

UNIVERSIDAD AMAZÓNICA DE PANDO

ÁREA DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DIRIGIDO

“MANUAL DE ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO”

Informe de Trabajo Dirigido presentado para optar al Título de Ingeniero Civil

UNIV: Wilder Mendoza Salas

TUTOR COLECTIVO: Ing. Jose Luís Richard Manrique Sanabria

ASESOR: MSc. Ing. Alfredo Escobar Arana

Cobija - Pando – Bolivia

2023

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos:

En primer lugar, agradecer a Dios, por iluminarme a lo largo de este tiempo de estudio, en especial por haberme dado perseverancia y paciencia durante la realización de este trabajo.

Te agradezco por ponerme en el camino a todas las personas que me colaboraron desinteresadamente y que fueron esenciales para culminar este triunfo.

A mis padres por darme la vida y permitirme cumplir con uno de mis sueños.

Al Ing. Alfredo Escobar Arana, por compartir sus conocimientos que me ayudaron a seguir mejorando cada día, por su experiencia como profesional en mecánica de suelos. Por su valiosa orientación y esfuerzo dedicado a la realización del presente trabajo de forma desinteresada.

Quiero agradecer a todos los docentes, compañeros y amigos que de una u otra forma nos colaboraron desinteresadamente durante la realización de este trabajo de graduación.

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso por ayudarme en cada momento que lo he necesitado, por estar ahí siempre. Te agradezco por toda la sabiduría brindada a lo largo de mi carrera y por darme respuestas positivas a todas mis peticiones.

Este trabajo está dedicado a mis padres: Domingo Mendoza Choque y Victoria Salas Ventura por darme su apoyo incondicional.

A mis hermanos, mi hijo Lucas Gael Mendoza, amigos y colegas de trabajo por el incentivo a no desfallecer en los intentos y poder cumplir con mi propósito.

RESUMEN

El Trabajo Dirigido titulado: “**MANUAL DE ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO**”, tiene como objetivo elaborar un manual de procedimientos de los ensayos de mecánica de suelos y esto dará un aporte en la preparación y conocimiento para estudiantes, docentes, técnico laboratoristas, tesis de laboratorio de mecánica de suelos de la carrera de ingeniería civil de la Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Universidad, el manual se desarrolló en base a la teoría y la práctica de los ensayos en el laboratorio y trabajo de gabinete. Los manuales de los ensayos se han realizado en base a la norma ASTM y AASHTO, manual de ensayos de mecánica de suelos, manual de funciones del personal, organigrama, cronograma de calibración de los equipos y planillas de reporte de los ensayos de laboratorio de suelos de la carrera de Ingeniería Civil. En este manual se detalla la realización de los ensayos de suelos basada en las normas, explicando de una manera clara y sencilla, el desarrollo y finalidad de cada una de las prácticas de laboratorio que involucran las diferentes asignaturas del área de suelos, mencionadas anteriormente y que requieren del desarrollo de laboratorios.

PALABRAS CLAVES: Suelos, Ensayos, Laboratorio, Calibración, Normas, Manual, Planillas.

ABSTRACT

The Directed Work entitled: " **MANUAL OF SOIL MECHANICS TESTS FOR THE CIVIL ENGINEERING CAREER OF THE AMAZON UNIVERSITY OF PANDO**", aims to develop a procedures manual for soil mechanics tests and this will provide a contribution in the preparation and knowledge for students, teachers, laboratory technicians, soil mechanics laboratory thesis students of the civil engineering career of the Faculty of Engineering and Technology of the University, the manual was developed based on the theory and practice of tests in laboratory and cabinet work. The test manuals have been carried out based on the ASTM and AASHTO standards, soil mechanics test manual, personnel functions manual, organization chart, equipment calibration schedule and report forms for soil laboratory tests. of the Civil Engineering degree. This manual details the conduct of soil tests based on the standards, explaining in a clear and simple way, the development and purpose of each of the laboratory practices that involve the different subjects of the soil area, mentioned above and that require the development of laboratories.

KEY WORDS: Soils, Tests, Laboratory, Calibration, Standards, Manual, Sheets.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	18
1.1. INTRODUCCIÓN	19
1.2. ANTECEDENTES	19
1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	21
1.4. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.5. OBJETIVOS	22
1.5.1. OBJETIVO GENERAL	22
1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.6. METODOLOGÍA	23
1.7. JUSTIFICACIÓN	23
1.8. ALCANCES	24
2. PROCEDIMIENTOS DE LOS ENSAYOS EN LABORATORIO Y EN CAMPO	25
2.1. DESCRIPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE SUELOS (PROCEDIMIENTO VISUAL Y MANUAL) (ASTM D2488)	26
2.1.1. Objetivo	26
2.1.2. Terminología	26
2.1.3. Materiales y equipos	27
2.1.4. Muestra a ensayar	27
2.1.5. Descripción informativa para suelos	28
2.1.6. Identificación de la turba	32
2.1.7. Preparación para la identificación	32
2.1.8. Identificación preliminar	33
2.1.9. Procedimiento para la identificación de suelos finos	33
2.1.10. Procedimiento para la identificación de suelos granulares	37
2.1.11. Validez del resultado	38
2.1.12. Presentación de resultados	38

2.2.	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD (ASTM D2216).....	41
2.2.1.	Resumen ejecutivo.....	41
2.2.2.	Propósito y alcance.....	41
2.2.3.	Materiales y equipos.....	41
2.2.4.	Muestra a ensayar.....	41
2.2.5.	Procedimiento del ensayo.....	43
2.2.6.	Cálculos.....	45
2.2.7.	Presentación de resultados.....	46
2.3.	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (ASTM D422).....	47
2.3.1.	Objetivo.....	47
2.3.2.	Materiales y equipo.....	47
2.3.3.	Muestra a ensayar.....	47
2.3.4.	Procedimiento del ensayo.....	48
2.3.5.	Cálculos.....	52
2.3.6.	Validez del ensayo.....	53
2.3.7.	Presentación de resultados.....	53
2.4.	DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA (ASTM D4318 AASHTO T89 Y T90).....	54
2.4.1.	Objetivo.....	54
2.4.2.	Materiales y equipos.....	54
2.4.3.	Preparación de la muestra.....	55
2.4.4.	Procedimiento del ensayo.....	57
2.4.5.	Cálculos.....	63
2.4.6.	Presentación de resultados.....	64
2.5.	DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS (ASTM D427 AASHTO T92).....	65
2.5.1.	Objetivo.....	65
2.5.2.	Materiales y equipos.....	65
2.5.3.	Muestra a ensayar.....	66

2.5.4.	Procedimiento del ensayo.....	66
2.5.5.	Cálculos	72
2.5.6.	Presentación de resultados.....	73
2.6.	ANÁLISIS HIDROMÉTRICO (ASTM D422).....	74
2.6.1.	Objetivo	74
2.6.2.	Materiales y equipos.....	74
2.6.3.	Muestra a ensayar	75
2.6.4.	Procedimiento.....	75
2.6.5.	Cálculos	78
2.6.6.	Presentación de resultados.....	80
2.6.7.	Procedimiento de calibración del hidrómetro.....	81
2.7.	DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA EN SUELOS FINOS (ASTM D854 AASHTO T100).....	83
2.7.1.	Objetivo	83
2.7.2.	Materiales y equipos.....	83
2.7.3.	Muestra a ensayar	84
2.7.4.	Calibración del picnómetro	84
2.7.5.	Procedimiento del ensayo.....	88
2.7.6.	Cálculos	93
2.7.7.	Presentación de resultados.....	94
2.8.	ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR (ASTM D698 AASHTO T99).....	95
2.8.1.	Propósito y alcance.....	95
2.8.2.	Materiales y equipos.....	95
2.8.3.	Métodos	96
2.8.4.	Muestra a ensayar	98
2.8.5.	Procedimiento del ensayo.....	102
2.8.6.	Cálculos	104
2.8.7.	Presentación de resultados.....	105

2.9.	ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO (ASTM D1557)	106
2.9.1.	Propósito y alcance	106
2.9.2.	Materiales y equipos	106
2.9.3.	Métodos	107
2.9.4.	Muestra a ensayar	109
2.9.5.	Procedimiento del ensayo	113
2.9.6.	Cálculos	116
2.9.7.	Presentación de resultados	116
2.10.	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD EN CAMPO, MÉTODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556 AASHTO T191)	117
2.10.1.	Resumen ejecutivo	117
2.10.2.	Propósito y alcance	117
2.10.3.	Materiales y equipos	117
2.10.4.	Muestra a ensayar	118
2.10.5.	Procedimiento del ensayo	118
2.10.6.	Cálculos	120
2.10.7.	Presentación de resultados	123
2.11.	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA DEL SUELO (CBR DE LABORATORIO) (ASTM D1883 AASHTO T193)	124
2.11.1.	Objetivo	124
2.11.2.	Alcance	124
2.11.3.	Responsables	124
2.11.4.	Términos y definiciones	124
2.11.5.	Equipos y herramientas	125
2.11.6.	Relación Humedad – Densidad	125
2.11.7.	Procedimiento	125
2.11.8.	Cálculos	129
2.11.9.	Presentación de resultados	133

2.12. ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTANDAR SPT Y MUESTREO CON TUBO PARTIDO EN LOS SUELOS (ASTM D1586 AASHTO T206).....	134
2.12.1. Objetivo	134
2.12.2. Alcance	134
2.12.3. Responsables.....	134
2.12.4. Términos y definiciones.....	134
2.12.4.1. Ensayo de penetración estándar, SPT.	134
2.12.4.2. Muestra alterada	135
2.12.4.3. Muestra inalterada	135
2.12.4.4. Martillo de SPT.	135
2.12.4.5. Barra guía de SPT.	135
2.12.4.6. Cuchara bipartita	135
2.12.4.7. Tubo de pared delgada o tubo Shelby	135
2.12.4.8. Número de golpes, N.....	136
2.12.4.9. Número de golpes corregido, N_{70}	136
2.12.4.10. Triangulo con polea.....	136
2.12.4.11. Supervisor.....	136
2.12.4.12. Operador.....	136
2.12.4.13. Ayudante	136
2.12.5. Equipos y herramientas.....	137
2.12.6. Procedimiento del ensayo	138
2.12.6.1. Selección del sitio de trabajo.....	138
2.12.6.2. Medidas de seguridad personal	138
2.12.6.3. Preparación del sitio de trabajo	138
2.12.6.4. Armado del equipo	138
2.12.7. Ejecución del ensayo	139
2.12.8. Manejo y transporte de muestras	142
2.12.9. Espaciamiento aproximado de las perforaciones	143
2.12.10. Profundidad de las perforaciones.....	143

2.12.11.	Criterios para describir la consistencia	144
2.12.12.	Descripción de color de suelo	144
2.12.13.	Descripción de humedad en campo ASTM D2488	145
2.12.14.	Cálculos	145
2.12.14.1.	Correcciones para N_{60}	146
2.12.14.2.	Peso Específico de Suelo.....	149
2.12.14.3.	Métodos de diseño directo de suelo, Ensayo de Penetración Estándar	149
2.12.14.4.	Presentación de resultados	149
2.13.	CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL CON APLICACIÓN DE INCREMENTO DE CARGA (ASTM D2435 AASHTO T216).....	150
2.13.1.	Objetivo	150
2.13.2.	Alcance	150
2.13.3.	Responsables.....	150
2.13.4.	Términos y definiciones.....	151
2.13.4.1.	Consolidación unidimensional.....	151
2.13.4.2.	Consolidación primaria.....	151
2.13.4.3.	Consolidación secundaria	151
2.13.4.4.	Índice de vacíos	151
2.13.4.5.	Presión de preconsolidación	151
2.13.4.6.	Arcillas normalmente consolidadas	151
2.13.4.7.	Arcillas sobreconsolidadas.....	151
2.13.4.8.	Razón de sobreconsolidación, OCR	152
2.13.4.9.	Operador	152
2.13.5.	Materiales y equipos	152
2.13.6.	Muestra a ensayar	154
2.13.7.	Procedimiento del ensayo	154
2.13.8.	Cálculos	158
2.13.9.	Determinación de las propiedades tiempo deformación.....	160
2.13.10.	Determinación de las propiedades carga deformación	164

2.13.11.	Determinación de los coeficientes de consolidación	167
2.13.12.	Presentación de resultados	168
3.	ORGANIGRAMA Y MANUAL DE FUNCIONES DEL PERSONAL DE LABORATORIO	169
3.1.	ORGANIGRAMA DE LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGONES	170
3.2.	MANUAL DE FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES DEL PERSONAL DE LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGONES	171
4.	CRONOGRAMA DE CALIBRACION DE LOS EQUIPOS DE LABORATORIO	181
5.	PLANILLAS DE REPORTE DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	206
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	221
6.1.	CONCLUSIONES	222
6.2.	RECOMENDACIONES.....	223
6.3.	BIBLIOGRAFÍA	224
7.	ANEXOS.....	227
8.	INFORMES DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN EL LABORATORIO	228

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Partículas angulares b) Partículas subangulares c) Partículas subredondeadas	39
Figura 2. d) Partículas redondeadas. e) Forma de partículas. f) Color.	39
Figura 3. g) Consistencia. h) Cementación. i) Dureza.....	39
Figura 4. j) Humedad y estructura. k) Tamaño de partícula gravas. l) Tamaño de partícula guijarros.....	39
Figura 5. a) Moldear esfera de 1 pulg dividir en tres de ½ pulg b)Presionar con los dedos	40
Figura 6. c) Reacción de agua luego de batir la esfera d) Reacción de agua luego de presionar la esfera.....	40
Figura 7. e) Enrollar el espécimen en rollo de 3 mm. f) Ruptura producida a los 3 mm de diámetro.....	40
Figura 8. g) Rigidez del espécimen. h) Arena y Grava.	40
Figura 9. Contenedor más su tapa	43
Figura 10. Determinación de la masa del contenedor	43
Figura 11. Disposición de la muestra en el contenedor.....	44
Figura 12. Determinación de la masa del contenedor más la muestra húmeda.....	44
Figura 13. Secado en horno	44
Figura 14. Enfriado en el desecador.....	45
Figura 15. Determinación de la masa del contenedor más la muestra seca.....	45
Figura 16. Determinación de la masa total de la muestra.....	48
Figura 17. Lavado de la muestra de suelo.	49
Figura 18. Vertido del material después del lavado.	49
Figura 19. Secado de la muestra en el horno.....	50
Figura 20. Separación manual de las partículas grandes.....	50
Figura 21. Máquina de tamizado.....	51
Figura 22. Determinación de la masa retenida en cada tamiz.	51
Figura 23. a) Aparato de Casagrande. b) vista lateral.	54
Figura 24. Mezclado de la muestra.....	56
Figura 25. Colocación de la muestra en el aparato de Casagrande	58
Figura 26. Muestra en el aparato de Casagrande. a) vista en planta. b) vista frontal.	58

Figura 27. Ranurado de la muestra.....	58
Figura 28. Ranurado	59
Figura 29. Mezclado de la muestra.....	59
Figura 30. Obtención de muestra para determinar el contenido de humedad.	60
Figura 31. Reducción del contenido de humedad con la ayuda de una secadora.....	61
Figura 32. Amasado de la muestra.	61
Figura 33. Fractura de los hilos de muestra.....	62
Figura 34. Muestra en el contenedor.	62
Figura 35. Determinación del valor del límite líquido.	63
Figura 36. Equipo principal para el ensayo.	66
Figura 37. Mezclado del suelo con agua.	67
Figura 38. Recubrimiento con vaselina.	67
Figura 39. Determinación de la masa del recipiente de contracción.	67
Figura 40. Preparación de la muestra.	68
Figura 41. Pesado del recipiente de contracción más muestra.	68
Figura 42. a) Muestra contraída luego de secado. b) Pesado de recipiente más la muestra seca	69
Figura 43. a) Llenado de recipiente de contracción con mercurio b) Enrasado de recipiente .	69
Figura 44. Pesado del recipiente de contracción más mercurio.	70
Figura 45. Llenado del recipiente de vidrio con mercurio.	70
Figura 46. Enrasado del mercurio en el recipiente de vidrio.....	70
Figura 47. Pesado del recipiente de vidrio más mercurio.....	71
Figura 48. La muestra seca flotando sobre el mercurio.....	71
Figura 49. a) Muestra en el proceso de inmersión. b) Muestra totalmente sumergida.....	71
Figura 50. Pesado del recipiente de vidrio más el mercurio sobrante.	72
Figura 51. Hidrómetro.	74
Figura 52. Dispersión de la muestra en el equipo mezclador.	75
Figura 53. Vertido de la muestra en el cilindro de sedimentación.	76
Figura 54. Cilindro de sedimentación en baño a temperatura constante.	76
Figura 55. Agitación manual de la muestra.	77

Figura 56. Introducción del hidrómetro a la muestra y lectura.	77
Figura 57. Determinación de la masa del picnómetro.	85
Figura 58. Equipo en el contenedor.	85
Figura 59. Absorción del agua sobrante.	86
Figura 60. Pesada picnómetro más agua.	86
Figura 61. Toma temperatura.	87
Figura 62. Vertido de agua en el vaso de la licuadora.	88
Figura 63. Introducción de la muestra al vaso de la licuadora.	88
Figura 64. Batido de la muestra.	89
Figura 65. Vaciado de la muestra al picnómetro.	89
Figura 66. Llenado del picnómetro.	90
Figura 67. Eliminación de aire.	90
Figura 68. Determinación de la masa del picnómetro más muestra.	91
Figura 69. Medición de la temperatura de ensayo.	91
Figura 70. Vertido de la muestra en un contenedor.	92
Figura 71. Secado de la muestra.	92
Figura 72. Secado de la muestra en el desecador.	92
Figura 73. Determinación de la masa de la muestra seca.	93
Figura 74. Equipo de compactación en laboratorio.	96
Figura 75. Secado de la muestra.	99
Figura 76. Carta para la determinación del contenido de humedad óptimo para un suelo, utilizando energía de compactación estándar.	100
Figura 77. a) Adición de agua a la muestra. b) Mezclado de la muestra.	101
Figura 78. a) Determinación de la longitud del molde. b) Determinación del diámetro del molde.	102
Figura 79. Determinación de la masa del molde.	102
Figura 80. Secuencia de golpes. a) para molde de 4 pulg. b) para molde de 6 pulg.	103
Figura 81. Compactación de la muestra.	103
Figura 82. Peso del molde más muestra.	104
Figura 83. Equipo de compactación en laboratorio.	107

Figura 84. Secado de la muestra.....	110
Figura 85. Carta para la determinación del contenido de humedad óptimo para un suelo, utilizando energía de compactación estándar.....	111
Figura 86. Adición de agua a la muestra y mezclado de la muestra.....	112
Figura 87. Secuencia de golpes. a) para molde de 4 pulg. b) para molde de 6 pulg.	114
Figura 88. Determinación de altura de molde. b) Determinación de diámetro de molde ..	114
Figura 89. Determinación la masa del molde.....	115
Figura 90. Compactación de la muestra en el molde.....	115
Figura 91. Determinación de la masa del suelo compactado mas molde.....	115
Figura 92. Aparato de cono de arena.....	118
Figura 93. Materiales necesarios para el ensayo.	121
Figura 94. a) Pesaje de botellón + cono + arena. b) Calibración de cono.....	121
Figura 95. Determinación del peso específico de arena.	122
Figura 96. Excavación de hoyo	122
Figura 97. Llenado del hoyo con arena tipo Ottawa.....	122
Figura 98. Muestra extraída y materiales en campo.....	123
Figura 99. a) Moldes con suelo compactado. b) Moldes con suelo antes de sumergir	127
Figura 100. a) Lectura inicial antes de sumergir. b) Sumergiendo en agua 96 horas.....	128
Figura 101. a) Molde con suelo + piston. b) Registrando los valores de penetración.....	129
Figura 102. Corrección de curvas de esfuerzo vs. penetración.	130
Figura 103. Cálculo del valor CBR.	131
Figura 104. Valores CBR vs humedad de prueba.	132
Figura 105. Peso unitario seco vs humedad de prueba.....	132
Figura 106. Determinación de valor CBR.....	133
Figura 107. Armado de equipo de SPT.	139
Figura 108. a) Cuchara bipartita. b) Cuchara Shelby o tubo Shelby.....	140
Figura 109. a) Equipo listo para los golpes. b) Martillo en caída libre SPT.	140
Figura 110. Retiro de martillo después de penetración de 450 mm.	141
Figura 111. a) Toma de muestra de SPT. b) Cuchara bipartita más la muestra extraída. .	141
Figura 112. Determinación de colores.....	144

Figura 113. Tabla de Variación de nH	147
Figura 114. Tabla de Variación de nB	147
Figura 115. Tabla de Variación de nS	148
Figura 116. Tabla de Variación de nR	148
Figura 117. Equipo de consolidación de mesa.	152
Figura 118. Consolidómetro de anillo fijo (ELE).	153
Figura 119. Partes principales de equipo de consolidación.....	153
Figura 120. Diagrama de cuerpo libre de equipo de consolidación.	154
Figura 121. Armado del equipo de consolidación.....	156
Figura 122. Ajuste del equipo de carga.	156
Figura 123. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo del tiempo.	162
Figura 124. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de la raíz del tiempo.	163
Figura 125. Determinación de la presión de preconsolidación por el método de Casagrande	165
Figura 126. Determinación de los índices de compresión.....	166

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Masa mínima de muestra requerida según tamaño de partícula.....	28
Tabla 2. Criterios para la descripción de la angularidad de las partículas granulares.....	28
Tabla 3. Criterios para la descripción de la forma de las partículas granulares.....	29
Tabla 4. Criterios para la descripción de la condición de humedad.....	29
Tabla 5. Criterios para describir la reacción con el HCl.....	30
Tabla 6. Criterios para describir la consistencia.....	30
Tabla 7. Criterios para describir la cimentación.....	31
Tabla 8. Criterios para describir la estructura.....	32
Tabla 9. Criterios para describir la resistencia en seco.....	34
Tabla 10. Criterios para describir la dilatancia.....	35
Tabla 11. Criterios para describir la rigidez.....	36
Tabla 12. Criterios para describir la plasticidad.....	36
Tabla 13. Identificación de suelos finos inorgánicos mediante ensayos manuales.....	37
Tabla 14. Masa mínima de muestra requerida según tamaño máximo de partícula.....	42
Tabla 15. Masa de muestra requerida según el tamaño máximo de partículas.....	48
Tabla 16. Valores del factor de corrección a para diferentes gravedades específicas.....	80
Tabla 17. Masa de muestra recomendada según el tipo de suelo.....	84
Tabla 18. Densidad del agua y coeficiente de temperatura (K) para varias temperaturas ...	87
Tabla 19. Especificaciones técnicas del ensayo de compactación Proctor según métodos ASTM.....	97
Tabla 20. Masa mínima de muestra requerida para ensayo Proctor modificado.....	98
Tabla 21. Tiempo de reposo en la preparación de muestras.....	102
Tabla 22. Especificaciones técnicas del ensayo de compactación Proctor según métodos ASTM.....	108
Tabla 23. Masa mínima de muestra requerida para ensayo Proctor modificado.....	109
Tabla 24. Tiempo de reposo en la preparación de muestras.....	112
Tabla 25. Tabla de espaciamiento aproximado de las perforaciones.....	143
Tabla 26. Criterios para describir la consistencia de suelos (ASTM D2488-00).....	144
Tabla 27. Criterios para la descripción de la condición de humedad (ASTM D2488-00).....	145

Tabla 28. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 103 kPa. 161

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Amazónica de Pando contempla en su malla curricular. Laboratorio de suelos, laboratorio de hormigones, laboratorio de hidráulica, laboratorio de maderas, laboratorio de asfaltos, laboratorio de física y un gabinete de topografía para la formación de sus profesionales, en ese marco es que se creó el laboratorio de suelos y hormigones, donde se desarrolla el presente trabajo, en la modalidad de trabajo dirigido. Para tal fin, existe un convenio interno entre el responsable del laboratorio y mi persona.

El estudiante de la carrera de ingeniería civil en el transcurso de su formación y desarrollo profesional se enfrenta a una gran variedad de dificultades, en los que el conocimiento del estudio de suelos es necesario. Indudablemente se aprenderá más en el campo y en la práctica, que la que puede enseñarse en las aulas. El propósito de este laboratorio es desarrollar conocimiento sólido de apoyo a la compleja respuesta de los suelos, donde se funda las grandes estructuras y otros sistemas de infraestructura. Toda planificación o estudio de suelos debe contemplar la mitigación ambiental y de riesgos de cualquier índole.

Con la finalidad de facilitar el aprendizaje del estudiante de la carrera, que requieran de este laboratorio es que se elabora el presente manual de procedimientos de ensayos de mecánica de suelos, basado en experiencias de ensayos realizados en el laboratorio con los equipos del mismo. De esa experiencia con base en las normas aplicadas se redacta el presente trabajo dirigido.

El presente trabajo contempla los ensayos más comunes que realiza el laboratorio, tanto en prácticas de asignatura, como en interacción social y prestación de servicios a la población externa a la universidad, adicionalmente contempla formularios de reporte de laboratorio y cronograma de calibración de los equipos más importantes del laboratorio.

1.2. ANTECEDENTES

El estudio de la Mecánica de Suelos es una rama de suma importancia para cualquier tipo de obra de Ingeniería Civil que se pretenda ejecutar, por medio de ésta se pueden

determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, lo cual hace posible la estimación de la capacidad de carga, los asentamientos, la presión de tierra, presión de poros, etc. Uno de los objetivos más importantes de esta disciplina es prever los problemas que se puedan presentar en el futuro, a través del conocimiento del comportamiento del suelo. Dicha rama puede ser aplicada antes, durante y después de la construcción. En una primera fase se emplea en obras como excavaciones, taludes, entre otros. Durante la construcción de una obra se aplica cuando ocurren problemas a causa de asentamientos o algún comportamiento inesperado del suelo, pudiendo ser provocados por una baja capacidad de carga del suelo y la presencia de suelos compresibles o desprendidos bajo las cimentaciones de la estructura, además el agrietamiento puede ser ocasionado por la presencia de suelos con alto grado de contracción y expansión. En algunas de las construcciones donde ocurren estos problemas, por no haber elaborado un buen estudio adecuado de Mecánica de Suelos, que proporcione la información necesaria para observar la calidad de los materiales existentes en el lugar, localizando de esta manera puntos críticos en los que se pueden originar problemas durante y después de la construcción, además de carecer de datos acerca de los suelos subyacentes del lugar y por ende dudas sobre el comportamiento de los mismos.

Antes de la aplicación de esta disciplina, el ingeniero buscaba la ubicación de sus obras y generalmente las cimentaba en roca o en suelos más o menos compactos; sin embargo hoy en día, con el incremento de la población, estos lugares se vuelven escasos y se debe construir en zonas donde el suelo en su mayoría muestra condiciones adversas para el apoyo de fundaciones, como también condiciones de riesgo tales como la inestabilidad de laderas, lo que vuelve aún más complejo el problema de cimentaciones para los proyectos, por lo que cada vez se hace más necesaria la puesta en práctica de criterios geotécnicos que encuentran su mayor apoyo en la Mecánica de Suelos y por ende en aquellos datos obtenidos mediante ensayos de campo y laboratorio que conllevan al mejor conocimiento y caracterización de los suelos y con ello su comportamiento de suelo.

Una Norma ASTM es un documento que ha sido desarrollado y establecido dentro de los principios de consenso de la organización, y que cumple los requisitos de los procedimientos y regulaciones de ASTM. Las normas se llevan a cabo con la participación

de todas las partes que tienen intereses en su desarrollo o uso. ASTM Internacional fue creada en 1898, siendo una organización no lucrativa, que brinda publicación de normas voluntarias por consenso, aplicables a los materiales, productos, sistemas y servicios; entre ellas abarca metales, pinturas, plásticos, textiles, petróleo, construcción, energía, ambiente, productos de consumo, servicios y recursos médicos, sistemas de pasteurización, electrónica y otras áreas. El libro Anual de Normas ASTM 2003, consta de 77 volúmenes, dividido en 16 secciones, en la sección 4 correspondiente a Construcción se encuentran 13 volúmenes, entre los cuales se ubica el volumen 04.08 y 04.09 que determinan los estándares para Suelos y Rocas. (Lopez, 2006, pág. 6)

Al realizar una revisión de las guías de laboratorio de otra Universidad de la Carrera de Ingeniería Civil, se logró identificar las implementadas por la Universidad Mayor de San Simón. las guías de laboratorio fueron desarrolladas por el Laboratorio de Geotecnia “UMSS” con el título de “MANUAL DE PROCEDIMIENTOS TECNICOS”.

A pesar de esta iniciativa no ha existido ningún otro tipo de propuesta para suplir esta necesidad en los laboratorios de Ingeniería Civil, en especial en el área de suelos, la cual cuenta con el mayor número de prácticas de laboratorio a desarrollar. Prácticas de la asignatura “mecánica de suelos y laboratorio” y ensayos en la elaboración de tesis. Hasta el día de hoy los estudiantes, que cursan estas asignaturas, en algunas ocasiones desarrollan los laboratorios y sus informes sin tener muy claro los conceptos a aplicar.

1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El laboratorio de mecánica de suelos de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Amazónica de Pando, no cuenta con un manual de funciones, tan poco con un manual de ensayos que sirva de guía para la realización o ejecución de ensayos de laboratorio bajo normas específicas, sobre todo para la realización de prácticas por los estudiantes de la carrera. Esto debido a que la carrera es relativamente nueva, en consecuencia, este laboratorio tiene pocos años de trayectoria, así mismo la cantidad de recurso humano es limitado. La inexistencia de un manual específico elaborado en este laboratorio, deriva en

la utilización de manuales de carácter general, los mismos no necesariamente expresan el contexto regional.

1.4. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

En el manual de ensayos de mecánica de suelos existe una serie de ensayos y cada ensayo tiene diferentes procedimientos propios de la misma realización de ensayo, En el caso particular de este manual de suelos se requiere procedimiento de realización de ensayo del suelo, por lo tanto, solo se realizó el manual de procedimientos de los ensayos de suelos, manual de funciones, organigrama, cronograma de calibración de equipos y las planillas de reporte de los ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar un manual de funciones y ensayos de mecánica de suelos para el laboratorio de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Amazónica de Pando aplicando las normas correspondientes de acuerdo a los suelos de la región y condiciones de trabajo en el laboratorio.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un manual (guía de laboratorio), donde se especifique la norma, método del ensayo, procedimientos, equipos, personal necesario para cada ensayo.
- Elaborar estructura orgánica de personal y manual de funciones de laboratorio de mecánica de suelos.
- Elaborar cronograma de calibración de los equipos de laboratorio de mecánica de suelos.
- Elaborar planillas de reporte que se deben realizar en cada uno de los ensayos en laboratorio de mecánica de suelos.

1.6. METODOLOGÍA

TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo es una investigación descriptiva, pues busca aplicar los métodos de los ensayos de suelos ya desarrollados, para mejorar la fundamentación teórica de los estudiantes a la hora de realizar las prácticas en el Laboratorio e identificar valores típicos para los suelos de la zona.

La investigación se efectuará en el laboratorio de mecánica de suelos, la técnica a utilizar será de observación y experimental practico, el cual reflejará y justificará la elaboración del Manual de funciones y ensayos de mecánica de suelos para el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Amazónica de Pando.

PROCEDIMIENTO

Previo la elaboración de manual de ensayos de mecánica de suelos, se ha propuesto realizar el manual de los siguientes ensayos: Descripción e identificación de suelos, Contenido de humedad, Análisis granulométrico, Límites de consistencia (líquido, plástico e índice de plasticidad), Determinación de límites de contracción, Análisis hidrométrico, Determinación de gravedad específica, Compactación proctor estándar, Compactación proctor modificado, Peso unitario seco en campo método cono de arena, Ensayo de relación de soporte de california CBR en laboratorio, Ensayo de penetración estándar SPT en campo, Consolidación unidimensional con aplicación de incrementos de carga. La normativa en la que se respaldara es en la norma American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) y American Society of Testing Materials (ASTM).

1.7. JUSTIFICACIÓN

Para una excelente formación de un Ingeniero Civil, si es necesario que se cuente con el manual de funciones y ensayos de laboratorios, los cuales le permitirán no solo comprender de manera teórica los conceptos vistos en cada una de las áreas de la ingeniería, sino que de una manera más aplicada de comprender correctamente el concepto en la realidad, y de esta

manera en su vida profesional tendrá mayor seguridad y mejor desenvolvimiento, cuándo, porqué y para qué se deben realizar los estudios geotécnicos previos a un proyecto de Ingeniería Civil.

Dentro de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Amazónica de Pando existen una serie de asignaturas que implican el desarrollo de prácticas de laboratorio complementarias a dichos espacios académicos que comprenden la línea de geotecnia.

Sin embargo, para el desarrollo del laboratorio de suelos no se cuenta con manuales propias de laboratorio, con las cuales el estudiante podría desarrollar el ensayo de manera eficiente y correcta según la norma, de esta manera las prácticas de laboratorio podrán ser más aplicadas a la realidad.

Por esta razón es necesario elaborar un manual para cada uno de los ensayos de laboratorio de suelos de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Amazónica de Pando, así el estudiante podrá desarrollar las prácticas de laboratorio de suelos de manera correcta, ya que es de gran importancia para su formación integral que le brinda la Universidad Amazónica de Pando.

1.8. ALCANCES

El presente trabajo tiene como propósito elaborar un manual de funciones y ensayos de mecánica de suelos para el laboratorio de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Amazónica de Pando aplicando normas que sean adecuadas de acuerdo a nuestros suelos.

Cada ensayo de laboratorio propuesta tendrá el contenido de objetivos, documentos de referencia, definiciones, alcances, material y equipo necesarios, procedimientos a realizar, planillas de reporte del ensayo realizado en laboratorio.

La normativa en la que se respaldará es en la norma AASHTO, ASTM, Debido a que en nuestro país no contamos con normas NB en mecánica de suelos.

CAPITULO II
2. PROCEDIMIENTOS
DE LOS ENSAYOS EN
LABORATORIO Y EN
CAMPO

2.1. DESCRIPCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE SUELOS (PROCEDIMIENTO VISUAL Y MANUAL) (ASTM D2488)

2.1.1. Objetivo

Describir e identificar suelos mediante procedimiento visual – manual para propósitos ingenieriles. Cuando se requiere una clasificación precisa deberá seguirse el procedimiento ASTM D 2487, que corresponde al procedimiento de clasificación de suelos para propósitos ingenieriles por el método de clasificación unificado. La identificación se basa en inspecciones visuales y pruebas manuales. (SIMON, 2004, pág. 1 a 11)

2.1.2. Terminología

Antes de empezar a describir los procedimientos para la identificación de suelos es necesario aclarar ciertos términos: (American Society for Testing and Materials (1999). ASTM D2488-00, 2003)

- **Arcilla**, suelo que pasa el tamiz No. 200 (0.075 mm) que exhibe plasticidad para ciertos rangos de contenido de humedad y son considerablemente resistentes cuando están secos.
- **Grava**, partículas de roca que pasan el tamiz de 3 pulg. (75 mm) y que son retenidos en el tamiz No. 4. Dentro de esta categoría se denomina gruesos a las partículas que pasan el tamiz de 3 pulg (75 mm) y son retenidos en el tamiz de $\frac{3}{4}$ pulg (19 mm) y finos a las que pasan el tamiz de $\frac{3}{4}$ pulg (19 mm) y son retenidos en el tamiz No. 4 (4.75 mm).
- **Arcilla orgánica**, arcilla con suficiente contenido orgánico para modificar las propiedades del suelo.
- **Limo orgánico**, limo con suficiente contenido orgánico para modificar las propiedades del suelo.
- **Turba**, suelo compuesto esencialmente por material vegetal en varios estados de descomposición, usualmente con un olor orgánico, de color marrón oscuro a

negro, consistencia esponjosa y una textura que va de fibrosa a amorfa.

- **Arena**, partículas de roca que pasan el tamiz No. 4 (4.75 mm) y son retenidos por el tamiz No 200 (0.075 mm). Las partículas de arena se subdividen a la vez en gruesas que son las que pasan el tamiz No 4 (4.75 mm) y son retenidos por el tamiz No. 10 (2 mm), medias que pasan el tamiz No. 10 (2 mm) y son retenidas en el tamiz No. 40 (0.425 mm) y finas que pasan el tamiz No. 40 (0.425 mm) y son retenidas por el tamiz No. 200 (0.075 mm).
- **Limo**, suelo que pasa el tamiz No. 200 (0.075 mm), no es plástico o ligeramente plástico y exhibe poca o ninguna resistencia cuando está seco.
- **Guijarros**, partículas de roca que pasan una abertura de 12 pulg (300 mm) y son retenidas en un tamiz de 3 pulg.
- **Cantos rodados**, partículas de roca que no pasan una abertura de 12 pulg. (300 mm).

2.1.3. Materiales y equipos

- Navaja de bolsillo o una espátula pequeña.
- Recipiente con tapa.
- Lupa manual.
- Agua.
- Ácido clorhídrico, recipiente pequeño con ácido clorhídrico diluido, una parte de ácido HCl (10 N) por tres partes de agua.

2.1.4. Muestra a ensayar

- La muestra debe ser representativa del estrato de donde ha sido obtenido mediante procedimientos apropiados o estandarizados.
- La muestra será cuidadosamente identificada registrando el lugar de procedencia.
- Para una precisa descripción e identificación, la cantidad mínima de muestra a ser examinada deberá estar acorde con la Tabla 1.

Tamaño máximo de partícula, mm	Tamiz	Masa de muestra mínima, g.
4.75	No. 4	100
9.5	3/8 pulg	200
19.0	3/4 pulg	1000
38.1	1 1/2 pulg	8000
75.0	3 pulg	60000

Tabla 1. Masa mínima de muestra requerida según tamaño de partícula.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999)

- Si la muestra de suelo a ser examinada es más pequeña que la mínima recomendada, el reporte deberá incluir aquello.

2.1.5. Descripción informativa para suelos

- **Angularidad**, describe la angularidad de la arena (porción gruesa), grava, guijarros y cantos rodados, como angular, subangular, subredondeadas o redondeadas de acuerdo con la Tabla 2.

Descripción	Criterio
Angular	Partículas que tienen lados afilados relativamente planos con superficies rugosas. Fig. 1 a
Subangular	Partículas similares a las angulares, pero con ejes redondeados. Fig. 1 b.
Subredondeada	Partículas que tienen lados casi planos, pero esquinas y ejes redondeados. Fig. 1 c.
Redondeada	Partículas con lados suavemente redondeadas sin ejes Fig. 2 d.

Tabla 2. Criterios para la descripción de la angularidad de las partículas granulares.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999)

- **Forma**, describe la forma de las gravas, guijarros y cantos rodados como planas, alargadas o planas y alargadas siguiendo los criterios de la Tabla 3 (Fig. 2e), de otra manera no mencionar. Indicar la fracción de las partículas que tienen la forma (un tercio de las partículas de grava son alargadas).

Descripción	Criterio
Plana	Partículas con ancho/ espesor > 3
Alargada	Partículas con longitud/ancho > 3
Plana y alargada	Partículas que cumplen ambos criterios de plana y alargada.

Tabla 3. Criterios para la descripción de la forma de las partículas granulares.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999)

- **Color**, describe el color. El color es una propiedad importante para identificar suelos orgánicos y para ciertas localidades son usados para identificar materiales de origen similar. Si la muestra tiene estratos de diferentes colores deberán ser descritos y los colores más importantes identificados. Si el color representa el estado seco del suelo, deberá ser registrado (Fig. 2f).
- **Olor**, describe el olor si es orgánico o inusual. Suelos que contienen cantidad significativa de material orgánico tienen un olor de vegetación en descomposición. Si el olor es inusual (productos del petróleo, químicos, etc.) deberá ser descrito.
- **Humedad**, describe el estado de humedad como seco, húmedo, mojado, de acuerdo con la Tabla 4.

Descripción	Criterio
Seca	Ausencia de humedad, polvoriento, seco al tacto.
Húmeda	Húmedo, pero sin presencia visible de agua.
Mojada	Agua libre visible, usualmente suelos por debajo del nivel freático.

Tabla 4. Criterios para la descripción de la condición de humedad.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999)

- **Reacción al HCl**, describe la reacción al HCl de acuerdo con la Tabla 5. Debido a que el carbonato de calcio es un agente cementante común, un reporte, debido a la reacción con el ácido clorhídrico diluido, es importante.

Descripción	Criterio
Ninguna	Reacción no visible.
Débil	Alguna reacción, con suave formación de burbujas.
Fuerte	Reacción violenta, con la inmediata formación de burbujas.

Tabla 5. Criterios para describir la reacción con el HCl.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999).

- **Consistencia**, para suelos de grano fino (arcillas y limos) describe la consistencia como muy suave, suave, firme, duro y muy duro de acuerdo con la Tabla 6 (Figura 3g). Esta observación es inapropiada para suelos con cantidades significativas de grava.
- **Cementación**, describe la cementación de suelos intactos de grano grueso (arenas y gravas) como débil, moderado y fuerte de acuerdo con la Tabla 7 (Fig. 3h).

Descripción	Criterio
Muy suave	Pulgar penetra el suelo más de 1 pulg (25 mm).
Suave	Pulgar penetra el suelo cerca de 1 pulg (25 mm).
Firme	Pulgar penetra el suelo cerca de 1/4 pulg (6 mm).
Dura	Pulgar no mella en el suelo, pero es fácilmente mellado por la uña del pulgar.
Muy dura	La uña del pulgar no mella el suelo.

Tabla 6. Criterios para describir la consistencia.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999).

Descripción	Criterio
Débil	Desmoronamiento o desmenuzamiento al manejar la muestra bajo una ligera presión de los dedos.
Moderada	Desmoronamiento o desmenuzamiento bajo una considerable presión de los dedos.
Fuerte	No existe desmoronamiento ni desmenuzamiento bajo presión de los dedos.

Tabla 7. Criterios para describir la cimentación.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999)

- **Estructura**, describe la estructura del suelo de acuerdo con la Tabla 8 (Fig. 4j).
- **Rango de tamaño de partículas**, para los componentes de grava y arena describe el rango de tamaños de partículas de acuerdo con los descrito en 3.2 y 3.6.
- **Tamaño máximo de partículas**, describe el tamaño máximo de partícula encontrado en la muestra de acuerdo con la siguiente información:
 - **Tamaño de arena**, si el tamaño máximo es el tamaño de arena, describir como fina, media o gruesa.
 - **Tamaño de grava**, si el máximo tamaño de partícula es de grava, describe el tamaño máximo de agregado como la menor abertura por el cual pasa la partícula (1½ pulg, si pasa la abertura de 1½ pulg, pero no pasa la abertura de ¾ pulg) (Fig. 4k).
 - **Guijarros y cantos rodados**, si el tamaño máximo de partícula es un guijarro o un canto rodado, describe la longitud mayor de la partícula más grande (Figura 4L).
- **Dureza**, describe la dureza de las arenas gruesas y tamaños mayores como duras o el estado en el que quedan luego de ser golpeadas por un martillo (Fig. 3i).
- Comentarios adicionales deben ser anotados, tales como la presencia de raíces, huecos, dificultad durante la perforación y muestreo, etc.

2.1.6. Identificación de la turba

La muestra compuesta primordialmente por material vegetal en varios estados de descomposición con textura fibrosa a amorfa, usualmente de color marrón oscuro a negro y un olor orgánico será designado como suelo altamente orgánico y será identificado como Turba, PT, y no será sujeta a los procedimientos de identificación

Descripción	Criterio
Estratificada	Capas alternadas de diferentes materiales o colores con espesores de al menos 6 mm, registre el espesor de las capas.
Laminada	Capas alternadas de varios materiales o colores con espesores menores a 6 mm, registre el espesor de las capas.
Fisurada	Fisuras a lo largo de planos definidos de fractura con pequeña resistencia a la fracturación.
Fracturada	Los planos de fracturación aparecen con superficies pulidas o lustrosas, algunas veces estriadas.
Estructura de boques	Suelos cohesivos que pueden ser disgregados en pequeños terrones, los cuales a su vez pueden ser disgregados.
Estructura con presencia de lentes	Inclusión de pequeños bolsones de suelos diferentes, tales como pequeños lentes de arena dispersos en una masa de arcilla. tomar nota del espesor de los lentes.
Homogénea	Mismo color y textura.

Tabla 8. Criterios para describir la estructura.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999).

2.1.7. Preparación para la identificación

- La porción de suelo a identificarse se basa en el porcentaje de la muestra que pasa el tamiz de 3 pulg. Las partículas mayores a 3 pulg deberán ser removidas manualmente, en el caso de una muestra suelta o mentalmente para muestras

intactas antes de clasificar el suelo.

- Estimar y registrar el porcentaje de guijarros y cantos rodados. Realizar visualmente estas estimaciones basadas en el porcentaje de volumen.
- De la fracción que pasa el tamiz de 3 pulg (75 mm) estimar y anotar el porcentaje de peso seco de las gravas, arenas y finos.
 - El porcentaje deberá ser estimado con una precisión del 5%. Los porcentajes de grava arena y finos deben sumar el 100%.
 - Si uno de los componentes está presente pero no en suficiente cantidad para ser considerado, de la porción del suelo menor a 3 pulg, indicar con términos como “rastros de finos” y no serán considerados dentro del 100% de la muestra.

2.1.8. **Identificación preliminar**

- El suelo es fino si contiene 50% o más de finos. Seguir el procedimiento para la identificación de suelos finos de la sección 10.
- El suelo es granular si contiene menos del 50% de finos. Seguir el procedimiento de identificación de suelos granulares de la sección 11.

2.1.9. **Procedimiento para la identificación de suelos finos**

- Seleccionar una muestra representativa del material. Remover las partículas mayores al tamiz No. 40. Muestra para realizar los ensayos de resistencia en seco, dilatancia y rigidez.
- **Resistencia en seco**
 - De la muestra, seleccionar la cantidad suficiente de suelo para moldear una esfera de 1 pulg (25 mm) de diámetro (Fig. 5a).
 - Del material moldeado, obtener al menos 3 muestras. Las muestras serán esferas de ½ pulg (12 mm) de diámetro. Dejar secar las esferas al sol o emplear métodos artificiales de secado sin exceder los 60 °C (Fig. 5a).
 - Probar la resistencia de las esferas secas apretándolas con los dedos.

Describir la resistencia de acuerdo con la Tabla 9 (Fig. 5b).

Descripción	Criterio
Ninguna	El espécimen seco se desmenuza en polvo con la simple presión del manipuleo.
Baja	El espécimen seco se desmenuza en polvo o terrones con alguna presión de los dedos.
Media	El espécimen seco se disgrega en pedazos o terrones con una considerable presión de los dedos.
Alta	El espécimen seco no puede ser disgregado con la presión de los dedos. El espécimen se disgrega cuando se le aplica presión con el pulgar sobre una superficie rígida.
Muy alta	El espécimen no puede ser disgregado cuando se lo presiona con el pulgar sobre una superficie rígida.

Tabla 9. Criterios para describir la resistencia en seco.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999)

- **Dilatancia**

- De la muestra, seleccionar la cantidad necesaria para realizar una esfera de $\frac{1}{2}$ pulg (12 mm) de diámetro. Moldear la muestra, añadiendo agua si fuese necesario, hasta obtener una consistencia suave pero no pegajosa.
- Suavizar la esfera de suelo en la palma de la mano con la hoja de la navaja o con una espátula pequeña. Batir horizontalmente, golpeando el lado de la mano vigorosamente contra la otra mano, varias veces. Observar la reacción del agua en la superficie de la esfera de suelo (Fig. 6c). Presionar la muestra en la mano y registrar la reacción de acuerdo con la Tabla 10 (Fig. 6d). La reacción es la velocidad con la cual el agua aparece cuando se bate la esfera o desaparece cuando se la presiona.

Descripción	Criterio
Ninguna	Ningún cambio visible en el espécimen.
Suave	El agua aparece lentamente en la superficie del espécimen mientras este es agitado y no desaparece o desaparece lentamente cuando el espécimen es escurrido.
Rápida	El agua aparece rápidamente en la superficie del espécimen mientras este es agitado, y desaparece rápidamente cuando el espécimen es escurrido.

Tabla 10. Criterios para describir la dilatancia.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999).

- **Rigidez**

- Completando la prueba de dilatancia, el espécimen será enrollado por la mano sobre una superficie lisa o entre las palmas, en un rollo de 1.8 pulg (3 mm) de diámetro (Fig. 7e) (si la muestra está muy húmeda para ser enrollada, deberá ser esparcida para perder agua por evaporación). Rejuntar los pedazos del rollo y seguir enrollando hasta que se produzca la ruptura con un diámetro de 1/8 pulg (3 mm); esto ocurrirá cuando el suelo se encuentre cerca de su límite plástico (Fig. 7f). Registrar la presión requerida para formar el rollo cerca del límite plástico, además, registrar la resistencia del rollo (Fig. 8g). Luego de aquello, rejuntar las piezas y amasar el conjunto hasta que este se quiebre. Registrar la rigidez del material durante el amasado.
- Describir la rigidez del rollo y el conjunto como baja, media o alta de acuerdo con la Tabla 11.

Descripción	Criterio
Baja	Solo una presión baja es requerida para enrollar el espécimen cerca del límite plástico. El conjunto de material es débil y suave.
Media	Una presión media se requiere para enrollar el espécimen cerca del

	Limite Plástico. El conjunto de material resquebrajado tiene una rigidez media.
Alta	Una presión considerable se requiere para enrollar el espécimen Cerca del límite plástico. El conjunto de material resquebrajado tiene una rigidez alta.

Tabla 11. Criterios para describir la rigidez.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999).

- **Plasticidad**, sobre la base de las observaciones realizadas durante el ensayo de rigidez, describir la plasticidad del material de acuerdo con la Tabla 12.

Descripción	Criterio
No plástica	No se puede hacer un rollo de 1/8 pulg (3 mm) bajo ningún contenido de humedad.
Baja	El rollo puede hacerse vagamente y el conjunto de muestra no puede formarse más seco que el límite plástico.
Media	El rollo puede hacerse fácilmente. El rollo no puede rehacerse luego de haber llegado al límite plástico. El conjunto de muestra se desmenuza cuando se seca más que el límite plástico.
Alta	Se requiere tiempo para el amasado y el enrollado hasta alcanzar el límite plástico. El rollo puede ser rehecho varias veces luego de haber alcanzado el límite plástico. El conjunto de muestra puede ser formado sin desmenuzarse cuando se seca más del límite plástico.

Tabla 12. Criterios para describir la plasticidad.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999).

- Luego decidir si el material es un suelo inorgánico u orgánico. Si es inorgánico seguir los pasos dados en 10.7.
- **Identificación de suelos finos inorgánicos**

- Identificar los suelos de acuerdo a la Tabla 13.

Símbolo	Resistencia en seco	Dilatancia	Rigidez
ML	Ninguna a baja	Lenta a rápida	Baja o el rollo no puede formarse
CL	Media a alta	Ninguna a lenta	Media
MH	Baja a media	Ninguna a lenta	Baja a media
CH	Alta a muy alta	Ninguna	Alta

Tabla 13. Identificación de suelos finos inorgánicos mediante ensayos manuales.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999)

- **Identificación de suelos finos orgánicos**

- Identificar el suelo como suelo orgánico, (OL/OH), si el suelo tiene suficientes partículas orgánicas para influir las propiedades del suelo.
- Si el suelo tiene estimadamente 15 a 25 % de arena, grava o ambos, las palabras “con arena” o “con grava” serán añadidos al nombre del grupo.
- Si el suelo tiene estimadamente más del 30 % de arena o grava las palabras “arenoso” o “gravoso” será añadidos al nombre de grupo. (SIMON, 2004, pág. 7)

2.1.10. Procedimiento para la identificación de suelos granulares

- El suelo es grava, si el porcentaje de grava estimada es mayor al porcentaje de arena (Figura 8h).
- El suelo es arena, si el porcentaje de grava es igual o menor al porcentaje de arena (Figura 8h).
- El suelo es grava limpia o arena limpia si el porcentaje de finos es igual o menor a 5%.
 - Identificar los suelos como grava bien gradada, GW, o como arena bien gradada, SW, si tiene un amplio rango de tamaños de partículas y cantidades substanciales en los tamaños intermedios.
 - Identificar el suelo como grava pobremente gradada, GP, o como arena pobremente gradada, SP, si consiste predominantemente de un solo tamaño de partícula o si no tiene en el rango de partículas algunas intermedias.

- El suelo será grava con finos o arena con finos, si el porcentaje de estimado de finos es 15% o más.
 - Identificar al suelo como grava arcillosa, GC, o como arena arcillosa, SC, si los finos son arcillosos determinados por el procedimiento de la sección 10.
 - Identificar al suelo como grava limosa, GM, o como arena limosa, SM, si los finos son limosos determinados por el procedimiento de la sección 10.
- Si el suelo contiene estimadamente 10% de finos, asignarle al suelo una doble asignación usando 2 grupos de símbolos.
 - EL primer símbolo de grupo corresponderá a la grava o arena limpia (GW, GP, SW, SP) y el segundo grupo corresponderá a la grava y arena con finos (GC, GM, SC, SM).
 - El nombre del grupo corresponderá al primer símbolo de grupo más las palabras “con arcilla” o “con limo” para indicar las características de plasticidad de los finos (grava bien gradada con arcilla, GW-GC).
- Si el espécimen es predominantemente arena o grava pero si se estima que contiene un 15% o más de otro material granular las palabras “con grava” o “con arena” deberán ser añadidos al nombre del grupo (arena arcillosa con grava, SC).
- Si la muestra contiene guijarros y cantos rodados las palabras “con guijarros” o “con cantos rodados” deberán ser añadidos al nombre del grupo (grava limosa con guijarros, GM).

2.1.11. Validez del resultado

Este procedimiento solo provee información cualitativa. Los resultados están sujetos a la experiencia del personal que ejecuta la identificación.

2.1.12. Presentación de resultados

El reporte de descripción e identificación deberán ser presentados en una planilla que contenga los datos de la muestra. La planilla se encuentra en el capítulo de las planillas.

DESCRIPCIÓN



a



b



c

Figura 1. a) Partículas angulares b) Partículas subangulares c) Partículas subredondeadas



d



e



f

Figura 2. d) Partículas redondeadas. e) Forma de partículas. f) Color.



g



h



i

Figura 3. g) Consistencia. h) Cementación. i) Dureza.



j



k



l

Figura 4. j) Humedad y estructura. k) Tamaño de partícula gravas. l) Tamaño de partícula gujarros.

Fuente. Elaboración propia

IDENTIFICACIÓN



a



b

Figura 5. a) Moldear esfera de 1 pulg dividir en tres de ½ pulg b) Presionar con los dedos



c



d

Figura 6. c) Reacción de agua luego de batir la esfera d) Reacción de agua luego de presionar la esfera



e

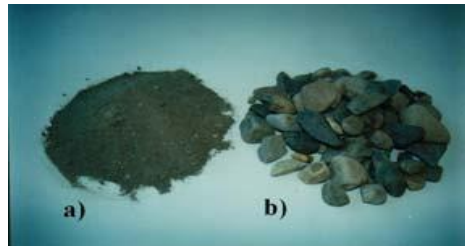


f

Figura 7. e) Enrollar el espécimen en rollo de 3 mm. f) Ruptura producida a los 3 mm de diámetro.



g



h

Figura 8. g) Rigidez del espécimen. h) Arena y Grava.

Fuente. Elaboración propia

2.2. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD (ASTM D2216)

2.2.1. Resumen ejecutivo

En el presente documento se describe el procedimiento para la determinación del contenido de humedad por masa en un suelo, por medio de una serie de mediciones y procedimientos normalizados. (Vidovic, 2014, págs. 2 - 5)

2.2.2. Propósito y alcance

Determinar el contenido de humedad (agua) por masa en una muestra de suelo mediante secado en horno. El contenido de humedad es la relación entre la masa del agua presente en los poros del suelo, M_w y la masa de los sólidos del suelo M_s (Ec. 1):

$$W = \frac{\text{masa de agua presente en una muestra de suelo dada}}{\text{masa de sólidos presente en una muestra de suelo dado}} \quad (1)$$

2.2.3. Materiales y equipos

- Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza de 0,01 g de precisión para muestras de hasta 200 g de masa o balanza de 0,1 g de precisión para muestras de más de 200 g de masa.
- Desecador conteniendo sílica gel. Se debe verificar que la sílica gel presente el color adecuado (azul).
- Contenedores. Deben ser claramente identificables y se requerirá de un contenedor por cada determinación de contenido de humedad.
- Equipo de manipuleo: guantes de asbesto, espátulas y cucharas.

2.2.4. Muestra a ensayar

- **Cantidad de muestra**

A no ser que se indique lo contrario, se adoptarán las cantidades mínimas de material

estipuladas por norma para obtener resultados con una precisión de $\pm 0,1 \%$ (Tabla 14).

Tamaño máximo de partícula mm	Tamiz	Masa de muestra mínima g.
2,00 o menos	No. 10	20
4,75	No. 4	100
9,50	3/8 pulg	500
19,00	3/4 pulg	2500
37,50	1½ pulg	10000
75,00	3 pulg	50000

Tabla 14. Masa mínima de muestra requerida según tamaño máximo de partícula.

Fuente. (Adaptado de ASTM 1999)

- **Selección de la muestra**

Las muestras deben estar claramente identificadas y su obtención deberá seguir los siguientes criterios:

- Si la muestra se encuentra en estado disturbado y es posible de manipular, seleccionar la cantidad necesaria.
- Si la muestra no puede ser mezclada, tomar por lo menos 5 porciones de material de diferentes lugares y combinarlos solo para el ensayo.
- Si la muestra se obtiene de cuchara muestreadora o similar, tomar la parte más representativa de la muestra. Si se observan diferentes estratos tomar una muestra promedio o muestras individuales de cada estrato.

- **Casos especiales**

Si se tratase de muestras de suelo con contenido de materia orgánica (arcillas orgánicas o limos orgánicos) se debe seguir el procedimiento ASTM D2974.

En suelos residuales no es aplicable este ensayo convencional, pues parte de la humedad presente como agua de cristalización, dentro de la estructura de los minerales de las partículas de suelo. Parte de esta humedad puede ser removida si el secado es realizado a la temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y no solo la humedad libre (Fourie 1997).

2.2.5. Procedimiento del ensayo

1. Identificar un contenedor limpio y seco, más su tapa y el número, No. (Fig. 9).



Figura 9. Contenedor más su tapa

Fuente. Elaboración propia

2. Determinar la masa del contenedor, más su tapa, registrar la masa, M_c , y el número, No. (Figura 10).



Figura 10. Determinación de la masa del contenedor

Fuente. Elaboración propia

3. Seleccionar muestra de suelo que represente el contenido de humedad del total de la muestra, según el criterio citado en acápite 2.2.4.
4. Colocar la muestra en el contenedor (Fig. 11) y tapan el contenedor.



Figura 11. Disposición de la muestra en el contenedor

Fuente. Elaboración propia

5. Determinar en la balanza la masa del contenedor más la muestra húmeda M_I (Fig. 12)



Figura 12. Determinación de la masa del contenedor más la muestra húmeda.

Fuente. Elaboración propia

6. Remover la tapa del contenedor y poner la tapa en parte inferior del contenedor.
7. Introducir el contenedor más la muestra húmeda en el horno. El tiempo de permanencia en el horno será como mínimo entre 12 a 16 horas (Fig. 13).



Figura 13. Secado en horno

Fuente. Elaboración propia

8. Extraer el contenedor con la muestra del horno, tapan el contenedor y dejar enfriar en el desecador hasta alcanzar temperatura ambiente (Fig. 14).



Figura 14. Enfriado en el desecador

Fuente. Elaboración propia

9. Determinar la masa del contenedor con la muestra seca, M_2 , utilizando la misma balanza (Fig. 15).



Figura 15. Determinación de la masa del contenedor más la muestra seca

Fuente. Elaboración propia

10. Repetir este procedimiento en tres muestras correspondientes al mismo suelo. Siendo el promedio aritmético el resultado de los tres ensayos.

2.2.6. Cálculos

Los datos obtenidos de la conducción del procedimiento del ensayo, son los siguientes:

- Masa del contenedor, M_c
- Masa del contenedor + muestra húmeda, M_f

➤ Masa del contenedor + muestra seca, M_2

Con ayuda de la Ecuación 2 determinamos la masa del agua presente en la muestra del suelo, M_w :

$$M = M_1 - M_2 \quad (2)$$

La Ecuación 3 es aplicada para conocer la masa de los sólidos del suelo, M_s .

$$M_s = M_2 - M_c \quad (3)$$

Sustituyendo en la Ecuación 4 los valores encontrados, se determina el contenido de humedad por masa de la muestra ensayada.

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100\% \quad (4)$$

Luego de realizar los cálculos anteriores para las tres muestras ensayadas, el promedio será el contenido de humedad correspondiente al suelo ensayado.

2.2.7. **Presentación de resultados**

Los resultados del ensayo deberán ser presentados en una planilla que contenga los datos de la muestra (Identificación, tipo, procedencia, profundidad de extracción, etc.). en capítulo de las planillas de reporte muestra un formato para la presentación de los resultados.

2.3. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (ASTM D422)

2.3.1. Objetivo

Este ensayo abarca la determinación de la distribución del tamaño de partículas mayores a 0.075 mm por medio de un proceso de tamizado y el cálculo de los coeficientes de uniformidad, C_u y curvatura, C_c siempre y cuando sean aplicables. (Vidovic, 2014, págs. 13 - 17)

2.3.2. Materiales y equipo

- Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza de 0,01 g de precisión para muestras de hasta 200 g de masa y de 0,1 g de precisión para muestras de más de 200 g de masa.
- Juego de tamices (3", 2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", No.4, No.10, No.30, No.50, No.100, No.200 y bandeja).
- Tamizador automático.
- Desecador conteniendo sílica gel.
- Mortero.
- Cuarteadores.
- Equipo de manipuleo: Guantes de asbesto, cucharas y cepillos.

2.3.3. Muestra a ensayar

- Una vez obtenidas las muestras de campo, fragmentar los agregados del suelo utilizando el mortero hasta obtener granos separados.
- Secar el suelo en el horno a una temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Seleccionar una cantidad de muestras representativa según la Tabla 15, ya sea por cuarteo o por una selección aleatoria del suelo, mezclando regularmente el material antes de obtener la muestra requerida.

Tamaño máximo de partículas mm	Tamiz	Masa de muestra mínima g.
9,50 o menos	3/8"	500
19,00	3/4"	1000
25,00	1"	2000
38,00	1½"	3000
50,00	2"	4000
75,00	3"	5000

Tabla 15. Masa de muestra requerida según el tamaño máximo de partículas.

Fuente. Análisis granulométrico ASTM D422

2.3.4. Procedimiento del ensayo

- Determinar la masa de un recipiente limpio y seco, $M_{recipiente}$.
- Seleccionar una muestra de suelo seco y determinar su masa seca junto con el recipiente, $M_{s+recipiente}$. (Fig. 16). restando la masa del recipiente determinar la masa seca de la muestra de suelo, M_s .



Figura 16. Determinación de la masa total de la muestra.

Fuente. Elaboración propia

- Colocar la muestra de suelo en el tamiz No. 200 y proceder a lavar cuidadosamente utilizando agua del grifo hasta que esta se vuelva clara y el suelo retenido por el tamiz no presente finos (Fig. 17). Tener mucho cuidado de no dañar el tamiz ni

perder suelo en este proceso. Si existe una considerable cantidad de material grueso, es recomendable utilizar el tamiz No. 4, además del No. 200, a fin de reducir el daño al tamiz No. 200.



Figura 17. Lavado de la muestra de suelo.

Fuente. Elaboración propia

- Determinar nuevamente la masa de un recipiente limpio y seco, $M_{recipiente2}$
- El material retenido debe ser cuidadosamente vertido en el recipiente previamente pesado. Se debe tener cuidado de no dejar partículas del suelo en la malla del tamiz (Fig. 18).



Figura 18. Vertido del material después del lavado.

Fuente. Elaboración propia

- Dejar reposar la muestra lavada hasta que la parte superior en suspensión se aclare y las partículas se hayan precipitado casi en su totalidad.

- Vaciar la mayor parte del agua clara superior y colocar el recipiente más la muestra de suelo en el horno de secado durante 24 horas (Fig. 19).



Figura 19. Secado de la muestra en el horno.

Fuente. Elaboración propia

- Luego de las 24 horas, dejar enfriar en el desecador y determinar la masa de material grueso seco y el recipiente. Restando la masa del recipiente se obtiene la masa del material grueso, M_{grueso} .
- En caso de que exista más del 10% de grava (material mayor a 4.75 mm) se debe separar manualmente las partículas grandes a través de los tamices 3", 2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", y 1/4" y registrar las masas retenidas respectivas a cada tamiz (Fig. 20). para la determinación de esta masa se debe utilizar un recipiente limpio y seco, además, la balanza debe estar con la opción de "tara" para que el peso del recipiente esté excluido en el pesaje.



Figura 20. Separación manual de las partículas grandes.

Fuente. Elaboración propia

- Verificar que los tamices No.4, No.10, No.30, No.50, No.100, No.200 y la bandeja se encuentren limpios y libres de partículas retenidas entre la malla.

- Colocar el suelo restante en la máquina de tamizado, verificando que los tamices No.4, No.10, No.30, No.50, No.100, No.200 y la bandeja estén apilados en ese orden en el tamizador automático, y tamizar durante 10 minutos (Figura 21).
- Extraer los tamices de la máquina de tamizado y colocar cada uno sobre un papel.



Figura 21. Máquina de tamizado.

Fuente. Elaboración propia

- Verter el material retenido en cada tamiz, empezando por el tamiz de mayor abertura, en un recipiente y determinar las masas de suelo retenido en cada uno de los tamices (Fig. 22) utilizando la opción “tara” de la balanza. Es importante no perder ninguna partícula de suelo. Es común que aparezcan partículas retenidas en la malla del tamiz, cuando esto sucede, se debe limpiar con el cepillo por la parte inferior de la malla, teniendo cuidado que las partículas caigan dentro del recipiente. Si el tamizado no fue adecuadamente realizado, algunas partículas podrán caer del tamiz sobre el papel. En tal caso, colocar este material en el tamiz siguiente antes de su pesaje.



Figura 22. Determinación de la masa retenida en cada tamiz.

Fuente. Elaboración propia

2.3.5. Cálculos

- Realizar una sumatoria de todas las masas retenidas registradas en la planilla de laboratorio, $M_{tamizado}$, incluyendo la masa del material retenido en la bandeja, y comparar con la masa seca del material grueso, M_{grueso} , registrada previo al tamizado. Una pérdida de más de 2% del peso es considerada como no satisfactoria y el ensayo debe ser repetido. Debiendo cumplirse la siguiente relación:

$$M_{tamizado} \geq 0,98 * M_{grueso} \quad (1)$$

- Calcular la masa de finos que presenta la muestra de suelo, M_{finos} , restando la masa seca de la muestra, M_s , y la masa seca del material grueso, M_{grueso} , después del lavado (Ec. 2).

$$M_{finos} = M_s - M_{grueso} \quad (2)$$

- Calcular la masa retenida acumulada en cada tamiz sumando la masa retenida de cada tamiz con la masa retenida acumulada de un tamiz previo:

$$M_{ret-acum} (i+1) = M_{ret} + M_{ret-acum} (i) \quad (3)$$

- La masa retenida acumulada en la bandeja será la sumatoria de masas de todos los tamices más la masa de finos que presenta el suelo:

$$M_{retenida - bandeja} = M_{tamizado} + M_{finos} \quad (4)$$

- Calcular el porcentaje retenido acumulado, $\%_{retenido}$, dividiendo la masa retenida acumulada en cada tamiz entre la masa retenida acumulada en la bandeja:

$$\%_{ret} = \frac{M_{retenida - acumulada}}{M_{retenida - bandeja}} * 100\% \quad (5)$$

- Calcular el porcentaje de finos o porcentaje de finos o porcentaje que pasa, $\%_{pasa}$, comenzando en 100% para el tamiz de mayor abertura y sustrayendo el porcentaje retenido acumulado en cada uno de los otros tamices.
- Dibujar una gráfica semilogarítmica entre el porcentaje que pasa y el tamaño de partículas (abertura del respectivo tamiz). Si menos del 12% pasa el tamiz No.200, calcular el coeficiente de uniformidad, C_u , y el coeficiente de curvatura, C_c , mediante las Ecuaciones (6) y (7).

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (6)$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (7)$$

Donde: D_{10} , D_{30} , D_{60} = Tamaño o diámetro aparente de partículas menores al 10, 30 y 60% del suelo respectivamente.

2.3.6. Validez del ensayo

Los valores obtenidos en laboratorio son válidos siempre y cuando la sumatoria de todas las masas retenidas, $M_{tamizado}$, registradas en la planilla de laboratorio y con la masa seca del material grueso, M_{grueso} , registrado previo al tamizado no difieran en más del 2%.

2.3.7. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo serán presentados en una planilla de laboratorio, juntamente con los datos de la muestra (Identificación, tipo, procedencia, profundidad de excavación, etc.), las masas retenidas determinadas en laboratorio ($\%_{ret}$) los porcentajes de material fino calculados en gabinete ($\%_{pasa}$), la gráfica semilogarítmica entre el porcentaje que pasan y el tamaño de partícula y los coeficientes C_U y C_C , siempre y cuando sean aplicables. La planilla correspondiente al ensayo de granulometría se encuentra en el capítulo de planillas de laboratorio.

2.4. DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA (ASTM D4318 AASHTO T89 Y T90)

2.4.1. Objetivo

En el presente informe se describe el procedimiento para la determinación de los límites de consistencia de una muestra de suelo por medio de una serie de mediciones y procedimientos normalizados. (Soliz, 2014, págs. 36-42)

El límite líquido es el contenido de agua de un suelo definido arbitrariamente como la frontera entre los estados semi-líquido y plástico. El límite plástico es el contenido de agua de un suelo ubicado en la frontera entre los estados plástico y semi-sólido.

2.4.2. Materiales y equipos

- Aparato de límite líquido de Casagrande (Fig. 23a y b).



a)



b)

Figura 23. a) Aparato de Casagrande. b) vista lateral.

Fuente. Elaboración propia

- Ranurador ASTM.
- Tamíz No. 40.
- Mortero.
- Placa de vidrio.
- Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.
- Balanza de 0,01 g de precisión.

- Desecador conteniendo sílica gel. Se debe verificar que la sílica gel presente el color adecuado (azul).
- Equipo de manipuleo: guantes de asbesto, espátulas y cucharas.
- Agua destilada o desmineralizada.

2.4.3. Preparación de la muestra

Preparación húmeda

A menos que se indique lo contrario, la preparación de las muestras deberá ser realizada mediante este método.

➤ Muestras que pasan el tamiz No. 40

- Cuando por análisis visual y manual se determina que la muestra presenta muy poca o ninguna cantidad de material que es retenido en el tamiz No. 40 se deberá mezclar de 150 a 200 g de muestra con agua destilada sobre una placa de vidrio con ayuda de una espátula. Si se desea, se puede remojar la muestra en un recipiente antes de mezclarla.
- Mezclar la muestra hasta una consistencia que aproximadamente corresponda a 25 a 35 golpes necesarios para cerrar la ranura.
- Seleccionar la cantidad de muestra que garantice de 150 a 200 gramos de material que pase el tamiz No.40.
- Si durante el mezclado se encuentran pequeños porcentajes de partículas que serían retenidas en el tamiz No. 40, se puede remover estas a mano. Si éstas estarían presentes en porcentajes mayores, o removerlas se consideraría impráctico, se puede lavar la muestra como se indica en la siguiente sección. En caso de que estas partículas correspondan a material cementado u otro tipo de partícula frágil no se deberá aplastarlas sino se deberá separarlas a mano ó lavando la muestra.
- Guardar la muestra en un recipiente que evite la pérdida de humedad y dejarla reposando al menos 16 horas. Para iniciar el ensayo se deberá volver a mezclar la muestra de suelo. (Fig. 24).



Figura 24. Mezclado de la muestra

Fuente. Elaboración propia

➤ **Muestras que contienen material retenido en el tamiz No. 40**

- Seleccionar una cantidad de suelo con contenido de humedad natural que corresponda a aproximadamente 150 a 200 g de material que pase el tamiz No. 40. Cuando la muestra de suelo contiene un porcentaje considerable de material que sería retenido en el tamiz No. 40, utilizar cantidades no mayores a 500 gramos.
- Colocar la muestra en un recipiente y cubrirlo con agua. Permitir que este remoje hasta que todos los terrones sean disueltos.
- Apoyar el tamiz No. 40 en la parte inferior de un recipiente limpio. Enjuagar la mezcla de suelo y agua dentro del tamiz. Alternativamente, se puede utilizar el tamiz No. 10 por encima del tamiz No. 40, donde se puede enjuagar la muestra en primera instancia.
- Después de retirar los materiales gruesos en la medida de lo posible, cubrir el tamiz con agua hasta 13 mm por encima de su superficie.
- Agitar la mezcla con los dedos mientras se va subiendo y bajando el tamiz dentro del recipiente y remover la suspensión para que los materiales finos sean lavados de los gruesos. Romper los terrones frotándolos suavemente sobre el tamiz con la punta de los dedos. Para terminar, levantar el tamiz por encima de la superficie del agua y enjuagar el material retenido con una pequeña cantidad de agua.
- Desechar el material que aún permanece por encima del tamiz No. 40.
- Reducir el contenido de humedad de la muestra que pasa el tamiz No. 40 hasta aproximarse al límite líquido, este proceso puede ser realizado con la ayuda de una secadora eléctrica de cabello o simplemente dejando esta al aire.

- Guardar la muestra en un recipiente que evite la pérdida de humedad y dejarla reposando al menos 16 horas. Para iniciar el ensayo se deberá volver a mezclar la muestra de suelo (Fig. 24).

Preparación seca

- Seleccionar la cantidad de muestra que garantice de 150 a 200 gramos de material que pase el tamiz No. 40.
- Secar esta muestra a temperatura ambiente o en un horno que no exceda los 60°C hasta que los terrones del suelo se pulvericen fácilmente.
- Pulverizar la muestra en un mortero de tal manera que no se rompan las partículas individuales. Si se encuentran partículas cementadas no se las deberá romper, sino simplemente removerlas a mano o seguir otro proceso como el de lavado, por ejemplo.
- Separar la muestra sobre el tamiz No. 40 agitándola a mano. Regresar al mortero el material aún retenido y repetir los procesos de pulverización y tamizado las veces que sea necesario.
- Colocar en un recipiente el material retenido en el tamiz No.40 y humedecerlo con una pequeña cantidad de agua.
- Guardar la muestra en un recipiente que evite la pérdida de humedad y dejarla reposando al menos 16 horas. Para iniciar el ensayo se deberá volver a mezclar la muestra de suelo. (Fig. 24).

2.4.4. Procedimiento del ensayo

a. Límite líquido

1. Colocar una porción de la muestra preparada en la copa del aparato del límite líquido (Fig. 25), presionarla hacia abajo y dispersarla dentro la copa hasta una profundidad de aproximadamente 10 mm en su parte más profunda, disminuyendo gradualmente esta profundidad para formar una superficie horizontal (Fig. 26a y b). Se debe tener cuidado en eliminar las burbujas de aire presentes en la muestra, a la vez se debe cuidar el resto de la muestra de posibles cambios de humedad, por

ejemplo, cubriéndola con una toalla húmeda.



Figura 25. Colocación de la muestra en el aparato de Casagrande

Fuente. Elaboración propia



a)



b)

Figura 26. Muestra en el aparato de Casagrande. a) vista en planta. b) vista frontal.

Fuente. Elaboración propia

2. Con el ranurador, formar una ranura en la muestra dentro del aparato de Casagrande (Figura 27). Al utilizar la herramienta ranuradora se debe tener cuidado en que ésta permanezca perpendicular a la superficie de la copa en el momento del corte (Figura 28).



Figura 27. Ranurado de la muestra

Fuente. Elaboración propia



Figura 28. Ranurado

Fuente. Elaboración propia

3. Levantar y dejar caer la copa girando la manivela del aparato a una velocidad de 1,9 a 2,1 caídas por segundo, hasta que las dos mitades de la muestra de la muestra entren en contacto en una distancia de 13 mm (Fig. 29).



Figura 29. Mezclado de la muestra

Fuente. Elaboración propia

4. Verificar que la ranura no sea cerrada por la presencia de burbujas de aire, esto observando que ambas mitades de la muestra hayan fluido con aproximadamente la misma forma. Si una burbuja de aire causara el contacto de ambas mitades, se deberá retirar la muestra de la copa, agregar una pequeña cantidad de agua para reemplazar la perdida durante la anterior operación y repetir todo el proceso. Si la muestra de suelo resbala sobre la superficie de la copa se deberán repetir los pasos anteriores con una mayor cantidad de agua. Si después de varios intentos la muestra sigue deslizándose ó si el número de golpes para cerrar la ranura es siempre menor a 25, registrar que el límite líquido no puede ser determinado, y reportar el suelo como no plástico.



Figura 30. Obtención de muestra para determinar el contenido de humedad.

Fuente. Elaboración propia

5. Registrar el número de golpes, N , requerido para cerrar la ranura. Remover una porción de la muestra de la copa con ayuda de una espátula. Esta operación debe realizarse manteniendo la espátula perpendicular a la superficie de la copa y a la ranura, además se debe retirar el segmento que corresponde a la unión de las mitades (Fig. 30). Colocar la muestra retirada en un recipiente previamente pesado y taparlo inmediatamente, a continuación, obtener el peso húmedo del recipiente más la muestra húmeda.
6. Retirar de la copa la muestra sobrante y reunirla unirla al resto de la muestra. Limpiar la copa y la herramienta ranuradora.
7. Volver a mezclar toda la muestra guardada agregando agua destilada para incrementar el contenido de humedad del suelo y consecuentemente disminuir el número de golpes requerido para cerrar la ranura. Repetir los pasos anteriores para producir al menos dos números de golpes más bajos. Uno de los ensayos deberá estar entre 25 a 35 golpes, otro entre 20 y 30 golpes y el último entre 15 a 25 golpes.
8. Determinar el contenido de humedad, w , de las muestras de suelo correspondientes a cada número de golpes.

b. Límite plástico

1. Seleccionar 20 gramos de la muestra preparada para el límite líquido. Reducir el contenido de humedad hasta una consistencia en la cual esta pueda ser enrollada sin adherirse a la mano. Para ello se puede mezclar y esparcir la muestra sobre la

placa de vidrio continuamente, ó se puede emplear una secadora eléctrica (Fig. 31).



Figura 31. Reducción del contenido de humedad con la ayuda de una secadora.

Fuente. Elaboración propia

2. De la porción de 20 gramos, seleccionar aproximadamente 1,5 a 2,0 gramos y formar con esta una masa elipsoidal.
3. Enrollar la masa de suelo entre la palma de la mano o los dedos y la placa de vidrio, con la presión suficiente para llevar al hilo de muestra a un diámetro uniforme a través de toda su longitud. El hilo de muestra deberá alcanzar un diámetro aproximado de 3,2 mm en no más de 2 minutos. La presión requerida para enrollar la muestra variará de acuerdo a la muestra de suelo (Fig. 32).



Figura 32. Amasado de la muestra.

Fuente. Elaboración propia

4. Cuando el hilo de muestra alcanza aproximadamente 3,2 mm romper el hilo en varias partes. Apretar las partes juntas, amasar entre el pulgar y el primer dedo de

cada mano, volver a formar la masa elipsoidal y volver a enrollar. Continuar hasta alcanzar un diámetro de 3,2 mm, y que los hilos se desmenucen bajo la presión requerida para enrollarlos y la muestra no pueda ser enrollada a diámetros menores de 3,2 mm (Fig. 33).



Figura 33. Fractura de los hilos de muestra.

Fuente. Elaboración propia.

5. Juntar las partes desmenuzadas y colocarlas en un recipiente previamente pesado (Fig. 34). Tapar inmediatamente el recipiente.



Figura 34. Muestra en el contenedor.

Fuente. Elaboración propia.

6. Seleccionar otra muestra de 1,5 a 2,0 gramos y repetir los pasos anteriores hasta que el contenedor tenga aproximadamente 6 gramos de suelo.
7. Repetir los pasos anteriores para obtener otro contenedor con al menos 6 gramos de muestra.
8. Determinar el contenido de humedad de cada una de las muestras.

2.4.5. Cálculos

a. Límite líquido LL.



Figura 35. Determinación del valor del límite líquido.

Fuente. Elaboración propia.

Graficar la relación entre el contenido de humedad, w , y el correspondiente número de golpes, N , en un gráfico de escala semilogarítmica, con el contenido de humedad como ordenada en la escala aritmética, y el número de golpes como abscisa en la escala logarítmica. Dibujar una línea recta que pase a través de los puntos obtenidos (Fig. 35).

Elegir el contenido de humedad correspondiente a la intersección de la línea recta dibujada con la abscisa de 25 golpes como el límite líquido del suelo, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 35.

b. Límite plástico, LP

El límite plástico es el promedio de los contenidos de humedad obtenidos de cada muestra.

c. Índice plástico, IP

El índice plástico es la diferencia de los límites líquido y plástico.

$$IP = LL - LP$$

2.4.6. **Presentación de resultados**

El informe de laboratorio deberá contener la identificación de la muestra, cualquier proceso especial de selección de muestra usado (tales como remoción de lentes de arena de muestras no disturbada), informe acerca de si la muestra fue secada al aire antes o durante la preparación, el límite líquido, el límite plástico, el índice plástico y la estimación del porcentaje retenido en el tamiz No. 40. En caso de que los ensayos de los límites no pudieron ser realizados, se reportará el suelo como no plástico. En el capítulo de planillas de laboratorio presenta una planilla de reporte de ensayo de determinación de límites de consistencia.

2.5. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE DE CONTRACCIÓN DE LOS SUELOS (ASTM D427 AASHTO T92)

2.5.1. Objetivo

El objetivo del ensayo es determinar el límite de contracción de un suelo por el método del mercurio. El límite de contracción se define como el contenido de humedad al cual un material al ser secado cesa de perder volumen.

El límite de contracción puede ser obtenido como:

$$SL = w_i(\%) - \Delta w(\%) \quad (1)$$

donde SL = límite de contracción; w_i = contenido de humedad inicial; Δw = cambio de contenido de humedad (entre el contenido de humedad inicial y el contenido de humedad en el límite de contracción). (Juan Carlos Rojas Vidovic, 2014, págs. 44 - 50)

2.5.2. Materiales y equipos

- Recipiente de evaporación.
- Espátula.
- Recipiente de contracción, el cuál puede ser de porcelana o metal monel (caracterizado por su alta resistencia a la corrosión) de aproximadamente 44 mm de diámetro y 12 mm de altura (Fig. 36).
- Recipiente de vidrio de aproximadamente 57 mm de diámetro y 31 mm de altura (Figura 36).
- Placa de vidrio con tres puntas metálicas para sumergir la muestra en el mercurio, (Figura 36).
- Placa de vidrio de superficie regular, lo suficientemente grande como para cubrir el recipiente de vidrio (Figura 36).

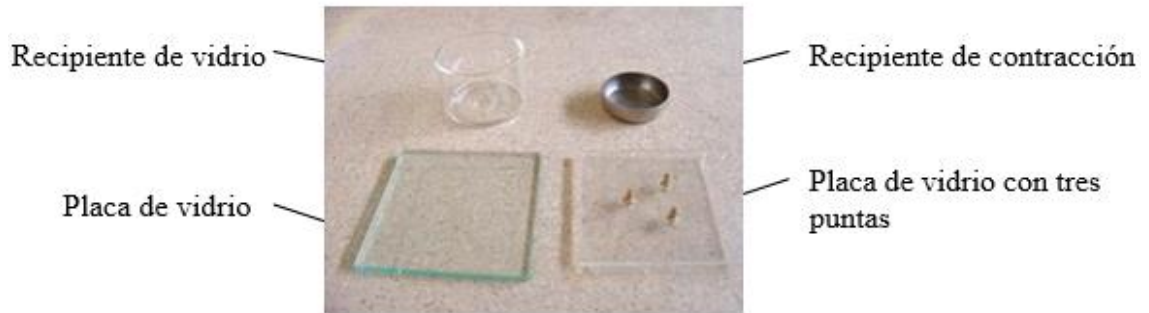


Figura 36. Equipo principal para el ensayo.

Fuente. Elaboración propia.

- Horno de secado: controlado por termostato capaz de mantener una temperatura uniforme de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza de 0,01 g de precisión.
- El mercurio necesario para llenar el recipiente de vidrio.
- Rociador de agua.
- Tamiz No. 40.
- Equipo de manipuleo: guantes, espátulas y cuchillos

Debido a que el mercurio es una sustancia peligrosa que puede causar enfermedad e inclusive muerte, es recomendable manejar esta sustancia con cuidado, tratando de evitar contacto directo prolongado.

2.5.3. Muestra a ensayar

- **Tamaño máximo de partícula**

El tamaño máximo de partículas corresponde a la fracción que pasa el tamiz No 40.

- **Cantidad de muestra**

La cantidad necesaria de suelo es de 30 g que debe pasar el tamiz No 40 de acuerdo a los procedimientos descritos en la norma ASTM D 421-85, referida a la preparación de muestras.

2.5.4. Procedimiento del ensayo

- **Preparación de la muestra**

1. La muestra debe pasar por la serie de tamices, seleccionando para el ensayo la fracción que pasa por el tamiz N° 40.
2. La fracción que pasa el tamiz N° 40 debe ser mezclada con agua, siguiendo para este fin el mismo procedimiento que se realiza para el límite líquido, de forma tal que la consistencia del suelo se aproxime a la de dicho límite (Fig. 37).



Figura 37. Mezclado del suelo con agua.

Fuente. Elaboración propia.

3. Recubrir el interior del recipiente de contracción con lubricante, vaselina, de forma tal que no exista adhesión entre el suelo y las paredes del recipiente (Fig. 38).



Figura 38. Recubrimiento con vaselina.

Fuente. Elaboración propia.

4. Registrar la masa del recipiente vacío, M_r . (Figura 39).



Figura 39. Determinación de la masa del recipiente de contracción.

Fuente. Elaboración propia.

5. Llenar el recipiente de contracción con suelo preparado cuidando que no exista burbujas de aire, ya que esto afectaría de gran manera el resultado (Figura 40), retirar el exceso de suelo y cuidar que no exista suelo adherido a las paredes exteriores el recipiente.



Figura 40. Preparación de la muestra.

Fuente. Elaboración propia.

6. Registrar la masa del recipiente con la muestra de suelo, M_w (Figura 41).



Figura 41. Pesado del recipiente de contracción más muestra.

Fuente. Elaboración propia.

7. Permitir que el suelo contenido en el recipiente de contracción seque a temperatura ambiente hasta que el color inicial oscuro de la muestra cambie por un color más claro (aproximadamente 6 a 8 horas). Luego, secar la muestra al horno. Si al sacar la muestra del horno (Fig. 42a), ésta no se encuentra fisurada o quebrada, entonces se deberá registrar la masa del recipiente de contracción más la muestra seca, M_D caso contrario se deberá repetir el proceso de preparación de la muestra (Fig. 42b).



a)



b)

Figura 42. a) Muestra contraída luego de secado. b) Pesado de recipiente más la muestra seca

Fuente. Elaboración propia.

➤ **Realización del ensayo**

1. Colocar el recipiente de contracción dentro el plato de evaporación, llenar el recipiente de contracción con mercurio y luego cubrirlo con la placa de vidrio plana para remover el exceso de mercurio. Para poder registrar el volumen real del recipiente de contracción, V , se debe asegurar que, al momento de remover el exceso de mercurio, no existan burbujas de aire dentro el recipiente (Figura 43a y 43b).



a)



b)

Figura 43. a) Llenado de recipiente de contracción con mercurio b) Enrasado de recipiente

Fuente. Elaboración propia.

2. Existen dos maneras de determinar el volumen del recipiente, la primera es midiendo el volumen de mercurio que contiene éste en un recipiente graduado, y la segunda, pesando el mercurio y utilizando la densidad de este último ($13,55 \text{ Mg/m}^3$) para obtener el volumen buscado (Figura 44).



Figura 44. Pesado del recipiente de contracción más mercurio.

Fuente. Elaboración propia.

3. Colocar el recipiente de vidrio en el plato de evaporación y llenarlo con mercurio (Figura 45).



Figura 45. Llenado del recipiente de vidrio con mercurio.

Fuente. Elaboración propia.

4. Remover el exceso de mercurio del recipiente de vidrio presionando en la parte superior la placa de vidrio de tres puntas (Figura 46). Verificar que no exista aire atrapado en el mercurio, ni que el mercurio que rebalse se adhiera a la parte exterior del recipiente.



Figura 46. Enrasado del mercurio en el recipiente de vidrio.

Fuente. Elaboración propia.

5. Medir la masa del mercurio más el recipiente de vidrio, M_{lleno} .



Figura 47. Pesado del recipiente de vidrio más mercurio.

Fuente. Elaboración propia.

6. Dejar flotar la muestra de suelo seca sobre el mercurio (Fig. 48).



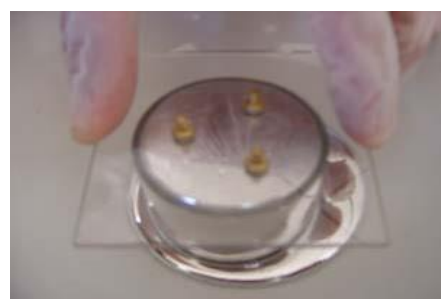
Figura 48. La muestra seca flotando sobre el mercurio.

Fuente. Elaboración propia.

7. Y luego sumergirla con ayuda de la placa de vidrio de tres puntas cuidando que no se formen burbujas de aire entre la placa y el mercurio, ya que si esto llegara a suceder se deberá regresar al paso anterior (Fig. 49a y 49b).



a)



b)

Figura 49. a) Muestra en el proceso de inmersión. b) Muestra totalmente sumergida.

Fuente. Elaboración propia.

8. Medir la masa del mercurio sobrante más el recipiente de vidrio $M_{sobrante}$.



Figura 50. Pesado del recipiente de vidrio más el mercurio sobrante.

Fuente. Elaboración propia.

2.5.5. Cálculos

Los datos obtenidos después de realizado el ensayo son los siguientes:

- Masa del recipiente, M_t
- Masa del recipiente con la muestra de suelo húmedo, M_w
- Masa del recipiente con la muestra de suelo seco, M_D .
- Volumen de mercurio que llena el recipiente de contracción, V .
- Masa del mercurio más recipiente de vidrio, M_{lleno} .
- Masa del mercurio sobrante más recipiente de vidrio, $M_{sobrante}$.

Los cálculos son los siguientes:

1. Cálculo de masa inicial de suelo húmedo.

$$M = M_w - M_t \quad (2)$$

2. Cálculo de masa de suelo seco.

$$M_o = M_D - M_t \quad (3)$$

3. Cálculo del contenido inicial de humedad, w , como porcentaje de masa seca.

$$W = \left[\frac{(M - M_o)}{M_o} \right] * 100 \quad (4)$$

4. Cálculo de la masa del mercurio desplazado por la muestra de suelo.

$$M_{desplazado} = M_{lleno} - M_{sobrante} \quad (5)$$

5. Cálculo del volumen desplazado por la muestra de suelo.

$$V_o = \frac{M_{desplazado}}{\rho_{Hg}} \quad (6)$$

Donde ρ_{Hg} es la densidad del mercurio con valor de 13,55 Mg/m³

6. Cálculo del límite de contracción como contenido de humedad de suelo expresado en porcentaje de masa seca

$$SL = w - \left\{ \left[\frac{(V - V_o) * \rho_w}{M_o} \right] * 100 \right\} \quad (7)$$

Donde ρ_w es la densidad de agua, con valor de 1 g/cm³

7. Adicionalmente puede calcularse el Índice de contracción, SR como:

$$SR = \frac{M_o}{(V_o * \rho_w)} \quad (8)$$

Este índice da una idea del cambio de volumen respecto al cambio de contenido de humedad.

2.5.6. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo deberán ser presentados en una planilla que contenga todos los datos de la muestra que permitan describirla (Identificación, tipo, procedencia, profundidad de extracción, etc.). En el capítulo de las planillas de laboratorio se presenta una planilla de registros que corresponde a este ensayo.

2.6. ANÁLISIS HIDROMÉTRICO (ASTM D422)

2.6.1. Objetivo

El objetivo del ensayo es determinar la distribución cuantitativa de tamaño de partículas menores a 0,075 mm a través de un proceso de sedimentación. (Juan Carlos Rojas Vidovic C. N., 2014, págs. 29 - 34)

2.6.2. Materiales y equipos

- Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura constante de $110 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balanza de 0,01 g de precisión.
- Tamiz No. 200 (abertura de 0,075 mm).
- Mortero.
- Hidrómetro ASTM 152-H o 151-H (Figura 51).



Figura 51. Hidrómetro.

Fuente. Elaboración propia.

- Equipo mezclador de muestras con cilindros de mezclado.
- Un cilindro de sedimentación de 1000 cc. (ml).
- Termómetro.
- Baño a temperatura constante (20°C).
- Agente dispersante: solución de hexametafosfato de sodio diluido en agua destilada a una proporción de 40 g de hexametafosfato por 1000 ml de solución.
- Agua destilada.
- Cronómetro.
- Equipo de manipuleo: espátulas, vaso de precipitación, guantes y pipeta.

2.6.3. Muestra a ensayar

- Separar la muestra a través del tamiz No.200 (0,075 mm) mediante lavado, teniendo cuidado de retener en un recipiente toda la suspensión producto del proceso (agua más partículas que pasan el tamiz No.200).
- Introducir la suspensión al horno a una temperatura de $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 16 h.
- Utilizando el mortero disgregar la muestra de suelo que pasó el tamiz No.200 hasta separar en granos todas las partículas del suelo teniendo el cuidado de no fracturar las partículas.
- Por el método del cuarteo o aleatoriamente seleccionar una porción de material de aproximadamente 65 g.

2.6.4. Procedimiento

1. Tomar entre 10 y 15 g de la muestra preparada y determinar su contenido de humedad.
2. Determinar la masa de suelo a ser utilizada en el ensayo de hidrometría. Se debe usar aproximadamente 50 g.
3. Colocar la muestra seleccionada dentro del cilindro de mezclado junto con 125 ml de una solución de hexametáfosfato de sodio (40 g/L).
4. Batir ligeramente hasta que el suelo se encuentre totalmente húmedo y dejar remojar la muestra por al menos 16 horas.
5. Después de la etapa de remojo, dispersar la muestra colocando esta en el equipo mezclador durante 4 horas.



Figura 52. Dispersión de la muestra en el equipo mezclador.

Fuente. Elaboración propia.

6. Verificar la calibración del hidrómetro (correcciones por menisco, temperatura y agente dispersante, además, relación lectura del hidrómetro y profundidad efectiva).
7. Inmediatamente después de la dispersión, verter la muestra de suelo en el cilindro de sedimentación, procurando no perder partículas de suelo.



Figura 53. Vertido de la muestra en el cilindro de sedimentación.

Fuente. Elaboración propia.

8. Añadir agua al cilindro de sedimentación hasta completar un volumen de 1000 ml.
9. Colocar el cilindro de sedimentación en baño a temperatura constante durante 1 minuto para que la suspensión suelo-agua alcance la temperatura del baño.



Figura 54. Cilindro de sedimentación en baño a temperatura constante.

Fuente. Elaboración propia.

10. Sacar el cilindro del baño a temperatura constante y usando la palma de la mano, tapar y agitar el cilindro de sedimentación volteando repetidas veces durante 1 minuto (el número de volteos durante el minuto debe ser aproximadamente 60 y no se debe permitir que exista material en el fondo del cilindro durante los primeros volteos).



Figura 55. Agitación manual de la muestra.

Fuente. Elaboración propia.

11. Una vez completado el minuto de agitación, colocar inmediatamente el cilindro de sedimentación en el baño a temperatura constante y comenzar a registrar las lecturas de la hidrometría.
12. Realizar las lecturas del hidrómetro a los siguientes intervalos de tiempo: 2, 5, 15, 30, 60, 250, 1440 minutos. Si bien los hidrómetros están calibrados para realizar las lecturas en la parte inferior del menisco, en la práctica esto no es sencillo, por lo tanto, las lecturas deben realizarse en la parte superior del menisco y las lecturas deberán ser corregidas por el factor de corrección por menisco.



Figura 56. Introducción del hidrómetro a la muestra y lectura.

Fuente. Elaboración propia.

13. Durante las lecturas colocar el hidrómetro dentro del cilindro entre 20 y 25 segundos antes de realizar la lectura. Tan pronto la lectura es realizada remover el hidrómetro y colocarlo en otro cilindro de sedimentación lleno con agua destilada, teniendo el cuidado de hacer girar el hidrómetro para liberar a este de las partículas de suelo que podrían haberse adherido al hidrómetro.

14. Después de cada lectura determinar la temperatura de la suspensión insertando un termómetro.

2.6.5. Cálculos

- Realizar la corrección de la lectura del hidrómetro por menisco y determinar la lectura real del hidrómetro, R_h

$$R_h = R_h + C_m$$

R_h = Lectura visual del hidrómetro

- Realizar la corrección de la lectura del hidrómetro por temperatura y agente dispersante según las ecuaciones 1. Los valores de corrección se encuentran en la planilla de calibración del hidrómetro.

$$R = R_h + F_T - F_S \quad (1)$$

Donde: R = Lectura corregida del hidrómetro.

R_h = Lectura del hidrómetro.

F_T = Corrección por temperatura.

F_S = Corrección por agente dispersor.

Las lecturas de corrección de temperatura y agente dispersor son únicamente usadas para calcular porcentaje más fino que se mantiene en suspensión al nivel del hidrómetro.

- El porcentaje de suelo que se mantiene en suspensión al nivel del hidrómetro puede ser calculada mediante las Ecuaciones 2 y 3 para los hidrómetros 151H y 152H respectivamente.

$$P = \left[\frac{100000}{M} * \frac{G}{G-G_1} \right] * (R - G_1) \quad (2)$$

$$P = \frac{R * a}{M} * 100 \quad (3)$$

Donde: a = Factor de corrección (Tabla 16)

M = Masa de la muestra de suelo que pasa el tamiz No.200.

P = Porcentaje del suelo que se mantiene en suspensión al nivel en el que el hidrómetro mide la densidad de la suspensión.

G = Gravedad específica de las partículas del suelo.

G_l = Gravedad específica del líquido en el cual las partículas están suspendidas (este valor puede ser asumido como 1000 para propósitos prácticos).

- Determinar la profundidad efectiva (distancia desde la superficie), L, mediante las constantes de calibración del hidrómetro, m y H_{ro} (relación lectura corregida y profundidad efectiva):

$$L = R_h * m + H_{ro} \quad (4)$$

- El diámetro de una partícula correspondiente al porcentaje indicado por la lectura del hidrómetro puede ser calculado de acuerdo a la ley de Stokes, utilizando la Ecuación 5 (ASTM-422).

$$D = \sqrt{\frac{30 * \eta}{980 (G - G_l)}} * \frac{L}{T} \quad (5)$$

Donde: D = Diámetro de la partícula, mm.

n = Coeficiente de viscosidad del agua, g*s/cm².

L = Distancia desde la superficie de la suspensión al nivel al cual la densidad de la suspensión es medida, cm.

T = Intervalo de tiempo desde el comienzo de la sedimentación al momento de lectura, min.

Siguiendo el análisis hidrométrico por (BS1377: Parte 2:1990:9.5)

La ecuación de stoke esta dada por:

$$D = \left\{ \frac{18 \eta * v}{g (\rho_s - \rho_w)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Usando en la práctica las siguientes unidades:

D = Diámetro de la partícula, mm.

n = Coeficiente de viscosidad del agua, mPa s (milipascal segundo).

L = Distancia desde la superficie de la suspensión al nivel al cual la densidad de la suspensión es medida, mm.

T = Intervalo de tiempo desde el comienzo de la sedimentación al momento de lectura, min.

g = Aceleración de la gravedad de acuerdo al lugar geográfico, m/s^2 .

$$D = \left\{ \frac{3 \cdot 10^{-4} \eta * L}{g (\rho_s - \rho_w) T} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Como la gravedad específica es $G_s = \rho_s / \rho_w$ y tomando la densidad del agua $\rho_w = 1 \text{ Mg/m}^3$ se tiene: Valores del factor de corrección a para diferentes gravedades específicas.

$$D = \left\{ \frac{3 \cdot 10^{-4} \eta * L}{g (G_s - 1) T} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Gravedad específica	Factor de corrección a
2,95	0,94
2,90	0,95
2,85	0,96
2,80	0,97
2,75	0,98
2,70	0,99
2,65	1,00
2,60	1,01
2,55	1,02
2,50	1,03
2,45	1,05

Tabla 16. Valores del factor de corrección a para diferentes gravedades específicas.

Fuente. Norma ASTM D422.

2.6.6. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo deben ser presentados en una planilla de laboratorio, la planilla de registro se encuentra en el capítulo de planillas de laboratorio, que debe registrarse los datos de la muestra (Identificación, tipo, procedencia, profundidad de excavación, etc.), el porcentaje más fino para cada diámetro, la gravedad específica, cualquier dificultad en la dispersión de la fracción que pasa el tamiz No.200 indicando cualquier tipo de cambio en

el agente dispersante o el equipo y tiempo de dispersión empleado.

2.6.7. Procedimiento de calibración del hidrómetro

Antes de realizar el ensayo, debe procederse a calibrar el hidrómetro, de manera tal que se obtengan los factores de corrección a ser aplicados en los resultados.

1. Factores de error a ser corregidos

- Las ecuaciones que sirven para calcular el porcentaje de suelo en suspensión, ecuaciones (4) y (5) ó (6), están desarrolladas considerando el uso de agua destilada o desmineralizada. Dado que es necesario el uso de un agente dispersante en el agua, la gravedad específica de la solución resultante es considerablemente mayor que la del agua.
- Las lecturas realizadas a una temperatura distinta de aquella a la que se calibró el hidrómetro producen errores, y éstos aumentan a medida que la temperatura de lectura está más alejada de la temperatura de calibración.
- Los fabricantes construyen los hidrómetros de manera que las lecturas sean realizadas en la parte inferior del menisco, sin embargo, no siempre es posible realizar las lecturas como es debido por lo que se debe aplicar correcciones por esta falla en la lectura.
- Considerando que el cálculo del diámetro de las partículas toma en cuenta el valor de la gravedad del lugar geográfico en el que se realiza el ensayo, debe adoptarse el valor adecuado (9,78 para Bolivia).

2. Calibración

La calibración es un proceso experimental en el que se realiza la medición de las variables que tienen influencia directa en el resultado obtenido.

Antes de realizar la calibración se debe tomar medida de las dimensiones del hidrómetro y se deben calcular algunas otras. Entre las dimensiones que deben medirse están: peso del hidrómetro (G), altura del bulbo (L_2), distancia del tope de la varilla del hidrómetro hasta la marca cero de la escala de medición (a), longitud total de la varilla (L_3), diámetro de la varilla (d), además de la temperatura ambiente (T). Con las mediciones realizadas se

calcula el volumen del hidrómetro (V_B) y el área del cilindro (A).

Obtención de la curva de calibración del hidrómetro. Debe medirse la longitud real (L_I) que corresponde a la distancia entre la parte superior del bulbo y la marca correspondiente en la escala de medición del hidrómetro (R_h). Deben realizarse varias mediciones de acuerdo a la graduación de la escala del hidrómetro. Con los datos medidos, es decir L_I y R_h , se calcula la longitud efectiva L , de acuerdo a la ecuación (8).

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \left[L_2 - \left(\frac{V_B}{A} \right) \right]$$

En vista que se tienen varios pares de datos del tipo $[R_h, L]$ se realiza un ajuste lineal de la forma que se muestra en la ecuación (9), misma que será empleada para el cálculo de la longitud efectiva (L) a partir de los datos leídos en el ensayo.

$$L = H_{ro} + m * R_h$$

Donde: H_{ro} = Valor de la ordenada en origen

m = Pendiente de la recta

R_h = lectura real del hidrómetro

Obtención del factor C_m . Para la corrección por menisco debe prepararse una solución del agente dispersor en un litro de agua, en la misma proporción que se utilizará en el desarrollo del ensayo. La solución debe colocarse en el baño de agua hasta que la temperatura se mantenga constante en el valor de la temperatura del baño, en ese instante se introduce el hidrómetro para hacer dos lecturas. El factor C_m es calculado como la diferencia entre las dos lecturas.

Obtención del factor de corrección por temperatura. Es adecuado realizar el proceso descrito en el párrafo anterior a temperaturas distintas, de manera que la temperatura que se espera tener en el ensayo quede incluida en el rango. El valor del factor de corrección por temperatura es calculado asumiendo una relación lineal entre los valores observados.

Obtención del factor por agente dispersor. Deben pesarse 40 [ml] de agente dispersor seco para obtener la cantidad de soluto en los 125 [ml] necesarios para la ejecución del ensayo, valor que se convierte en el factor de corrección debido a la influencia del agente dispersor.

2.7. DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA EN SUELOS FINOS (ASTM D854 AASHTO T100)

2.7.1. Objetivo

El ensayo tiene por objetivo el determinar la gravedad específica de los sólidos de una muestra de suelo cuyas partículas tienen un tamaño menor a 4.75 mm, por medio de una serie de mediciones y procedimientos normalizados. El parámetro es obtenido siguiendo el método de ensayo estándar D854 propuesto por la norma ASTM.

La gravedad específica de los sólidos de un suelo está dada por la relación que existe entre el peso unitario de los sólidos del suelo y el peso unitario del agua (Ec. 1). (Soliz, Manual de ensayos d laboratorio, "Determinación de la gravedad específica (ASTM D854)", 2014, págs. 19-27)

$$G_s = \frac{\text{peso unitario de los solidos del suelo } (\gamma_s)}{\text{peso unitario del agua } (\gamma_w)} \quad (1)$$

2.7.2. Materiales y equipos

- Picnómetro con una capacidad mínima de 250 ml. El volumen del picnómetro debe ser 2 o 3 veces el volumen de la muestra húmeda durante la etapa de desaireado.
- Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.
- Balanza de 0,01 g de precisión, con una capacidad de por lo menos 500 g cuando se utiliza el picnómetro de 250 ml y 1000 g para el picnómetro de 500 ml.
- Desecador conteniendo sílica gel, se debe verificar que la sílica gel presente el color adecuado azul.
- Termómetro de 0,1 ° C de precisión.
- Equipo de remoción de aire de las muestras que puede estar constituido por una bomba de vacío o una hornilla capaz de mantener la temperatura adecuada para hervir el agua.
- Tamiz No 4 (abertura de 4,75 mm).

- Batidora de suelo.
- Embudo.
- Papel absorbente.
- Conservadora.
- Recipiente capaz de contener agua.
- Trozo de plastro sobre el cual pueda asentarse el picnómetro.
- Equipo de manipuleo: guantes de asbesto, espátulas y cucharas.
- Agua desaireada.

2.7.3. Muestra a ensayar

➤ Tamaño máximo de partícula

La muestra debe ser tamizada a través del tamiz No. 4, tomándose la porción que pasa como muestra a ser empleada en el ensayo. En caso de que un porcentaje del suelo sea retenido en el tamiz No. 4, esta porción deberá ser analizada mediante el procedimiento ASTM C127 u otro equivalente.

➤ Cantidad de muestra

La masa de la muestra representativa del suelo secada al horno deberá corresponder al rango presentado en la Tabla 17, encontrándose esta en función del tipo de suelo.

Tipo de suelo	Masa seca de muestra para picnómetro de 250 ml, g.	Masa seca de muestra para picnómetro de 500 ml, g.
SP, SP – SM	60 ± 10	100 ± 10
SP-SC, SM, SC	45 ± 10	75 ± 10
Limo o arcilla	35 ± 10	50 ± 10

Tabla 17. Masa de muestra recomendada según el tipo de suelo.

Fuente. Norma ASTM D854.

2.7.4. Calibración del picnómetro

1. Determinar y registrar la masa del picnómetro limpio y seco (Fig. 57). Realizar el proceso 5 veces, la desviación estándar de los valores debe ser menor o igual que

0,02 g. El promedio de los valores será registrado como la masa del picnómetro M_p



Figura 57. Determinación de la masa del picnómetro.

Fuente. Elaboración propia.

2. Llenar el picnómetro con agua desaireada hasta rebasar la marca de calibración, ver el procedimiento de llenado del picnómetro en el punto 7 del acápite 5. El agua desaireada no debe ser utilizada hasta que esta no adquiera la temperatura del cuarto donde se realiza la calibración.



Figura 58. Equipo en el contenedor.

Fuente. Elaboración propia.

3. Introducir a la conservadora el picnómetro, termómetro, el tapón del picnómetro y agua deaireada en una botella (Figura 58). Dejar que el picnómetro entre en equilibrio térmico (por al menos 3 h) a una temperatura de entre 15 a 30 °C. Pueden introducirse en un mismo contenedor hasta seis picnómetros a la vez.
4. Extraer un picnómetro, tomando este por la parte superior del cuello para no alterar

la temperatura del agua en él. Colocar sobre plastroformo.

5. Utilizando el papel absorbente, ajustar el nivel del agua en el picnómetro hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de graduación (Fig.59).



Figura 59. Absorción del agua sobrante.

Fuente. Elaboración propia.

6. Determinar y registrar la masa del picnómetro lleno de agua, $M_{pw, c}$, con una precisión de 0,01 g. (Figura 60).



Figura 60. Pesada picnómetro más agua.

Fuente. Elaboración propia.

7. Extraer el termómetro de la conservadora e insertar este en el agua contenida en el picnómetro hasta una profundidad de 25 a 80 mm. Determinar y registrar la temperatura del agua en el picnómetro, T_b , con una precisión de 0,1 °C (Fig. 61).



Figura 61. Toma temperatura.

Fuente. Elaboración propia.

8. Repetir los pasos del 2 al 6 hasta obtener cinco medidas independientes para cada picnómetro que esté siendo calibrado.
9. Utilizando cada uno de los cinco datos, calcular el volumen de cada picnómetro, V_p , con la ayuda de la siguiente ecuación.

$$V_p = \frac{(M_{pw,c} - M_p)}{\rho_{w,c}} \quad (2)$$

Donde: $\rho_{w,c}$ = densidad por masa del agua a la temperatura de calibración (g/mL) (Tabla 18).

Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)	Coefficiente de temperatura (K)	Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)	Coefficiente de temperatura (K)
15,0	0,99910	1,00090	23,0	0,99754	0,99933
16,0	0,99895	1,00074	24,0	0,99730	0,99909
17,0	0,99878	1,00057	25,0	0,99705	0,99884
18,0	0,99860	1,00039	26,0	0,99679	0,99858
19,0	0,99841	1,00020	27,0	0,99652	0,99831
20,0	0,99821	1,00000	28,0	0,99624	0,99803
21,0	0,99799	0,99979	29,0	0,99595	0,99774

Tabla 18. Densidad del agua y coeficiente de temperatura (K) para varias temperaturas

Fuente. Norma ASTM D854.

10. Calcular el promedio y la desviación estándar de los cinco volúmenes determinados. La desviación estándar debe ser menor o igual que 0,05 ml.

2.7.5. Procedimiento del ensayo

1. Verificar que la masa del picnómetro, M_p , esté dentro los 0,06 g de la masa calibrada, de lo contrario recalibrar la masa seca del picnómetro.
2. Determinar el contenido de humedad, w , de una porción de la muestra siguiendo el procedimiento D2216. Utilizando el contenido de humedad calcular la cantidad de muestra húmeda necesaria para cumplir con los requerimientos de la Tabla 17.
3. Colocar 100 ml de agua en la batidora de suelo (Fig. 62).



Figura 62. Vertido de agua en el vaso de la licuadora.

Fuente. Elaboración propia.

4. Adicionar la muestra y batir (Figura 63).



Figura 63. Introducción de la muestra al vaso de la licuadora.

Fuente. Elaboración propia.

5. Colocar el vaso en la batidora y batir la muestra (Figura 64).



Figura 64. Batido de la muestra.

Fuente. Elaboración propia.

6. Utilizando el embudo, colocar la mezcla en el picnómetro (Figura 65). Lavar todas las partículas retenidas en el embudo con ayuda de agua, haciendo que estas entren al picnómetro.



Figura 65. Vaciado de la muestra al picnómetro.

Fuente. Elaboración propia.

7. Adicionar agua hasta que el nivel se encuentre entre $1/3$ a $1/2$ del alto del cuerpo del picnómetro (Figura 66). Agitar el picnómetro hasta formar una mezcla homogénea. Lavar cualquier partícula adherida al picnómetro. Para algunos suelos que contienen una fracción significativa de suelo orgánico, el kerosén es mejor humectante que el agua.



Figura 66. Llenado del picnómetro.

Fuente. Elaboración propia.

8. Para poder remover el contenido de aire se hierve la muestra por un mínimo de 2 h (Figura 67). Aplicar solamente el calor necesario para que la mezcla se mantenga hirviendo. Agitar la mezcla tanto como sea necesario para evitar que el suelo se adhiera al picnómetro o las partículas que se encuentren, en la superficie interna del picnómetro, sobre el nivel de la mezcla se sequen.



Figura 67. Eliminación de aire.

Fuente. Elaboración propia.

9. Llenar el picnómetro, hasta rebasar la marca de calibración, con agua desaireada introduciendo ésta a través de un tubo flexible de diámetro pequeño cuya punta se mantenga ligeramente sumergida en la mezcla contenida por el picnómetro. Este proceso debe ser realizado cuidadosamente para evitar que se generen burbujas de aire en la muestra. Para esto el agua puede ser introducida por una manguera de diámetro pequeño cuyo extremo de salida quede justo debajo de la superficie del

agua en el picnómetro.

10. Dejar enfriar el picnómetro hasta que adquiera la temperatura ambiente.
11. Introducir a la conservadora el picnómetro, termómetro, un recipiente con agua, el tapón del picnómetro y agua desaireada en una botella. Dejar que el picnómetro entre en equilibrio térmico durante toda la noche.
12. Extraer el picnómetro de la conservadora, tomando este por la parte superior del cuello para no alterar la temperatura del agua y ponerlo sobre plastroformo.
13. Ajustar el agua a la marca de calibración con la ayuda del papel absorbente.
14. Medir y registrar la masa del conjunto picnómetro, suelo y agua, $M_{pws,t}$ con una precisión de 0,01 g (Figura 68).



Figura 68. Determinación de la masa del picnómetro más muestra.

Fuente. Elaboración propia.

15. Medir con el termómetro y registrar la temperatura de la mezcla, T_t con una precisión de 0,1 °C, tomando el dato a una profundidad de 25 a 80 mm (Figura 69).



Figura 69. Medición de la temperatura de ensayo.

Fuente. Elaboración propia.

16. Verter la muestra en un contenedor, evitando que queden partículas en el picnómetro, es posible utilizar agua adicional para lavar estas (Figura 70).



Figura 70. Vertido de la muestra en un contenedor.

Fuente. Elaboración propia.

17. Secar la muestra en el horno a una temperatura de 110 ± 5 °C (Figura 71).



Figura 71. Secado de la muestra.

Fuente. Elaboración propia.

18. Dejar enfriar en el desecador (Figura 72).



Figura 72. Secado de la muestra en el desecador.

Fuente. Elaboración propia.

19. Determinar la masa de la muestra seca, M_s con una precisión de 0,01 g (Figura 73).



Figura 73. Determinación de la masa de la muestra seca.

Fuente. Elaboración propia.

2.7.6. Cálculos

Los datos obtenidos a partir de la calibración son:

- Volumen del picnómetro, V_p .
- Masa calibrada promedio del picnómetro seco, M_p .

Los datos registrados durante el procedimiento son los siguientes:

- Masa del picnómetro más la muestra y el agua destilada, $M_{pws,t}$
- Temperatura de ensayo, T_t .
- Masa de los sólidos secados al horno, M_s .

Con ayuda de la Ecuación 3 se determina la masa del picnómetro más agua a la temperatura de ensayo, $M_{pw,t}$:

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p * \rho_{w,t}) \quad (3)$$

Donde: $\rho_{w,t}$ = densidad del agua a la temperatura de ensayo T_t , Obtenida de la Tabla 18.

Calcular la gravedad específica a la temperatura de ensayo con la Ecuación 4:

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{wt}} = \frac{M_s}{M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s)} \quad (4)$$

donde: ρ_s = densidad de los sólidos del suelo

A menos que se especifique lo contrario, la gravedad específica será presentada para una

temperatura de 20°C. Para ello se corrige la gravedad obtenida mediante el factor K que depende de la temperatura a la que se realizó el ensayo, T_t , y con la siguiente relación:

$$G_{20^{\circ}C} = K * G_t \quad (5)$$

Para suelos que contengan partículas mayores a 4.75 mm se deberá ponderar la gravedad específica de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$G_{avg@20^{\circ}C} = \frac{1}{\frac{R}{100 \cdot G_{1@20^{\circ}C}} + \frac{P}{100 \cdot G_{2@20^{\circ}C}}} \quad (6)$$

donde: R = porcentaje de suelos retenidos en el tamiz No. 4.

P = porcentaje de suelo que pasa el tamiz No. 4.

$G_{1@20^{\circ}C}$ = gravedad específica aparente de los suelos retenidos en el tamiz No. 4 determinada por el ensayo ASTM C127 y corregida para 20 °C.

$G_{2@20^{\circ}C}$ = gravedad específica de los sólidos del suelo que pasan el tamiz No. 4 determinada por éste procedimiento (Ec. 5).

2.7.7. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo deberán ser presentados en una planilla que contenga el valor de la gravedad específica a 20°C con una precisión de 0,01, el tamaño máximo de partícula, la gravedad específica para otra temperatura especificada diferente a 20°C con una precisión de 0,01, el tipo de fluido utilizado si es diferente al agua destilada, además los datos de la muestra (Identificación, tipo, procedencia, profundidad de extracción, etc.), y por último si alguna porción de la muestra es eliminada durante su preparación, esta información también deberá ser incluida en el informe. La planilla de reporte de ensayo se encuentra en el capítulo de las planillas de laboratorio. (Soliz, Manual de ensayos de laboratorio, "Determinación de la gravedad específica (ASTM D854)", 2014, págs. 19-27).

2.8. ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR (ASTM D698 AASHTO T99)

2.8.1. Propósito y alcance

El ensayo de Compactación Proctor Estándar ASTM D698 es utilizado para la determinación de la relación que existe entre el contenido de humedad y el peso unitario seco de un suelo (curva de compactación). Además, mediante la anterior relación se determina el peso unitario seco máximo para un valor óptimo del contenido de humedad. Este ensayo se aplica únicamente, a suelos con menos del 30% en peso de partículas retenidas en el tamiz de 19 mm. (Espinoza, 2014, págs. 2 - 9)

2.8.2. Materiales y equipos

- Un molde cilíndrico de metal con dimensiones normadas y diámetro referencial de 4 pulg (molde de compactación de 4 pulg) (Fig. 74).
- Un molde cilíndrico de metal con dimensiones normadas y diámetro referencial de 6 pulg (molde de compactación de 6 pulg) (Fig. 74).
- Un martillo pistón compactador estándar de $2,5 \pm 0,01$ kg de masa que debe tener una caída libre de $304,8 \pm 1,3$ mm. La cara de golpe del pistón tiene un diámetro de $50,8 \pm 0,25$ mm cuando esta nueva. El pistón debe ser reemplazado cuando el diámetro de la cara de golpe es desgastado o expandido en 12 mm. El pistón debe estar equipado con un tubo guía que le permita desplazarse en la caída con facilidad, el tubo guía debe tener al menos cuatro agujeros en cada extremo espaciados 90 grados entre si, el diámetro mínimo para estos agujeros es de 9,5 mm (Fig. 74).



Figura 74. Equipo de compactación en laboratorio.

Fuente. Elaboración propia.

- Una regla de metal rígida recta de no menos de 254 mm de largo.
- Tamices de 19 mm (3/4 pulg), 9,5 mm (3/8 pulg), y 4,75 mm (No. 4) de abertura.
- Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.
- Balanza de 0,01 g de precisión para muestras de hasta 200 g de masa o balanza de 0.1 g de precisión para muestras de más de 200 g de masa.
- Desecador conteniendo sílica gel. Se debe verificar que el sílica gel presente el color adecuado (azul).
- Contenedores. Deben ser claramente identificables y se requerirá de un contenedor por cada determinación de contenido de humedad.
- Equipo de manipuleo: guantes de asbesto, guantes de goma, espátulas y cucharas.

2.8.3. Métodos

Tres son los métodos de compactación propuestos, debiéndose elegir uno de estos en función al porcentaje de tamaño de partículas presentes en la muestra de suelo.

Para la selección del método de compactación el suelo debe ser tamizado a través de las mallas 3/4 pulg, 3/8 pulg y No. 4.

El método A. utiliza como material de compactación el suelo que pasa el tamiz No. 4. Es aplicado a suelos con un porcentaje menor al 20%, por masa del material, retenido en el tamiz No. 4.

El método B. utiliza como material de compactación el suelo que pasa el tamiz 3/8 pulg. Es aplicado a muestras de suelo con un valor mayor al 20 %, por masa del material, retenido en el tamiz No. 4 y con un valor menor al 20%, por masa del material, retenido en el tamiz 3/8 pulg.

El método C. utiliza como material de compactación el suelo que pasa el tamiz 3/4 pulg. Es aplicado a muestras de suelo con un valor mayor al 20 %, por masa del material, retenido en el tamiz 3/8 pulg y con un valor menor al 30 %, por masa del material, retenido en el tamiz 3/4 pulg.

Los métodos difieren en el tamaño máximo de partícula de la muestra a compactar, número de golpes por capa y molde a utilizarse, como se muestra en la Tabla 19.

Características	Método		
	A	B	C
Molde: - volumen [cm ³]	944	944	2124
- diámetro [mm]	101,6	101,6	152,4
Martillo: - masa [kg]	2,5	2,5	2,5
- altura de caída [mm]	305	305	305
Número de capas de compactación	3	3	3
Número de golpes por capa	25	25	56
Energía de compactación [kNxm/m ³]	600	600	600
Suelo a usarse: - pasa el tamiz	No. 4	3/8"	3/4"
Criterio de selección:			
- porcentaje retenido en el tamiz No. 4	< 20 %	> 20 %	
- porcentaje retenido en el tamiz 3/8"		< 20 %	> 20 %
- porcentaje retenido en el tamiz 3/4"			< 30 %

Tabla 19. Especificaciones técnicas del ensayo de compactación Proctor según métodos ASTM.

Fuente. Norma ASTM D698

2.8.4. Muestra a ensayar

➤ Limitaciones

Los métodos se aplican en suelos que tienen 30 % o menos por masa de partículas retenidas en el tamiz $\frac{3}{4}$ pulg.

Los métodos generalmente reproducen pesos unitarios secos máximos bien definidos para suelos que pueden retener agua, es decir suelos que no presentan un drenado libre.

Si los métodos son aplicados a suelos con drenado libre el peso unitario seco máximo no será bien definido y podría ser menor que el obtenido con el método de compactación apropiado para estos casos (Método estándar de ensayo para índice máximo de densidad y peso unitario seco de suelos utilizando una mesa vibratoria, ASTM D4253).

Si la muestra de la prueba contiene más de 5 % por masa del material de fracción gruesa y el material no se incluirá en la prueba, las correcciones deben ser hechas al peso unitario y a el contenido humedad de la muestra para hacer esta corrección se utiliza la Práctica D4718.

➤ Cantidad de muestra

La masa de muestra seca requerida para los métodos A y B es aproximadamente de 16 kg, y para el método C de 29 kg. Por lo tanto, la muestra obtenida en campo debe ser de por lo menos 23 kg para los métodos A y B y 45 kg para el método C (Tabla 20).

Método	Masa de muestra mínima	
	Seca	En campo
	kg	kg
A	16	23
B	16	23
C	29	45

Tabla 20. Masa mínima de muestra requerida para ensayo Proctor modificado.

Fuente. Norma ASTM D698 (adaptada de ASTM 2003).

➤ Reutilización de muestra

La utilización de muestras que previamente hayan sufrido un proceso de compactación en laboratorio produce una variación en los resultados obtenidos. Por lo

que se descarta la reutilización de muestras en procesos de compactación en laboratorio.

➤ **Degradación de muestra**

Los suelos que contienen partículas que se degradan durante la compactación se constituyen en un problema, especialmente cuando se tiene mayor degradación durante la compactación en laboratorio que durante la compactación en campo, que es el caso típico. Como consecuencia de esta diferencia, en muchas ocasiones, no es posible alcanzar en campo los valores de compactación obtenidos a partir de ensayos de laboratorio.

Los suelos residuales son los que sufren mayor degradación de la estructura de sus partículas al ser compactados. Gidigasú (1974) demostró la influencia tanto de la preparación de las muestras y del procedimiento de laboratorio en las características de compactación de los suelos residuales.

Cuando el suelo a compactar es degradable, se recomienda determinar los parámetros de compactación a través de un proceso de pruebas en campo, que contribuirán a la optimización de la elección y operación del equipo (Simmons & Blight 1997).

➤ **Preparación de la muestra**

1. Secar la muestra al ambiente, hasta que esta tenga un contenido de humedad bajo (Figura 75).
2. Determinar el contenido de humedad inicial de la muestra, w_o , y los límites de consistencia.



Figura 75. Secado de la muestra.

Fuente. Elaboración propia.

- Si el suelo es plástico, con la ayuda de la Figura 76 estimar el valor de humedad óptima, tomando en cuenta la siguiente recomendación: la gráfica de la Figura 76. fue propuesta por Johnson & Salberg (1962) para una energía de compactación estándar, por lo tanto, para energía de compactación modificada al valor de contenido de humedad óptimo determinado se le debe restar 2 %. Para muestras no plásticas la estimación del contenido de humedad óptimo debe estar en función del tipo de suelo y principalmente a la experiencia del operador.

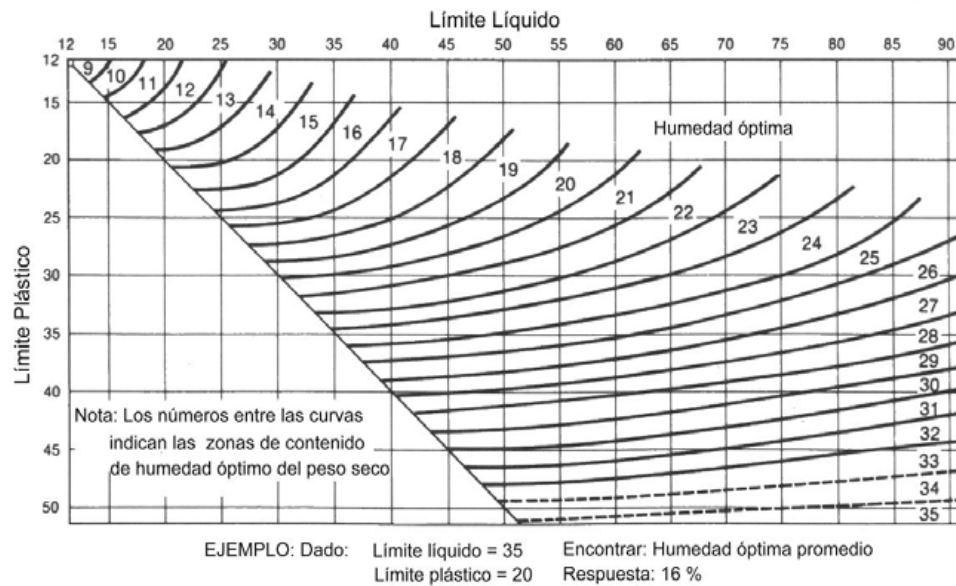


Figura 76. Carta para la determinación del contenido de humedad óptimo para un suelo, utilizando energía de compactación estándar.

Fuente. Johnson & Salberg ,1962.

- Tamizar la muestra a través de las mallas No. 4 (4,75 mm), 3/8 pulg (9,5 mm), 3/4 pulg (19 mm). Luego, conocidos los porcentajes retenidos en cada tamiz, seleccionar el método a seguir según la Tabla 19.
- Preparar por lo menos cinco especímenes de muestra, con contenidos de humedad que estén alrededor del óptimo estimado. Primero se prepara una muestra con el contenido de humedad óptimo estimado. A continuación, se seleccionan los contenidos de humedad para los especímenes restantes, de tal manera que por lo menos dos estén del lado seco y otros dos del lado húmedo del óptimo, con una variación del orden de 2 %, pero en ningún caso, mayor a 4%.

6. Para el cálculo de la cantidad de agua a ser añadida a la muestra, con el propósito de alcanzar los contenidos de humedad previamente determinados, es posible utilizar la siguiente ecuación:

$$V_w = M_o \left[\frac{\frac{\Delta w}{100}}{1 + \frac{w_o}{100}} \right] \quad (1)$$

Donde: V_w = volumen de agua a ser añadido a la muestra [ml].

M_o = masa inicial de la muestra de suelo (2300 g método A y B y 5900 g método C) [g].

Δw = variación requerida del contenido de humedad de la muestra [%].

W_o = contenido de humedad inicial del suelo [%].

7. Adicionar a cada muestra el volumen de agua (Fig. 77a), calculado con la Ecuación 1, y proceder al mezclado hasta asegurar una distribución homogénea (Fig. 77b).



a



b

Figura 77. a) Adición de agua a la muestra. b) Mezclado de la muestra.

Fuente. Elaboración propia.

8. Dejar reposar las muestras humedecidas hasta que el contenido de humedad de las muestras llegue a un equilibrio. La Tabla 21 presenta el tiempo de reposo para diferentes tipos de suelo.

Clasificación	Tiempo de reposo mínimo
	horas
GW, GP, SW, SP	no requiere
GM, SM	3
Otros	16

Tabla 21. Tiempo de reposo en la preparación de muestras.

Fuente. Norma ASTM D698.

2.8.5. Procedimiento del ensayo

1. Determinar las dimensiones del molde y determinar su volumen, V_m (Fig. 78a y b)



a



b

Figura 78. a) Determinación de la longitud del molde. b) Determinación del diámetro del molde.

Fuente. Elaboración propia.

2. Ensamblar y asegurar el molde a la base. Determinar la masa del molde más la base, M_1 (Figura 79).



Figura 79. Determinación de la masa del molde.

Fuente. Elaboración propia.

3. Seleccionar una superficie uniforme y rígida sobre la cual se ubicará el molde durante el proceso de compactación.
4. Ensamblar el anillo de extensión al molde.
5. Compactar la muestra en tres capas, cada capa con 25 golpes para el molde de 4 pulg (método A y B) o con 56 golpes para el de 6 pulg (método C).
6. Aplicar los golpes con una frecuencia uniforme aproximada de 25 golpes por minuto tratando de cubrir toda la superficie de la muestra, asegurando así la homogeneidad de la compactación (Fig. 80 y Fig. 81).

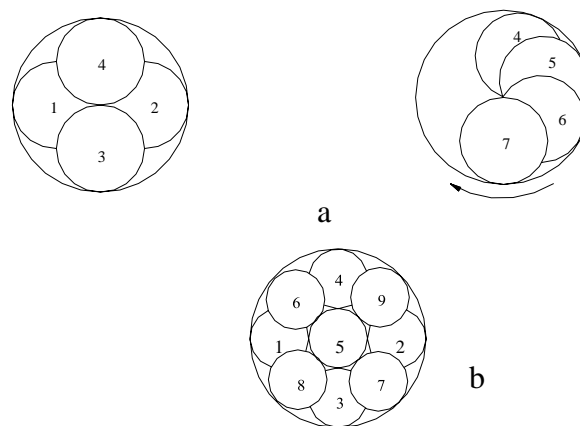


Figura 80. Secuencia de golpes. a) para molde de 4 pulg. b) para molde de 6 pulg.

Fuente. Elaboración propia.



Figura 81. Compactación de la muestra.

Fuente. Elaboración propia.

7. Una vez compactada la última capa, esta debe exceder ligeramente el nivel del

- molde, llegando hasta el anillo de extensión. El exceso no debe ser mayor a 6 mm, de otra manera, descartar la muestra.
8. Quitar el anillo de extensión cortando el suelo en contacto con sus paredes con la ayuda de un cuchillo o una navaja.
 9. Enrasar la muestra compactada, con ayuda de la regla metálica rígida, hasta el nivel del borde del molde, rellenando cualquier orificio con el suelo restante.
 10. Determinar la masa del molde más la base y la muestra, M_2 (Figura 82).



Figura 82. Peso del molde más muestra.

Fuente. Elaboración propia.

11. Extraer suelo de la parte superior de la muestra compactada con el propósito de determinar el contenido de humedad, w_1 , extraer suelo de la parte inferior de la muestra compactada y determinar el contenido de humedad, w_2 . El contenido de humedad de la muestra, w , debe calcularse como el promedio de los dos valores anteriores cuya diferencia no sobrepase de 0,5 %.
12. Repetir el procedimiento en las cinco muestras de suelo preparadas.

2.8.6. Cálculos

Los datos obtenidos de la conducción del procedimiento del ensayo, son los siguientes:

- Volumen del molde, V_m
- Masa del molde más la base, M_1
- Masa del molde más la base y la muestra, M_2
- Contenido de humedad de la muestra, w

Con ayuda de la Ecuación 2 determinamos la masa de la muestra, M :

$$M = M_2 - M_1 \quad (2)$$

El peso unitario de la muestra, γ es obtenido con la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{M * g}{V_m} \quad (3)$$

donde: g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

El peso unitario seco de la muestra, γ_d , está dado por:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w}{100}} \quad (4)$$

Representar los resultados del ensayo en una gráfica contenido de humedad versus peso unitario seco, ajustar los puntos obtenidos a una curva. Identificar en la curva el valor máximo del peso unitario seco (peso unitario seco máximo, γ_{dmax}) y el valor de contenido de humedad correspondiente a este último (contenido de humedad óptimo, w_{optimo}).

2.8.7. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo deberán ser presentados en una planilla que contenga además los datos de la muestra (Identificación, método utilizado, tipo, procedencia, profundidad de extracción, etc.).

- método usado (A, B, o C)
- método de la preparación usado (húmedo o seco)
- óptimo contenido de humedad estándar, el más cercano a 0,1 %
- el máximo peso unitario seco, el mas cercano a 0,1 KN/m³

La planilla de registro del ensayo de compactación proctor estándar está en el capítulo de las planillas de laboratorio.

2.9. ENSAYO DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO (ASTM D1557)

2.9.1. Propósito y alcance

El ensayo de Compactación Proctor Modificado (ASTM D1557) es utilizado para la determinación de la relación que existe entre el contenido de humedad y el peso unitario seco de un suelo. Además, mediante la anterior relación se determina el peso unitario seco máximo para un valor óptimo del contenido de humedad. Este ensayo se aplica únicamente, a suelos con menos del 30% en peso de partículas retenidas en el tamiz de 19 mm. (Fernando Lopez Alborta, 2014, págs. 11 - 18)

2.9.2. Materiales y equipos

- Un molde cilíndrico de metal con dimensiones normadas y diámetro referencial de 4 pulg (molde de compactación de 4 pulg) (Figura 83).
- Un molde cilíndrico de metal con dimensiones normadas y diámetro referencial de 6 pulg (molde de compactación de 6 pulg) (Figura 83).
- Un martillo pistón compactador modificado de $4.54 \pm 0,01$ kg de masa que debe tener una caída libre de $457.2 \pm 1,6$ mm. La cara de golpe del pistón tiene un diámetro de $50.8 \pm 0,25$ mm cuando esta nueva. El pistón debe ser reemplazado cuando el diámetro de la cara de golpe es desgastado o expandido en 12 mm.
- El pistón debe estar equipado con un tubo guía que le permita desplazarse en la caída con facilidad, el tubo guía debe tener al menos cuatro agujeros en cada extremo espaciados 90 grados entre sí, el diámetro mínimo para estos agujeros es de 9.5 mm (Figura 83).



Figura 83. Equipo de compactación en laboratorio.

Fuente. Elaboración propia.

- Una regla de metal rígida recta de no menos de 254 mm de largo.
- Tamices de 19 mm (3/4 pulg), 9.5 mm (3/8 pulg), y 4.75 mm (No. 4) de abertura.
- Horno de secado, controlado por termostato, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 ± 5 °C.
- Balanza de 0.01 g de precisión para muestras de hasta 200 g de masa o balanza de 0.1 g de precisión para muestras de más de 200 g de masa.
- Desecador conteniendo sílica gel. Se debe verificar que el sílica gel presente el color adecuado azul.
- Contenedores. Deben ser claramente identificables y se requerirá de un contenedor por cada determinación de contenido de humedad.
- Equipo de manipuleo: guantes de asbesto, guantes de goma, espátulas y cucharas.

2.9.3. Métodos

Tres son los métodos de compactación propuestos, debiéndose elegir uno de estos en función al porcentaje de tamaño de partículas presentes en la muestra de suelo.

Para la selección del método de compactación el suelo debe ser tamizado a través de las mallas 3/4 pulg, 3/8 pulg y No. 4.

El método A. utiliza como material de compactación el suelo que pasa el tamiz No. 4. Es aplicado a suelos con un porcentaje menor al 20%, por masa del material, retenido en el

tamiz No. 4.

El método B. utiliza como material de compactación el suelo que pasa el tamiz 3/8 pulg. Es aplicado a muestras de suelo con un valor mayor al 20 %, por masa del material, retenido en el tamiz No. 4 y con un valor menor al 20%, por masa del material, retenido en el tamiz 3/8 pulg.

El método C. utiliza como material de compactación el suelo que pasa el tamiz 3/4 pulg. Es aplicado a muestras de suelo con un valor mayor al 20 %, por masa del material, retenido en el tamiz 3/8 pulg y con un valor menor al 30 %, por masa del material, retenido en el tamiz 3/4 pulg.

Los métodos difieren en el tamaño máximo de partícula de la muestra a compactar, número de golpes por capa y molde a utilizarse, como se muestra en la Tabla 22.

Características	Método		
	A	B	C
Molde: - volumen [cm ³]	944	944	2124
- diámetro [mm]	101.6	101.6	152.4
Martillo: - masa [kg]	4.54	4.54	4.54
- altura de caída [mm]	457	457	457
Número de capas de compactación	5	5	5
Número de golpes por capa	25	25	56
Energía de compactación [kN×m/m ³]	2700	2700	2700
Suelo a usarse: - pasa el tamiz	No. 4	3/8"	3/4"
Criterio de selección:			
- porcentaje retenido en el tamiz No. 4	< 20 %	> 20 %	
- porcentaje retenido en el tamiz 3/8"		< 20 %	> 20 %
- porcentaje retenido en el tamiz 3/4"			< 30 %

Tabla 22. Especificaciones técnicas del ensayo de compactación Proctor según métodos ASTM.

Fuente. Norma ASTM D1557.

2.9.4. Muestra a ensayar

➤ Limitaciones

Los métodos se aplican en suelos que tienen 30 % o menos por masa de partículas retenidas en el tamiz $\frac{3}{4}$ pulg.

Los métodos generalmente reproducen pesos unitarios secos máximos bien definidos para suelos que pueden retener agua, es decir suelos que no presentan un drenado libre. Si los métodos son aplicados a suelos con drenado libre el peso unitario seco máximo no será bien definido y podría ser menor que el obtenido con el método de compactación apropiado para estos casos (Método estándar de ensayo para índice máximo de densidad y peso unitario seco de suelos utilizando una mesa vibratoria, ASTM D4253).

➤ Cantidad de muestra

La masa de muestra seca requerida para los métodos A y B es aproximadamente de 16 kg, y para el método C de 29 kg. Por lo tanto, la muestra obtenida en campo debe ser de por lo menos 23 kg para los métodos A y B y 45 kg para el método C (Tabla 23).

Método	Masa de muestra mínima	
	Seca	En campo
	kg	kg
A	16	23
B	16	23
C	29	45

Tabla 23. Masa mínima de muestra requerida para ensayo Proctor modificado.

Fuente. Norma ASTM D1557 (adaptada de ASTM 2003).

➤ Reutilización de muestra

La utilización de muestras que previamente hayan sufrido un proceso de compactación en laboratorio produce una variación en los resultados obtenidos. Por lo que se descarta la reutilización de muestras en procesos de compactación en laboratorio.

➤ Degradación de muestra

Los suelos que contienen partículas que se degradan durante la compactación se constituyen en un problema, especialmente cuando se tiene mayor degradación durante la

compactación en laboratorio que durante la compactación en campo, que es el caso típico. Como consecuencia de esta diferencia, en muchas ocasiones, no es posible alcanzar en campo los valores de compactación obtenidos a partir de ensayos de laboratorio.

Los suelos residuales son los que sufren mayor degradación de la estructura de sus partículas al ser compactados. Gidigasú (1974) demostró la influencia tanto de la preparación de las muestras y del procedimiento de laboratorio en las características de compactación de los suelos residuales.

Cuando el suelo a compactar es degradable, se recomienda determinar los parámetros de compactación a través de un proceso de pruebas en campo, que contribuirán a la optimización de la elección y operación del equipo (Simmons & Blight 1997).

➤ **Preparación de la muestra**

1. Secar la muestra al ambiente, hasta que esta tenga un contenido de humedad bajo (Figura 84).
2. Determinar el contenido de humedad inicial de la muestra, w_o , y los límites de consistencia.
3. Si el suelo es plástico, con la ayuda de la Figura 85 estimar el valor de humedad óptima, tomando en cuenta la siguiente recomendación: la gráfica de la Figura fue propuesta por Johnson & Salberg (1962) para una energía de compactación estándar, por lo tanto, para energía de compactación modificada al valor de contenido de humedad óptimo determinado se le debe restar 2 %. Para muestras no plásticas la estimación del contenido de humedad óptimo debe estar en función del tipo de suelo y principalmente a la experiencia del operador.



Figura 84. Secado de la muestra.

Fuente. Elaboración propia

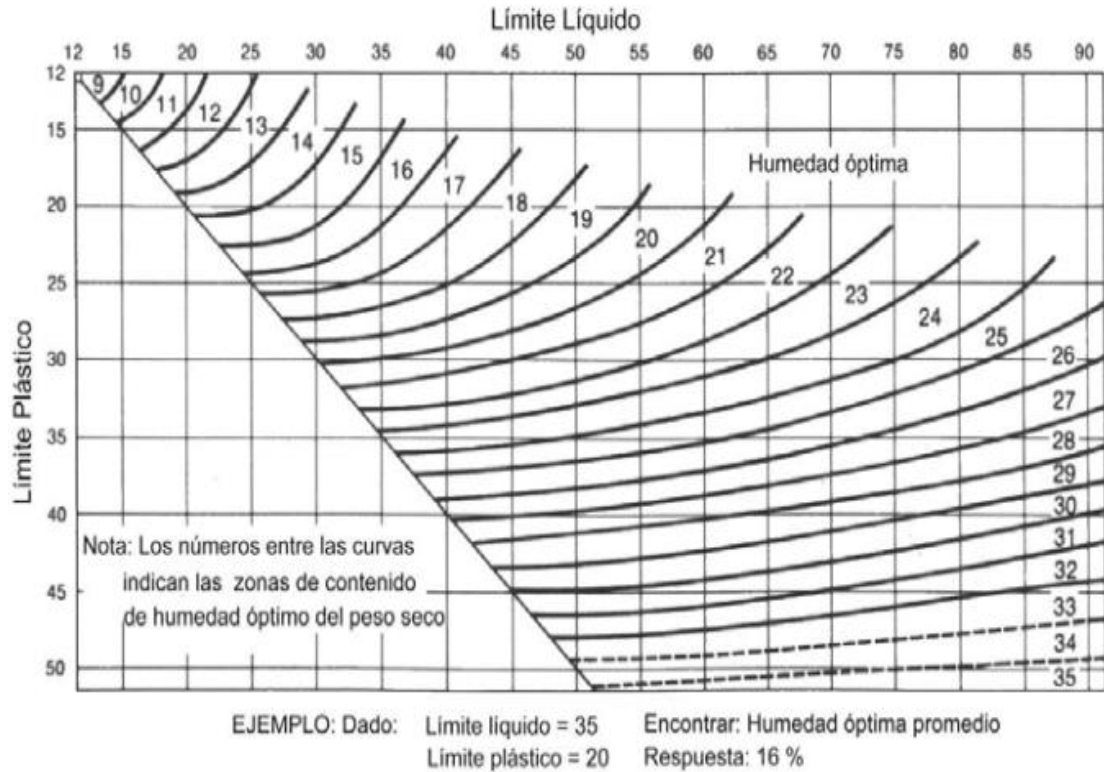


Figura 85. Carta para la determinación del contenido de humedad óptima para un suelo, utilizando energía de compactación estándar.

Fuente. Johnson & Salberg ,1962

4. Tamizar la muestra a través de las mallas No. 4 (4.75 mm), 3/8 plg (9.5 mm), 3/4 plg (19 mm). Luego, conocidos los porcentajes retenidos en cada tamiz, seleccionar el método a seguir según la Tabla 23.
5. Preparar por lo menos cinco especímenes de muestra, con contenidos de humedad que estén alrededor del óptimo estimado. Primero se prepara una muestra con el contenido de humedad óptimo estimado. A continuación, se seleccionan los contenidos de humedad para los especímenes restantes, de tal manera que por lo menos dos estén del lado seco y otros dos del lado húmedo del óptimo, con una variación del orden de 2 %, pero en ningún caso, mayor a 4%.
6. Para el cálculo de la cantidad de agua a ser añadida a la muestra, con el propósito de alcanzar los contenidos de humedad previamente determinados, es posible utilizar la siguiente ecuación:

$$V_w = M_o \left[\frac{\frac{\Delta w}{100}}{1 + \frac{w_o}{100}} \right] \quad (1)$$

Donde: V_w = volumen de agua a ser añadido a la muestra [ml].

M_o = masa inicial de la muestra de suelo (2300 g método A y B y 5900 g método C) [g].

Δw = variación requerida del contenido de humedad de la muestra [%].

W_o = contenido de humedad inicial del suelo [%].

7. Adicionar a cada muestra el volumen de agua, calculado con la Ecuación 1, y proceder al mezclado hasta asegurar una distribución homogénea (Fig. 86).
8. Dejar reposar las muestras humedecidas hasta que el contenido de humedad de las muestras llegue a un equilibrio La Tabla 24 presenta los tiempos de reposo para diferentes tipos de suelo.

Clasificación	Tiempo de reposo mínimo
	horas
GW, GP, SW, SP	no requiere
GM, SM	3
Otros	16

Tabla 24. Tiempo de reposo en la preparación de muestras.

Fuente. Norma ASTM D1557.



Figura 86. Adición de agua a la muestra y mezclado de la muestra.

Fuente. Elaboración propia.

2.9.5. Procedimiento del ensayo

1. Determinar las dimensiones del molde y determinar su volumen V_m (Fig. 88a y b).
2. Ensamblar y asegurar el molde a la base. Determinar la masa del molde más la base, M_1 (Figura 89).
3. Seleccionar una superficie uniforme y rígida sobre la cual se ubicará el molde durante el proceso de compactación.
4. Ensamblar el anillo de extensión al molde.
5. Compactar la muestra en cinco capas, cada capa con 25 golpes para el molde de 4 pulg (método A y B) o con 56 golpes para el de 6 pulg (método C).
6. Aplicar los golpes con una frecuencia uniforme aproximada de 25 golpes por minuto tratando de cubrir toda la superficie de la muestra, asegurando así la homogeneidad de la compactación (Fig. 87 y 90).
7. Una vez compactada la última capa, esta debe exceder ligeramente el nivel del molde, llegando hasta el anillo de extensión. El exceso no debe ser mayor a 6 mm, de otra manera, descartar la muestra.
8. Quitar el anillo de extensión cortando el suelo en contacto con sus paredes con la ayuda de un cuchillo ó una navaja.
9. Enrasar la muestra compactada, con ayuda de la regla metálica rígida, hasta el nivel del borde del molde más suelo compactado, rellenando cualquier orificio con el suelo restante.
10. Determinar la masa del molde más la base y la muestra, M_2 (Figura 91).
11. Extraer suelo de la parte superior de la muestra compactada con el propósito de determinar el contenido de humedad, w_1 , extraer suelo de la parte inferior de la muestra compactada y determinar el contenido de humedad, w_2 . El contenido de humedad de la muestra, w , debe calcularse como el promedio de los dos valores anteriores cuya diferencia no sobrepase de 0,5%.
12. Repetir el procedimiento en las cinco muestras de suelo preparadas.

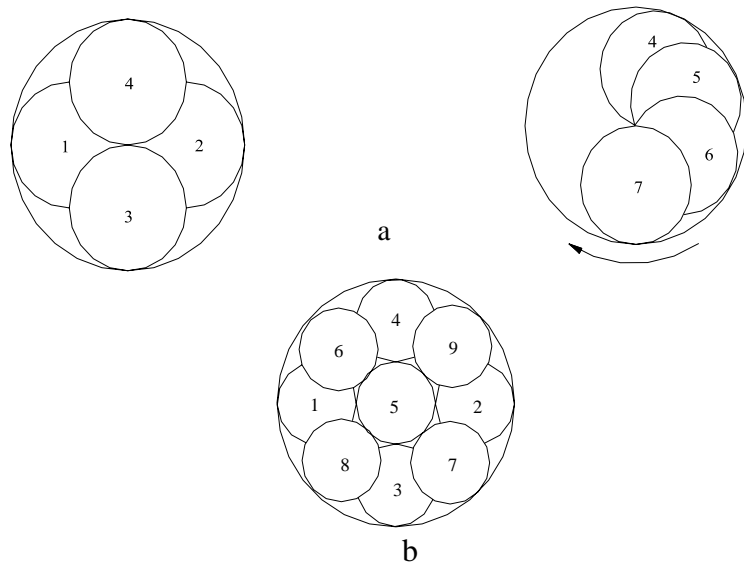


Figura 87. Secuencia de golpes. a) para molde de 4 pulg. b) para molde de 6 pulg.

Fuente. Elaboración propia.



a



b

Figura 88. Determinación de altura de molde. b) Determinación de diámetro de molde

Fuente. Elaboración propia.



Figura 89. Determinación la masa del molde

Fuente. Elaboración propia.



Figura 90. Compactación de la muestra en el molde

Fuente. Elaboración propia.



Figura 91. Determinación de la masa del suelo compactado mas molde.

Fuente. Elaboración propia.

2.9.6. Cálculos

Los datos obtenidos de la conducción del procedimiento del ensayo, son los siguientes:

- Volumen del molde, V_m
- Masa del molde más la base, M_1
- Masa del molde más la base y la muestra, M_2
- Contenido de humedad de la muestra, w

Con ayuda de la Ecuación 2 determinamos la masa de la muestra, M :

$$M = M_2 - M_1 \quad (2)$$

El peso unitario de la muestra, γ , es obtenido con la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{M * g}{V_m} \quad (3)$$

donde: g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

El peso unitario seco de la muestra, γ_d , esta dado por:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w}{100}} \quad (4)$$

Representar los resultados del ensayo en una gráfica contenido de humedad versus peso unitario seco, ajustar los puntos obtenidos a una curva. Identificar en la curva el valor máximo del peso unitario seco (peso unitario seco máximo, γ_{dmax}) y el valor de contenido de humedad correspondiente a este último (contenido de humedad óptimo, w_{optimo}).

2.9.7. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo deberán ser presentados en una planilla que contenga los datos de la muestra como (Identificación, método utilizado, tipo, procedencia, operador, descripción, profundidad de extracción, etc.). La planilla de registro de ensayo de compactación de proctor modificado está en el capítulo de las planillas de laboratorio de la Universidad Amazónica de Pando.

2.10. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD EN CAMPO, MÉTODO DEL CONO DE ARENA (ASTM D1556 AASHTO T191)

2.10.1. Resumen ejecutivo

En el presente informe se describe el procedimiento para la determinación de la densidad en campo de suelos cuya partícula de tamaño máximo no exceda los 38 mm, por medio de una serie de mediciones y procedimientos normalizados. (Liliana Araceli Rodriguez Alvarez, 2014, págs. 25 - 29)

2.10.2. Propósito y alcance

Determinar la densidad en campo mediante el método del cono de arena de ensayo estándar propuesto por la ASTM D1556.

La densidad en campo de un suelo está dada por la relación que existe entre la masa y el volumen de una porción de suelo (Ec. 1):

$$\rho = \frac{\text{masa del suelo}}{\text{volumen}} \quad (1)$$

2.10.3. Materiales y equipos

- Placa base.
- Botellón con cono.
- Herramienta para excavar.
- Balanza.
- Horno.
- Contenedor para evitar pérdidas de humedad.
- Arena de cuarzo tipo Ottawa*.

* La arena debe cumplir con ciertas exigencias que garantizan que el procedimiento sea bien ejecutado entre estas están: la arena debe ser limpia, seca, uniforme en densidad y gradación y no cementada, observando que su coeficiente de uniformidad debe ser menor que 2 ($cu < 2$).

En la Figura 92 se muestra las características del aparato para realizar el ensayo de cono de arena y en la Figura 93 se muestran todos los materiales empleados para la realización del ensayo.

2.10.4. Muestra a ensayar

- El suelo a ensayar debe tener suficiente cohesión de forma tal que un orificio hecho en él se mantenga estable, sin que las paredes se desmoronen.
- El suelo a ensayar no debe ser orgánico, saturado ni altamente plástico ya que debe soportar presión durante el ensayo.
- En caso de que el tamaño de la partícula de mayor tamaño sobrepase los 38 mm, deberá emplearse el método de ensayo, ASTM D4914 ó D5030.

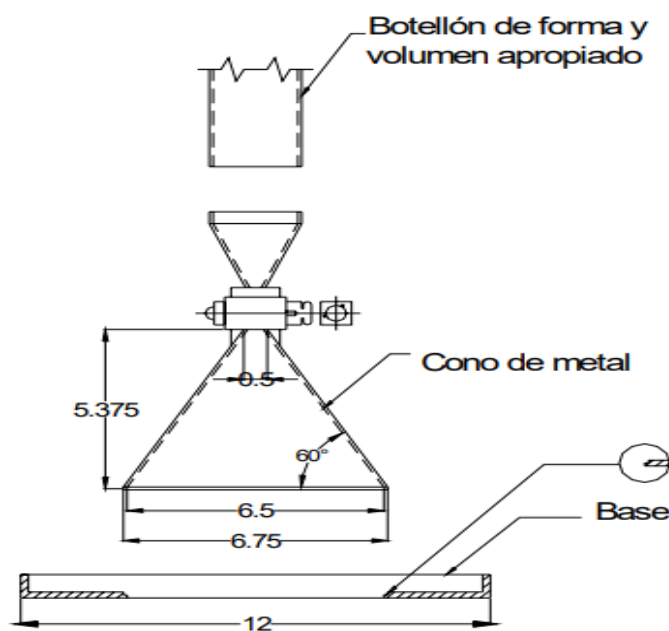


Figura 92. Aparato de cono de arena.

Fuente. Elaboración propia.

2.10.5. Procedimiento del ensayo

- **Calibración del cono de arena y determinación del peso específico de la arena.**
 1. Pesar el botellón con arena más el cono, M_1 (Fig. 94a).
 2. Voltrear el botellón sobre una superficie lisa y plana.

3. Una vez volteado el botellón debe abrirse la válvula con que cuenta el botellón para hacer fluir la arena hasta que el cono esté lleno (Fig. 94b). El botellón más la arena sobrante deben ser pesados, M_2 .
4. Para la determinación del peso específico se emplea el molde de 4" del ensayo Proctor, del que debe obtenerse el volumen, V_m , a través de la medida directa de sus dimensiones. Además, debe obtenerse la masa del molde, M_m .
5. El molde de ensayo Proctor debe ser llenado con arena del botellón, evitando que la arena sufra compactación debiendo luego pesar el molde Proctor más la arena que contiene, M_3 (Fig. 95).
6. Antes de realizar los procedimientos en campo es importante verificar el estado de los equipos, pues cualquier daño que presenten afectará los resultados.

➤ **Procedimiento en campo**

1. Antes de ir a campo debe realizarse el pesaje del botellón con arena más el cono, M_4 .
2. Elegir el sitio adecuado para realizar el ensayo, esto es: el sitio debe ser representativo del área que se quiere describir y la superficie debe ser plana de forma tal que la placa base puede reposar de la mejor manera posible.
3. Colocar la placa asegurando que tenga contacto pleno con el suelo, de ser posible marcar el perímetro para tener control pleno sobre el sitio de ensayo, asegurando que la placa no sufra desplazamientos.
4. Hacer un hueco en el suelo (Fig. 96) que tenga diámetro igual al del cono y profundidad suficiente para que la arena contenida en el botellón sea suficiente para llenar el hueco, el cono y aún sobre alguna porción en el botellón. La porción de suelo extraída del hueco debe mantenerse de tal forma que no existan pérdidas de humedad ni de masa.
5. Determinar la masa del suelo extraído del hueco, M_5 .
6. Dejar fluir la arena del botellón en el hueco hasta que el hueco y cono estén llenos, esto ocurre cuando la arena deja de fluir (Fig. 97 y 98).
7. Determinar la masa del botellón más el contenido de arena sobrante, M_6 .
8. Determinar el contenido de humedad de la muestra de suelo, w .

2.10.6. Cálculos

Los datos obtenidos del procedimiento del ensayo, son los siguientes:

- Masa de botellón + arena + cono, M_1 .
- Masa de botellón + arena sobrante + cono, M_2 .
- Masa de molde Proctor, M_m .
- Masa de molde Proctor + arena, M_3 .
- Masa de botellón + arena + cono, M_4 .
- Masa de suelo extraído del hueco, M_5 .
- Masa de botellón + arena sobrante + cono, M_6 .
- Contenido de humedad de la muestra de suelo, w .

La masa de arena, M_c que llena el cono es calculada como:

$$M_c = M_1 - M_2 \quad (2)$$

Con ayuda de la Ecuación 3 determinamos el peso específico de la arena, γ_d :

$$\gamma_d = \frac{M_3 - M_m}{V_m} * 9,81 \quad (3)$$

La Ecuación 2 es aplicada para conocer la masa de suelo seco, M_d .

$$M_d = 100 \frac{M_5}{(w+100)} \quad (4)$$

El volumen del hueco, V_h , es calculado como:

$$V_h = \frac{M_4 - M_6 - M_c}{\gamma_d} * 9,81 \quad (5)$$

La densidad del suelo húmedo, ρ_h , y la densidad del suelo seco, ρ_d , se calcula con:

$$\rho_h = \frac{M_5}{V_h} \quad (6)$$

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_h} \quad (7)$$

Para obtener valores de peso específico en unidades de kN/m^3 hay que multiplicar la Ecuaciones 6 y 7 por $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$.



Figura 93. Materiales necesarios para el ensayo.

Fuente. Elaboración propia.



a



b

Figura 94. a) Pesaje de botellón + cono + arena. b) Calibración de cono.

Fuente. Elaboración propia.



Figura 95. Determinación del peso específico de arena.

Fuente. Elaboración propia.



Figura 96. Excavación de hoyo

Fuente. Elaboración propia.



Figura 97. Llenado del hoyo con arena tipo Ottawa.

Fuente. Elaboración propia.



Figura 98. Muestra extraída y materiales en campo.

Fuente. Elaboración propia.

2.10.7. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo deberán ser presentados en una planilla que contenga los datos de la muestra (Identificación, tipo, procedencia, ubicación, profundidad de extracción, etc.). La planilla de registros del ensayo se encuentra en el capítulo de las planillas de laboratorio de Laboratorio de suelos de la Universidad Amazonia de Pando.

2.11. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA DEL SUELO (CBR DE LABORATORIO) (ASTM D1883 AASHTO T193)

2.11.1. Objetivo

Establecer la metodología para la ejecución del ensayo de relación de soporte de California, CBR en laboratorio en suelos compactados, con la humedad óptima, niveles de energía variables y el cálculo del valor CBR a partir de la comparación entre la carga de penetración del suelo y la de un material estándar, permitiendo evaluar la calidad relativa de suelos usados en subrasantes, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, bases y capas de rodadura granulares, en concordancia con el procedimiento ASTM D1883. (Carlos Salinas, 2006)

2.11.2. Alcance

- Este procedimiento se aplica a todo ensayo de relación de soporte de California, CBR realizado por personal del Laboratorio de Suelos cuando se quiere determinar la razón CBR de un suelo.
- El procedimiento es empleado en todo tipo de suelo en el que pueda realizarse compactación.

2.11.3. Responsables

Responsable de laboratorio de suelos, Técnico de laboratorio y toda persona que resulte involucrada en la ejecución de un ensayo CBR ejecutado por el Laboratorio de Suelos.

2.11.4. Términos y definiciones

➤ Operador

Es el técnico, tesista u otra persona capacitada responsable de la operación directa del equipo.

2.11.5. Equipos y herramientas

- Prensa manual de compresión, Ver catálogo de este equipo.
- 3 moldes CBR.
- 3 Discos espaciadores.
- 3 piezas de sobrecarga, (carga metálica anular, cargas ranuradas).
- 3 placas metálica de hinchamiento con perforaciones.
- 1 pistón de penetración.
- 1 anillo de carga con capacidad de 50 KN
- 3 deformímetros de precisión de 0,001” de precisión
- 1 deformímetros de 0,001” de precisión.
- 3 placas de sobrecarga de masa igual a 4,54 kg
- Balanza de 20 kg con precisión de 0,1 g y balanza de 1000 g con precisión de 0,01 g
- Tamices.

2.11.6. Relación Humedad – Densidad

Determine el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima compactada seca del suelo, de acuerdo con los métodos proctor estándar o proctor modificado.

2.11.7. Procedimiento

1. Muestra

1.1. La cantidad de muestra necesaria para realizar el ensayo depende del tamaño máximo de partículas encontrado en la muestra, de acuerdo con los siguientes casos:

1.2. Si todo el material pasa a través del tamiz de 3/4”, todo el suelo es utilizado en la preparación para compactación sin modificaciones. Si existe suelo que es retenido en el tamiz de 3/4”, el material retenido es removido y reemplazado en igual cantidad por suelo de la misma muestra que pasa el tamiz 3/4” y es retenido en el tamiz N° 4.

2. Espécimen

2.1. El ensayo CBR puede ser realizado con especímenes preparados por dos medios distintos:

2.2. Para el contenido de humedad óptimo, de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Con muestra preparada de acuerdo con el numeral 1 el operador determina el valor de peso unitario seco máximo y contenido de humedad óptimo.
- En caso de requerir el valor CBR al 100 % del peso unitario seco y contenido de humedad óptimo el operador compacta el suelo preparado haciendo variar el contenido de humedad en ± 5 % del valor óptimo.
- Si se requiere calcular el valor CBR con el contenido de humedad óptimo y algún porcentaje de peso unitario seco máximo, el operador compacta tres especímenes con una variación de ± 5 % del contenido de humedad óptimo usando el valor de peso unitario seco máximo, pero usando un número de golpes diferente por capa para cada espécimen. El número de golpes por capa varía en forma tal que se obtiene valores de peso unitario seco mayores y menores que el valor deseado. Usualmente se reporta valores CBR al 95 % de peso unitario seco máximo usando 56, 25 y 10 golpes por capa, realizando la penetración en cada uno de los especímenes.
- Inexistencia de protección en la pieza que esta en contacto con la mano, al momento de la transmisión del golpe.
- Postura de trabajo de pie, exigencia física alta.

2.3. Para un rango de valores de contenido de humedad, de acuerdo con la siguiente secuencia:

- Preparar especímenes de acuerdo con el numeral 2, la compactación es realizada en el molde CBR y en caso de que el peso unitario especificado sea el 100 % o un valor muy próximo a éste se necesita mayor cantidad de energía, en algunos casos energía mayor que 56 golpes por capa.
- Para los casos en los que se utiliza 25 golpes y 10 golpes por capa se realiza la penetración.
- Si la muestra es saturada, el operador toma una porción representativa del material

para la determinación del contenido de humedad inicial y otra porción al final de la compactación para la determinación de contenido de humedad final, de acuerdo con el procedimiento técnico de contenido de humedad. Si la muestra no es saturada, el contenido de humedad es determinado de acuerdo con el procedimiento técnico de compactación de suelos con energía estándar o modificada de acuerdo al caso que corresponda.

- El operador arma el molde CBR con el collar de extensión y coloca sobre la placa base con el hoyo de extracción hacia abajo. Introduce el disco espaciador sobre la placa base y coloca el disco de papel filtro sobre el disco espaciador. Luego, el operador compacta el suelo de acuerdo con el numeral 2.2.
- A continuación, remueve el collar de extensión y corta el suelo compactado a nivel del molde. Con material fino rellena los espacios superficiales que quedan después de la nivelación. Luego retira la placa base perforada y el disco espaciador y determina la masa del molde y suelo, acto seguido coloca el disco de papel filtro en la placa base perforada, vuelca el molde y suelo compactado y fija la placa base al molde con el suelo en contacto con el papel filtro.
- El operador coloca la masa de sobrecarga sobre placa perforada y asegura, teniendo cuidado de no dañar el suelo. Luego aplica una carga igual a la masa del material base y pavimento que no es menor a 4,54 kg. Si no se especifica la masa correspondiente al pavimento, el operador aplica carga igual a 4,54 kg.



a



b

Figura 99. a) Moldes con suelo compactado. b) Moldes con suelo antes de sumergir

Fuente. Elaboración propia.

- Luego sumerge el molde y cargas en agua. El operador toma las lecturas iniciales para expansión y deja el reposo por 96 horas manteniendo el agua en nivel constante. Después de las 96 horas el operador registra las lecturas finales de expansión para calcular el porcentaje de expansión en función de la altura inicial del espécimen, retira el agua y deja drenar a la muestra por un tiempo de 15 minutos cuidando que no exista disturbación o remoción de alguna porción, luego remueve las masas, la placa perforada y el papel filtro y determina y registra la masa.



a



b

Figura 100. a) Lectura inicial antes de sumergir. b) Sumergiendo en agua 96 horas.

Fuente. Elaboración propia.

- Al término del periodo de inmersión, tome las lecturas finales de expansión a cada una de las probetas y calcule el porcentaje de expansión refiriendo dichas lecturas a la altura inicial.

$$\text{Porcentaje de expansión} = \frac{\text{expansion (mm)}}{116.6} * 100$$

3. Procedimiento

- 3.1. El operador coloca la masa de sobrecarga sobre el espécimen y a fin de evitar daños en el suelo coloca el peso anular de 2,27 kg sobre el suelo antes de colocar el pistón de penetración para aumentar la masa hasta alcanzar el valor total de sobrecarga. La masa total es por lo menos igual al peso del material base y en caso de no ser dato conocido es asumido un valor igual a 4,54 kg. Si el espécimen ha sido sumergido en agua la sobrecarga es igual al valor usado en dicha etapa.

- 3.2. Luego coloca el pistón de penetración con la menor cantidad posible de masa, de forma que no exceda 45 N. Inmediatamente coloca los “deformímetros” a cero y registra la lectura.
- 3.3. A continuación, aplica la carga de penetración con una velocidad de 1,27 mm/min, registrando la carga que corresponda a los valores de penetración de 0,64 mm, 1,27 mm, 1,91 mm, 2,54 mm, 3,18 mm, 3,81 mm, 4,45 mm, 5,08 mm, 7,62 mm, 10,16 mm, 12,70 mm y la máxima carga y penetración en caso de que ocurra.
- 3.4. Cuando ha cesado la penetración, el operador retira una porción de suelo de la capa superior para determinar el contenido de humedad. Si el tipo de suelo es fino la cantidad de muestra no es menor que 100 gramos y si el suelo es granular la cantidad de muestra no es menor que 500 gramos.



Figura 101. a) Molde con suelo + pistón. b) Registrando los valores de penetración.

Fuente. Elaboración propia.

2.11.8. Cálculos

1. En base a los resultados obtenidos del ensayo de relación de soporte de California “CBR” en laboratorio, el supervisor de ensayo de CBR calcula el esfuerzo de penetración en MPa y realiza la gráfica de esfuerzo vs penetración. En caso de que las curvas obtenidas presenten una forma curva cóncava cerca del origen, el supervisor realiza una corrección que consiste en prolongar la porción recta de la curva hasta interceptar el eje de abscisas y registrar el valor, como se puede ver en

la Figura 102. La corrección, prácticamente consiste en trasladar el eje de coordenadas hasta el punto de intersección encontrado.

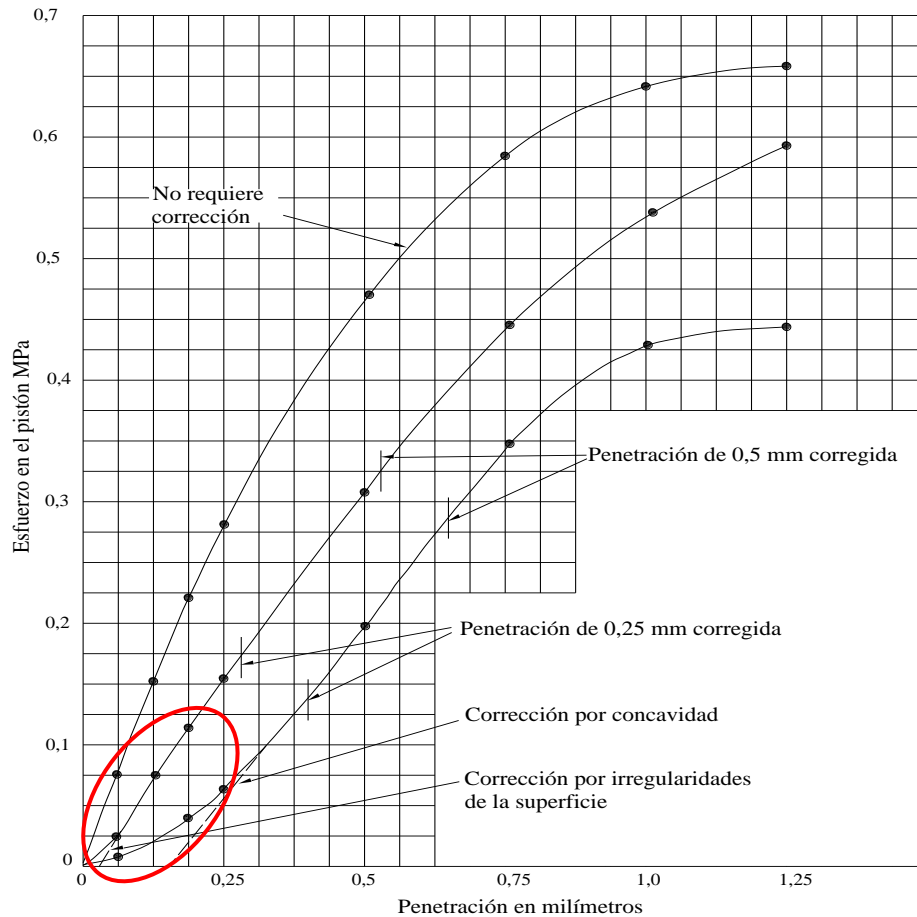


Figura 102. Corrección de curvas de esfuerzo vs. Penetración.

Fuente. Norma ASTM D1883.

2. Después de corregir las curvas, el supervisor determina los valores de esfuerzo correspondientes a valores de penetración de 2,54 mm (0,1”) y de 5,08 mm (0,2”) de penetración y calcula el valor CBR dividiendo el esfuerzo corregido entre el esfuerzo estándar de 6,9 MPa y 10,3 MPa y multiplicando por 100. El supervisor también calcula el valor de CBR para el esfuerzo máximo y si el valor de la penetración es menor que 0,2” el valor es estimado a través de interpolación.
3. El valor de CBR presentado normalmente es el correspondiente a la penetración de 2,54 mm y en caso de que el valor correspondiente a 5,08 mm de penetración sea mayor, el ensayo es realizado nuevamente. Si después de realizado el ensayo por

segunda vez el valor obtenido para 5,08 mm de penetración es mayor, este es el valor CBR del suelo.

4. Para los suelos del tipo A-1, A-2-4 y A-2-6, la razón de soporte se calcula solo para 5,08 mm de penetración. (Claudio Perez, pág. 163)
5. Para los suelos del tipo A-4, A-5, A-6 y A-7, cuando la razón de soporte correspondiente a 5,08 mm resulte mayor que la correspondiente a 2,54 mm, repita el ensayo. Si el ensayo del chequeo entrega un resultado similar, emplee la razón de soporte correspondiente a 5,08 mm de penetración.
6. Para los suelos del tipo A-3, A-2-5 y A-2-7, informe el mayor porcentaje de CBR obtenido entre los correspondientes a 2,54 mm (0,1”) y 5,08 mm (0,2”).
7. Si se ha utilizado la secuencia de preparación descrita en el numeral 2.2. el supervisor realiza la gráfica de valores CBR vs. peso unitario seco y determina el valor CBR requerido a partir del valor de peso unitario seco definido para el proyecto, como en la Figura 103.

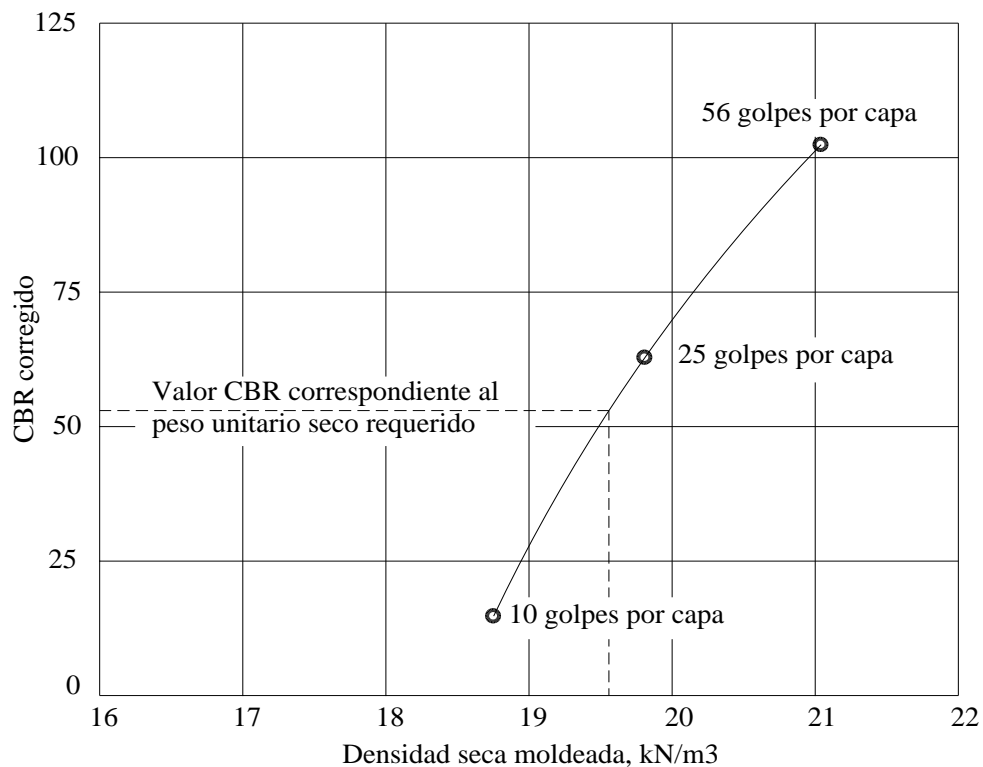


Figura 103. Cálculo del valor CBR.

Fuente. Norma ASTM D1883.

8. Si se ha utilizado la secuencia de preparación descrita en el numeral 2.3. el supervisor realiza la gráfica de compactación y de CBR vs. contenido de humedad eligiendo el valor como el menor correspondiente al rango de contenido de humedad, de acuerdo con las Figuras 104, 105 y 106.

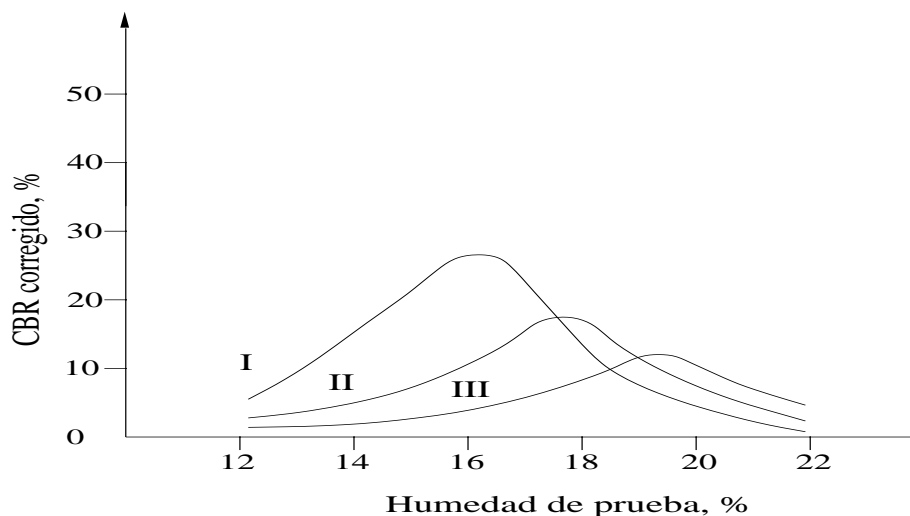


Figura 104. Valores CBR vs humedad de prueba.

Fuente. Norma ASTM D1883.

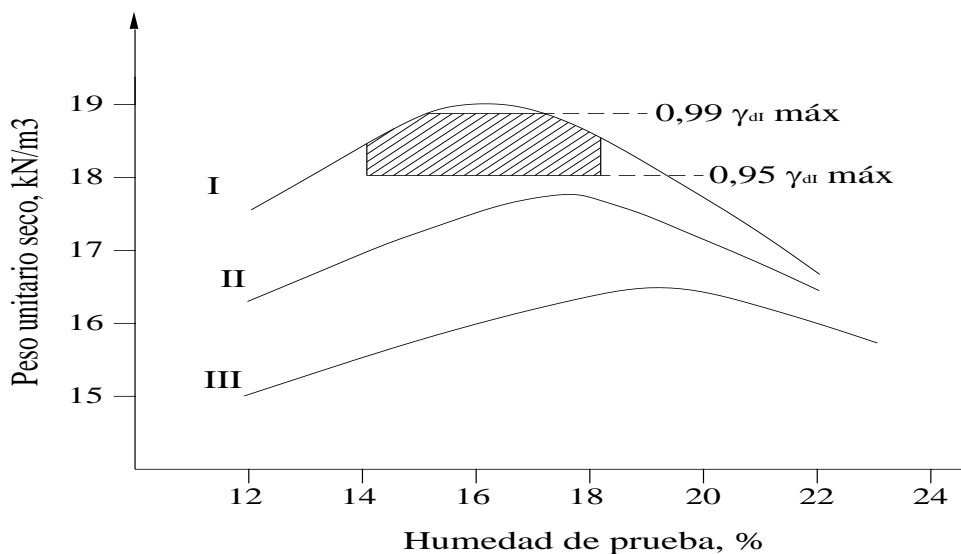


Figura 105. Peso unitario seco vs humedad de prueba

Fuente. Norma ASTM D1883.

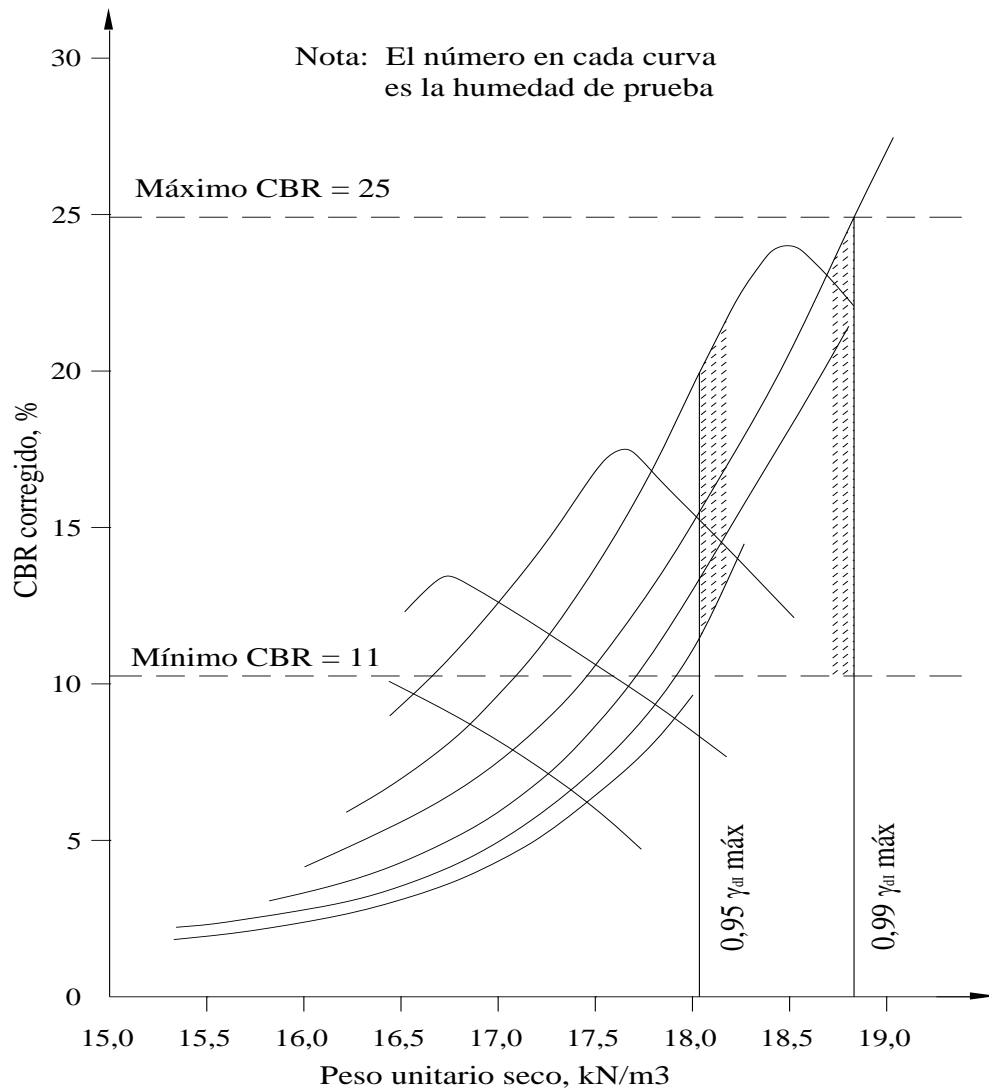


Figura 106. Determinación de valor CBR.

Fuente. Norma ASTM D1883.

2.11.9. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo deberán ser presentados en una planilla, además que contenga los datos de la muestra (Identificación, ubicación, método de extracción, procedencia, descripción, profundidad de extracción, etc.). La planilla de registro se encuentra en el capítulo de planillas de laboratorio corresponde a manual de los ensayos de Laboratorio de Suelos de la Universidad Amazónica de Pando.

2.12. ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR SPT Y MUESTREO CON TUBO PARTIDO EN LOS SUELOS (ASTM D1586 AASHTO T206)

2.12.1. Objetivo

Establecer la metodología para la ejecución del ensayo de penetración estándar SPT y muestreo con tubo partido en los suelos, toda vez que se quiera determinar la resistencia del suelo a la penetración cuantificada por medio del número de golpes N necesarios para la introducción de un muestreador por medio de la caída de un martillo de peso establecido. (Carlos Salinas M. S., 2006)

2.12.2. Alcance

Este procedimiento se aplica a todo ensayo de penetración estándar realizado por el personal del Laboratorio de Suelos en suelos finos (arcillas) hasta suelos tipo arena en los que es posible ejecutar la acción de perforación por métodos manuales o mecánicos sin que resulte en daños para el equipo.

2.12.3. Responsables

Jefe del Laboratorio de Suelos, técnico operador de laboratorio de suelos, auxiliar de laboratorio de suelos, personal de apoyo (becarios) y toda persona que resulte involucrada en la ejecución de un ensayo de penetración estándar del Laboratorio de Suelos.

2.12.4. Términos y definiciones

2.12.4.1. Ensayo de penetración estándar, SPT.

Es el ensayo realizado en campo, que consiste de la penetración de la cuchara bipartita o tubo de pared delgada a través de caída de martillo de peso igual a 63,5 kg, de una altura igual a 760 mm que permite la cuantificación de la resistencia del suelo a penetración junto con la obtención de muestras alteradas o inalteradas de acuerdo al tipo de muestreador empleado.

2.12.4.2. Muestra alterada

Es la porción de suelo extraída con métodos manuales o mecánicos que no conserva sus propiedades físico-mecánicas y que no puede ser utilizada en forma directa en ensayos de laboratorio para la determinación de parámetros de resistencia de deformación.

2.12.4.3. Muestra inalterada

Es la porción de suelo extraída con métodos manuales o mecánicos que conserva el conjunto de propiedades físico-mecánicas como en el estado natural en el punto de extracción.

2.12.4.4. Martillo de SPT.

Material de acero de peso igual que 63,5 kg con un orificio en la parte central de diámetro, guía que sirve de eje para la caída, mediante la cual el operador logra el levantamiento y la caída del martillo o pesa para producir el golpe durante la ejecución del ensayo.

2.12.4.5. Barra guía de SPT.

Es la barra metálica empleada como eje de dirección para la caída y levante sucesivos del martillo durante la ejecución del ensayo en cuya punta cuenta con una base sobre la que cae directamente el martillo.

2.12.4.6. Cuchara bipartita

Es el muestreador empleado para la extracción de muestra alterada durante la ejecución del ensayo SPT.

2.12.4.7. Tubo de pared delgada o tubo Shelby

Es el tipo de muestreador empleado para la extracción de muestra inalterada haciendo uso del equipo SPT.

2.12.4.8. Número de golpes, N

Es el número de caídas del martillo de la altura determinada que permite la penetración de una profundidad de 450 mm de la cuchara o tubo Shelby. El número de golpes representa la resistencia del suelo a la penetración.

2.12.4.9. Número de golpes corregido, N_{70}

Es el número de golpes, N , resultado de la suma de los golpes necesarios para introducir el muestreador los 300 mm finales, a fin de disminuir el nivel de energía del 100% a 70% aplicando factores de corrección.

2.12.4.10. Triangulo con polea

Es el equipo que permite armar el trípode para el martillo y equipo de perforación mecánico, y posibilita mantener el eje vertical durante la perforación y ejecución del ensayo. Consta de tres orificios dispuestos en forma triangular para el armado del trípode y de una polea que permite el libre movimiento de martillo.

2.12.4.11. Supervisor

Es el ingeniero responsable de la ejecución del ensayo en campo.

2.12.4.12. Operador

Es el técnico, tesista u otra persona capacitada responsable de la operación directa del equipo.

2.12.4.13. Ayudante

Es toda persona que resulte involucrada en la preparación del sitio de trabajo, el armado del equipo y/o manejo y transporte de muestras cuya función principal es la de colaborar con la ejecución del ensayo sin intervenir directamente en la operación del equipo.

2.12.5. Equipos y herramientas

- 1 equipo de SPT, que consta de motor.
- 3 Barras para trípode.
- 1 Martillo tipo rosquilla de acero con peso igual a 63,50 kg.
- 1 Triangulo para trípode más la polea.
- 1 soga con gancho.
- 1 barra guía.
- Barras SPT, de 1,50 m, 1,20 m o de 1,00 m en número suficiente para alcanzar la profundidad programada.
- Barras de extractor manual, de 1,20 m en número suficiente para alcanzar la profundidad programada.
- 1 cuchara bipartita (cuchara terzaghi).
- 1 tubo de pared delgada (tubo Shelby).
- Bolsas de plástico y bolsas de yute.
- 2 llaves Stilson de 18”.
- 2 llaves crecen de 15”.
- 1 pala, 1 picota, 1 machete.
- 1 juego de llaves combinadas.
- 1 cepillo con cerdas metálicas.
- 1 gancho extractor de barras para el SPT.
- 1 nivel de burbuja para el SPT.
- 1 cinta métrica de 50 m.
- 1 flexómetro.
- 1 GPS.
- 1 cámara fotográfica.
- 1 pizarra.
- 1 marcador de agua.
- Cinta masquín ¾”, aceite.
- Guantes de seguridad, botas de seguridad, cascos, overoles y todo elemento de

seguridad que garantice la correcta ejecución del ensayo y de acuerdo al número de personas que resulte involucrada en la ejecución del ensayo.

2.12.6. Procedimiento del ensayo

2.12.6.1. Selección del sitio de trabajo

- El supervisor realiza el reconocimiento general de la zona de estudio a fin de seleccionar el o los puntos exactos para la ejecución del ensayo SPT y los marca en el plano de ubicación general de la zona de estudio para tener registro del punto.
- A través de la selección del punto, el supervisor asegura que la zona tenga buenas condiciones, que permite la verificación de acceso y garantiza la representatividad de los puntos elegidos para la ejecución del ensayo.

2.12.6.2. Medidas de seguridad personal

El supervisor, operador y ayudante se visten con overol y se colocan todos los elementos de seguridad pertinentes para la operación del equipo que eviten todo posible daño personal durante toda la ejecución del ensayo.

2.12.6.3. Preparación del sitio de trabajo

El supervisor y el operador ayudados por el ayudante garantizan la limpieza del lugar de ejecución del ensayo. La finalidad es garantizar una correcta alineación de las barras y que la penetración será completamente vertical respecto de la superficie del terreno. Existen casos en que la realización del ensayo comienza a una profundidad determinada distinta de la superficie del terreno, por lo que se hace necesaria la excavación de calicatas hasta llegar al nivel deseado, para lo cual se emplea el procedimiento de excavación de calicatas.

2.12.6.4. Armado del equipo

- El operador con ayuda del ayudante traslada el equipo SPT hasta el lugar preparado para el ensayo y dispone que esté totalmente horizontal la superficie de suelo. como

se muestra en la figura 107.



Figura 107. Armado de equipo de SPT.

Fuente. Elaboración propia.

- El operador y ayudante arman el trípode de sustento, colocando primero el triángulo, se introduce la barra al triángulo, a continuación, se colocan las otras dos barras asegurando que quede armado en forma rígida. A continuación, el operador introduce la soga a polea, posteriormente poner en la plomada y que la soga quede en posición adecuada para la realización del ensayo, a continuación, el operador acciona el motor del equipo SPT y hace funcionar el sistema de elevación del equipo SPT.
- El operador y/o el ayudante limpia y engrasa la rosca de tantas barras como sea necesario para alcanzar la profundidad máxima programada para el ensayo.

2.12.7. Ejecución del ensayo

- El operador perfora en forma manual un orificio de diámetro de 85 mm hasta la profundidad del primer ensayo, que generalmente es de 0,5 m a 2 m. a continuación el operador va aumentando las barras necesarias de acuerdo a la profundidad requerida para la realización del ensayo.
- El operador enrosca el muestreador adecuado (cuchara bipartita o tubo Shelby) a través del eje del equipo SPT en la perforación a las barras preparadas haciendo pasar el cabezal por medio del orificio del martillo. Cuando el muestreador llega al fondo de la excavación, el operador acciona el motor del equipo SPT y eleva el

martillo una altura de 760 mm que se encuentra marcada en la barra guía del martillo.



a



b

Figura 108. a) Cuchara bipartita. b) Cuchara Shelby o tubo Shelby.

Fuente. Elaboración propia

- El operador realiza marcas cada 150 mm con un marcador en las barras de forma tal que el supervisor controle el número de golpes necesarios para la introducción del muestreador por cada 150 mm.



a



b

Figura 109. a) Equipo listo para los golpes. b) Martillo en caída libre SPT.

Fuente. Elaboración propia.

- El operador deja caer el martillo en forma libre y el supervisor controla el número de golpes necesarios para la introducción de las barras una profundidad total de 450 mm divididos en 3 porciones de 150 mm cada una. El supervisor hace registro el número de golpes en campo.

- Cuando se ha alcanzado la penetración de 450 mm, el técnico responsable de campo retira el martillo del eje de penetración y coloca en el extremo del eje, el gancho que sirve para jalar el conjunto de barras.



Figura 110. Retiro de martillo después de penetración de 450 mm.

Fuente. Elaboración propia.

- Cuando el muestreador llega a nivel de superficie, el operador manipula la muestra con cuidado. En caso de haber empleado cuchara bipartita, el operador la abre y dicta al supervisor los datos necesarios descritos en el procedimiento de descripción e identificación visual y manual de suelo. El operador guarda la muestra en una bolsa de plástico y le coloca una etiqueta siguiendo el procedimiento de identificación, rotulado y transporte de muestras.



a



b

Figura 111. a) Toma de muestra de SPT. b) Cuchara bipartita más la muestra extraída.

Fuente. Elaboración propia.

- Si se utiliza el tubo de pared delgada el operador cubre los extremos del muestreador con plástico transparente y coloca una identificación de muestras de acuerdo con el procedimiento de identificación y transporte de muestras.
- El operador coloca la muestra obtenida en una caja para el guardado y transporte de muestras que está resguardado contra inclemencias del tiempo.
- El operador del ensayo de penetración estandar junto con el supervisor repite los pasos descritos de la ejecución del ensayo hasta el paso anterior ejecución del ensayo registrando todos los datos obtenidos en el registro de campo para ensayo de penetración estándar SPT.
- En caso de que sean necesarios más de 50 golpes para penetrar cualquiera de los segmentos intermedios de 150 mm, si se supera 100 golpes para la penetración total de 450 mm o si luego de 10 golpes para un intervalo de 150 mm no se registra avance, entonces el ensayo se detiene y se registra como rechazo.
- Luego de un rechazo el supervisor decide sobre la continuidad del ensayo y en caso de decidir a favor de la continuidad registra en el registro de campo la profundidad a la cual se tomó la decisión. En este caso el operador prepara el equipo para perforación mecánica conforme el procedimiento de perforación mecánica y verifica si es posible pasar la profundidad que representa problemas con perforación hasta alcanzar una profundidad con suelo distinto que permita la continuidad del ensayo.
- Una vez finalizado el ensayo, el operador procede al recojo del equipo verificando que ninguna de las partes resulte o presente daño del equipo.

2.12.8. Manejo y transporte de muestras

- El manejo y transporte de las muestras obtenidas se realiza de acuerdo con el procedimiento de identificación, rotulado y transporte de muestras.

2.12.9. Espaciamiento aproximado de las perforaciones

No existen reglas fijas para determinar el espaciamiento de las perforaciones, pero hay parámetros que contribuyen a encontrar el mismo. (cimentaciones B. M., 2016, pág. 77).

Tabla 2.4 Espaciamiento aproximado de las perforaciones.

Tipo de proyecto	Espaciamiento (m)
Edificios de muchos pisos	10 - 30
Plantas industriales de un piso	20 - 60
Carreteras	250 - 500
Subdivisión residencial	250 - 500
Presas y diques	40 - 80

Tabla 25. Tabla de espaciamiento aproximado de las perforaciones.

Fuente: Braja M. Das (1983). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (7ma. Ed.).

Perforaciones exploratorias en el campo. Tabla 2.4, pág. 77.

2.12.10. Profundidad de las perforaciones

Para determinar la profundidad de las perforaciones para edificios Sowers y Sowers utiliza el siguiente criterio: (cimentaciones B. M., 2016, pág. 76).

$$\frac{D_b}{S^{0.7}} = a$$

Donde:

D_b = Profundidad de perforación.

S = Número de pisos.

$a = 3$ (si D_b esta en metros).

Empleando la fórmula se encuentra la profundidad de perforación para el edificio. Ejemplo para edificio de 5 pisos tenemos:

$$\frac{D_b}{5^{0.7}} = 3$$

$$D_b = 5^{0.7} \times 3$$

$$D_b = 5^{0.7} \times 3 = 9.25 \text{ metros}$$

2.12.11. Criterios para describir la consistencia

Descripción	Criterio
Muy suave	Pulgar penetra el suelo más de 1 pulg (25 mm).
Suave	Pulgar penetra el suelo cerca de 1 pulg (25 mm).
Firme	Pulgar penetra el suelo cerca de ¼ pulg (6mm).
Dura	Pulgar no mella en el suelo pero es fácilmente mellado por la uña del pulgar.
Muy dura	La uña del pulgar no mella el suelo.

Tabla 26. Criterios para describir la consistencia de suelos (ASTM D2488-00).

Fuente: Descripción e identificación de suelos. UMSS. Tabla 6. pág. 55.

2.12.12. Descripción de color de suelo

El color es una propiedad importante para identificar los suelos, por lo tanto, se debe determinar el color de todas las muestras de los diferentes estratos y profundidades.



Figura 112. Determinación de colores

Fuente: Elaboración propia

2.12.13.

Descripción de humedad en campo ASTM**D2488**

Descripción en la condición de humedad como seca, húmedo y mojado, de acuerdo a la tabla.

Descripción	Criterio
Seca	Ausencia de humedad, polvoriento, seco al tacto.
Húmeda	Húmedo pero sin presencia visible de agua.
Mojada	Agua libre visible, usualmente suelos por debajo del nivel freático.

Tabla 27. Criterios para la descripción de la condición de humedad (ASTM D2488-00).

Fuente: Descripción e identificación de suelos. UMSS. Tabla 4. pág. 54.

2.12.14.

Cálculos

- A partir de los datos obtenidos durante la ejecución del ensayo, el ingeniero calcula el número de golpes, N , para la obtención de los parámetros necesarios. El número de golpes, N , es la sumatoria del número de golpes registrados durante la penetración de los 300 mm finales. El número de golpes necesario para penetrar los primeros 150 mm no es tomado en cuenta con propósitos de cálculo y únicamente sirve como control para el rechazo.
- Con propósitos de cálculo y análisis en gabinete el ingeniero determina el número de golpes corregido, N_{60} , empleando la planilla de cálculo de número de golpes corregidos. La energía total real disponible no es del 100%, por lo que se aplican factores de corrección al número de golpes, N , obtenido en el siguiente paso, el valor correspondiente a cada uno de los factores se muestra en el siguiente paso de correcciones.

2.12.14.1. Correcciones para N_{60}

El ensayo está sometido a diferentes variables que afectan el resultado del mismo, para la corrección se empleara el número de penetración estándar como una función de la energía de entrada de hincado y su disipación alrededor del muestreador hacia el suelo. (cimentaciones B. M., 2016, pág. 84).

Las variaciones de n_H , n_B , n_S y n_R con base en recomendaciones de Seed y colaboradores (1985) y Skempton (1986). La cual se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Energía teórica de entrada} = W * h$$

Donde

W = peso del martinete 63.5 Kg.

h = altura de caída 0.76 m.

$$\text{Energía teórica de entrada} = 63.5 \text{ Kg.} * 0.76 \text{ m.} = 48.26 \text{ Kg*m.}$$

El resultado anterior de energía teórica de entrada 48.26 Kg*m indica el impacto de martillo que debe ser verificado al momento de los ensayos.

$$N_{60} = \frac{N * n_H * n_B * n_S * n_R}{60}$$

Donde:

N_{60} = Número de penetración estándar, corregido por las condiciones en el campo.

N = Número de penetración medido.

n_H = Eficiencia del martinete (%).

n_B = Corrección por el diámetro de la perforación.

n_S = Corrección del muestreador.

n_R = Corrección por longitud de la barra.

A continuación, se describe las tablas de variación para la corrección del número de golpes de penetración estándar SPT, corregido por las condiciones en el campo. (cimentaciones B. M., 2016, pág. 84)

Porcentaje de energía transferida estandarizada de martillo para n_H (%).

1. Variación de η_H			
País	Tipo de martinete	Liberación del martinete	η_H (%)
Japón	Toroide	Caída libre	78
	Toroide	Cuerda y polea	67
Estados Unidos	De seguridad	Cuerda y polea	60
	Toroide	Cuerda y polea	45
Argentina	Toroide	Cuerda y polea	45
China	Toroide	Caída libre	60
	Toroide	Cuerda y polea	50

Figura 113. Tabla de Variación de n_H .

Fuente: Braja M. Das (1983). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (7ma. Ed.). Depósitos naturales de suelo y exploración del subsuelo. Tabla 2.5, pág. 84.

Corrección por diámetro del sondeo, Variación para n_B

2. Variación de η_B	
Diámetro, mm	η_B
60-120	1
150	1.05
200	1.15

Figura 114. Tabla de Variación de n_B .

Fuente: Braja M. Das (1983). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (7ma. Ed.). Depósitos naturales de suelo y exploración del subsuelo. Tabla 2.5, pág. 84.

Corrección por muestreador, Variación para n_s

3. Variación de η_s

Variable	η_s
Muestreador estándar	1.0
Con recubrimiento para arena y arcilla densas	0.8
Con recubrimiento para arena suelta	0.9

Figura 115. Tabla de Variación de n_s .

Fuente: Braja M. Das (1983). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (7ma. Ed.).
Depósitos naturales de suelo y exploración del subsuelo. Tabla 2.5, pág. 84.

Corrección por longitud de barras, Variación para n_R

4. Variación de η_R

Longitud de la barra, m	η_R
> 10	1.0
6-10	0.95
4-6	0.85
0-4	0.75

Figura 116. Tabla de Variación de n_R .

Fuente: Braja M. Das (1983). Fundamentos de ingeniería de cimentaciones (7ma. Ed.).
Depósitos naturales de suelo y exploración del subsuelo. Tabla 2.5, pág. 84.

2.12.14.2. Peso Específico de Suelo

El peso específico de suelo se debe realizar de todas las muestras obtenidas de campo de los sondeos de diferentes profundidades, en laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Amazónica de Pando. Braja M. Das. (cimentaciones B. M., 2016, pág. 8).

2.12.14.3. Métodos de diseño directo de suelo, Ensayo de Penetración Estándar

Se revisó bibliografía moderna y se encuentro trabajos de investigación en el vecino país del Brasil para suelos residuales muy similar al nuestro, en la cual sustamos el presente ensayo de penetración estándar. Fernando Schnaid, nos dice en su libro Ensaio de campo e suas aplicacoes a Engenharia de fundacoes.

Ruver y Consoli (2006) establecieron un método de estimación para determinar la capacidad portante para suelos cohesivos y residuales, expresados en términos de valores medios y límites superior e inferior para el rango correspondiente al nivel de confiabilidad de 99%. (Fernando Schnaid, 2014, pág. 55).

$$q_{adm} = 9,54 * N_{SPT,60} \quad (\text{KN/m}^2) \quad \text{Valores medios}$$

$$q_{adm} = 9,54 \cdot N_{SPT,60} + 6,41 \sqrt{N_{SPT,60}^2 - 20,3N_{SPT,60} + 167,3} \quad (\text{kN/m}^2) \text{ limite superior}$$

$$q_{adm} = 9,54 \cdot N_{SPT,60} - 6,41 \sqrt{N_{SPT,60}^2 - 20,3N_{SPT,60} + 167,3} \quad (\text{kN/m}^2) \text{ limite inferior}$$

2.12.14.4. Presentación de resultados

Los resultados del ensayo deberán ser presentados en una planilla, muestra la presentación final de los resultados obtenidos a través de la ejecución del ensayo SPT. Básicamente, consiste en la presentación de la profundidad, identificación del sondeo, identificación de la muestra, ubicación del sondeo, el nivel freático, la descripción del suelo y su clasificación, perfil estratigráfico del suelo, el contenido de humedad, la consistencia, color, el tamaño máximo de partículas, observaciones generales y una gráfica de variación del número de golpes N y N_{60} respecto de la profundidad.

2.13. CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL CON APLICACIÓN DE INCREMENTO DE CARGA (ASTM D2435 AASHTO T216)

2.13.1. Objetivo

El método provee los procedimientos para determinar la magnitud y la velocidad de consolidación de un suelo confinado lateralmente y con drenaje axial, cuando está sujeto a cargas aplicadas en incrementos definidos bajo esfuerzo controlado.

Los resultados de este ensayo son usados para estimar la magnitud y velocidad de los asentamientos totales y diferenciales de una estructura o terraplén, información que es de suma importancia en el diseño de estructuras y la evaluación de su comportamiento. (Geotecnia, 2004)

2.13.2. Alcance

Este procedimiento es aplicado a todo ensayo de consolidación unidimensional en muestras de suelos finos (arcillas) en estado no disturbado y que han sido naturalmente sedimentados en agua, no obstante el procedimiento básico es también aplicable a muestras de suelos compactados o muestras de suelos no disturbados formados por otros procesos tales como meteorización o alteración química, sin embargo la interpretación de estos últimos puede requerir métodos diferentes a los mostrados en este procedimiento ya que los métodos de interpretación presentados son aplicables a muestras de suelos naturalmente sedimentados en agua. Adicionalmente, las muestras de suelos finos que no han obtenidas bajo el nivel freático o que no han sido saturadas en campo, siguen los requisitos establecidos en el procedimiento técnico de preparación de muestras.

2.13.3. Responsables

Responsable de Laboratorio, Técnico de Laboratorio, Auxiliar de Laboratorio y toda persona que resulte involucrada en la ejecución de un ensayo de consolidación unidimensional del Laboratorio de Suelos.

2.13.4. **Términos y definiciones**

2.13.4.1. **Consolidación unidimensional**

Se denomina consolidación al proceso de cambio de volumen provocado por la aplicación de una presión continua sobre una masa de suelo, acompañada de drenaje de agua desde los poros de las partículas del suelo y que ocurre en el transcurso de un tiempo generalmente largo. Cuando el movimiento de las partículas de suelo ocurre sólo en una dirección (vertical) el proceso se denomina consolidación unidimensional.

2.13.4.2. **Consolidación primaria**

Es el cambio de volumen de un suelo de grano fino causado por la expulsión de agua desde los vacíos y la transferencia de carga del exceso de presión de poros de agua a las partículas de suelo.

2.13.4.3. **Consolidación secundaria**

Es el cambio de volumen de un suelo de grano fino causado por el ajuste plástico de la estructura de suelo después de que la consolidación primaria ha sido completada.

2.13.4.4. **Índice de vacíos**

Es la relación entre el volumen de vacíos (agua y aire) y el volumen de partículas de suelo.

2.13.4.5. **Presión de preconsolidación**

Es la presión máxima pasada a la que el suelo ha sido sometido. Esta presión es considerada como el esfuerzo de fluencia del suelo.

2.13.4.6. **Arcillas normalmente consolidadas**

Se llaman arcillas normalmente consolidadas a aquellas cuya presión de sobrecarga efectiva presente es la presión máxima a la que el suelo fue sometido en el pasado.

2.13.4.7. **Arcillas sobreconsolidadas**

Se llaman arcillas sobreconsolidadas a aquellas cuya presión de sobrecarga efectiva presente es menor que la que el suelo experimentó en el pasado.

2.13.4.8. **Razón de sobreconsolidación, OCR**

Es la relación entre el esfuerzo efectivo máximo pasado y el esfuerzo efectivo presente.

2.13.4.9. **Operador**

Es el ingeniero, técnico, auxiliar, tesista u otra persona capacitada responsable de la operación directa del equipo de consolidación unidimensional.

2.13.5. **Materiales y equipos**

- **Equipo de carga (Fig. 117, 119 y 120).** Equipo capaz de aplicar cargas verticales a la muestra.
- **Consolidómetro.** Dispositivo que contiene a la muestra durante el ensayo, constituido por las siguientes partes: depósito de agua para la inundación de la muestra (celda de consolidación), anillo muestrador, fijador del anillo, anillo de retención de la muestra, dos discos o piedras porosos (superior e inferior) y distribuidor de presión (Fig. 118).
- **Deformímetro.** Con una precisión de lectura de 0.0025 mm como mínimo.
- Cronómetro.
- Juego de pesas.
- Balanza de precisión 0.01g.
- Calibrador vernier digital para medir diámetros exteriores e interiores.
- Equipo de contenido de humedad.
- Equipo auxiliar. Juego de espátulas planas, espátula tipo cuchillo y contenedores.



Figura 117. Equipo de consolidación de mesa.

Fuente. Elaboración propia (laboratorio geotecnia UMSS).



Figura 118. Consolidómetro de anillo fijo (ELE).

Fuente. Elaboración propia.

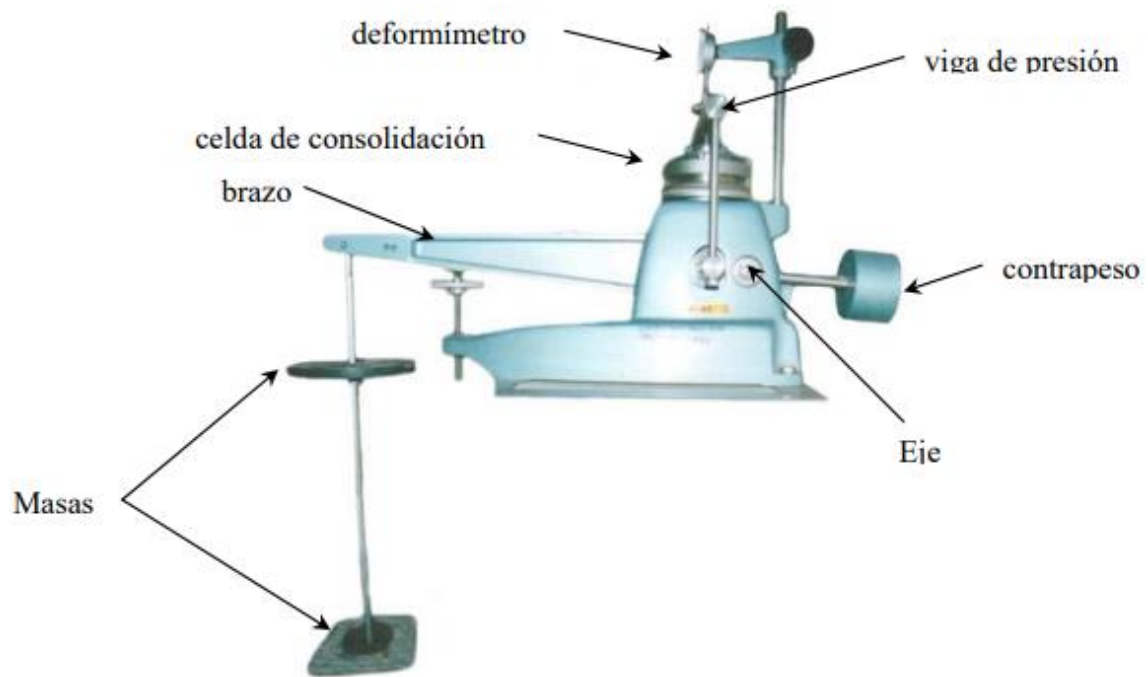


Figura 119. Partes principales de equipo de consolidación.

Fuente. Elaboración propia.

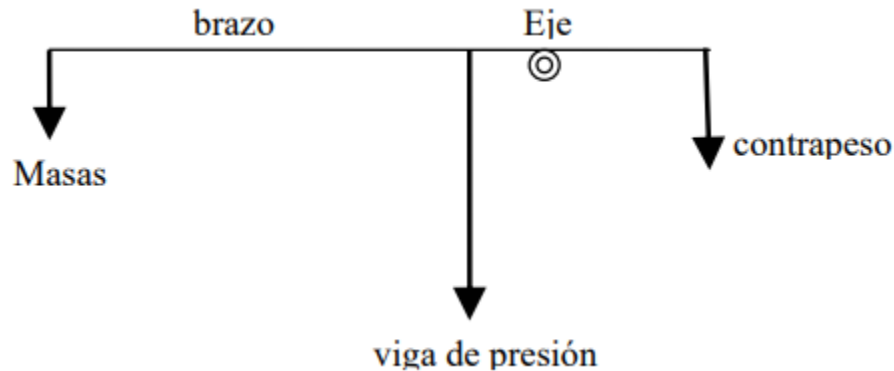


Figura 120. Diagrama de cuerpo libre de equipo de consolidación.

Fuente. Elaboración propia.

2.13.6. Muestra a ensayar

Por lo general el ensayo es realizado en muestras no disturbadas de suelos finos naturalmente sedimentados en agua. Sin embargo, el procedimiento es también aplicado a muestras compactadas o disturbadas o suelos formados por otros procesos, debiendo evaluarse estos resultados a través de métodos diferentes al presentado en este texto.

Los resultados son afectados significativamente por la disturbación de la muestra, debiendo tenerse cuidado en la selección y preparación de la muestra a ensayar. Se debe evitar la vibración, distorsión i compresión durante la preparación de la muestra.

2.13.7. Procedimiento del ensayo

1. Preparación de la muestra

- a. Preparar la muestra en un lugar donde los cambios en el contenido de humedad durante el proceso se minimicen.
- b. Determinar el diámetro interno del anillo de consolidación (tomar cuatro medidas del diámetro interno) con la ayuda de calibrador vernier, D_o .
- c. Pesar el anillo de muestreador en la balanza de precisión y registrar el dato, M_{anillo} .
- d. Con ayuda de una espátula tallar la muestra cuidadosamente haciendo uso del juego de espátulas y la introduce en el anillo muestreador de consolidación.

- e. Enrasar la muestra en los extremos superior e inferior del anillo de consolidación.
- f. Determinar la masa de la muestra húmeda, M_{T_o} , pesando el conjunto anillo más muestra y sustrayendo la masa del anillo.
- g. Determinar la altura de la muestra con la ayuda del calibrador Vernier (tomar cuatro mediciones de la altura de la muestra introducida en el anillo de muestreador, H_o).
- h. Determinar el volumen de la muestra, V_o , en función a la altura de la muestra y el diámetro del anillo de consolidación.
- i. Determinar el contenido de humedad del suelo sobrante del proceso de tallado de la muestra.
- j. Determinar la gravedad específica según el procedimiento técnico Gravedad Específica en Suelos Finos (picnómetro de agua) ó Gravedad Especifica en Suelos Finos (picnómetro de agua de 50 ml) según se convenga, a no ser que no se necesite el índice de vacíos preciso de la muestra, para lo cual puede hacerse uso de una gravedad especifica obtenida en un suelo con propiedades físicas y mecánicas similares a las de la muestra.
- k. Realizar ensayos de límites de Atterberg según el procedimiento técnico Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad y la distribución del tamaño de partículas según el procedimiento técnico de Granulometría según se convenga. Estos ensayos no son necesarios para la interpretación de datos, sin embargo, pueden ser adjuntados para caracterizar el material y cuantificar la presencia de una posible fracción de suelo grueso en la muestra.

2. Realización del ensayo

- a. El operador coloca la piedra porosa base de la celda en el fondo de la celda de consolidación.
- b. Asegura el anillo muestreador con el fijador del anillo, en esta etapa el anillo muestreador contiene dentro de sí la muestra, y suavemente los deposita en la celda de consolidación hasta que el anillo muestreador este en contacto con la piedra porosa base y los tornillos de fijación atraviesen el fijador del anillo en sus orificios respectivos.



Figura 121. Armado del equipo de consolidación.

Fuente. Elaboración propia.

- c. Asegura los tres tornillos y coloca encima del espécimen la piedra porosa superior y encima de ésta el distribuidor de presión, evitando algún posible cambio en el contenido de humedad del espécimen. El operador apoya el equipo de consolidación en la plataforma de consolidación del aparato de carga de manera que no haya ningún movimiento.
- d. Acomodar el consolidómetro en el aparato de carga colocando la viga de presión perpendicular a la muestra y apoya el deformímetro al centro del extremo superior de la viga de presión.



Figura 122. Ajuste del equipo de carga.

Fuente. Elaboración propia.

- e. Inicialmente aplicar una carga base (presión) de 5 kPa. Inmediatamente ajustar el indicador de deformímetro y registra la lectura de deformación cero, d_0 . Si la muestra tiende a expandirse adicionar carga hasta controlar la expansión.

- f. Si la muestra se encuentra saturada (muestra obtenida por debajo del nivel freático) tomar la previsión de inundarla luego de aplicar la carga base. Luego de la inundación si la muestra se expande, incrementar la carga hasta controlar la expansión. Se debe registrar la carga necesaria para controlar la expansión y la lectura de deformación resultante.
- g. Luego la muestra debe ser sometida a incrementos constantes de carga. Si se requiere la pendiente y la forma de la curva virgen de consolidación o la presión de preconsolidación, la presión final alcanzada debe ser mayor o igual que 4 veces el valor de la presión de preconsolidación. La descarga debe abarcar por lo menos dos decrementos de presión.
- h. La secuencia de carga estándar comprende una relación de incremento de carga de 1, obtenida a través de la duplicación los incrementos de cargas, debiéndose obtener valores aproximados a 12, 25, 50, 100, 200, etc. kPa. La secuencia de descarga debe ser realizada descargando hasta alcanzar una carga en una relación de $\frac{1}{4}$ de la carga actuante. Este esquema de carga y descarga puede ser modificado para fines específicos.
- i. Antes de cada incremento de carga se debe registrar el cambio de altura, d_f , de la muestra. Dos son los métodos alternativos para especificar las secuencias de lectura de tiempo y la permanencia mínima de cada incremento de carga, en la práctica el método A es el más utilizado, detallándose solamente éste en los párrafos siguientes.
- j. La duración estándar para cada incremento de carga debe ser de 24 horas. Inmediatamente aplicada la carga, registrar las lecturas de deformación de la muestra a intervalos de 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15, 30 minutos y 1, 2, 4, 8 y 24 horas. Por lo menos en 2 incrementos de carga, incluyendo por lo menos uno después de que la presión de preconsolidación ha sido excedida. En el resto de los incrementos de carga, el operador toma suficientes lecturas cerca del final del periodo de incremento de carga para verificar que la consolidación primaria ha sido completada.
- k. Para minimizar la expansión durante el desmontaje de la muestra, aplicar sobre la

carga base inicial (5 kPa). Una vez que los cambios de altura hayan cesado (usualmente se debe esperar una noche), desmontar rápidamente luego de quitar la carga base. Remover la muestra y el anillo del consolidómetro y secar el agua libre presente en la muestra y el anillo. Determinar la masa de la muestra en el anillo, y quitar la masa del anillo para obtener la masa húmeda final, M_{Tf} .

1. Secar la muestra más el anillo en el horno hasta obtener un peso constante, determinar la masa de la muestra seca, M_d , y calcular el contenido de humedad final, w_f .

2.13.8. Cálculos

3. Propiedades de la muestra

3.1. Se promedia las cuatro medidas del diámetro interno del anillo muestreador y se obtiene D_o .

3.2. Se promedia las cuatro medidas de la altura de la muestra y se obtiene H_o .

3.3. Se halla el área de la muestra A , cm^2 , según la expresión mediante la ecuación (1).

$$A = \pi * \frac{D_o^2}{4} \quad (1)$$

3.4. Se obtiene el volumen inicial de la muestra V_o , cm^3 , mediante la ecuación (2).

$$V_o = A * H_o \quad (2)$$

3.5. Se obtiene la masa seca total del espécimen M_d , mediante la expresión (3) donde M_{Tf} es la masa total de la muestra y w_{fp} es el contenido de humedad de la muestra (en forma decimal) después del ensayo.

$$M_d = \frac{M_{Tf}}{1 + w_{fp}} \quad (3)$$

3.6. Calcular los contenidos de humedad inicial y final del ensayo:

$$w_o = \frac{M_{T_o} - M_d}{M_d} * 100 \quad (4)$$

$$w_f = \frac{M_{T_f} - M_d}{M_d} * 100 \quad (5)$$

Donde:

M_d = masa seca de la muestra.

M_{T_o} = masa húmeda de la muestra antes del ensayo.

M_{T_f} = masa húmeda de la muestra después del ensayo.

3.7. Calcular la densidad seca inicial de la muestra ρ_d , g/cm³, mediante la ecuación:

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_o} \quad (6)$$

Donde:

ρ_d = densidad seca de la muestra.

V_o = volumen inicial de la muestra.

3.8. Calcular el peso unitario seco de la muestra γ_d , KN/m³:

$$\gamma_d = 9.8 \times \rho_d \quad (7)$$

3.9. Calcular el volumen de los sólidos con V_s , KN/m³:

$$V_s = \frac{M_d}{G_s * \rho_w} \quad (8)$$

Donde:

G_s = gravedad específica de los sólidos.

ρ_w = densidad del agua igual a 1 g/cm³.

3.10. Determinar la altura equivalente de los sólidos, H_s :

$$H_s = \frac{V_s}{A} \quad (9)$$

Donde:

A = área de la muestra.

3.11. Calcular el índice de vacíos antes y después del ensayo:

$$e_o = \frac{H_o - H_s}{H_s} \quad (10)$$

$$e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s} \quad (11)$$

Donde:

H_o = altura inicial de la muestra.

H_f = altura final de la muestra, cm.

3.12. Calcular el grado de saturación de la muestra, en porcentaje, antes y después del ensayo:

$$S_o = \frac{M_{T_o} - M_d}{A \rho_w (H_o - H_s)} * 100 \quad (12)$$

$$S_f = \frac{M_{T_f} - M_d}{A \rho_w (H_f - H_s)} * 100 \quad (13)$$

S_o = grado de saturación de la muestra antes del ensayo.

S_f = grado de saturación de la muestra después del ensayo.

2.13.9. Determinación de las propiedades tiempo deformación.

A partir de los datos tiempo – deformación registrados durante cada una de las etapas de incremento de carga (12, 25, 50, 100, 200, 400, etc.) es posible determinar el coeficiente de consolidación, C_v , para cada uno de los incrementos de carga.

Dos son los procedimientos de mayor aplicación para este propósito, el método del logaritmo del tiempo y el método de la raíz cuadrada del tiempo. Para una mejor comprensión de los procedimientos se utilizarán los datos correspondientes a la etapa de carga de 103 kPa, siendo los datos registrados los de la Tabla 28.

Tiempo transcurrido (min)	Asentamiento (mm)
0.0	0.625
0.1	0.691
0.25	0.699
0.5	0.708
1	0.719
2	0.733
4	0.753
8	0.781
15	0.814
30	0.860
60	0.908
120	0.949
240	0.978
1440	1.016

Tabla 28. Datos de la etapa de consolidación correspondiente a una presión de 103 kPa.

Fuente. Elaboración propia (ASTM D2435)

1.20.9.1. Método del logaritmo del tiempo

2. Graficar los datos de la Tabla 28, el eje de las abscisas en escala logarítmica representa el tiempo transcurrido y el eje de las ordenadas en escala natural la deformación o el asentamiento de la muestra.
3. La parte inicial de la curva representa una parábola, en este sector seleccionar dos tiempos cualesquiera, t_1 y t_2 , tal que t_2 sea 4 veces mayor que t_1 .
4. A través de los puntos de la curva correspondientes a los tiempos seleccionados, trazar dos líneas horizontales AB y CD. Determinar la distancia, “y”, existente entre ambas rectas.
5. Dibujar una línea horizontal EF a la distancia “y” sobre la recta AB. La intersección de la recta EF con el eje de las ordenadas marca el valor de la deformación al 0 % de consolidación, d_0 , de la muestra.
6. Trazar la recta, GH, tangente a la curva en su sector de mayor pendiente.
7. Prolongar hacia la izquierda la porción final recta de la curva, formando la línea IJ. El punto de intersección entre las rectas GH e IJ es el punto de deformación de la

muestra al 100 % de consolidación, d_{100} .

8. Sobre el eje de las ordenadas identificar el punto correspondiente a la deformación al 50 % de consolidación, d_{50} .
9. A través de del punto d_{50} , dibujar la horizontal KL.
10. Proyectar al eje de las abscisas el punto de intersección entre la línea KL y la curva de consolidación. El valor de la abscisa es el tiempo al 50 % de la consolidación de la muestra, t_{50} .
11. Con la Ecuación 14 determinar el coeficiente de consolidación C_v .

$$C_v = \frac{0.197 H^2_{D_{50}}}{t_{50}} \quad (14)$$

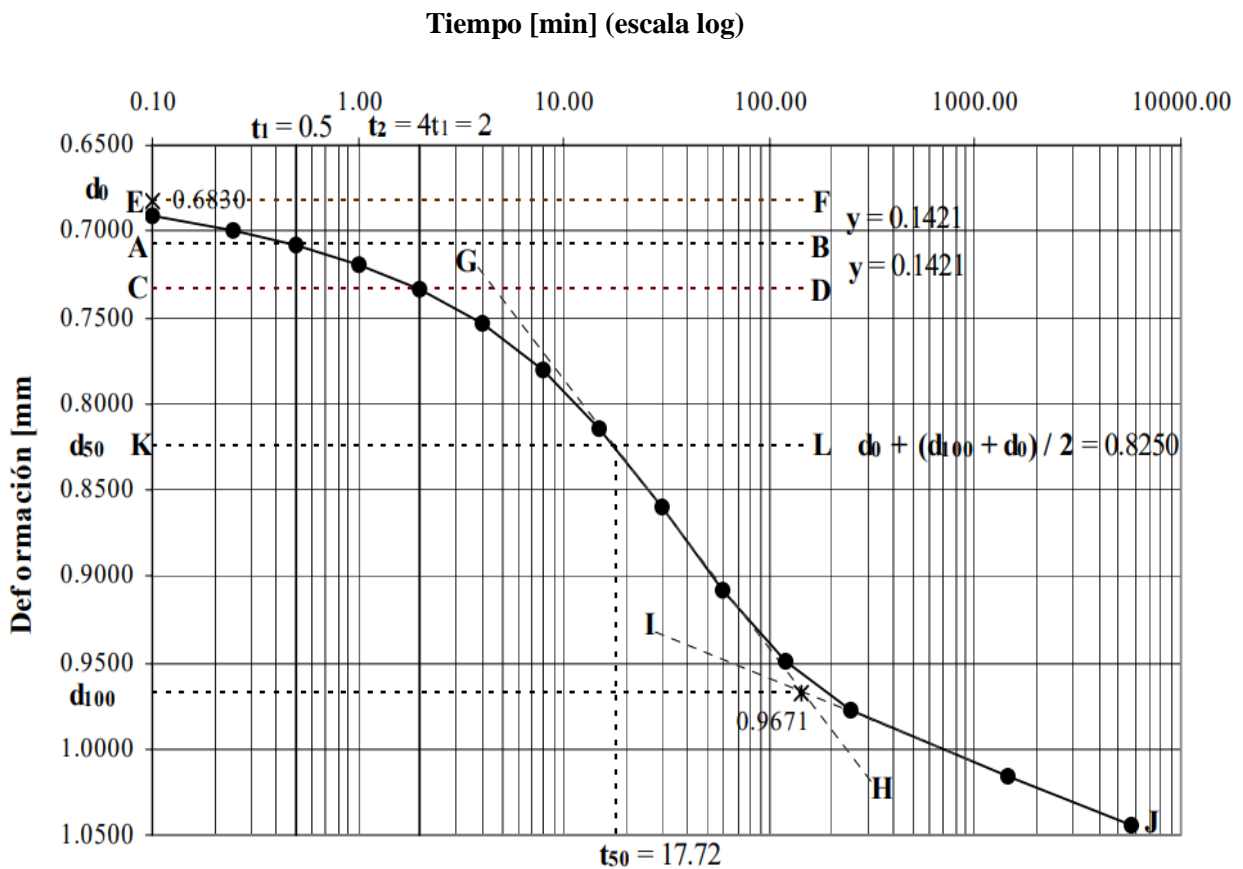


Figura 123. Determinación del coeficiente de consolidación por el método del logaritmo del tiempo.

Fuente. Laboratorio de geotecnia UMSS. (ASTM D2435)

1.20.9.2. Método de la raíz cuadrada del tiempo.

2. Graficar los datos de la Tabla 28, en el eje de las abscisas la raíz cuadrada el tiempo y en el eje de las ordenadas la deformación o el asentamiento de la muestra.
3. A través de los puntos que muestren alineación en la parte inicial de la curva, trazar la recta AB, la intersección de la recta AB con el eje de las ordenadas (punto A) es la deformación al tiempo de consolidación cero, d_0 .
4. Determinar la distancia OB sobre el eje de las abscisas.
5. Ubicar el punto C a una distancia del origen O igual a 1.15 veces la distancia OB.
6. Trazar la línea AC. La intersección de la línea AC con la curva marca el punto correspondiente al noventa por ciento de la consolidación, d_{90} y t_{90} .
7. Con la Ecuación 15 determinar el coeficiente de consolidación C_v .

$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}}$$

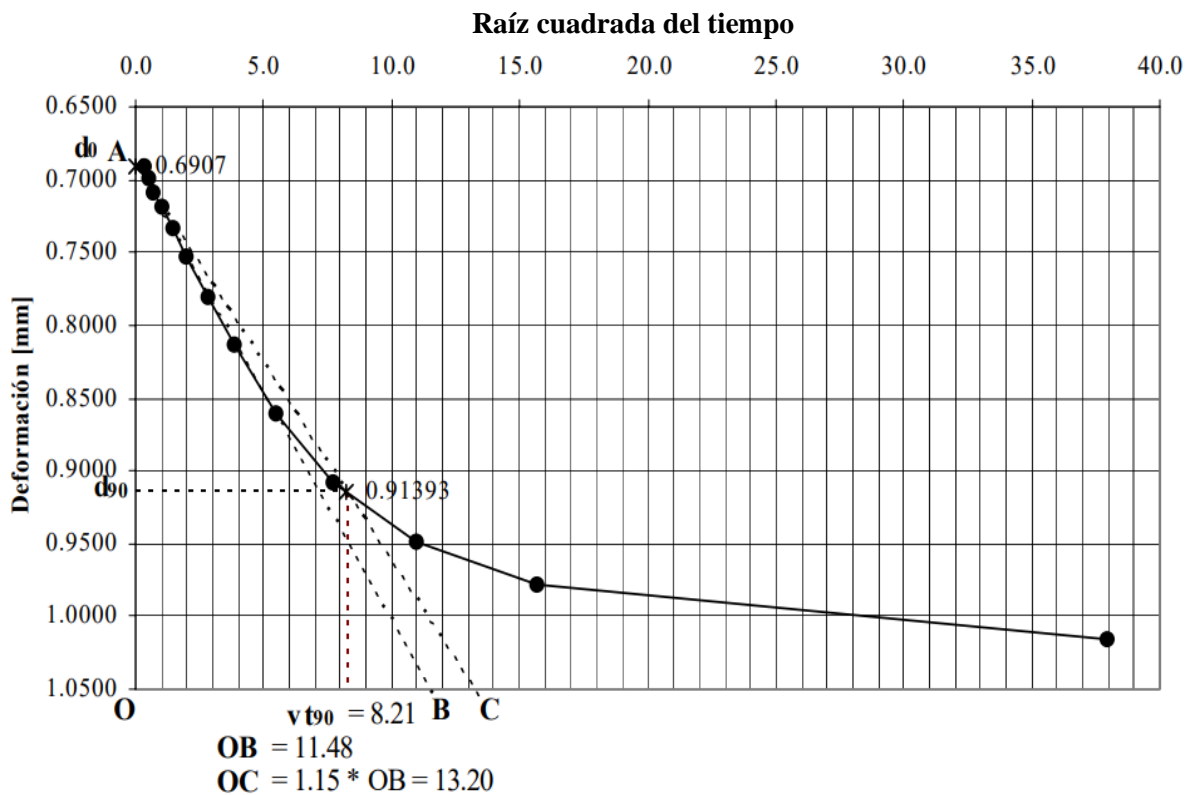


Figura 124. Determinación del coeficiente de consolidación por el método de la raíz del tiempo.

Fuente. Laboratorio de geotecnia UMSS. (ASTM D2435)

2.13.10. **Determinación de las propiedades carga deformación**

1. Construir una tabla con las deformaciones finales, d_f , correspondientes a la culminación de cada incremento de carga.
2. Calcular para cada incremento el cambio de altura, ΔH , con respecto a la altura inicial de la muestra con la siguiente ecuación:

$$\Delta H = d - d_o \quad (16)$$

3. Calcular el índice de vacíos con la ecuación:

$$e = e_o - \frac{\Delta H}{H_s} \quad (17)$$

4. Calcular la deformación vertical en porcentaje según la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} * 100 \quad (18)$$

5. Calcular el esfuerzo vertical σ_v , con la ecuación:

$$\sigma_v = \frac{P}{A} \quad (19)$$

Donde: P = carga aplicada [N]

σ_v = esfuerzo vertical [kPa]

6. Graficar la deformación vs. el esfuerzo efectivo vertical correspondiente al final de cada incremento de carga.
7. Sobre la curva de consolidación, determinar el punto de menor radio de curvatura, a.
8. Partiendo del punto “a” trazar una línea horizontal AB.
9. Tazar una línea CD tangente al punto “a”.
10. Trazar la línea AE bisectriz del ángulo DAB.
11. Prolongar la parte final de la línea de compresión, dibujar la línea GF.
12. La proyección, sobre el eje de las abscisas, del punto “b” intersección entre las rectas AE y GF, es el valor de preconsolidación, P'_c , de la muestra.

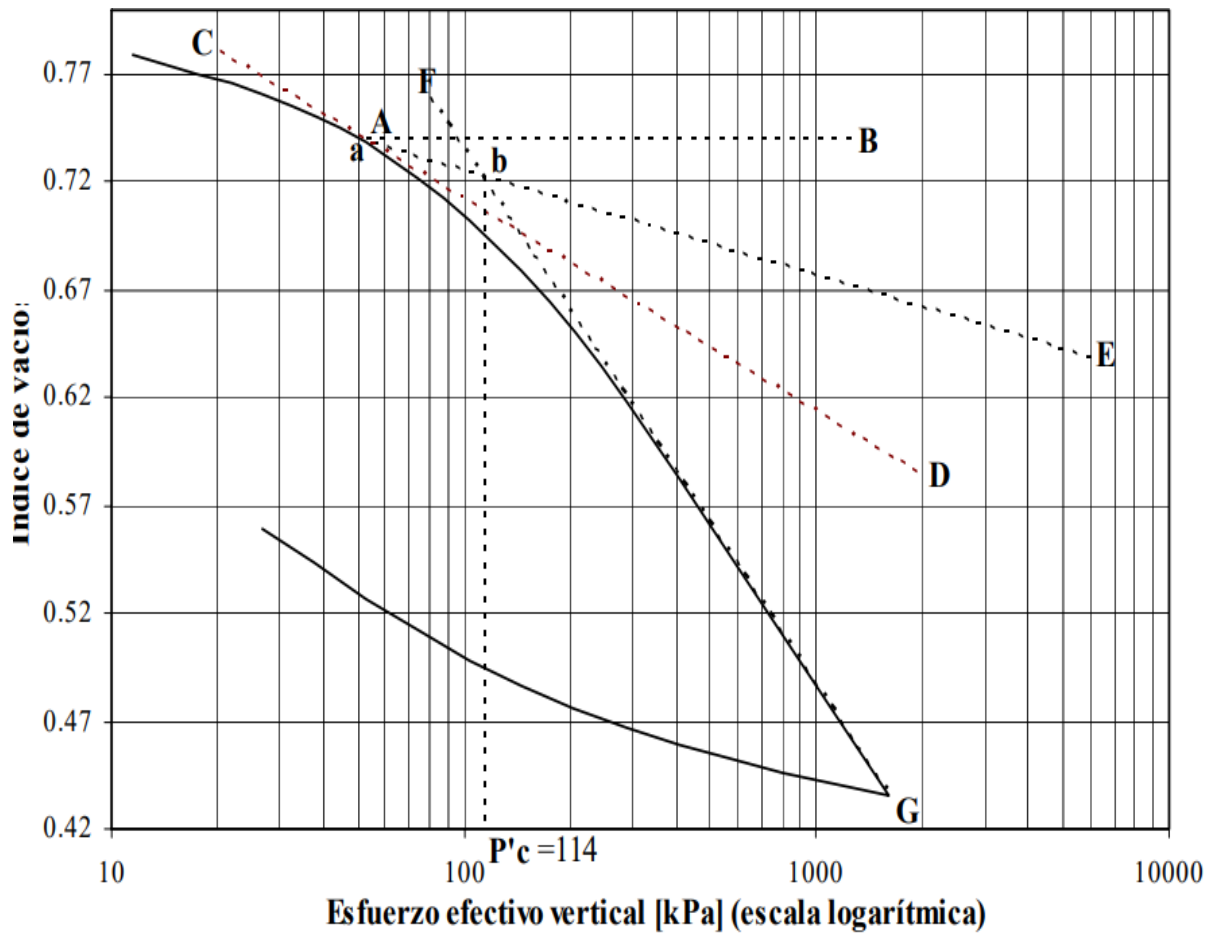


Figura 125. Determinación de la presión de preconsolidación por el método de Casagrande

Fuente. Laboratorio de geotecnia UMSS. (ASTM D2435)

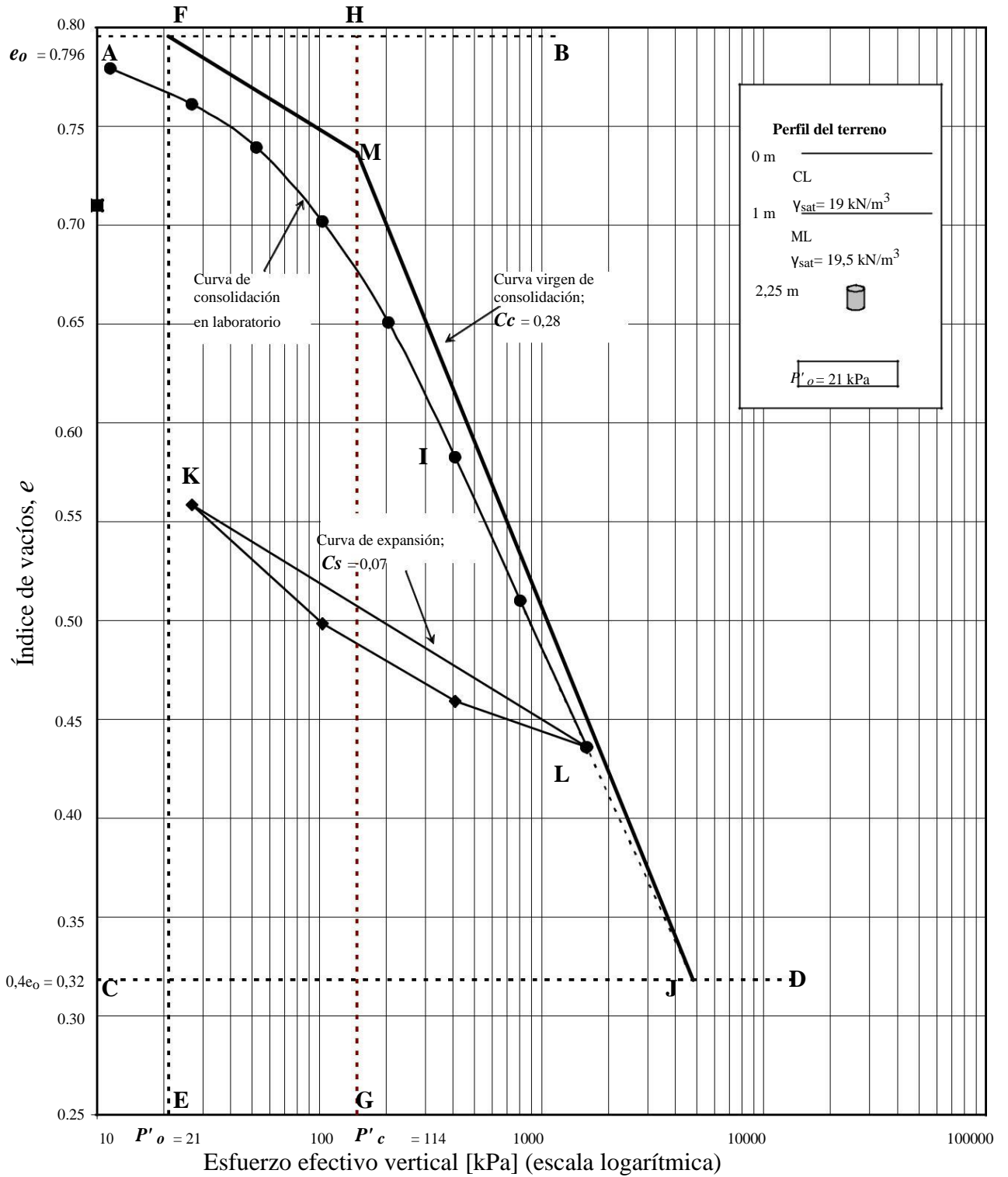


Figura 126. Determinación de los índices de compresión.

Fuente. Laboratorio de geotecnia UMSS. (ASTM D2435)

Determinación de los coeficientes de consolidación

1. En la Figura 126, índice de vacíos vs. esfuerzo efectivo vertical, trazar una línea horizontal AB por el índice de vacíos inicial e_o .
2. Trazar la línea horizontal CD a través del índice de vacíos correspondiente al valor del índice de vacíos inicial multiplicado por 0.4.
3. Trazar la vertical EF que pasa por el valor de la presión efectiva actuante a la profundidad correspondiente a la extracción de la muestra ensayada.
4. A partir del valor de preconsolidación, P'_c , trazar la línea vertical GH.
5. Prolongar la pendiente de la región recta de la curva de compresión hasta interceptar la línea CD, obteniendo la recta IJ.
6. Unir el punto final de la curva de consolidación con el punto final de la rama de expansión, con la línea KL. La pendiente de la recta, es el índice de expansión, C_s , calculado con la siguiente ecuación:

$$C_s = \frac{e_K - e_L}{\log \sigma'_{zL} - \log \sigma'_{zK}} \quad (20)$$

7. Partiendo de la intersección entre las rectas AB y EF, trazar la línea FM paralela a KL, hasta cortar la línea GH.
8. A través de la línea MJ unir la intersección de la recta GH y FM con la intersección de las líneas CD e IJ. La pendiente de la recta MJ es el índice de compresión, C_c , determinado con la ecuación:

$$C_c = \frac{e_M - e_J}{\log \sigma'_{zJ} - \log \sigma'_{zM}} \quad (21)$$

Para suelos normalmente consolidados la línea FM tiene una longitud igual a cero, no existiendo esta porción de la curva virgen de consolidación.

2.13.12.

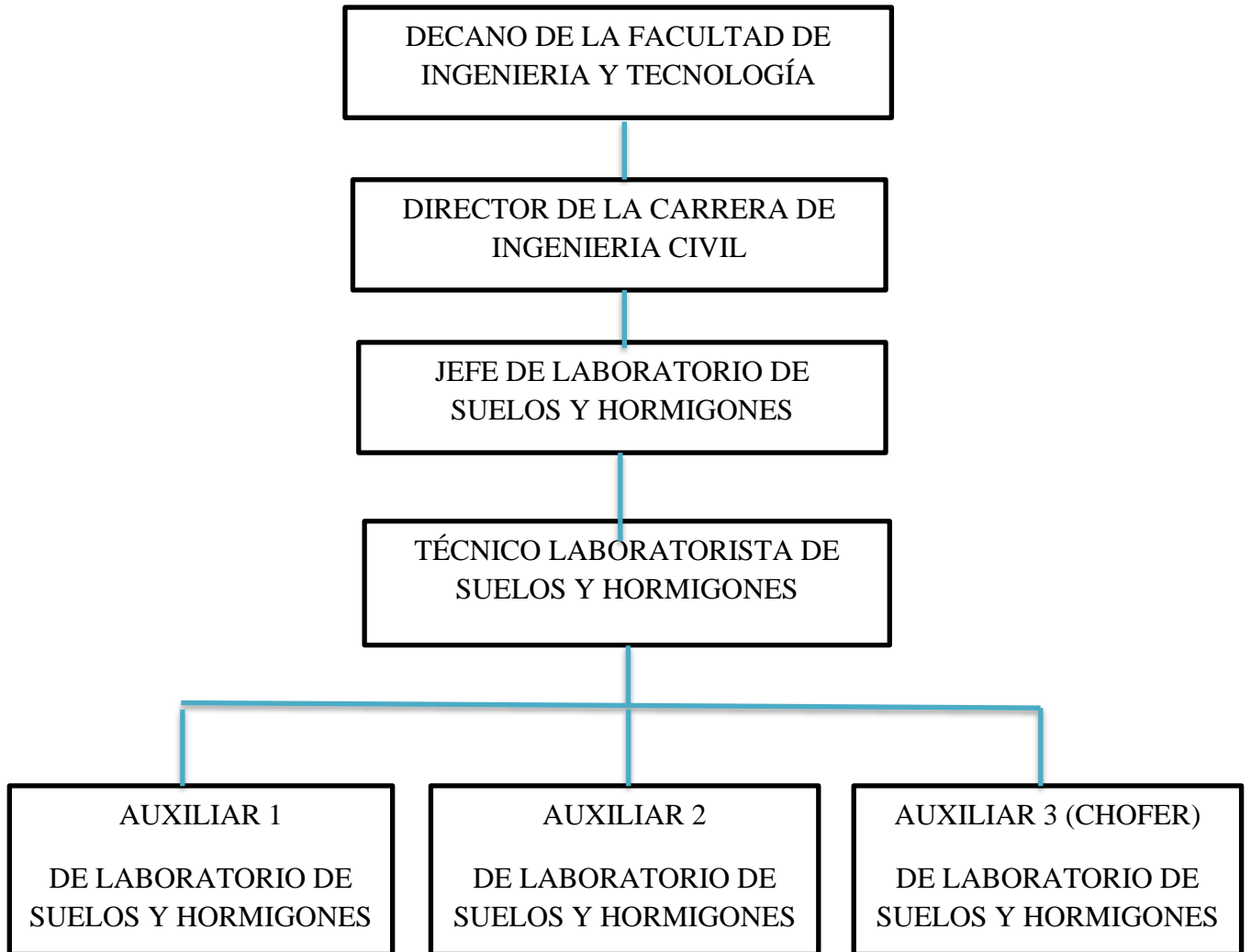
Presentación de resultados

Los resultados del ensayo deberán ser presentados en una planilla que contenga todos los datos de la muestra que permitan describirla (Identificación, ubicación, método de extracción, procedencia, descripción, gravedad específica, límites de consistencia, profundidad de extracción, etc.). La planilla de registro se encuentra en el capítulo de planillas de laboratorio corresponde a manual de los ensayos de Laboratorio de Suelos de la Universidad Amazónica de Pando.

CAPITULO III

3. ORGANIGRAMA Y MANUAL DE FUNCIONES DEL PERSONAL DE LABORATORIO

3.1. ORGANIGRAMA DE LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGONES



3.2. MANUAL DE FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES DEL PERSONAL DE LABORATORIO DE SUELOS Y HORMIGONES

Cargo: Jefe de Laboratorio de Suelos y Hormigones			
Nivel de Organización: Funcional			
UBICACIÓN ESTRUCTURAL			
Depende de:		Dependientes:	
Lineal:	Decano de la Facultad de Ingeniería y Tecnología.	Lineal:	No aplica.
Funcional:	Director de la Carrera de Ingeniería civil.	Funcional :	Técnicos y Auxiliar de laboratorio.
OBJETIVO			
Supervisar, coordinar, planificar, administrar, y dirigir la ejecución del trabajo del personal del laboratorio, con la responsabilidad total por las operaciones técnicas y la provisión de los recursos necesarios para asegurar la calidad requeridas de las operaciones del laboratorio. (de acuerdo a la norma)			
Formación	Experiencia	Habilidades	
<ul style="list-style-type: none"> • Poseer título en provisión Nacional de Ingeniero Civil. • Contar con una edad mínima de 35 años • Cursos de posgrado de Mecánica de Suelos. • Poseer especialidad en suelos y hormigones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Contar con una experiencia general mínima de siete años • Contar con experiencia específica (trabajo de laboratorio de suelos y hormigones) cinco años • Conocimientos técnicos de medición y ensayo de 	<ul style="list-style-type: none"> • Liderazgo. • Trabajo en equipo. • Proactivo • Toma de decisiones • Manejo de conflictos • Autodisciplina • Buen juicio (prudencia) • Analítico y Moderador. 	

<ul style="list-style-type: none"> • Estar registrado en la Sociedad de Ingenieros de Bolivia. 	<p>equipos de laboratorio.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conocimiento de las normas técnicas de calidad de laboratorio • Conocimiento de las leyes, normas y reglamentos que regulan obras arquitectónicas y construcciones civiles. • Conocimiento de Normas de Seguridad e Higiene Industrial. • Conocimiento de laboratorio especializado en obras civiles (ensayos de laboratorio y campo, en suelos y hormigones para estructuras de hormigón, obras de movimientos de tierra, obras de arte y drenaje) • Conocimiento básico de medición y ensayo de equipos de laboratorio, según normas técnicas de calidad. • Conocimiento de las Normas ISO 9001, 17020 y 17025 	
---	--	--

FUNCIONES		
<ul style="list-style-type: none">• Supervisar y controlar los procesos y/o actividades del laboratorio de Suelos y Hormigones• Representar al laboratorio de Suelos y Hormigones de la carrera de Ingeniería Civil, en todos los actos públicos como privados del Laboratorio. (de acuerdo al reglamento)• Coordinar actividades del Laboratorio de Maderas y del Gabinete Topográfico y con otros laboratorio del Área y de la Universidad que sean necesarias (de acuerdo al reglamento)• Verificar cabalmente el cumplimiento de los procedimientos de trabajo y normas correspondientes al Laboratorio.• Llevar el control de la calibración de los equipos del laboratorio• Asistencia técnica en el control de calidad de los productos que se emplearan en los ensayos.• Elaboración del Manual de la Calidad correspondiente al Laboratorio• Distribuir el trabajo que deben realizar el personal a su cargo, y evaluar el desarrollo de las actividades del Laboratorio.• Brindar asesoría técnica al personal a su cargo, estudiantes de la carrera y a los usuarios.• Elaborar programas, proyectos de investigación y desarrollar tareas que permitan el cumplimiento de los objetivos y metas del Laboratorio.• Velar por la disciplina, rendimiento y capacitación del personal a su cargo.• Elaborar informes mensuales de las actividades realizadas• Elaborar el presupuesto del Laboratorio.• Planificar y programar estrategias de trabajo para hacer uso eficiente de los recursos y la distribución del tiempo.• Exigir el orden de los equipos y sitios de trabajo.• Toma decisiones de responsabilidad como responsable del Laboratorio.• Analizar e interpretar la información pertinente para determinar las especificaciones.• Asumir la responsabilidad de supervisor de la calidad en caso que se le asigne.• Realizar además de las tareas previstas en el puesto, todas aquellas que sean encomendadas por disposiciones superiores.		

RESPONSABILIDADES	AUTORIDAD
<ul style="list-style-type: none"> • Convocar a reuniones programadas o extraordinarias para coordinar actividades, recomendar prioridades. • Toma de decisiones de responsabilidad como responsable del Laboratorio. • Rendir informes periódicos a la Dirección de Área. • Realizar informe técnico de actividades de trabajo de gabinete referido a los ensayos para el respectivo control de calidad, realizadas para entidades públicas o privadas. • Realizar informe de todas las tareas encomendadas. • Velar por el buen uso y mantenimiento de los equipos. • Mantener en confidencialidad los trabajos y resultados elaborados dentro y fuera del laboratorio, así como la de precautelar la confidencialidad y seguridad de la información y documentación que se genere, reciba y/o maneje. • Validar los informes de resultados emitidos • Aprobar informes de Laboratorio. • Firmar informes de los diferentes tipos de ensayo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobre el trabajo de los técnicos y auxiliares del laboratorio. • Aprobar documentación que se genere dentro del laboratorio.

Elaboración propia a base de formulario de Manual de Funciones y Responsabilidades

Código: ADM-FOR-001, Versión: v.00.

Cargo: Técnico Laboratorista de Suelos

Nivel de Organización: Operativo.

UBICACIÓN ESTRUCTURAL

Depende de:		Dependientes:	
Lineal:	Decano de la Facultad de Ingeniería y Tecnología.	Lineal:	No aplica.
Funcional:	Jefe de laboratorio de suelos y hormigones.	Funcional:	Auxiliar de Laboratorio.

OBJETIVO

Ejecutar y desarrollar ensayos de suelos de acuerdo a las normativas vigentes dentro del laboratorio.

Formación	Experiencia	Habilidades
<ul style="list-style-type: none"> Estudios técnicos en Laboratorio de Suelos y hormigones. Técnico de laboratorio especialista en obras civiles (ensayos de laboratorio y campo de suelos) 	<ul style="list-style-type: none"> Experiencia mayor a dos años en puestos similares. Conocimiento de ensayos de suelos. Conocimiento de las Normas (ASTM, AASHTO) Conocimientos técnicos de medición y ensayos de equipo de laboratorio, normas técnicas de calidad 	<ul style="list-style-type: none"> Liderazgo. Trabajo en equipo. Proactivo

FUNCIONES

- Realizar la verificación de equipos (calibración) según normativa específica.
- Realizar ensayos de laboratorio y campo concerniente a suelos.
- Mantener los equipos del laboratorio en su lugar y en estado de funcionamiento.

- Mantener en orden los equipos y sitios de trabajo, reportando cualquier anomalía.
- Verificar e informar el estado de la calibración de los equipos del laboratorio.
- Realizar el mantenimiento preventivo de los equipos del laboratorio.
- Dar asistencia, ejecutar y dar seguimiento en la realización de los ensayos de campo y laboratorio.
- Elaborar los registros de control de ensayos de laboratorio y ensayos de campo.
- Preparación y toma de muestra de suelos.
- Realizar y ejecutar los ensayos.
- Realizar el levantamiento y actualización de inventario de equipos, accesorios, instrumentos de medición, insumos y herramientas de laboratorio, para determinar existencias y necesidades de materiales y equipos.
- Verificar cabalmente el cumplimiento de los procedimientos de trabajo y normas correspondiente al laboratorio.
- Cumplir con programas de limpieza establecidos.
- Efectuar cálculos, gráficos y procesar sus resultados.
- Operar las máquinas y equipos de laboratorios respectivo.
- Realizar además de las tareas previstas en el puesto, todas aquellas que sean encomendadas por disposiciones superiores.

RESPONSABILIDADES	AUTORIDAD
<ul style="list-style-type: none"> • Informar al inmediato superior de cualquier anomalía que detecte en el funcionamiento de cualquier equipo a su cargo a fin de evitar su deterioro o limitaciones en la realización de sus actividades. • Informe de las tareas encomendadas. • Controlar y monitorear los equipos del laboratorio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Firmar informes de supervisión de ensayos que se realizan en el Laboratorio.

- Asumir la responsabilidad de inspector de la calidad en caso que se le asigne.
- Cumplir con normas, procesos y procedimientos nacionales e internacionales, para la realización de ensayos.
- Mantener en confidencialidad los trabajos y resultados elaborados dentro y fuera del laboratorio, así como la de precautelar la confidencialidad y seguridad de la información y documentación que se genere, reciba y/o maneje.

Elaboración propia a base de formulario de Manual de Funciones y Responsabilidades

Código: ADM-FOR-001, Versión: v.00. (Pando, 2018)

Cargo: Auxiliar 1 de Laboratorio de Suelos y Hormigones			
Nivel de Organización: Operativo.			
UBICACIÓN ESTRUCTURAL			
Depende de:		Dependientes:	
Lineal:	Decano de la Facultad de Ingeniería y Tecnología.	Lineal:	No aplica.
Funcional:	Técnico de laboratorio de suelos y hormigones.	Funcional:	Auxiliar de Laboratorio.
OBJETIVO			
Apoyar en la realización de los ensayos de suelos y hormigones de acuerdo a las normativas vigentes dentro del laboratorio.			
Formación	Experiencia	Habilidades	
<ul style="list-style-type: none"> Título de bachiller. 	<ul style="list-style-type: none"> Conocimiento de ensayos de suelos. 	<ul style="list-style-type: none"> Liderazgo. Trabajo en equipo. 	
FUNCIONES			
<ul style="list-style-type: none"> Apoyar en los ensayos de laboratorio y campo concerniente a suelos. Mantener en orden los equipos y sitios de trabajo en campo y laboratorio. Cumplir con cronograma de limpieza de laboratorio. Realizar todas aquellas tareas que sean encomendadas por disposiciones superiores. 			
RESPONSABILIDADES		AUTORIDAD	
<ul style="list-style-type: none"> Informar al inmediato superior de cualquier anomalía que detecte en el funcionamiento de cualquier equipo en la realización de sus actividades. Cumplir con normas y procedimientos nacionales e internacionales, para la realización de ensayos. 			

Elaboración propia a base de formulario de Manual de Funciones y Responsabilidades

Cargo: Auxiliar 2 de Laboratorio de Suelos y Hormigones			
Nivel de Organización: Operativo.			
UBICACIÓN ESTRUCTURAL			
Depende de:		Dependientes:	
Lineal:	Decano de la Facultad de Ingeniería y Tecnología.	Lineal:	No aplica.
Funcional:	Técnico de laboratorio de suelos y hormigones.	Funcional:	Auxiliar de Laboratorio.
OBJETIVO			
Apoyar en la realización de los ensayos de suelos y hormigones de acuerdo a las normativas vigentes dentro del laboratorio.			
Formación	Experiencia	Habilidades	
<ul style="list-style-type: none"> • Título de bachiller. 	<ul style="list-style-type: none"> • Conocimiento de ensayos de suelos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Liderazgo. • Trabajo en equipo. 	
FUNCIONES			
<ul style="list-style-type: none"> • Apoyar en los ensayos de laboratorio y campo concerniente a suelos. • Mantener en orden los equipos y sitios de trabajo en campo y laboratorio. • Cumplir con cronograma de limpieza de laboratorio. • Realizar todas aquellas tareas que sean encomendadas por disposiciones superiores. 			
RESPONSABILIDADES		AUTORIDAD	
<ul style="list-style-type: none"> • Informar al inmediato superior de cualquier anomalía que detecte en el funcionamiento de cualquier equipo en la realización de sus actividades. • Cumplir con normas y procedimientos nacionales e internacionales, para la realización de ensayos. 			

Elaboración propia a base de formulario de Manual de Funciones y Responsabilidades

Cargo: Auxiliar 3 Chofer de Laboratorio de Suelos y Hormigones			
Nivel de Organización: Operativo.			
UBICACIÓN ESTRUCTURAL			
Depende de:		Dependientes:	
Lineal:	Decano de la Facultad de Ingeniería y Tecnología.	Lineal:	No aplica.
Funcional:	Técnico de laboratorio de suelos y hormigones.	Funcional:	Auxiliar de Laboratorio.
OBJETIVO			
Conducir la camioneta al punto de ensayo y apoyar en la realización de los ensayos de suelos y hormigones de acuerdo a las normativas vigentes dentro del laboratorio.			
Formación	Experiencia	Habilidades	
<ul style="list-style-type: none"> Licencia de conducir categoría B 	<ul style="list-style-type: none"> Experiencia mayor a dos años en puestos similares 	<ul style="list-style-type: none"> Liderazgo. Trabajo en equipo. 	
FUNCIONES			
<ul style="list-style-type: none"> Conducir la camioneta a los puntos de ensayos en campo concerniente a suelos. Apoyar en los ensayos de laboratorio y campo. Realizar todas aquellas tareas que sean encomendadas por disposiciones superiores. 			
RESPONSABILIDADES		AUTORIDAD	
<ul style="list-style-type: none"> Informar al inmediato superior de cualquier anomalía que detecte en el funcionamiento de la camioneta. 			

Elaboración propia a base de formulario de Manual de Funciones y Responsabilidades

CAPITULO IV

**4. CRONOGRAMA DE
CALIBRACION DE
LOS EQUIPOS DE
LABORATORIO**

CAPITULO V

**5. PLANILLAS DE
REPORTE DE LOS
ENSAYOS DE
LABORATORIO**

CAPITULO VI
6. CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Considerando los resultados obtenidos en el presente manual de procedimientos de laboratorio de mecánica de suelos se recomienda:

- Tomando en cuenta que este manual de laboratorio para Mecánica de suelos ha sido elaborado con fines didácticos, se considera que puede ser utilizado como un documento de apoyo en el área de geotecnia, que incluye las normas ASTM y AASHTO.
- La calibración del equipo utilizado para la realización de los ensayos de laboratorio es un factor importante en los datos obtenidos, ya que las Normas ASTM hacen énfasis en los requisitos que éstos deben cumplir para que los resultados tengan una mayor garantía.
- La correcta interpretación de las normas para su aplicación en los procedimientos de ensayo, permite obtener resultados confiables de los parámetros del suelo y sus características físicas.
- Al comparar las guías de ensayos de suelos utilizadas en la actualidad con las desarrolladas en este documento, las cuales han sido elaboradas conforme a los lineamientos expuestos en las Normas ASTM y AASHTO, se observa que ha sido modificada la estructura de la guía incluyéndose nuevos apartados como son: objetivos, alcances, procedimientos, herramientas utilizados, personal necesario y las ecuaciones de cálculo.
- Se han elaborado planillas de registro de datos obtenidos (en campo y laboratorio) en cada uno de los ensayos y de la información necesaria para proporcionar los resultados deseados, además se han elaborado planillas de cálculo en Excel, con la finalidad de agilizar la presentación de resultados.
- Se han elaborado cronograma de calibración de los equipos de laboratorio, así también manual de funciones y organigrama de laboratorio de mecánica de suelos.

6.2. RECOMENDACIONES

Considerando los resultados obtenidos en el presente manual de procedimientos de laboratorio de mecánica de suelos se recomienda:

- Para obtener un mejor rendimiento y calidad en los resultados obtenidos en la realización de los ensayos, se recomienda que los equipos de laboratorio utilizados sean los exigidos por las Normas de los diferentes métodos de ensayo abordados en este trabajo.
- Se recomienda complementar los conocimientos teóricos y de laboratorio con visitas de campo a proyectos afines, con el objetivo de que permitan una mejor aplicabilidad de los procedimientos a seguir en la realización de los ensayos.
- Para que el aprendizaje de la Mecánica de Suelos y de los procedimientos de los ensayos que se desarrollan en dicha materia sea más provechoso, es necesario que se imparta una técnica electiva que permita al estudiante obtener un conocimiento más profundo de otros ensayos y de la utilización de los resultados que estos proporcionan.
- Es recomendable que el personal dedicado al trabajo de laboratorio de Mecánica de suelos reciba la capacitación apropiada de los procedimientos de ensayo y del uso de los equipos, para que exista una mayor eficiencia en el desarrollo de los ensayos.
- Se recomienda a los docentes de Mecánica de suelos incentivar a los estudiantes el uso de estas guías o procedimientos y así el estudiante tenga mejor conocimiento en su formación profesional.
- Para ampliar la información de cada uno de los ensayos desarrollados en este manual, se recomienda consultar cada una de las normas correspondientes (normas ASTM o AASHTO).

6.3. BIBLIOGRAFÍA

- American Society for Testing and Materials (1999). ASTM D2488-00, 2. a. (2003). *Descripcion and Identification of Soils (Visual - Manual)*. (Vols. Volume 04.08 Soil and Rock (I): D420 - D4912. ASTM).
- Carlos Salinas, M. S. (2006). *Procedimiento tecnico "Ensayo de penetracion estandar SPT"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simon, Cochabamba.
- Carlos Salinas, M. S. (2006). *Procedimiento Tecnico, Relacion de soporte de california CBR*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simon, Cochabamba.
- cimentaciones, B. M. (2016). *Depositos naturales de suelo y exploracion del subsuelo*. Srotima Edicion.
- cimentaciones, B. M. (2016). *Propiedades Geotecnicos de suelo*. Septima edicion.
- Claudio Perez, N. D. (s.f.). *Manual de ensayos de suelos y materiales ABC. Determinacion de la Relacion de Soporte del Suelo en el Laboratorio (CBR de Laboratorio) ASTM D1883 AASHTO T193* (Vol. Volumen 4. Ensayos de suelos y materiales). La Paz, Bolivia.
- Espinoza, A. A. (2014). *Manual de ensayos de laboratorio, "Ensayo de compactación Proctor estándar (ASTM D698)"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Fernando Lopez Alborta, H. C. (2014). *Manual de ensayos de laboratorio "Compactacion proctor modificado (ASTM D1557)"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Fernando Schnaid, E. O. (2014). *Ensaio de campo e suas aplicacoes a Engenharia de fundacoes*. CEP 04013-043 - Sao Paulo - Brasil: Segunda edicion.

- Geotecnia, L. d. (2004). *Manual de Ensayos "Consolidacion Unidimensional (ASTM D2435)"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simon, Cochabamba, Bolivia.
- Juan Carlos Rojas Vidovic, C. N. (2014). *Manual de ensayos de laboratorio "Análisis hidrométrico (ASTM D 422)"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Juan Carlos Rojas Vidovic, C. N. (2014). *Manual de ensayos de Laboratorio "Determinación del límite de contracción (ASTM D427-98)"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Liliana Araceli Rodriguez Alvarez, C. N. (2014). *Manual de ensayos de laboratorio "Determinación de la densidad en campo, método del cono de arena (ASTM D1556)"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba.
- LOPEZ, S. L. (2006). *Propuesta de un Manual de laboratorio de mecanica de suelos conforme a la norma ASTM 2003*. San Salvador.
- Pando, U. A. (2018). *Manual de funciones y responsabilidades,Codigo: ADM-FOR-001, Version: v.00*. Cobija, Pando, Bolivia.
- SIMON, L. D. (2004). *Descripcion e identificacion de suelos (procedimiento visual - manual) ASTM D2488*. Cochabamba.
- Soliz, J. M. (2014). *Manual de ensayos d laboratorio, "Determinación de la gravedad específica (ASTM D854)"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Soliz, J. M. (2014). *Manual de ensayos de Laboratorio "Determinacion limites de consistencia ASTM D4318"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simon, Cochabamba, Bolivia.

Vidovic, J. C. (2014). *Manual de ensayos de laboratorio "Análisis Granulométrico por Tamizado (ASTM D422)"*. Laboratorio de Geotecnia, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.

7. ANEXOS

**8. INFORMES DE LOS
ENSAYOS
REALIZADOS EN EL
LABORATORIO Y
CAMPO**