños incrementos, cada uno de los cuales se mantiene el tiempo necesario para que la presión en el agua, en exceso de la hidrostática, se reduzca a cero.

Los ensayos consolidados drenados se utilizan esencialmente en suelos granulares (arenas), sin embargo, se puede aplicar en suelos finos, pero los ensayos requieren tiempos prolongados del orden de semanas (Salas, 2011). La velocidad de ensayo debe ser tal, que las fluctuaciones en la presión de poros sean despreciables y en cualquier caso, que no sean superiores al 5% de la presión efectiva de confinamiento (Suárez, s.f.).

Paralelo a lo anterior, Geotechnical Engineering Office afirma que: “los ensayos drenados generalmente son preferidos para los ensayos rutinarios, debido a la facilidad de su ejecución y son los más utilizados para el análisis de laderas y taludes” (1979).

La realización de este ensayo, es igual que el explicado en el sub ítem anterior; el ensayo consolidado no drenado, pero con una diferencia en la fase de falla. Se debe realizar un cambio en las válvulas de drenaje, ya que en la fase de rotura si hay drenaje de la muestra.

Después de realizar la consolidación de la muestra de suelo, y pasar el ensayo a modo UU como lo requiere el software, las válvulas de drenaje se deben abrir de acuerdo a las condiciones in situ. Ya sea drenaje por poros (ver Figura 175), drenaje por cabezal (ver Figura 176) o drenaje por poros y cabezal (ver Figura 174).

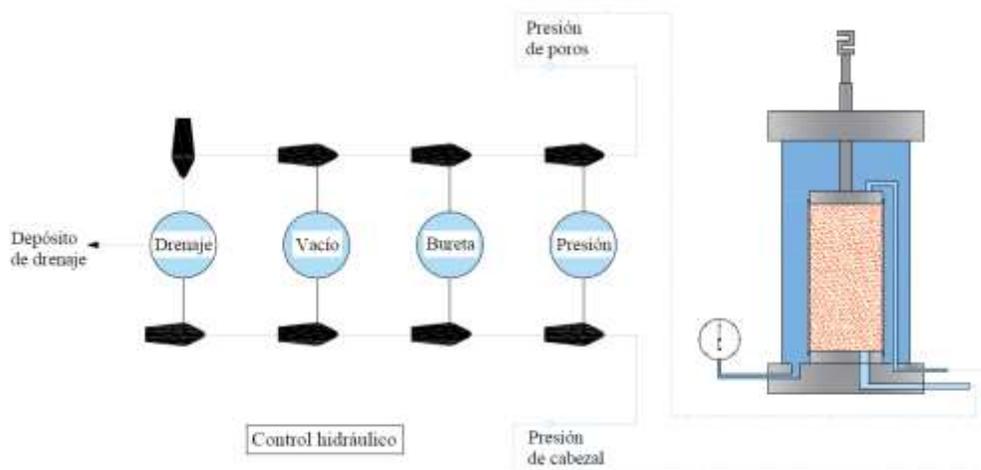


Figura 175. Drenaje por poros en fase de rotura

Fuente: Autor, 2018.

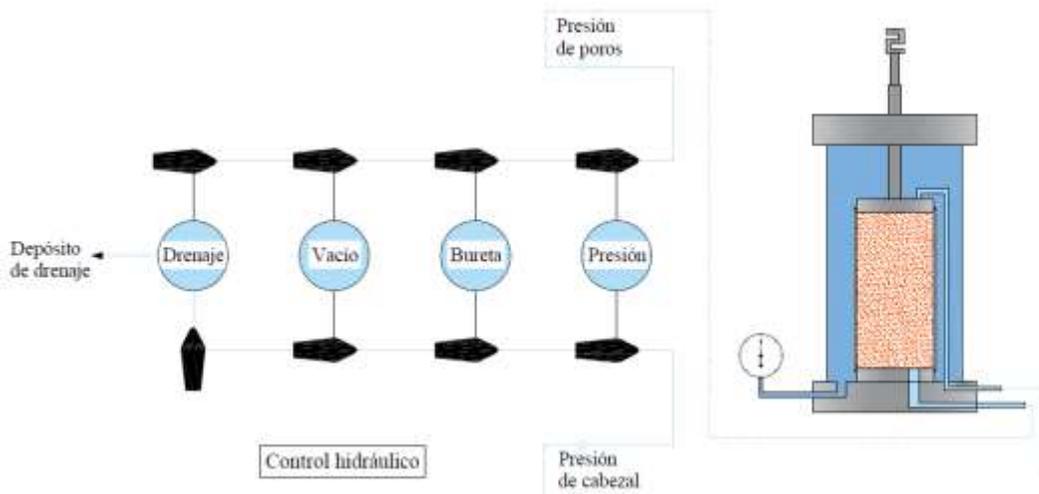


Figura 176. Drenaje por cabezal en fase de rotura

Fuente: Autor, 2018.

5.1.1.3 Crear la guía metodológica para el desarrollo del ensayo Triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

Este objetivo comprende las bases del estudio del estado del arte, para el desarrollo de los dos primeros objetivos llamados: “Plantear el marco conceptual basándose en el desarrollo del ensayo Triaxial para la guía metodológica” y “Establecer el funcionamiento de cada una de las partes de la maquina Triaxial y construir los procedimientos detallados para la realización eficaz del ensayo Triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña”. Gracias a la investigación realizada en documentos científicos también se incluyó en la guía metodológica, en su capítulo 3, el manejo adecuado de las muestras de suelo y como se obtienen a partir de diferentes técnicas en campo. Así mismo, para la obtención de información, análisis de las partes del equipo triaxial y descripción del mismo, fue sumamente importante asistir al laboratorio y realizar los diferentes tipos de ensayos triaxiales. Como también la preparación de las muestras de manera alterada, por medio el ensayo de compactación, para establecer los procedimientos necesarios para la realización de los mismos.

La guía metodológica se puede encontrar en el apéndice A de este documento.

5.1.1.3.1 Estructuración de la guía metodológica

Inicialmente, la guía metodológica habla de los antecedentes históricos, en su primer capítulo. Después, abarca todos los conceptos, teorías y fundamentos descritos en el primer objetivo y, como parte final de éste (Capitulo 1 de la guía metodológica), las normas nacionales e internacionales que rigen el ensayo triaxial.

La estructura del capítulo 1 de la guía metodológica llamado: “*Generalidades*” quedó de la siguiente manera:

Capítulo 1: Generalidades

- Antecedentes Históricos
- Conceptos relacionados con el ensayo triaxial
- Teorías relacionadas con el ensayo triaxial
- Normas que rigen el ensayo triaxial

Avanzando en la guía, exactamente en el capítulo 2, describe de manera detalla todos los componentes y partes de equipo triaxial, incluyendo su funcionamiento. Este capítulo es muy importante estudiarlo y comprenderlo antes de iniciar cualquier manipulación del equipo triaxial, debido a que en él se especifican de manera adecuada, cada procedimiento para la realización de todos los procesos llevados a cabo antes, durante y después de un ensayo triaxial. Toda la información presente en este capítulo, es la descrita en el segundo objetivo, y parte de ella, está contenida en el capítulo 2 y 4 de la guía metodológica.

La estructura para este segundo capítulo de la guía metodológica llamado: “*Generalidades de la máquina triaxial*”, quedó de la siguiente manera:

Capítulo 2: Generalidades de la maquina triaxial

- Recomendaciones generales
- Precauciones de seguridad
- Información de uso y riesgo
- Equipo triaxial

- Computador
- Máquina de ensayos
- Celda triaxial
- Unidad triaxial automática
- Unidad de cambio de volumen automático

Como se habló anteriormente, en el capítulo 3 de la guía metodológica se describió las muestras de suelo para un ensayo triaxial y su preparación u obtención. Dicho capítulo llamado: “*Muestras de suelo*”, quedó estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 3: Muestras de suelo

- Tipos de muestras
- Compactación de los suelos
- Reconstitución de muestras de grano fino granular en el laboratorio
- Técnicas de muestreo para muestras inalteradas

Para el último capítulo de la guía metodológica llamado: “*Ensayos triaxiales*”, el cual se describe en el segundo objetivo, se pueden apreciar los procedimientos de ejecución de los ensayos triaxiales: **UU** (no consolidado no drenado), **CU** (consolidado no drenado) y **CD** (consolidado drenado). Su estructura es la siguiente:

Capítulo 4: Ensayos triaxiales

- Preliminares: en este ítem se describe cada uno de los procesos y procedimientos a realizar antes de cada ensayo triaxial
- Desarrollo de los diferentes tipos de ensayos triaxiales

5.1.1.3.2 Guía rápida para el ensayo triaxial

Para facilitar la información más relevante de ejecución de los diferentes tipos de ensayos triaxiales, se creó una guía rápida (guía o manual de bolsillo, llamada comúnmente); abarca de manera más general los capítulos 1 y 4 de la guía metodológica. Cabe aclarar que esta guía busca esclarecer dudas antes, durante o después de un ensayo de manera más práctica y ágil. Es importante que para entenderla, se deba estudiar previamente la guía metodológica propuesta anteriormente. Se puede encontrar en el Apéndice B de este documento.

La estructura de la guía rápida queda de la siguiente manera:

Guía rápida para el ensayo triaxial

- Introducción
- Descripción de los ensayos triaxiales
- Tipos de ensayos triaxiales
- Equipo y materiales necesarios
- Preparación de la muestra
- Procedimiento de ensayo

5.1.2 Particularidades del funcionamiento del equipo triaxial

5.1.2.1 Ejecución de ensayos: Consolidado No drenado (CU) y Consolidado drenado (CD)

Para la ejecución de los ensayos consolidado no drenado (CU) y consolidado drenado (CD) se presentan un inconveniente y es al pasar de una etapa a otra en el proceso de ejecución del mismo. Durante la fase de consolidación, el software toma bien las lecturas de cambio de volumen y, una vez ya termine esta fase no hay manera de pasar a la fase de rotura.

Al dar clic en detener ensayo, éste automáticamente lo termina. Lo que conlleva a iniciar otro ensayo aunque no ocurra la fase de rotura de este que se llevaba en curso.

La solución a este problema se encuentra especificado en la guía metodológica en la ejecución para estos ensayos (Capítulo 4: ensayos triaxiales).

5.1.2.2 Máquina de ensayos

Al encender la máquina de ensayos, en su pantalla, de manera automática, debería mostrar los parámetros de medición para los que se encuentra programada. Pero al momento de su activación (encendido) no mostraba lo anteriormente indicado, lo que era necesario esperar un tiempo prudencial. Al inicio de este proyecto de grado, el tiempo solía encontrarse entre 30 a 40 minutos, pero después de un período de estar realizando ensayos ya sobrepasaba dicho tiempo las dos horas o más.

5.1.3 Recomendaciones durante el desarrollo del ensayo

5.1.3.1 Líneas de agua a presión

Las tuberías que conducen el agua a cada uno de los diferentes componentes (equipo de medición de cambio de volumen digital, celda triaxial y unidad triaxial automática) se encuentren debidamente purgadas, es decir, que se hayan evacuado todas las burbujas de aire dentro del sistema, para que no se generen vacíos que afecten tanto la muestra como la generación de las lecturas de los equipos erróneas. Incluso para la unidad de medición de cambio de volumen digital y análogo y conductos de presión de poros y cabezal es conveniente la aplicación de presiones iniciales para así ayudar a eliminar la presencia de burbujas.

5.1.3.2 Magnitudes de presión en 0 (cero)

Las diferentes presiones, como cámara, cabezal y poros, es importante que su magnitud se encuentren en un valor igual a 0 (cero) en las pantallas de medición para estos parámetros (computador y unidad triaxial automática), antes de iniciar la aplicación de presiones según sea las condiciones para las diferentes etapas del ensayo triaxial. Así mismo, colocar en 0 la lectura inicial del cambio de volumen digital, que se encuentra en la ventana grafica del software.

Este proceso es muy importante realizarlo para evitar magnitudes erróneas durante cualquier ensayo triaxial y obtener parámetros de resistencia desfasados.

5.1.3.3 Verificación de la saturación en las muestras de suelo

Si la prueba lo amerita, se requerirá como etapa inicial (así se haya realizado ya este procedimiento), la verificación de la saturación de la muestra de suelo antes de iniciar el ensayo. Es importante tener claro las presiones a aplicar, tanto de confinamiento como de contrapresión,

parámetros que se ven reflejados directamente en la presión de poros de la muestra. Esto con el fin de no incurrir en errores en el cálculo del parámetro B de Skempton.

Es conveniente considerar y valorar la opción de la saturación de las muestras en la prueba no consolidada no drenada, especialmente si se está al frente de suelos tropicales.

5.1.3.4 Aplicación de presiones

Es importante tener especial cuidado de concentrar y medir las presiones requeridas, ya sean la presión de cámara como cabezal y poros, en la unidad triaxial automática y luego transferirlas a la muestra de suelo de forma gradual, para que ésta se altere lo menos posible.

Así mismo, es importante que durante el proceso de saturación, consolidación o rotura, la presión de cámara este por encima a la presión de cabezal. Este rango de diferencia se debe establecer debidamente antes de iniciar cualquier ensayo triaxial.

5.1.3.5 Muestras de suelo

Una manipulación adecuada de las muestras, mínimo contacto con las mismas, tanto en su moldeo o remoldeo como en su colocación en la celda triaxial, y una prevención extrema en la pérdida de humedad de las mismas, son fundamentales como punto de partida para un óptimo desempeño del ensayo a ejecutar.

5.1.3.6 Velocidad de aplicación de carga axial

En los proyectos de ingeniería es muy importante conocer la velocidad con la que se aplican las cargas, cuál será el comportamiento del suelo ante estas, pero es tal vez más

importante conocer cuál es la respuesta del suelo cuando se varían las velocidades de aplicación de dicha carga (Builes-Brand, 2014).

Si se realiza a una muy velocidad muy alta de aplicación de carga axial en la etapa de rotura durante un ensayo consolidado drenado no se permite la disipación de la presión de poros.

La carga axial que se deberá aplicar a la muestra suelo será aquella que tenga una velocidad de deformación tal que proporcione una estabilización de las presiones de poros. Si se asume que la falla ocurre después del 4% de la deformación axial, una velocidad de deformación de ensayo, se puede determinar con la siguiente ecuación 31:

$$\varepsilon' = \frac{4\%}{10t_{50}} \quad (31)$$

Donde

ε' = velocidad de deformación

t_{50} = tiempo necesario para obtener el 50% de la consolidación primaria

Si la falla se estima que se obtiene un valor más bajo que el 4%, se reemplaza este valor por el estimado en la ecuación anterior (INVIAS, I. N., 2007).

5.1.3.7 Rango de presiones de confinamiento

Usualmente se aplican presiones de confinamiento mucho más altas de las que actúan “in situ” (sobre todo, en el caso del estudio de posibles deslizamientos a poca profundidad), dado que la envolvente de rotura presenta una cierta curvatura, normalmente se tiende a sobre estimar el valor de C' e infravalorar el valor de ϕ' (Lloret, 1989).

Como se aprecia en la referencia anterior, se recomienda realizar un análisis geotécnico minucioso al suelo en estudio para determinar las presiones a las que será sometido en el ensayo triaxial de acuerdo a este.

5.1.4 Cuidados con los dispositivos del equipo triaxial

5.1.4.1 Unidad triaxial automática

Este componente del equipo triaxial es el más importante y fundamental para la aplicación de esfuerzos a la muestra de suelo. En su interior se encuentran los conductos que conducen el agua desde el tanque de almacenamiento hasta la celda triaxial, pasando por una serie de conexiones a válvulas, el cual permiten llevar la presión a su destino final, que para este caso es la muestra de suelo. Además de estos conductos, el en interior de la unidad triaxial automática también posee circuitos integrados y conexiones eléctricas para la medición en tiempo real de las presiones que posee la muestra en cámara, cabezal y poros.

De acuerdo con lo anterior, es sumamente importante el correcto manejo de la unidad triaxial automática mientras se realiza el montaje de la muestra y en cada una de las etapas del ensayo triaxial. En el capítulo 2 de la guía metodológica, se hace énfasis en el cuidado de la aplicación de presiones y la posición de las válvulas para brindar la seguridad y cuidado de la máquina y del personal que lo está operando.

Una de las descripciones realizadas y de mayor precaución, es acerca de las válvulas que dirigen el flujo de agua por los conductos, desde el tanque hacia la distribución hidráulica. Estas válvulas nunca se deben encontrar cerradas, ya que al momento de aplicar cualquier presión con la perillas correspondiente para esta función puede generar rotura de los conductos y, por lo

tanto, crear expulsiones de agua de forma descontrolada alterando todos los componentes internos de la unidad triaxial automática, en especial lo que funcionan con electricidad.

Por tal motivo, se recomienda leer atentamente todas las indicaciones contempladas en el capítulo 2 de la guía para evitar este tipo de emergencias.

5.1.4.2 Celda triaxial

La celda triaxial siempre debe limpiarse después de realizar cualquier tipo de ensayo, esto con el fin de preservarla. Por ello, la pared celular sólo debe limpiarse con jabón y agua o una solución de detergente suave seguido de lavado adecuado.

Si la celda se deja sin utilizar durante largos períodos de tiempo se debe verificar que cada una de sus partes se encuentre en óptimas condiciones e igualmente hacer una limpieza respectiva. También debe permanecer el pistón a su posición más baja para evitar que la grasa utilizada a manera de lubricación quede expuesta a suciedad.

5.1.4.3 Buretas

Al momento de utilizar estos sistemas de medición tubulares, se deben dejar sin contenido de agua después de cualquier tipo de ensayo triaxial. Esta evacuación es una medida prevención para cualquier generación de hongos dentro de las mismas y evitar obstrucción en los conductos que llevan su flujo de agua para medición de sus funciones.

La evacuación del agua se realiza por medio de la manipulación de las sus válvulas en la distribución hidráulica y el movimientos de las perillas de aplicación de carga (descrito en el capítulo 4 de la guía metodológica).

5.1.4.4 Bomba de vacíos

Cuando se requiera utilizar la bomba de vacíos para la aplicación de presión negativa tanto al tanque de agua como a la membrana de látex para su colocación, se debe asegurar primero, antes de su encendido, que el conducto que va desde la unidad triaxial automática hacia la misma, se encuentre sin contenido de agua. Cualquier introducción de agua dentro de la bomba puede alterar su funcionamiento.

Para la aplicación de vacíos al tanque de agua, primero se debe asegurar que las válvulas que dirigen el flujo de éste hacia la distribución hidráulica se encuentre cerrada, para luego proceder a la realización de la extracción de las burbujas de aire contenida en el agua almacenada.

5.2 Limitantes

El proceso de saturación de las muestras de suelo es un fase de mucho cuidado en su ejecución y verificación, siendo el parámetro B de Skempton quien nos determina la magnitud de esta relación. La saturación total de la muestra de suelo, es una condición necesaria para la realización de un ensayo triaxial (opción para el ensayo UU). Por ello, es indispensable realizarla siguiendo las recomendaciones de las normas que rigen este tipo de ensayos para los laboratorios de suelos.

De acuerdo con lo anterior, el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), dentro de sus normas, y la específica para el ensayo triaxial (Norma INV E-153-07) llamada: “**PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO MEDIANTE COMPRESIÓN TRIAXIAL**”, establece dos métodos de aplicación para el proceso de saturación de las muestras de suelo: “*Inicio de la*

saturación con el método de inicio de ensayo seco ” y “Inicio de la saturación con el método de inicio de ensayo saturado”.

Los dos anteriores s de saturación no se pudieron establecer como procedimientos para la guía metodológica. Su causa principalmente radica en:

- Para el método “*Inicio de la saturación con el método de inicio de ensayo seco*” se tienen que manejar presiones negativas a la muestra de suelo, por lo que la máquina triaxial que cuenta el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, no tenía las funciones necesarias para suministrar dicha presión de manera controlada. Al momento de encender la bomba de vacíos y abrir el paso de la presión negativa con su válvula correspondiente, ésta llegaba directamente a la muestra, alterando su estructura. Así mismo, dentro del sistema hidráulico de la unidad triaxial automática se encuentra con agua, era de atención especial que no le llegara líquido a la bomba de vacíos. Concluyendo que para este método de saturación no fue apto su aplicación.
- Para el método “*Inicio de la saturación con el método de inicio de ensayo saturado*”, por su parte, presentó inconvenientes en el control automático de presiones, exactamente el de la presión en el cabezal. El problema se presenta cuando se le suministra a la muestra una presión constante por el extremo del cabezal y se deja la válvula de drenaje abierta por poros, y esto para la unidad triaxial automática en su control automático de presiones le es de trabajo continuo mantenerla estable, por lo que siempre se encontrará encendida, administrando presión a la muestra. Si se deja un tiempo prudencial entre 1 a 3 horas, el control

automático se apaga debido a que se activa el interruptor de seguridad de la perilla de aplicación de presión.

Concluyendo, como parte de pruebas en el laboratorio a diferentes muestras y la aplicación de los anteriores procesos de saturación descritos, se determinó la manera más práctica y segura de aplicar presiones a la muestra sin que ésta se altere, logrando la saturación de la misma. Estableciéndose el proceso en la guía metodológica, descrito en su Capítulo 4, subcapítulo: *“etapa de saturación del espécimen”* y en la guía rápida.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

Muchos parámetros del suelo tienen influencia en la resistencia al corte, como el tamaño del grano, distribución granulométrica, humedad, historia de tensiones, velocidad de ensayo, tamaño de la muestra (Kramer y Rizkallah, 1976), sin embargo otros investigadores han encontrado que el equipo utilizado e inclusive al personal involucrado en la toma y ensayo de la muestra de suelo, tienen un efecto considerable en los resultados (Shibuya, Mitachi y Tamate, 1997, Stoewahse, 2001); así el resultado de un ensayo de una muestra de suelo será la combinación de una serie de eventos como el tipo de suelo y el equipo utilizado. Son tantas las variables que se ven involucradas en la medición de la resistencia cortante en suelos que no hay consenso sobre una en especial (Rowe, 1969).

Las investigaciones en el campo de la mecánica de los suelos, se han concentrado en gran manera en el comportamiento y respuesta de los suelos sometidos a presiones, respondiendo al rango de presiones usualmente presentes en los problemas de la ingeniería geotécnica y, dado que los suelos producen fallas por esfuerzos de corte, su comportamiento es más complejo que otros elementos como el acero o el concreto donde prevalecen los esfuerzos normales. Debido a estos estudios, los ensayos más comunes utilizados para la medición de los parámetros de resistencia al corte de los suelos en laboratorio son el ensayo triaxial y el de corte directo y, en campo, las correlaciones obtenidas del ensayo SPT, siendo el primero el más confiable y de mayor simulación a las condiciones reales del sitio en estudio.

Paralelo a lo anterior, este ensayo no solamente brinda información acerca de los parámetros de resistencia del suelo, sino también propiedades hidráulicas, como lo es la medición del parámetro de permeabilidad; propiedades de consolidación, analizando y calculando el coeficiente de consolidación C_v ; propiedades para el estudio del empuje de tierras, como lo es el coeficiente de empuje pasivo K_0 y por último, datos de esfuerzo-deformación en términos de esfuerzos efectivos y/o totales.

Por otro lado, gracias a las investigaciones realizadas acerca de las teorías involucradas en el ensayo triaxial, se logró comprender como este ensayo, realizado de manera apropiada nos brinda la información necesaria para analizar y diseñar estructuras de carácter civil, como por ejemplo, la cimentaciones superficiales y profundas en relación a la capacidad de soporte del suelo y, además, del estudio de la estabilidad de un talud. Siendo así, como resultado propio de este proyecto de grado y cuyo fin de los objetivos del mismo, se estableció el marco referencial, abarcando toda la información necesaria para conocimiento del ensayo, además de su creación, evolución y mejora continua en el tiempo.

Como resultado de las visitas al laboratorio y la realización de numerosos ensayos triaxiales, se logró comprender el funcionamiento del equipo triaxial, aplicando los conceptos, teorías y fundamentos realizado gracias a la investigación anteriormente mencionada. Con base en esto, se pudo plasmar, detallar, describir y mostrar cada una de las partes, componentes y herramientas del equipo, para dar cumplimiento al segundo objetivo específico y generando gran parte del contenido de la guía metodológica y guía rápida para el desarrollo del mismo en el laboratorio. Cabe resaltar que gracias a los ensayos efectuados en el tiempo de preparación de este proyecto de grado, se logró entender todo la distribución hidráulica para el suministro de presiones a la muestra de suelo y

recrearlo mediante gráficos o esquemas, para facilitar los procesos descritos en cuanto a la realización de los ensayos triaxiales en sus diferentes fases y preparaciones preliminares de las muestras.

El suelo, como afirman Reyes, Camacho y Morantes (2003):“Puede considerarse como el material más comúnmente utilizado en ingeniería civil, puesto que en toda obra éste intervine como material de fundación o como material de construcción”. Partiendo de esta definición, es importante establecer los métodos de obtención de muestras de suelo para no alterar su composición y estructura. Además, diversos autores sugieren que el proceso de extracción y la reconstitución de muestras inciden de manera notable en los resultados obtenidos en los ensayos. Por ello, en la guía metodológica se incluyó, de manera general, las técnicas de muestreo y de reconstitución de muestras en el laboratorio, aptas para su estudio y requeridas en el ensayo triaxial.

Otro aspecto importante a resaltar del ensayo triaxial es que permite aplicar tanto deformaciones como esfuerzos controlados; el primero, gracias al sistema de aplicación de carga de forma motorizada el cual permite deformar la muestra de suelo verticalmente a una velocidad constante, el segundo, por permitir deformar libremente la muestra bajo la aplicación de cargas gracias al pistón de carga vertical. Así mismo, otra característica importante es que permite la eliminación de esfuerzos cortantes en los extremos superior e inferior de la muestra, y puesto que entre el agua de la cámara y la superficie vertical de la misma no se generan esfuerzos cortantes, el esfuerzo axial y la presión de cámara son los esfuerzos principales. Bajo estas condiciones del ensayo triaxial, el esfuerzo principal mayor σ_1 es el esfuerzo axial, y el esfuerzo principal menor

σ_3 , es igual a la presión de cámara. Por supuesto esta actúa no solo en la superficie vertical de la muestra, sino también en sus bases.

Como complemento de lo anterior, es resaltar la fase de consolidación que realiza el ensayo triaxial en dos de sus tres tipos diferentes: Consolidado no drenado y consolidado drenado. Gracias al primero, se puede simular las condiciones si el tiempo de construcción de una obra civil se extiende por largo tiempo, como por ejemplo, en el caso de una presa de tierra, es razonable suponer que al final de la construcción ya se abra producido algún grado de consolidación. Si en este momento los esfuerzos cortantes se generan en el suelo tiene la magnitud suficiente para producir la falla, ésta se produciría rápidamente sin drenaje adicional. Para el ensayo consolidado drenado sucede algo similar pero cambia en las bases de la construcción en el campo, debido a que puede encontrarse sobre un depósito de arena o grava, la falla potencial se produciría en condiciones drenadas.

Por último y para concluir, la realización de la guía metodológica en base al ensayo triaxial en laboratorio, no solo aporta conocimientos teóricos al lector, sino recomendaciones precisas en cuanto al manejo del equipo, brindando la información más relevante e importante para entender el comportamiento del suelo en cada una de sus fases. Además, gracias al equipo triaxial con que cuenta la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, permite gran versatilidad en los ensayo, simular las condiciones en campo a las que se encuentra el suelo sometido a esfuerzos y, así mismo, aplicación de diferentes condiciones en el estudio de los suelos para la ingeniería Geotécnica.

CAPÍTULO 7: Recomendaciones

Teniendo en cuenta que el software para el desarrollo del ensayo triaxial, puede ser actualizado en un futuro esto implicaría que la guía metodológica completa y la guía rápida deberán igualmente actualizarse para estar acorde a los procedimientos que describa el software.

Siendo este proyecto de grado un primer aporte al laboratorio de suelos y pavimentos en relación al ensayo triaxial, se recomienda investigar los suelos de Ocaña en todos los aspectos que este ensayo puede brindar para el análisis y estudio de los mismos.

Para el desarrollo de proyectos de grado futuros, se recomienda investigar sobre la aplicabilidad de ensayos triaxiales en arenas, realizando las adaptaciones o modificaciones al equipo triaxial (especialmente al pedestal de la celda triaxial para procesos de compactación) necesarias para la reconstituciones de las muestras.

Realizar números ensayos triaxiales a diferentes muestras de suelo, obtener sus parámetros de resistencia y, compararlos con los datos obtenidos del ensayo de corte directo y, si es posible extender la investigación, con correlaciones obtenidas de ensayos de SPT y realizar los respectivos análisis.

Tanto la guía metodológica y la guía rápida sean de gran ayuda como base teórica, científica y metodológica para las futuras adquisiciones de equipos de laboratorio de suelos de la universidad y sea necesaria la implementación de manuales para su manejo.

Referencias

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de construcción sísmo resistente NRS-10*. Colombia: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.
- ASTM, I. (2002). *Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) (D 698)*. West Conshohocken: Annual Book of ASTM Standards.
- Berry, P., & Reid, D. (1996). *Mecánica de suelos*. McGraw-Hill Companies.
- Botía, W. Á. (2015). *MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE ENSAYOS DE SUELOS Y MEMORIA DE CÁLCULO*. Bogotá: UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations*. New Delhi: Wiley John Wiley & Sons.
- Builes-Brand, M. A. (enero-junio de 2014). Incidencia de la velocidad de aplicación de carga en la resistencia al corte no drenado de suelos residuales de anfibolita en el Valle de San Nicolás, Antioquia (Colombia). *Revista EIA*, 11(21), 89-97. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.21.89-97>
- Camacho, J. F., Molina, F. A., & Reyes, O. J. (2014). Preparación de especímenes de arena para ensayos triaxiales mediante un método controlado de compactación. *Rev. Cient. Gen. José María Córdova*, 185-196.
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa.
- Das, B. (2001). *Principio de Ingeniería de Cimentaciones* (Cuarta edición ed.). New York: International Thomson Editores S.A.
- Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México: Cengage Learning Editores, S.A.
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Thomson Learning.
- Duncan, J., & Wright, S. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.
- Fatherree, B. (26 de Febrero de 2012). Historia de la Geotecnia: El Ascenso de la Geotecnia en 1936. *Waterways Experiment Station*. Obtenido de <http://geotecnia-sor.blogspot.com.co/2012/02/historia-de-la-geotecnia-el-ascenso-de.html>
- Fell, R., & Jeffery, R. (1987). *Determination of drained shear strength for slope stability analysis*. Balkema: Soil Slope instability and stabilisation, Walker & Fell (eds).
- Freundlund, D., & Rehardjo, H. (January de 1987). Soil mechanics principles for highway engineering in arid regions". In *Soil Mechanics Considerations: Arid and Semiarid Areas*. (C. A2L06TRB, Ed.) 1(11).
- Frost, J., & Park, J. Y. (2003). A Critical Assessment of the Moist Tamping Technique. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 57-70. doi:10.1520/GTJ11108J
- INVIAS, I. N. (2007). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. INV ARTÍCULO 153 - 07. Parámetros de resistencia de suelo mediante compresión triaxial.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de Suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos* (Vol. Tomo 1). México: Limusa.
- Juarez, E., & Rico, A. (1973). *Mecánica de suelos*. Ciudad de México: LIMUSA.
- Kramer, U., & Rizkallah, V. (1976). *Experiences with the Determination of Shear Parameters in the Shear Box Device*. Eigenverlag, Hannover, German: Mitteilungen Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau und Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Hannover.

- Ladd, R. S. (1978). Preparing Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 16-23.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- Lloret, A. (1989). Propiedades y ensayos de suelos y rocas. En J. Corominas, *Estabilidad de taludes y laderas naturales. Monografía No. 3* (págs. 31-79). Barcelona : SOCIEDAD ESPAÑOLA DE GEOMORFOLOGIA.
- Martínez, C., & Sepúlveda, J. (2017). *DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DINÁMICOS EN LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA FORMACIÓN ALGODONAL EN OCAÑA NORTE DE SANTANDER MEDIANTE MÉTODOS GEOFÍSICOS*. Ocaña: Universidad Francisco De Paula Sander Ocaña.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley & Sons.
- Polito, C. P. (1999). *The Effects of Non-Plastic and Plastic Fines on the Liquefaction of Sandy Soils. (Disertación doctoral)*. De la base de datos de la Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State (13275).
- Restrepo, R., Tellez, O. J., & Tribín, J. C. (s.f.). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ENSAMBLE DE UN EQUIPO PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN TRIAXIAL DIDÁCTICO EN MUESTRAS DE SUELO DE PEQUEÑAS DIMENSIONES*. Universidad Piloto de Colombia.
- Reyes, Ó., Camacho, J., & Morantes, I. (2003). La teoría del estado crítico como herramienta para la interpretación de ensayos triaxiales en suelo cohesivos. *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31-39.
- Rico Rodriguez, A., & Del Castillo, H. (1976). *La ingeniería de los suelos en la vías terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas*. México: Limusa.
- Rowe, P. (1969). The Relation Between the Shear Strength of Sands in Triaxial Compression, Plane Strain and Direct Shear. *Géotechnique*.
- Salas, I. O. (2011). Ensayos triaxiales para suelos. En *Métodos y Materiales* (págs. 14-24). Costa Rica: LanammeUCR.
- Sanchez, L. F., & Pinto, E. A. (2013). *DETERMINACION DE LA CORRELACION ENTRE EL NUMERO DE GOLPES (N) DEL ENSAYO DE PENETRACION ESTANDAR (SPT), Y EL NUMERO DE GOLPES (Nc) DE LA PRUEBA DE PENETRACION DINAMICA CON EL CONO TIPO PECK (CP), CASO DE ESTUDIO, SUELOS COHESIVOS*. Ocaña, Colombia: Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- Shibuya, S., Mitachi, T., & Tamate, S. (1997). *Interpretation of Direct Shear Box Testing of Sands as Quasi-Simple Shear* (Vol. 47). *Géotechnique*.
- Skempton, A. (1954). *The pore pressure coefficients A and B*. *Geotechnique*.
- Stoewahse, C. (2001). *On the Determination of Friction Behaviour of Geotextiles and Soils in the Direct Shear Device*. Eigenverlag, Hannover, German: Dissertation Universität Hannover, Mitteilungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau.
- Suarez, J. (1998). *Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga-Colombia: Ingeniería de suelos Ltda. Obtenido de <http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/14-libro-deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales-jaime-suarez.html?download=147:229-3-esfuerzoyresistenciaalcortante>.

- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos: Análisis geotécnico* (Vol. I). Bucaramanga: Geotecnología S.A.S. Obtenido de <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>
- Terzaghi, K., & Peck, R. (1973). *MECÁNICA DE SUELOS EN LA INGENIERÍA PRÁCTICA*. New York: EL ATENEO S.A.
- Verruijt, A. (2001). *SOIL MECHANICS*. Delft University of Technology.

Apéndices

Apéndice A. Guía metodológica para el desarrollo del ensayo triaxial en el laboratorio de suelos y pavimentos de la Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña.

Apéndice B. Guía rápida para el ensayo triaxial.