

COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN OBTENIDOS EN
LOS EQUIPOS DE LABORATORIO DE LA UPB BUCARAMANGA Y
VERIFICACIÓN DE ASENTAMIENTOS CON UN MODELO A ESCALA

STEFANY XIMENA LOAIZA GÓMEZ
SERGIO ANDRÉS RINCÓN LEAL

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA
2018

COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN OBTENIDOS EN
LOS EQUIPOS DE LABORATORIO DE LA UPB BUCARAMANGA Y
VERIFICACIÓN DE ASENTAMIENTOS CON UN MODELO A ESCALA

STEFANY XIMENA LOAIZA GÓMEZ
SERGIO ANDRÉS RINCÓN LEAL

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL



DIRECTOR:

Ing. Msc. GERARDO BAUTISTA GARCÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO
BUCARAMANGA
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, mayo 2018

DEDICATORIA

Dedicado a...

A Dios.

Primero que todo la dedicación va para Dios, ya que Él siempre ha estado conmigo y nunca me desampara, gracias a Él jamás me rendí en querer salir adelante frente a los obstáculos difíciles que se me presentaron en mi vida, sin Él no estaría donde estoy ahora.

A mis padres

Sonia Jeaneth Leal Jiménez y Hober Rincón Navarro, gracias a ellos son mi fuerza de ser cada día mejor y ser una gran persona para los demás, ellos siempre estuvieron en las buenas y en las malas durante toda mi carrera universitaria, ayudándome a mantener las fuerzas de seguir estudiando, gracias a ellos por brindarme un cálido hogar y gracias a ellos por brindarme sonrisas cuando me sentía pesimista.

A mi hermano

Andrés Felipe Rincón Leal por su cariño y su manera de hacerme ver el mundo de una manera tan sencilla, gracias por acompañarme al igual que mis padres, y espero yo ser un buen ejemplo hoy y siempre, y nunca en mi vida abandonarlo.

A mi compañera.

Stefany Loaiza por acompañarme en esta aventura donde tuvimos todo tipo de obstáculos, pero finalmente pudimos superarlos, espero que a partir de hoy seamos más unidos para seguir trabajando de la mano, y ante todo mantener la sencillez frente a los demás.

Amigos cercanos y docentes

Por sus consejos y su compañía, más que todo esta parte va dedicado a 3 personas especiales que han marcado mi vida de manera grandiosa, las primeras dos personas son José Luis Enciso Moreno y Nelson Andrés Cuevas Morales quienes han demostrado siempre ser amigos incondicionales y confiables, que nos apoyaron durante todo el proceso de la tesis desde el comienzo hasta el final. La otra persona es mi director de proyecto de grado el ingeniero Gerardo Bautista, gracias a Dios por haberme puesto en el camino a esa persona cuando estaba buscando docentes de alta calidad para realizar mi proyecto de grado, por su entrega y su dedicación durante este último año de trabajo.

Sergio Andrés Rincón Leal

Dedicado a...

Principalmente a Dios, por darme la sabiduría, fortaleza y paciencia en todo el proceso de formación como persona e ingeniera civil.

A mis padres por darme la oportunidad y motivación de estudiar, por apoyarme en todo el proceso de formación en estos años y por su amor incondicional. Este logro es por y para ellos.

A mis hermanos por ayudarme y aconsejarme en cada paso que doy.

A mi novio por su apoyo y compañía incondicional.

A mi compañero por su amistad única, por ser un gran apoyo y por tener siempre palabras de motivación en cada paso de este proyecto.

Stefany Ximena Loaiza Gómez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos como manera primordial a Dios, por todo lo concedido y por brindarnos la sabiduría para culminar de manera exitosa esta grandiosa carrera. Del mismo modo agradecemos a nuestros padres y hermanos por darnos su cálida compañía.

A nuestro director Gerardo Bautista por que hizo esto posible por su tan devota dedicación con nosotros para llevar a cabo este proyecto de manera exitosa, por su tiempo en acompañarnos, guiarnos y enseñarnos lo requerido para la ejecución de esta tesis. Este conocimiento nos será de gran utilidad durante nuestra vida profesional y en próximos estudios.

Al laboratorista Don Vicente Páez y a los técnicos por acompañarnos y siempre estar pendiente de nosotros para ejecutar los ensayos de laboratorio de manera correcta, y también por brindarnos el buen humor y mantener el ambiente de trabajo de manera armoniosa.

A los ingenieros colombianos de Pinzuar que sin ellos no sería posible desarrollar el manual, gracias por su apoyo durante las dudas que surgían.

A nuestros profesores por enseñarnos el camino de un buen ingeniero, tanto en la manera profesional como la personal.

A nuestros amigos íntimos José Luis Enciso moreno, Andrés Alfonso Ortega Méndez, Nelson Andrés Cuevas morales, Laura Marcela Correa, Michelle ivon Rojas, Vladimir Serrano, Sebastián Quijano, Wilson Arévalo, Christian Albis, Karen Moncada Durán, Julián Carreño, Andrés Yasir y David Vera por permanecer a nuestro durante nuestro ciclo en la universidad, y por el apoyo mutuo que hizo que nuestra carrera fuera más emocionante, y por mantener el buen humor que hizo que fuera menos estresante nuestra vida universitaria.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	18
1. OBJETIVOS.....	19
1.1. OBJETIVO GENERAL:	19
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:	19
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
3. JUSTIFICACIÓN.....	21
4. ALCANCE.....	22
5. ANTECEDENTES.....	23
6. MARCO TEÓRICO	25
6.1. Granulometría en suelos	25
6.2. Plasticidad y límites.....	26
6.3. Clasificación de suelos.....	26
6.3.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S)	27
6.3.2. Sistema de clasificación AASTHO.....	28
6.4. Compactación de suelos	30
6.5. Relaciones volumétricas y gravimétricas	31
6.5.1. Porosidad (n)	32
6.5.2. Relación de vacíos (e)	33
6.5.3. Grado de saturación (Sr)	33
6.5.4. Contenido de humedad	33
6.5.5. Densidad de los suelos.....	33
6.6. Deformaciones y Asentamientos.....	33
6.6.1. Asentamiento total consolidación primaria	36
7. METODOLOGÍA.....	37
7.1. Selección del material	37
7.2. Ensayos de caracterización	37
7.2.1. Análisis granulométrico de suelos por tamizado (INV E-123).....	37
7.2.2. Determinación límite líquido, límite plástico (INV E- 125 e INV E-126)	37
7.2.3. Ensayo modificado de compactación (INV E-142)	37
7.2.4. Ensayo de consolidación (INV E-151)	37
7.3. Construcción y carga de modelo a escala	38
7.4. Cálculo de asentamientos	38
7.5. Comparación de resultados	38

8.	PROCEDIMIENTO PARA LA EJECUCIÓN DE ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN EN EL EQUIPO DIGITAL PS-300 D DE PINZUAR	39
8.1.	NORMAS GENERALES DEL LABORATORIO.....	39
8.2.	PRECAUCIONES DE SEGURIDAD PARA LA UTILIZACIÓN DEL EQUIPO 40	
8.3.	INFORMACIÓN DEL EQUIPO DE CONSOLIDACIÓN	40
8.4.	MANUAL DE USUARIO	42
9.	RESULTADOS	55
9.1.	Ensayos de caracterización	55
9.1.1.	Análisis granulométrico de suelos por tamizado (INV E-123).....	55
9.1.2.	Determinación límite líquido, límite plástico (INV E- 125 - INV E-126) .	56
9.1.3.	Clasificación del suelo por SUCS	56
9.1.4.	Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO	57
9.1.5.	Ensayo modificado de compactación (INV E-142)	57
9.1.6.	Ensayos consolidación unidimensional de suelos (INV E-151)	58
10.	ANALISIS DE RESULTADOS	67
10.1.	Asentamientos del modelo a escala.	67
10.2.	Asentamientos estimados a partir de la ecuación de la teoría de consolidación	67
10.2.1.	Asentamiento análogo 1	69
10.2.2.	Asentamiento ensayo análogo 2	70
10.2.3.	Asentamiento ensayo análogo 3	71
10.2.4.	Asentamiento ensayo digital 1	72
10.2.5.	Asentamiento ensayo digital 2	73
10.2.6.	Asentamiento ensayo digital 3.....	75
10.3.	Asentamientos estimados a partir de la integral de la teoría de consolidación	76
10.3.1.	Asentamiento ensayo análogo 1	77
10.3.2.	Asentamiento ensayo análogo 2	84
10.3.3.	Asentamiento ensayo análogo 3	91
10.3.4.	Asentamiento ensayo digital 1	98
10.3.5.	Asentamiento ensayo digital 2.....	105
10.3.6.	Asentamiento ensayo digital 3.....	113
10.4.	Comparación de asentamientos del modelo a escala con los obtenidos teóricamente para la fórmula 1	120

10.5 Comparación de asentamientos del modelo a escala con los obtenidos según el método de la integral	122
11. CONCLUSIONES.....	125
12. RECOMENDACIONES	127
13. BIBLIOGRAFÍAS	128
14. ANEXOS	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estado de consistencia de los suelos.	26
Figura 2. Ensayo de Proctor normal (1) y modificado (2) en un suelo	31
Figura 3. Representación esquemática de las fases de un elemento de suelo.....	32
Figura 4. Gráfica tiempo-deformación durante la consolidación.	35
Figura 5. Conexiones	42
Figura 6. Ensayo de compactación	42
Figura 7. Muestra extraída del molde.....	43
Figura 8. Cámara de consolidación desarmada.....	43
Figura 9. Pastilla puesta en cámara.	43
Figura 10. Cámara de consolidación asegurada.....	44
Figura 11. Cámara de consolidación armada.....	44
Figura 12. Cámara de consolidación con deformímetro digital.	45
Figura 13. Ingreso a interfaz del software.	45
Figura 14. Pantalla inicial del software.	46
Figura 15. Selección de consolidómetro.	46
Figura 16. Carga de datos.....	47
Figura 17. Finalización de carga.	48
Figura 18. Inicio de cargue.....	48
Figura 19. Carga siguiente.....	49
Figura 20. Cambio de datos para siguiente carga.....	49
Figura 21. Inicio siguientes cargas y descargas.....	50
Figura 22. Selección de opción carga o descarga.	50
Figura 23. Actualización de datos.	51
Figura 24. Consulta de datos.	51
Figura 25. Datos capturados por deformímetro cargue.....	52
Figura 26. Datos capturados por deformímetro descargue.....	52
Figura 27. Análisis según Taylor.	53
Figura 28. Análisis según Casagrande.....	53
Figura 29. Gráficas de cargue.....	53
Figura 30. Gráficas de descargue.....	54
Figura 31. Extracción espécimen.	54
Figura 32. Gráfica ensayos granulométricos.....	55

Figura 33. Carta de plasticidad SUCS.....	56
Figura 34. Relación de vacíos vs presión.....	59
Figura 35. Relación de vacíos vs presión.....	60
Figura 36. Relación de vacíos vs presión.....	61
Figura 37. Relación de vacíos vs presión.....	62
Figura 38. Relación de vacíos vs presión.....	63
Figura 39. Relación de vacíos vs presión.....	64
Figura 40. Datos modelo a escala.....	67
Figura 41. Estratos de suelo del modelo a escala.....	68
Figura 42. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.	70
Figura 43. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.	71
Figura 44. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.	72
Figura 45. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.	73
Figura 46. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.	74
Figura 47. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.	76
Figura 48. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.	81
Figura 49. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.	82
Figura 50. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.	82
Figura 51. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.	83
Figura 52. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.	83
Figura 53. Variación para análogo 1.	84
Figura 54. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2.	88
Figura 55. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2.	89
Figura 56. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2.	89
Figura 57. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2.	90
Figura 58. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2.	90
Figura 59. Variación para análogo 2.	91
Figura 60. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.	95
Figura 61. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.	96
Figura 62. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.	96
Figura 63. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.	97
Figura 64. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.	97
Figura 65. Variación para análogo 3.	98
Figura 66. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.....	102

Figura 67. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.....	103
Figura 68. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.....	103
Figura 69. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.....	104
Figura 70. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.....	104
Figura 71. Variación para digital 1.....	105
Figura 72. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.....	110
Figura 73. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.....	110
Figura 74. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.....	111
Figura 75. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.....	111
Figura 76. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.....	112
Figura 77. Variación para análogo 2.	112
Figura 78. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.....	117
Figura 79. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.....	118
Figura 80. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.....	118
Figura 81. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.....	119
Figura 82. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.....	119
Figura 83. Variación para digital 3.....	120

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estado de consistencia de los suelos.....	27
Tabla 2. Sistema de clasificación AASHTO	29
Tabla 3. Análisis granulométrico.	55
Tabla 4. Determinación Límite líquido y plástico	56
Tabla 5. Clasificación de suelos AASHTO.	57
Tabla 6. Datos para clasificación AASHTO.....	57
Tabla 7. Ensayo modificado de compactación.	58
Tabla 8. Datos para cálculo de Cv.	59
Tabla 9. Datos para cálculo de Cv.	60
Tabla 10. Datos para cálculo de Cv.	61
Tabla 11. Datos para cálculo de Cv.	62
Tabla 12. Datos para cálculo de Cv.	63
Tabla 13. Datos para cálculo de Cv.	64
Tabla 14. Masa modelo a escala.	65
Tabla 15. Mediciones modelo a escala.	66
Tabla 16. Asentamiento de análogo 1.....	69
Tabla 17. Asentamiento de análogo 2.....	70
Tabla 18. Asentamiento de análogo 3.....	71
Tabla 19. Asentamiento de digital 1.	73
Tabla 20. Asentamiento de digital 2.	74
Tabla 21. Asentamiento de digital 3.	75
Tabla 22. Profundidad análogo 1 a 15 cm.....	77
Tabla 23. Profundidad análogo 1 a 20 cm.....	78
Tabla 24. Profundidad análogo 1 a 25 cm.....	78
Tabla 25. Profundidad análogo 1 a 30 cm.....	78
Tabla 26. Profundidad análogo 1 a 35 cm.....	79
Tabla 27. Profundidad análogo 1 a 40 cm.....	79
Tabla 28. Profundidad análogo 1 a 45 cm.....	79
Tabla 29. Profundidad análogo 1 a 50 cm.....	80
Tabla 30. Profundidad análogo 1 a 55 cm.....	80
Tabla 31. Profundidad análogo 1 a 60 cm.....	80
Tabla 32. Datos de profundidades análogo 1.....	81

Tabla 33. Profundidad análogo 2 a 15 cm.....	84
Tabla 34 Profundidad análogo 2 a 20 cm.....	85
Tabla 35. Profundidad análogo 2 a 25 cm.....	85
Tabla 36. Profundidad análogo 2 a 30 cm.....	85
Tabla 37. Profundidad análogo 2 a 35 cm.....	86
Tabla 38. Profundidad análogo 2 a 40 cm.....	86
Tabla 39. Profundidad análogo 2 a 45 cm.....	86
Tabla 40. Profundidad análogo 2 a 50 cm.....	87
Tabla 41. Profundidad análogo 2 a 55 cm.....	87
Tabla 42. Profundidad análogo 2 a 60 cm.....	87
Tabla 43. Datos de profundidades análogo 2.....	88
Tabla 44. Profundidad análogo 3 a 15 cm.....	91
Tabla 45. Profundidad análogo 3 a 20 cm.....	92
Tabla 46. Profundidad análogo 3 a 25 cm.....	92
Tabla 47. Profundidad análogo 3 a 30 cm.....	92
Tabla 48. Profundidad análogo 3 a 35 cm.....	93
Tabla 49. Profundidad análogo 3 a 40 cm.....	93
Tabla 50. Profundidad análogo 3 a 45 cm.....	93
Tabla 51. Profundidad análogo 3 a 50 cm.....	94
Tabla 52. Profundidad análogo 3 a 55 cm.....	94
Tabla 53. Profundidad análogo 3 a 60 cm.....	94
Tabla 54. Datos de profundidades análogo 3.....	95
Tabla 55. Profundidad digital 1 a 15 cm.	98
Tabla 56. Profundidad digital 1 a 20 cm.	99
Tabla 57. Profundidad digital 1 a 25 cm.	99
Tabla 58. Profundidad digital 1 a 30 cm.	99
Tabla 59. Profundidad digital 1 a 35 cm.	100
Tabla 60. Profundidad digital 1 a 40 cm.	100
Tabla 61. Profundidad digital 1 a 45 cm.	100
Tabla 62. Profundidad digital 1 a 50 cm.	101
Tabla 63. Profundidad digital 1 a 55 cm.	101
Tabla 64. Profundidad digital 1 a 60 cm.	101
Tabla 65. Datos de profundidades digital 1.	102
Tabla 66. Profundidad digital 2 a 15 cm.	105

Tabla 67. Profundidad digital 2 a 20 cm.	106
Tabla 68. Profundidad digital 2 a 25 cm.	106
Tabla 69. Profundidad digital 2 a 30 cm.	106
Tabla 70. Profundidad digital 2 a 35 cm.	107
Tabla 71. Profundidad digital 2 a 40 cm.	107
Tabla 72. Profundidad digital 2 a 45 cm.	107
Tabla 73. Profundidad digital 2 a 50 cm	108
Tabla 74. Profundidad digital 2 a 55 cm.	108
Tabla 75. Profundidad digital 2 a 60 cm.	108
Tabla 76. Datos de profundidad digital 2.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 77. Profundidad digital 3 a 15 cm.	113
Tabla 78. Profundidad digital 3 a 20 cm.	113
Tabla 79. Profundidad digital 3 a 25 cm.	114
Tabla 80. Profundidad digital 3 a 30 cm.	114
Tabla 81. Profundidad digital 3 a 35 cm.	114
Tabla 82. Profundidad digital 3 a 40 cm.	115
Tabla 83. Profundidad digital 3 a 45 cm	115
Tabla 84. Profundidad digital 3 a 50 cm	115
Tabla 85. Profundidad digital 3 a 55 cm.	116
Tabla 86. Profundidad digital 3 a 60 cm.	116
Tabla 87. Datos de profundidades digital 3.	117
Tabla 88. Datos obtenidos en modelo a escala.	120
Tabla 89. Datos obtenidos con ecuación (1).	121
Tabla 90. Datos obtenidos en modelo a escala.	122
Tabla 91. Datos obtenidos con ecuación (2).	122
Tabla 92. Porcentajes de error ecuación (1) y (2).	124

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONSOLIDACIÓN OBTENIDOS EN LOS EQUIPOS DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA DE BUCARAMANGA Y VERIFICACIÓN DE ASENTAMIENTOS EN MODELO A ESCALA.

AUTOR(ES): STEFANY XIMENA LOAIZA GÓMEZ
SERGIO ANDRÉS RINCÓN LEAL

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): GERARDO BAUTISTA GARCÍA

RESUMEN

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo comparar los asentamientos por consolidación producidos en un estrato arcilloso a escala drenado por las dos caras, con los estimados a partir de parámetros obtenidos en ensayos de consolidación. Para la determinación de los parámetros de consolidación se utilizaron seis equipos, de los cuales tres son análogos y los otros tres corresponden a equipos digitales recientemente adquiridos por la UPB. Los trabajos comenzaron con la búsqueda del material, el cual debería corresponder a una arcilla con algún contenido de arena. El material escogido pertenece al grupo CL según el SUCS y fue tomado de la ciudad de Barrancabermeja ubicado en el km 5 vía el Boston. Posteriormente se realizaron ensayos de compactación con el fin de determinar la humedad óptima y el peso específico seco máximo, los cuales se utilizaron para preparar tanto las muestras de los ensayos de consolidación, así como también el estrato del modelo a escala. Una vez las deformaciones en el modelo a escala llegaron a su valor máximo, estas se compararon con los asentamientos estimados a partir de los parámetros obtenidos en los ensayos de consolidación. Además de la comparación de asentamientos, también se elaboró un manual de operación de los nuevos consolidómetros digitales, con el fin de implementar su uso regular tanto en las clases de mecánica de suelos, venta de servicios, proyectos de grado e investigaciones. Este manual es de fácil entendimiento para instructores de laboratorio, estudiantes y profesores.

PALABRAS CLAVE:

Consolidación, asentamientos, arcillas, expansión, relación de vacíos, presión, modelo.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: COMPARISON OF CONSOLIDATION PARAMETERS USING EQUIPMENTS OF THE PONTIFICIAN BOLIVARAN UNIVERSITY AND VERIFICATION OF SETTLEMENTS IN SCALE MODEL.

AUTHOR(S): STEFANY XIMENA LOAIZA GÓMEZ
SERGIO ANDRÉS RINCÓN LEAL

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: GERARDO BAUTISTA GARCÍA

ABSTRACT

The main aim of this thesis project is to compare the soil consolidation in a scale model of clay stratum drained on both sides with the parameter estimates obtained by consolidation tests. Six types of equipment were used in the estimation of soil consolidation parameters: three of which are analogue and the other three are estimated using digital equipment recently acquired by UPB. The first stage of the project was to locate a clay that had some sand content. The chosen clay belongs to the CL group, according to the SUCS and was sourced from Barrancabermeja. Later, compaction tests were made in order to determine the optimum humidity and the maximum dry specific weight. These test results were then used to prepare both the consolidation tests and the scale model of the stratum. Once the clay had fully settled in the scale model, the consolidation in the scale model was then compared with the estimated consolidation obtained in the consolidation tests. In addition to the comparison of the consolidation, operating manuals for the new digital consolidators were written for use in soil mechanics lessons, sales service, thesis projects and investigations. These manuals were written in order to be easily understood and used by laboratory instructors, teachers as well as students.

KEYWORDS:

Consolidation, settlements, clays, expansion, vacuum ratio, pressure, model.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

En suelos arcillosos los asentamientos se calculan por medio de la teoría de la consolidación, esta teoría es válida si se cumplen las siguientes condiciones. Saturación total, incompresibilidad tanto del agua como de las partículas de suelo. Así mismo las deformaciones no se dan de manera inmediata, ya que estas tardan un tiempo, el cual depende del tipo de arcilla y carga utilizada.

Con el fin de modernizar su infraestructura y equipos, la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana en el año 2017 adquirió tres equipos de consolidación digitales, los cuales presentan varias ventajas con respecto a los equipos análogos, dentro de las cuales se destacan: mayor precisión en la toma de datos en lo referente a tiempos exactos y resolución de las deformaciones, captura de datos en cualquier instante (sin importar si son horas laborables o no), pausa automática de los ciclos de carga y descarga al completarse la consolidación en cada uno de ellos.

En el presente trabajo de grado, se realizaron seis ensayos de consolidación, de los cuales tres fueron ejecutados con los equipos análogos y los otros tres con los equipos digitales, con el fin de obtener las relaciones de vacíos iniciales y finales y a partir de ellas, calcular los asentamientos producidos por una sobrecarga estática. De manera simultánea se utilizó la misma sobrecarga estática para producir deformaciones en un modelo a escala con la misma arcilla.

Una vez obtenidos los asentamientos finales en el modelo a escala, estos se compararon con los estimados a partir de parámetros provenientes de cada uno de los seis ensayos de consolidación realizados.

Finalmente, se elaboró un manual de operación de los equipos automatizados, el cual se incluye en el capítulo 8 del presente trabajo de grado. Este manual incluye: preparación de las muestras, operación de los consolidómetros y uso del software. Se espera que las prácticas hasta ahora realizadas con los equipos análogos sean reemplazadas usando los equipos nuevos y para ello el manual facilitará la apropiación del conocimiento por parte de instructores de laboratorio, estudiantes y profesores, dado que este fue escrito usando un sistema de paso a paso de muy fácil entendimiento.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL:

Establecer diferencias y similitudes de los parámetros de consolidación obtenidos en los equipos de laboratorio de la UPB y comparar los asentamientos estimados a partir de dichos parámetros con los ocurridos en un modelo a escala

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Determinar la humedad óptima y peso específico seco máximo de una arcilla, mediante ensayos tipo Proctor modificado, con el fin preparar las muestras con las cuales se realizarán los ensayos de consolidación y el estrato que se utilizará en el modelo a escala.
- Calcular los asentamientos producidos por una carga estática sobre un estrato arcilloso a partir de las curvas de consolidación y compresibilidad obtenidas en los ensayos de consolidación y compararlos con los producidos en un modelo a escala.
- Comparar los parámetros de consolidación obtenidos en los 6 consolidómetros de la Universidad Pontificia Bolivariana.
- Elaborar un manual de operación de los equipos nuevos de consolidación, para que éste sea fácil entendimiento por parte de los laboratoristas de la UPB.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Durante las dos décadas en las cuales ha funcionado el laboratorio de mecánica de suelos de la universidad pontificia bolivariana de Bucaramanga, se han usado equipos análogos para la ejecución del ensayo de consolidación. Lamentablemente estos equipos no permiten el cumplimiento de las normas vigentes del ensayo, ya que no es posible tomar datos durante las horas no laborales, generando con esto fuentes de error de carácter humano y un menor rendimiento por parte del personal que se encuentre laborando en el laboratorio, debido a que tendrían que dedicar parte de su tiempo a la toma de datos del ensayo de consolidación anotándolos en determinados formatos y dejarían de realizar otras labores durante ese tiempo.

En el año 2017 la Universidad adquirió equipos automatizados, los cuales permiten detener las pruebas y reanudarlas en el momento que se desee, además la captura de datos la realiza el software y no el operador, permitiendo de esta manera el cumplimiento de las normas y minimizando los errores en los resultados finales al tener una toma de datos de manera automática en los respectivos formatos.

Por otra parte, es bien sabido que, en la gran mayoría de los casos en la ingeniería de suelos colombiana, los asentamientos se estiman a partir de correlaciones con el número de golpes corregido del ensayo de penetración estándar, sin embargo, para suelos arcillosos y bajo ciertas condiciones tales como la saturación total del estrato e incompresibilidad del agua y partículas, la teoría de la consolidación ofrece mejores resultados en el cálculo de dichos asentamientos.

3. JUSTIFICACIÓN

Los suelos cohesivos pueden ser limosos y arcillosos. Para este tipo de suelos uno de los parámetros más importantes para su estudio es el asentamiento, el cual se determina a partir del ensayo de consolidación. En estos suelos la permeabilidad es muy baja y las presiones se disipan muy lentamente, por lo que puede seguir deformándose varios años después de terminada la construcción, afectando de esta manera la estructura en la parte superior por asentamientos diferenciales en su cimentación.

Por otra parte, la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga adquirió en el año 2017 tres consolidómetros automatizados con los cuales se pueden realizar los ensayos cumpliendo con las normas estipuladas, ya que estos permiten detener y reanudar las pruebas en cualquier momento. Hasta el año 2016 las pruebas de consolidación se hacían con equipos análogos, en los cuales los ensayos debían ejecutarse de manera continua debido a que estos no se podían pausar y la toma de datos se realizaba de manera manual en un formato, trayendo como consecuencia que no se pudieran tomar las lecturas de deformación en horas no laborables y aumentando la posibilidad de tener errores de tipo operativo al tomar datos de manera visual en un equipo que tiene deformímetros con bajo grado de precisión.

Además de comparar los asentamientos producidos en un modelo a escala con los estimados a partir de la teoría de la consolidación, el presente trabajo también pretende implementar la práctica de consolidación mediante equipos automatizados y de esta manera establecer diferencias entre los resultados de los asentamientos calculados a partir de parámetros obtenidos en ensayos, usando consolidómetros análogos y automatizados. Como valor agregado al presente trabajo de grado, el informe final contendrá un instructivo de operación del equipo de fácil entendimiento para los instructores de laboratorio

4. ALCANCE

En el presente trabajo de grado se realizó una comparación de los parámetros de consolidación de una arcilla, obtenidos en los equipos de consolidación análogos y automatizados de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Así mismo se estimó el asentamiento producido por una carga estática sobre un estrato arcilloso, drenado por las dos caras, que se encuentra dentro de un modelo a escala. El modelo a escala fue construido en madera, con ángulos de acero galvanizado y con la ayuda de 4 deformímetros se midieron todos los días los asentamientos bajo la carga estática hasta la culminación del proceso de consolidación bajo dicha carga.

Finalmente se compararon los asentamientos estimados a partir de los resultados de los ensayos de consolidación (tanto en los equipos análogos como en los equipos automatizados) con los realmente producidos en el estrato arcillosos del modelo a escala. Además, se presenta un manual de operación con el instructivo para el uso del software y un vídeo, el cual se espera que sea de gran utilidad a profesores, estudiantes e instructores de laboratorio.

5. ANTECEDENTES

El Dr. Karl Von Terzaghi hizo numerosas contribuciones para sentar las bases de la mecánica de suelos teniendo en cuenta un modelo sugerido originalmente por Lord Kelvin. Entre ellas una de las más importantes es la teoría de la consolidación, que ha sido aplicada para determinar asentamientos de suelos cohesivos en numerosos proyectos de ingeniería.¹ Debido a que cuando un suelo fino se encuentra en estado saturado y es sometido por una carga estática, ocurre un proceso de disminución de volumen en determinado lapso de tiempo por la presión de poros interna, este proceso de reducción de volumen por una carga estática en un periodo de tiempo se conoce como consolidación.² A pesar de los años y las nuevas teorías avanzadas, esta teoría sigue siendo la más efectiva para enseñar y entender el proceso de consolidación.

La teoría de consolidación planteada tiene en cuenta un estrato arcilloso con espesor denotado por H, dicho estrato es sometido a un proceso de sobrecarga y el asentamiento producido por dicha sobrecarga se puede calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1+e} * H \quad (1)$$

$$\Delta H = \int_0^H \frac{\Delta e}{1+e_0} * dz \quad (2)$$

Dónde:

ΔH =Deformación total de estrato arcilloso (condiciones de drenaje variable)

Δe =Variación de relación de vacíos debido a sobrecarga inducida.

e = Relación de vacíos.

H = Espesor total del estrato arcilloso.

A manera de antecedente local se encontró un trabajo de grado en las bases de datos de la plataforma Alejandría de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga del año 2012, realizado por los estudiantes Álvaro Rueda e Iván Jaimes, el cual estaba encaminado a establecer la aplicabilidad de la teoría de consolidación de Terzaghi a las arcillas saturadas encontradas en un sector del área metropolitana de Bucaramanga al ser sometidas a cargas estáticas, dicho trabajo se tituló *“Comparación de los asentamientos de los suelos arcillosos en modelos a escala con los estimados por medio de la teoría de la consolidación”*, el objetivo principal fue

¹ Pablo Carrillo (2009). ASENTAMIENTOS EN SUELOS ARCILOOS EN CASOS EN QUE LOS CRITERIOS 1-D Y CONSOLIDACION PRIMARIA NO SON SUFICIENTES. Santiago de Chile.

² Juárez Badillo (2005). Mecánica de suelos Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos. México. Limusa.

el de estudiar las arcillas de un sector del área metropolitana de Bucaramanga mediante la teoría de la consolidación y su asentamiento en un modelo a escala en tiempo real, utilizando los métodos A y B descritos en la norma INV E 151-13. En ese trabajo de grado concluyen que la comparación de los resultados obtenidos del modelo a escala y los datos del laboratorio no difieren más de un 3.55% y la deformación del modelo a escala en el lapso de tiempo con una carga de 0.01 Kg/cm² fue de 0.138cm, utilizando las máquinas análogas para realizar estos procesos de consolidación a diferencia de este trabajo de grado donde se trabajó con máquinas análogas y automatizadas.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Granulometría en suelos³

En los primeros años de investigación sobre las propiedades de los suelos, se creía que éstas dependían directamente de la distribución de las partículas según sus tamaños; debido a esto la preocupación principal de los ingenieros era la búsqueda de métodos acertados para obtener esta distribución. Hoy en día se sabe que las propiedades del suelo no dependen exclusivamente del tipo de suelos sino principalmente de la compactidad y orientación de las partículas (en caso de los suelos gruesos) y de la historia geológica de esfuerzos (en el caso de los suelos finos).

Se refiere distribución granulométrica de un suelo a la separación en diferentes fracciones, las cuales son seleccionadas por el tamaño de sus partículas y se caracterizan porque su tamaño se encuentra comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo. La distribución por tamaños en suelos gruesos puede revelar algo relacionado a las propiedades físicas del material, y según la experiencia los suelos gruesos bien graduados, es decir con amplia gama de tamaños, tienen un mejor comportamiento ingenieril. De igual manera, los suelos gruesos bien gradados se compactan mejor que los suelos mal gradados, debido a que las partículas más pequeñas pueden acomodarse en los huecos que se forman entre las partículas más grandes, adquiriendo de esta manera una mayor compactidad.

Las propiedades mecánicas de los suelos finos (arcillas y limos plásticos), son más difíciles de establecer debido a que dependen de un mayor número de conceptos, y se puede decir que ninguna de las circunstancias que definen las propiedades mecánicas de un suelo fino está descrita por la distribución granulométrica de dicho suelo.

En un principio el suelo se dividía en tres o cuatro fracciones, debido a la cantidad de tiempo que se gastaban en los procedimientos de separación por tamaños. Posteriormente fue posible la realización de curvas granulométricas, contando con un mayor número de tamaños diferentes de las partículas del suelo. Actualmente es posible ampliar las curvas en los tamaños finos gracias a la aplicación de técnicas de análisis de suspensiones, y ésta gráfica granulométrica se dibuja con porcentajes como ordenadas y tamaños de partículas como abscisas. Cuando se dice ordenadas se hace referencia al porcentaje en peso, de las partículas menores que el tamaño correspondiente.

Existen dos métodos principales que se utilizan para la separación de un suelo en diferentes fracciones: la separación por mallas que se usa para obtener fracciones correspondientes a los tamaños mayores del suelo y se debe hacer pasar la muestra de suelo en tamices de aberturas descendentes hasta la malla N°200, así se puede obtener un punto de la curva acumulativa correspondiendo a cada abertura, por otro lado, para los tamaños menores del suelos se hace necesario el método del hidrómetro, y se basa en el hecho de que la velocidad de sedimentación de partículas

³ Tomado de Badillo Juárez (2005), *MECÁNICA DE SUELOS, FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE SUELOS*, México, Limusa. Páginas 97 a 101.

en un líquido es función de su tamaño. Éste último método se entiende que está fundamentado en Stokes, ya que proporciona una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en un fluido y el tamaño de esas partículas.

6.2. Plasticidad y límites⁴

Cuando un suelo tiene cohesión, según la naturaleza y la cantidad de agua que posea, puede tener propiedades que lo incluyen en el estado sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso. Los límites de Atterberg marcan una separación significativa entre estos cuatro estados

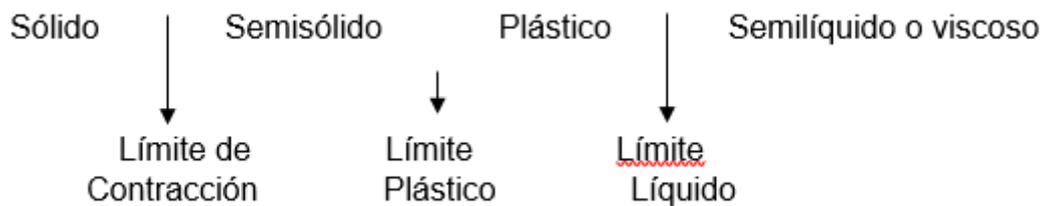


Figura 1. Estado de consistencia de los suelos.

José A. Jiménez, José L. de Justo. (1975). Geotecnia y Cimientos I, propiedades de los suelos y de las rocas. Ed Rueda. Pag 71

Los límites de Atterberg ayudan a dar una idea del tipo del suelo y sus propiedades, de igual manera ayudan a indicar la calidad del suelo. El límite líquido se determina dibujando tres puntos, que corresponden a tres operaciones con la cuchara (Copa de Casagrande), con tres muestras diferentes de humedad; se traza la recta que se adapte a estos puntos y se determina el corte a los 25 golpes, de esta manera se lee la humedad del límite líquido. El límite plástico es el punto en el que el suelo empieza a perder su cohesión por falta de humedad; el ensayo se realiza con una porción de suelo que pase por el tamiz N°40, con un contenido de humedad superior al límite plástico. El Índice de plasticidad sería entonces la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, y cuanto mayor índice de un suelo su permeabilidad se hace menor. El límite de contracción se define como el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando.

6.3. Clasificación de suelos⁵

A la hora de clasificar los suelos encontramos que existen varios tipos, como arcillas, limos, arena, gravas en orden creciente según el tamaño de sus partículas; no obstante, dentro de este proyecto de grado se trabajó con suelo arcilloso, el cual se caracteriza por ser un suelo cohesivo, de carácter plástico y de baja permeabilidad. De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S) un suelo se considera fino si más del 50% de una muestra pasa por el tamiz número 200, y se

⁴ Tomado de José A. Jiménez, José L. de Justo. (1975). Geotecnia y Cimientos I, propiedades de los suelos y de las rocas. Ed Rueda. Páginas 71 a 82

⁵ Tomado de Badillo Juárez (2005), MECÁNICA DE SUELOS, FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE SUELOS, México, Limusa. Páginas 149 a 152.

divide en 3 grandes grupos: Limos inorgánicos, Arcillas inorgánicas, Limos y Arcillas orgánicas.

6.3.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S)⁶

Este sistema está basado en el de Aeropuertos, con ligeras modificaciones, y tiene en cuenta los suelos gruesos y finos, distinguiendo ambos por el tamizado a través de la malla 200. Un suelo se considera grueso si más del 50% de las partículas son gruesas, y fino si más de la mitad de sus partículas en peso son finas.

En suelos gruesos el símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, las cuales son las iniciales de estos suelos en inglés. Las gravas y las arenas se separan con la malla N^o4, por lo que si más del 50% de su fracción gruesa no pasa la malla pertenece al grupo G, y del caso contrario pertenece al grupo S. De igual manera se subdividen en cuatro tipos.

	Tipo	W	P	M	C
SUELOS GRUESOS	Gravas [G]	Son gravas bien graduadas y con pocos finos o limpios por completo, con coeficiente de uniformidad mayor a 4 y coeficiente de curvatura entre 1 y 3.	Son gravas mal graduadas con apariencia uniforme. No se cumple con uno a los dos requisitos de gradación.	Son gravas limosas. El contenido de finos afecta las características de resistencias, esfuerzos de deformación y la capacidad de drenaje libre. Se ubican por debajo de la línea A y en la zona por encima de la línea A con índice de plasticidad menor a 4.	Son gravas arcillosas. Se ubican por encima de la línea A y además su índice de plasticidad es superior a 7.
	Arenas [S]	Son arenas bien graduadas y con pocos finos o limpios por completo, con coeficiente de uniformidad mayor a 6 y coeficiente de curvatura entre 1 y 3.	Son arenas mal graduadas con apariencia uniforme. No se cumple con uno a los dos requisitos de gradación.	Son arenas limosas. El contenido de finos afecta las características de resistencias, esfuerzos de deformación y la capacidad de drenaje libre. Se ubican por debajo de la línea A y en la zona por encima de la línea A con índice de plasticidad menor a 4.	Son arenas arcillosas. Se ubican por encima de la línea A y además su índice de plasticidad es superior a 7.

Tabla 1. Estado de consistencia de los suelos.

Los suelos finos son aquellos cuyo contenido en peso que pasa por el tamiz No 200 es superior al 50%. Los suelos arcillosos y limosos se subdividen a su vez en los de

⁶ Tomado de Badillo Juárez (2005), *MECÁNICA DE SUELOS, FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE SUELOS*, México, Limusa. Páginas 152 a 158.

alta compresibilidad y los de baja compresibilidad de acuerdo con su límite líquido, siendo la frontera el 50%. El nombre de un suelo fino quedará determinado por su ubicación en la carta de plasticidad de Casagrande, resultando los grupos CH, CL, MH, ML, OH y OL. Para este trabajo de grado se trabajó con arcillas inorgánicas de alta compresibilidad (CL) provenientes del municipio de Barrancabermeja.

6.3.2. Sistema de clasificación AASTHO⁷

Este método para clasificar los suelos es considerado como el más antiguo para clasificar un suelo pues es utilizado desde 1929, sin embargo, se ha ido actualizando con el paso de los años. Su principal uso generalmente es para suelos de material sub-rasante para la adecuación y construcción de vías. Este sistema consta de la interpretación de las lecturas obtenidas del análisis granulométrico y del análisis de límites, ya categorizado con estos parámetros, permite seleccionar con mayor detalle el tipo de suelo según el índice de grupo para finalmente clasificarlo.

El sistema AASHTO se divide en dos grandes grupos: Los suelos granulares y los suelos finos; estos grupos tiene subdivisiones en 7 distintos grupos que corresponden a A1, A2 y A3 para materiales granulares, donde se retiene el 35% de partículas que pasan por el tamiz N°200. Los materiales que pasen un 35% por el tamiz N°200 corresponden a A4 y finalmente para clasificar los finos corresponden a A5, A6 y A7 conformados por limos y arcillas según su granulometría y sus límites.

Para clasificar el suelo según este sistema es necesario recurrir a la tabla 2 descartando en primera instancia opciones inadecuadas de izquierda a derecha y arriba abajo según la granulometría, en segunda instancia según sus límites, seguido de sus índices y finalmente para establecer una posición detallada dentro de un grupo se escoge una opción según el índice de grupo que corresponda.

⁷ Tomado de Braja M. Das (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Editorial Thompson international. Páginas 35 a 38.

Clasificación general	Materiales Granulares (35% o menos para el tamiz #299)							Materiales Limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado % que pasa											
N°10 (2.00mm)	50 máx	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
N°40 (425 µm)	30 máx	50 máx	51 máx	--	--	--	--	--	--	--	--
N°200 (75 µm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 min	36 min	36 min
Consistencia											
Límite líquido				40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min
Índice de plasticidad	6 máx		No plastico	10 máx	10 máx	11 min	11 min	10 máx	10 máx	11 min	11 min
Tipos de materiales característicos	Cantos, gravas y arena		Arena fina	Gravas y arenas limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación	Excelente a bueno							Regular a malo			
IG	0		0				0	0	A-7-5 A-7-6	IG < LL-30 IG > LL-30	

Tabla 2. Sistema de clasificación AASHTO

JOSEPH E. BOWLES (1980). *Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil*, Ed. McGraw-Hill. México. Pag 70.

El sistema se basa en los siguientes criterios:

- Tamaño de las partículas:
Grava: Fracción correspondiente al material retenido entre la malla de 75 µm y la malla #10.
Arena: fracción correspondiente al material retenido entre la malla de 10 µm y la malla #200
Limos y arcillas: Fracción correspondiente al material que pasa la malla #200
- Plasticidad: Término *limoso* utilizado cuando el material fino presenta un índice de plasticidad de 10 o menos y el término *arcilloso* se utiliza cuando el material fino presenta un índice de plasticidad igual o superior a 11.

Para clasificar un suelo de acuerdo a la tabla 2, se realiza un proceso de eliminación de datos, donde el primer grupo en el que se ajusten los datos de izquierda a derecha es la clasificación correcta.

Finalmente se incorpora un número llamado *Índice de grupo* para realizar una evaluación de calidad de un suelo como material subrasante de carreteras. Este número se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10) \quad (3)$$

Donde:

IG = índice de grupo

F= Finos retenidos

LL = Límite líquido

IP = Índice de plasticidad

Estos son los principios para utilizar la ecuación (3):

1. Si la ecuación 3 da un valor negativo para IG se asume que es igual 0.
2. El IG se redondea al número entero más cercano.
3. No hay límite superior para el IG
4. Entre los grupos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 Y A-3 siempre es igual a 0.
5. Para grupos A-7-5 el IG debe ser menor o igual al LL-30
6. Para grupos A-7-6 el IG debe ser mayor o igual a LL-30

6.4. Compactación de suelos⁸

La compactación es un proceso por el que un relleno debe pasar para que se forme una masa densa y poco compresible, mediante la disminución de su relación de vacíos, lo cual traerá como consecuencia un mejoramiento de las propiedades físicas. En una prueba de laboratorio se obtiene la curva de compactación, en ella el eje de las abscisas corresponde a la humedad y el eje de las ordenadas corresponde a la densidad seca y dicha curva permite obtener la humedad para la cual la densidad seca es mayor (humedad óptima).

El ensayo Proctor consiste en apisonar una muestra de suelo en un número determinado de capas sucesivas en un molde cilíndrico y cada capa se apisona por medio del número de golpes, de tal forma que la energía aplicada sea similar a la que suministran los equipos de campo. Si en dado caso que el tamaño del suelo sea superior al que permite el molde, se debe tamizar por el tamaño máximo permitido y se realiza el ensayo Proctor con la fracción fina.

⁸ Tomado de José A. Jiménez, José L. de Justo. (1975). Geotecnia y Cimientos I, propiedades de los suelos y de las rocas. Ed Rueda. *Páginas 221 a 225*

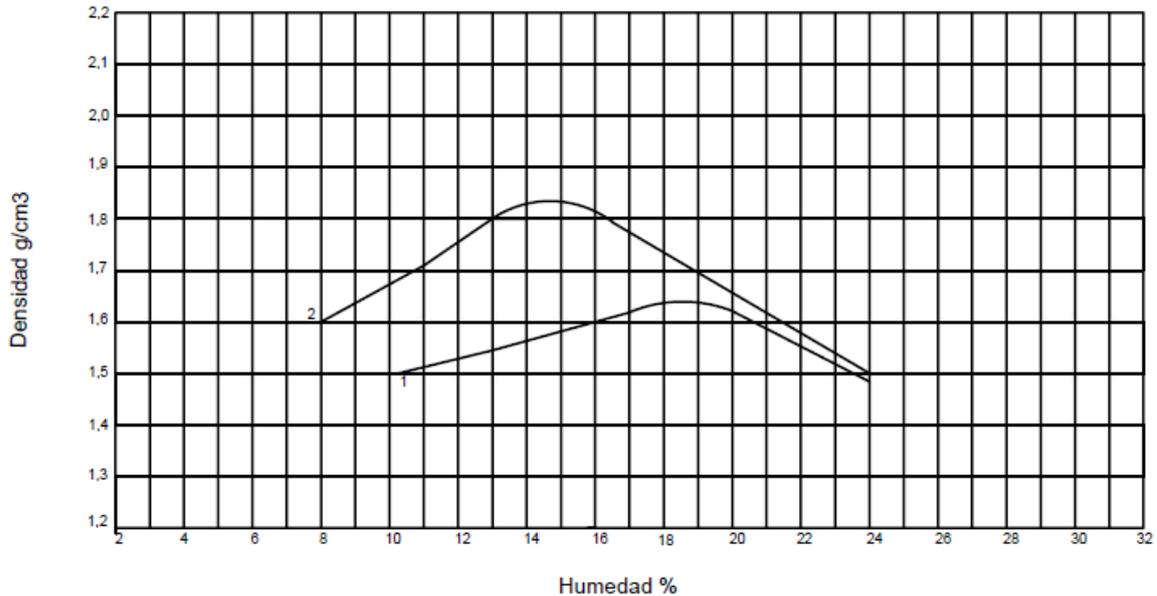


Figura 2. Ensayo de Proctor normal (1) y modificado (2) en un suelo

José A. Jiménez, José L. de Justo. (1975). Geotecnia y Cimientos I, propiedades de los suelos y de las rocas. Ed Rueda. Pag 222

En el ensayo de Proctor se produce la compactación mediante impacto, sin embargo, existe otro ensayo de laboratorio, el compactador manual de Harvard, conocido popularmente como el ensayo Harvard miniatura. Este último se usa para suelos con tamaños inferiores a la abertura del tamiz No10, a pesar de la facilidad para su ejecución los resultados no son los mejores comparados con las pruebas Proctor.

6.5. Relaciones volumétricas y gravimétricas⁹

Para definir el estado físico de un suelo es necesario conocer las propiedades físicas básicas, y se hace necesario cuantificar las tres fases constituyentes: sólida, líquida y gaseosa. Resulta difícil visualizar cada fase en sus proporciones relativas, porque en una muestra de suelo todas se encuentran mezcladas en forma natural, por lo que es conveniente tener un modelo de suelo en el que las tres fases se separan en cantidades individuales, y cada uno recibe su nombre de acuerdo a la cantidad que proporciona una referencia unitaria como se observa a continuación:

⁹ Tomado de R. Whitlow (1994). Fundamentos de mecánica de suelos, Ed Compañía Editorial Continental



Figura 3. Representación esquemática de las fases de un elemento de suelo.

R. Whitlow (1994). *Fundamentos de mecánica de suelos*, Ed Compañía Editorial Continental. Pag 52.

Donde:

V = Volumen total del elemento
 Vs = Volumen de sólidos
 Vv = Volumen de vacíos
 Va = Volumen de agua
 Va = Volumen de aire en los poros

M = Masa total del elemento
 Ms = Masa de sólidos
 Mv = Masa de vacíos
 Ms = Masa del agua
 Masa del aire en poros se supone igual a cero

A continuación se presentan algunas relaciones volumétricas y gravimétricas fundamentales:

6.5.1. Porosidad (n)¹⁰

Porosidad es la porción del volumen ocupada por los poros, si los suelos están llenos de agua como si lo están de aire o de ambos. El índice de poros es la razón del espacio ocupado por los poros al espacio que es ocupado por los sólidos.

$$n(\%) = \frac{V_v}{V} \times 100\%$$

¹⁰ Tomado de José A. Jiménez, José L. de Justo. (1975). *Geotecnia y Cimientos I*, propiedades de los suelos y de las rocas. Ed Rueda. Página 47.

6.5.2. Relación de vacíos (e) ¹¹

Relación de vacíos se refiere al volumen que no es ocupado por los sólidos, éste volumen puede ser de agua, aire o ambos.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

6.5.3. Grado de saturación (Sr)¹²

La proporción de vacíos ocupada por el agua se expresa en términos del grado de saturación, es decir que la cantidad de agua en el suelo puede expresarse como una fracción del volumen de vacíos

$$Sr(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$$

6.5.4. Contenido de humedad¹³

Es la proporción de agua presente en un elemento de suelo, es decir la cantidad de fase líquida que se encuentra en la masa sólida

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

6.5.5. Densidad de los suelos¹⁴

Es la relación existente entre la masa de suelo y el volumen total de una muestra.

$$p = \frac{\text{masa sólidos}}{\text{Volumen total}}$$

6.6. Deformaciones y Asentamientos

El exceso de presión intersticial se produce cuando un estrato de suelo se somete a un incremento de esfuerzos totales, como se puede observar en el resultado de una carga aplicada por la construcción de algún edificio, debido a que el exceso de presión de poros se disipa con un flujo de agua hacia el exterior porque el agua no puede resistir esfuerzos cortantes. Este proceso se denomina consolidación.

La permeabilidad en los suelos granulares es alta, por lo que el exceso de presión intersticial puede disiparse al instante a diferencia de las arcillas, que son suelos finos con una permeabilidad muy baja y es por esto que la disipación del exceso de presión

¹¹ Tomado de R. Whitlow (1994). Fundamentos de mecánica de suelos, Ed Compañía Editorial Continental. Página 53.

¹² Tomado de R. Whitlow (1994). Fundamentos de mecánica de suelos, Ed Compañía Editorial Continental. Página 53.

¹³ Tomado de R. Whitlow (1994). Fundamentos de mecánica de suelos, Ed Compañía Editorial Continental. Página 54.

¹⁴ Tomado de R. Whitlow (1994). Fundamentos de mecánica de suelos, Ed Compañía Editorial Continental. Página 55.

intersticial es un proceso lento. Debido a esto una estructura puede continuar asentándose durante varios años después de terminada la construcción.¹⁵

La consolidación se aplica en la práctica en estructuras cimentadas en depósitos de arcilla, por lo que es importante estimar el asentamiento total de la estructura y la velocidad a la cual se produce el asentamiento. El asentamiento del suelo que es causado por cargas se divide en tres categorías:

- Asentamiento inmediato: ningún cambio en el contenido de agua, provocado por la deformación elástica del suelo seco y suelo húmedo.
- Asentamiento por consolidación primaria: resultado de un cambio de volumen en suelos saturados cohesivos por la expulsión del agua que ocupa los espacios vacíos.
- Asentamiento por consolidación secundaria: se puede observar en suelos saturados cohesivos por reacomodo de las partículas de forma retardada.

En los suelos arenosos se presenta un rápido drenaje del agua de los poros, por lo que el asentamiento inmediato y la consolidación ocurren simultáneamente.

En 1925 Terzaghi sugirió el procedimiento de prueba de la consolidación unidimensional, la cual se realiza en un consolidómetro. El espécimen de suelo se sitúa dentro de un anillo metálico con dos piedras porosas, una en la parte superior y otro en la parte inferior¹⁶.

El asentamiento empieza rápidamente y se hace más lento a medida que pasa el tiempo. Se puede dividir en tres etapas como se muestra en la figura 5:

¹⁵ Tomado de PETER L. BERRY Y DAVID REID (1993). Mecánica de suelos, McGraw-Hill INTERAMERICANA, S.A, UK. *Páginas 130-131*

¹⁶ Tomado de Braja M. Das (2001). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Editorial Thompson internacional. *Páginas 151 a 155.*

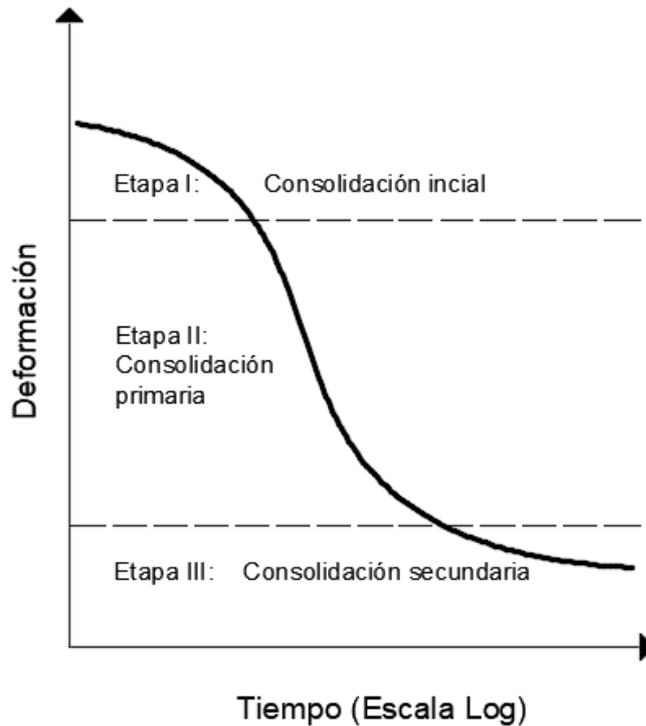


Figura 4. Gráfica tiempo-deformación durante la consolidación.

B. M. Das (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Sacramento: Cengage. Pag 155

Etapa I: Compresión inicial

Esta etapa es generada instantáneamente al aplicar la carga, debido a la compresión y la cantidad de aire presente en los poros del suelo. El porcentaje que se evidencia durante esta etapa depende de la saturación del suelo, llegando a ser 0 cuando el suelo está completamente saturado y puede llegar a ser tan superior como el 50% cuando la saturación presente es del 90%. El porcentaje se encuentra relacionado inversamente proporcional con la carga, ya que cuando se aumenta la carga disminuye la relación de vacíos.

Etapa II: Consolidación primaria.

La velocidad de compresión está determinada por la evacuación del agua presente en los poros del suelo. Generando la expulsión del agua como reacción a la fuerza exterior aplicada, la cual incrementa la presión del agua sobrepasando así la presión hidrostática, generando así el flujo del agua.

Cuando se aplica una carga al suelo y la estructura de granos no es capaz de soportarla, es cuando la presión neutra soporta dicha carga. Posteriormente dicha presión se reduce hasta llegar a cero, generando así que el flujo de agua escape por los poros, causando finalmente que la estructura quede soportada sobre los granos de suelo.

Etapa III: Consolidación secundaria

Una vez se disipa en su totalidad la presión hidrostática, la compresión continúa de manera muy lenta durante un tiempo indefinido. Esta compresión tiene lugar gracias a la reubicación plástica de los granos del suelo y la fisuración de los granos debido a los nuevos esfuerzos experimentados por el suelo.

Como se ve en la figura 5 la consolidación secundaria puede presentarse como una línea recta con pendiente negativa, debido al cambio en la relación de vacíos con respecto al tiempo que experimenta durante la compresión secundaria.¹⁷

6.6.1. Asentamiento total consolidación primaria¹⁸

La teoría de consolidación planteada tiene en cuenta un estrato arcilloso con espesor denotado por H, dicho estrato es sometido a un proceso de sobrecarga y el asentamiento producido por dicha sobrecarga se puede calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1+e} * H \quad (1)$$

$$\Delta H = \int_0^H \frac{\Delta e}{1+e_0} * dz \quad (2)$$

Dónde:

ΔH =Deformación total de estrato arcilloso (condiciones de drenaje variable)

Δe =Variación de relación de vacíos debido a sobrecarga inducida.

e = Relación de vacíos.

¹⁷ GEORGE B. SOWERS. (1972). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. Ed Limusa- Wiley México. Páginas 145 a 151.

¹⁸ Tomado de Badillo Juárez (2005), *MECÁNICA DE SUELOS, FUNDAMENTOS DE LA MECÁNICA DE SUELOS*, México, Limusa. Página 281

7. METODOLOGÍA

7.1. Selección del material

Durante este proyecto de grado, se trabajó con material de carácter arcilloso, por lo cual se realizó la búsqueda del suelo en la ciudad de Barrancabermeja, una ciudad rica en materiales arcillosos, y cercana al área metropolitana. Luego de una búsqueda en canteras, fincas y otros predios, se encontró un material adecuado en una mina, de la cual se extrajo el material arcilloso (ubicado en el km 5 vía el Boston), el respectivo material fue extraído bajo la autorización del dueño de la mina.

7.2. Ensayos de caracterización

Teniendo seleccionado el material arcilloso, se procede a realizar ensayos de caracterización como granulometría, límite líquido, límite plástico y humedad, para determinar así sus propiedades físicas y ver que sea el material adecuado para utilizar en este trabajo de grado.

7.2.1. Análisis granulométrico de suelos por tamizado (INV E-123)

Con el fin de corroborar que el material seleccionado corresponde a un suelo arcilloso se procedió a realizar tres pruebas de granulometría por mallas con lavado por el tamiz N°200. Ver anexo A.

7.2.2. Determinación límite líquido, límite plástico (INV E- 125 e INV E-126)

Una vez verificado que el material escogido es fino, es decir, más del 50% en peso pasó por la malla N°200, se procedió a realizar los ensayos de límite líquido y límite plástico con el fin de determinar su ubicación en la carta de plasticidad de Casagrande. Ver anexo B.

7.2.3. Ensayo modificado de compactación (INV E-142)

Con el fin de determinar la humedad óptima y el peso específico seco máximo, se realizaron ensayos de compactación tipo Proctor modificado. Dichos parámetros se utilizaron tanto para la preparación de las muestras de laboratorio, previo a su saturación, así como también para la compactación del estrato arcilloso drenado por las dos caras que se usó en el modelo a escala, también previo a su saturación. Ver anexo C.

7.2.4. Ensayo de consolidación (INV E-151)

Se realizaron seis ensayos de consolidación (tres con equipos análogos y tres con equipos digitales) con el fin de obtener las curvas de compresibilidad y a partir de ellas

estimar las relaciones de vacíos bajo ciertas cargas, con las cuales se calcularon los asentamientos.

7.3. Construcción y carga de modelo a escala

La construcción del modelo a escala se realizó con láminas de madera procedentes de estibas de carga, obtenidas en depósitos de fábricas, con dimensiones de 70cm x 70cm x 70cm, y reforzando cada cara interna con una lámina de triplex y cada cara con su respectivo desagüe con manguera. Se ensamblaron las cinco caras y las láminas de refuerzo con tornillos de pasa rápido para madera cada 5 cm vertical y horizontalmente, utilizando resina de poliéster como aglutinante para superficies en contacto. Adicionalmente se reforzaron con ángulos de acero galvanizado todas las aristas externas, de igual manera se ensambló con tornillos de madera y resina de poliéster. Finalmente se adicionó resina en las caras internas y externas, con el objetivo de impermeabilizar toda la superficie de la caja.

Una vez terminada construcción de la caja se colocaron dos capas de agregado grueso (3/4) de 10cm y una capa intermedia arcillosa separada por dos geotextiles de 50cm. Se realizó la compactación del estrato arcilloso con un pisón en capas de 10 cm y se tomaron 2 muestras a 25 cm y 50 cm para realizar un control de compactación.

El proceso de carga se realizó por medio de pesas prestadas del laboratorio de geotecnia y pavimentos, además se utilizó una lámina de acero de 8mm de espesor para garantizar una carga uniforme. El peso total usado fue de 211.25 Kg.

7.4. Cálculo de asentamientos

Con los resultados obtenidos en los seis ensayos de consolidación se calcularon los asentamientos esperados en el modelo a escala, para lo cual se tuvieron en cuenta las mismas condiciones de drenaje, espesor del estrato arcilloso y sobre carga utilizada.

7.5. Comparación de resultados

Finalmente se compararon los resultados de los asentamientos estimados a partir de los parámetros obtenidos en cada uno de los equipos de consolidación utilizados con los sucedidos en el modelo a escala, para finalmente establecer similitudes, diferencias, errores y tendencias.

8. PROCEDIMIENTO PARA LA EJECUCIÓN DE ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN EN EL EQUIPO DIGITAL PS-300 D DE PINZUAR

8.1. NORMAS GENERALES DEL LABORATORIO

- Antes de ingresar al laboratorio los usuarios deberán identificarse con el carnet vigente que los acredite como estudiantes o en caso de personas particulares deberán portarlo en un sitio visible.
- No se puede fumar, comer, o beber dentro del laboratorio.
- El laboratorio tendrá disponibilidad en el horario habitual de clases, mientras el profesor del curso o auxiliar de laboratorio se encuentren presente.
- Revisar el equipo al iniciar la práctica e informar al funcionario encargado, sobre cualquier irregularidad que se presente o cualquier elemento o insumo asignado para la práctica y consignado en el formato que se llena para el control de inventario de laboratorio de ingeniería civil.
- Realizar la debida limpieza de la zona de la práctica para así mantener orden del laboratorio durante la práctica y su culminación; además utilizar de manera adecuada los recipientes para la disposición de desechos y recolección de materiales sobrantes.
- Ingresar al laboratorio para utilizar los espacios únicamente para las actividades del laboratorio.
- Usar bata blanca y todos aquellos elementos de seguridad e higiene indicados por el coordinador del laboratorio y docente respectivo.
- Se debe ingresar al laboratorio con zapato cerrado y pantalón largo.
- Los elementos que no formen parte de la práctica, no será permitido su ingreso
- Las ventas de cualquier tipo quedan prohibidas dentro del laboratorio.
- Sin previa autorización del encargado del laboratorio, no está permitido retirar muestras, insumos y equipos pertenecientes a la universidad.
- Antes de utilizar algún equipo o herramienta, se recomienda pedir al encargado del laboratorio una previa explicación y autorización.
- Utilizar la máquina y/o herramienta correcta para cada tipo de trabajo. Nunca usar máquinas o herramientas para lo cual no han sido diseñadas.

- Los protectores de las herramientas mecánicas nunca deben quitarse. Nunca quite un protector cuando una herramienta está siendo usada.
- Los trabajos que requieren la aplicación de mucha fuerza se deben realizar con un bajo ritmo de trabajo.
- Al usar herramientas cortantes, la presión y movimientos del corte se recomienda hacer el movimiento hacia afuera y nunca hacia el cuerpo.
- En caso de visualizar movimientos o la aparición de chispas y arcos eléctricos, percibir olores extraños, un calentamiento anormal o sensación de descarga, y/o escuchar ruidos extraños en las máquinas, se deberá apagar de inmediato la máquina, desenergizarla y de manera inmediata informar al encargado del laboratorio.

8.2. PRECAUCIONES DE SEGURIDAD PARA LA UTILIZACIÓN DEL EQUIPO

- Evite utilizar este equipo de forma distinta a las especificadas en este manual del usuario. Uso incorrecto puede resultar en lesiones graves a personal o daño del software.
- No intente operar el equipo con dispositivos de seguridad puestos o activados.
- Solo hay una forma de conectarse a la correcta alimentación eléctrica. La tensión se indica en la entrada de alimentación eléctrica del aparato.
- Consulte la sección de instalación antes de instalar la máquina.
- Antes de operar la máquina asegúrese que tenga las manos limpias y secas.
- Se recomienda leer todo el manual antes de desempaquetar, instalar o poner en funcionamiento el equipo.
- Asegúrese de que todas las piezas móviles están completamente aseguradas antes de iniciar cualquier mantenimiento

8.3. INFORMACIÓN DEL EQUIPO DE CONSOLIDACIÓN

El sistema PS 300-D, se ha implementado para registro simultáneo de ensayos de consolidación. Puede ser ajustado hasta con series cámaras de consolidación, las cuales por medio de un multiplexor se comunican con el computador, desde el cual se hace el registro completo de los ensayos. El software permite buen registro de todos los parámetros del ensayo, descargar los datos directamente en una hoja de cálculo Excel, en la que se muestran las gráficas de consolidación en tiempo real,

realizar cálculos automáticos de tiempos de consolidación, hasta coeficientes de consolidación y el tiempo de pre – consolidación y finalmente almacenar los datos en una base de datos permanente, que permite su recuperación para revisión, consulta e impresión posterior.

El software ha sido desarrollado bajo el ambiente Windows, por lo tanto, puede ser instalado bajo un sistema operativo compatible.

ESPECIFICACIONES:

Capacidad máxima de carga vertical:
5 Kn (500 Kgf, 1100 lbf)

Sistema de aplicación de carga:
Pesas con brazo multiplicado

Cámara de consolidación:
Hasta 6 cámaras de consolidación de anillo flotante de 50.8 mm de diámetro

Medición de la deformación vertical
Comparador de carátula digital Rango 12,5 mm, resolución 0,001 mm.

Funciones de software:
Registro de parámetros de la muestra; Cliente, Obra, localización, sondeo, profundidad, tipo de material, descripción; dimensiones y datos para cálculo de densidad, humedad, grado de saturación, expansión y porcentaje de vacíos.

Hoja de cálculo para registro y control:
Hojas de cálculo Excel (Office 2010)

Multiplexor:
Multiplexor bidireccional de 6 canales

Interfaz de entrada

Computador incluido:
Computador tipo personal: CPU + monitor + teclado + Ratón.

Sistema operativo:
Windows: Compatible con Windows XP, Windows 7 y Windows 8 (*)

8.4. MANUAL DE USUARIO

Paso 1. Conexión de los equipos a fuentes de energía.

Se realizan las conexiones a fuentes en las tomas naranjas, asegurando un voltaje de 110 V a 120 V, como se muestra en la *figura 5*.



Figura 5. Conexiones

Paso 2. Preparación de la muestra para el ensayo de consolidación

Si las muestras que se van a utilizar en laboratorio son re moldeadas, estas deberán prepararse con la densidad que el suelo tenía en campo. En el caso del presente trabajo de grado a las muestras primero se les realizó un ensayo de compactación tipo Proctor modificado (según norma INVE 111-13) con el fin de determinar su peso específico seco máximo y su humedad óptima. Una vez determinados dichos parámetros se tomaron muestras de moldes compactadas con la humedad óptima para realizar el ensayo de consolidación (según la norma INVE 151). *Ver figuras 6 y 7.*



Figura 6. Ensayo de compactación



Figura 7. Muestra extraída del molde.

Paso 3. Armado de la cámara de consolidación

Primero se coloca la piedra porosa grande en el fondo de la cámara (*ver figura 8*)



Figura 8. Cámara de consolidación desarmada.

En seguida se introduce la muestra en la cámara, quedando encima de la piedra porosa. (*ver figura 9*)



Figura 9. Pastilla puesta en cámara.

Después se coloca la parte platina superior hueca y se aseguran las tuercas (*ver figura 10*).



Figura 10. Cámara de consolidación asegurada.

Para finalizar el armado de la cámara, se coloca la piedra porosa pequeña y sobre esta se ubica la tapa de bronce (*Ver figura 11*).



Figura 11. Cámara de consolidación armada

Finalmente se lleva la cámara al consolidómetro digital y se satura verificando que el deformímetro se encuentre apagado (*Ver figura 12*).



Figura 12. Cámara de consolidación con deformímetro digital.

Paso 4. Manejo del software

- **Paso 4.1** Ingreso a la interfaz del software PS- 300D

Una vez encendido el computador e iniciada la sesión de Windows aparecerá lo siguiente en el escritorio y se le da doble clic al icono mostrado en la *figura 13*.

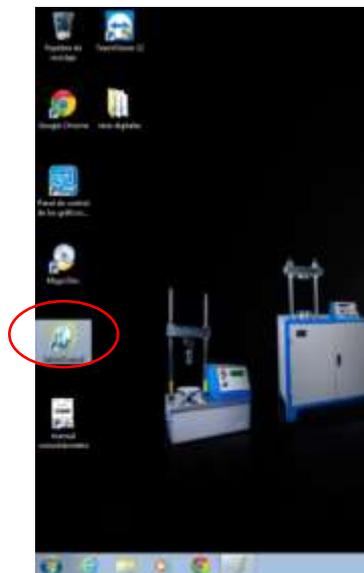


Figura 13. Ingreso a interfaz del software.

Una vez se da doble clic, aparecerá la ventana mostrada en la *figura 14*. En ella se pueden apreciar los posibles consolidómetros en los cuales se pueden realizar pruebas de forma simultánea. El módulo de adquisición de datos del laboratorio de geotecnia y pavimentos permitiría realizar hasta seis ensayos

simultáneamente, sin embargo, la UPB solo adquirió tres consolidómetros digitales.



Figura 14. Pantalla inicial del software.

- **Paso 4.2** Selección del consolidómetro a usar.

A continuación, se da clic en la pestaña “iniciar” del consolidómetro que se desea utilizar. Una vez se realiza esta acción aparece la ventana mostrada en la *figura 15*. Antes de seleccionar la opción “cargar datos” se debe verificar que la parte inferior de la ventana aparezca las palabras “servidor conectado” lo cual garantiza la transmisión de datos.



Figura 15. Selección de consolidómetro.

- **Paso 4.3** Cargar datos y enumerar el ensayo:

Después de dar clic en “Cargar datos” aparecerá la ventana mostrada en la *figura 16* donde se procede a designar el número de ensayo (número que se utilizará una vez finalice el ensayo para consultarlo) y a llenar todas las casillas que estén sombreadas en azul oscuro, vale la pena aclarar que se debe dar enter al introducir un valor en cada casilla para que sea válido. Los valores de las casillas sombreadas en azul claro son calculados por el software.



Figura 16. Carga de datos.

Nota: En las medidas de diámetro y altura se necesitan mínimo dos valores para promediar.

- **Paso 4.4** Finalización de carga de datos

Una vez introducidos los datos por completo, se debe seleccionar el usuario del equipo (por defecto el software trae como opción “Técnico Pinzuar”) y se da clic en “salir” para comenzar a ejecutar el ensayo.



Figura 17. Finalización de carga.

- **Paso 4.5** Inicio del primer cargue.

Al salir de “cargar los datos”, aparece una ventana como la mostrada en la *figura 18*. En esta ventana el usuario debe asegurarse que esté activa la opción “carga” (ya que se va dar inicio a los ciclos de carga) y se da clic en el botón “iniciar”. En el momento de confirmar el inicio, simultáneamente se debe soltar el seguro del consolidómetro.



Figura 18. Inicio de cargue.

- **Paso 4.6** Proceso para continuar con la siguiente carga

Ya iniciados los ensayos, se consolida la muestra, lo cual sucede cuando dos lecturas sean constantes dependiendo de la carga o hasta que aparezca “consolidación primaria alcanzada”. Una vez consolidada la muestra se da clic en “detener” y se coloca el seguro en el consolidómetro simultáneamente para poder continuar con la siguiente carga. Si aparece la opción “consolidación primaria

alcanzada”, esta desaparece después de un tiempo y el ciclo se detiene automáticamente.

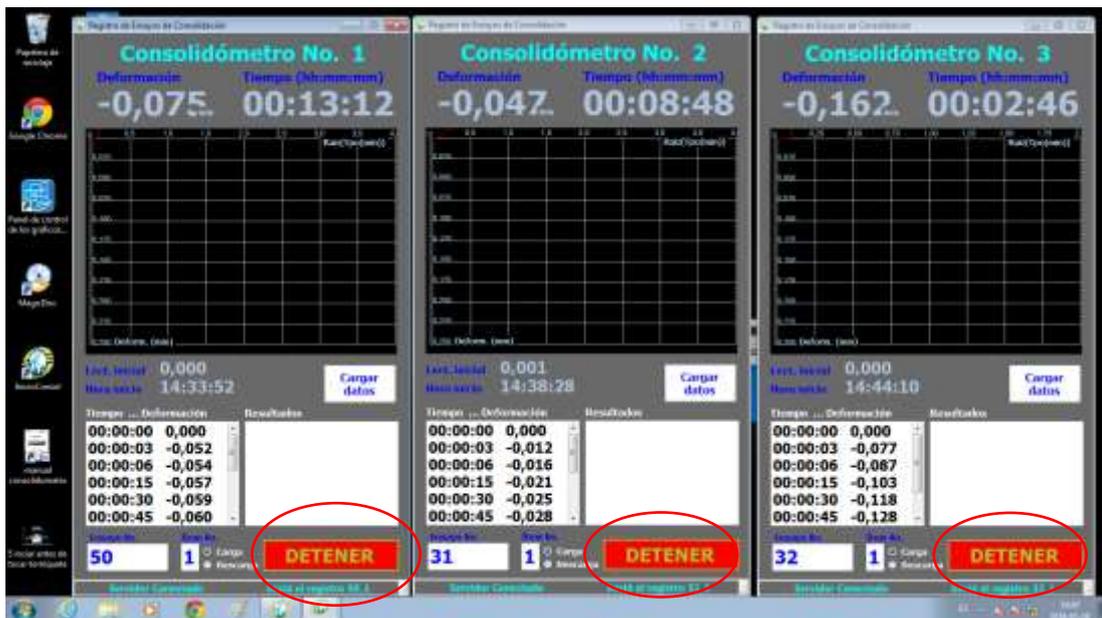


Figura 19. Carga siguiente.

Nota: En la parte superior izquierda aparecerá la deformación actual en el deformímetro y a la derecha el tiempo transcurrido del ensayo

- **Paso 4.7** Proceso para iniciar con las siguientes cargas y descargas.

Una vez detenido el ensayo se da clic nuevamente en “cargar datos”, se actualiza el valor de la nueva carga y se da clic en salir, como se presentó en el paso 4.4. Ver figura 20.



Figura 20. Cambio de datos para siguiente carga.

Una vez se da clic a la opción “salir”, se selecciona la opción “continuar” y esta se confirma quitando el seguro del consolidómetro de manera simultánea. De esta

manera se comienza el segundo ciclo de carga y se repite este proceso hasta alcanzar los ciclos de carga deseados.



Figura 21. Inicio siguientes cargas y descargas.

Nota: El equipo tiene la capacidad de realizar 8 ciclos de carga y 8 ciclos de descarga como máximo.

Ya teniendo todos los ciclos de carga, se procede a iniciar las descargas. Lo primero que se debe hacer es detener el ensayo después del último ciclo de carga y antes de proceder a “cargar datos” para actualizar el valor de la carga, se da clic en la parte inferior central donde dice “descarga”. Ver figura 22.

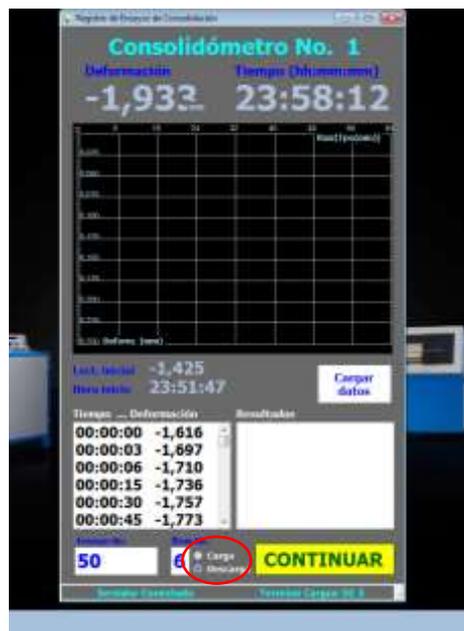


Figura 22. Selección de opción carga o descarga.

A continuación, se actualiza nuevamente el valor de la carga soportada por el brazo y se da clic en “salir” para iniciar el primer ciclo de descarga y esto se repite hasta completar los ciclos de descarga necesarios.



Figura 23. Actualización de datos.

- **Paso 4.8** Finalización del ensayo de consolidación.

Una vez finalizado el proceso de consolidación, se vuelve a abrir la aplicación como se mostró en el paso 4.1 y se selecciona “consultar ensayos” ingresando el número de ensayo según corresponda.



Figura 24. Consulta de datos.

- **Paso 4.9** Extracción de datos

Se pueden guardar los datos en el escritorio o en un dispositivo externo (USB) para poder extraerlos y modificarlos. Las figuras 25, 26, 27, 28, 29 y 30 muestran los datos capturados por el deformímetro digital en las etapas de cargue y descargue, análisis para el cálculo del t_{90} según Taylor, análisis según Casagrande para el cálculo del t_{50} y gráficas de cada cargue.

ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN - NORMAS / ASTM D4247 - ADMITIDAS																			
Cliente: _____ Proyecto: _____ Ubicación: _____ Coordenadas: _____ Sonda: _____ Material: _____ Descripción: _____												Profundidad: _____ Vuelco: SI Perforado: NO Corrido: NO		<div style="border: 2px solid green; padding: 10px; text-align: center; font-size: 2em; color: red; width: 40px; margin: 0 auto;">1</div> No. Seta: 023					
DIMENSIONES DE LA MUESTRA																			
DATOS RECALES												Masa: _____ No. Seta: 023							
DATOS FINALES																			
Dimensiones (mm) Diámetro (mm): 50.00 Altura (mm): 22.00 Anillo (mm): 3.007 Índice (mm): 44.998				Densidad P. seco (g) 102.296 Agua (g) 221.298 M. seco (g) 99.978 M. total (g) 191.195 agua (g) 2.222 agua (g) 2.468				Humedad P. Agua (g) 6.100 Agua (g) 52.428 Agua (g) 13.930 W (%) 11.70 P. Agua (g) 18.038 agua (g) 2.468				Distancia de varitas No. 22.000 Agua (g) 4.883 No. W 8.888 No. 19264.988				Densidad P. Agua (g) _____ Agua (g) _____ Agua (g) _____ W (%) _____ P. Agua (g) _____ agua (g) _____			
ETAPA DE CARGUE																			
Inicio (Fecha - hora)		2017-01-30	14:24:07	2017-01-22	8:22:49	2017-01-23	7:49:53	2017-01-24	8:08:00	2017-01-25	7:59:28	2017-02-01	12:23:58	2017-02-18	10:23				
Temperat. (C)	Hum. R. (DI)	25	63	25	63	25	63	25	63	25	63	21.0	63	22.2	63				
Presión (kPa)		6.1		49.0		90.0		194.7		389.3		773.6		1546.4					
(mm)	Rate (mm)	mm		mm		mm		mm		mm		mm		mm					
0.00	0	0.000		0.100		0.190		1.037		1.930		3.822		7.644					
0.00	0.22	-0.002		0.401		-0.881		-1.221		-1.601									

Figura 25. Datos capturados por deformímetro cargue.

ETAPA DE DESCARGUE																
Inicio (Fecha - hora)						2017-02-08	7:55:26	2017-02-08	8:15:42							
Temperat. (C)	Hum. R. (DI)					25.0	66.0	25.0	66.0							
Presión (kPa)						194.7		90.0								
(mm)	Rate (mm)					mm		mm								
0.00	0					1.000		0.909								
0.25	0.224					1.000		0.946								
0.50	0.316					1.000		0.946								
0.75	0.500					1.000		0.944								
1.00	0.707					1.000		0.943								
1.25	0.866					1.000		0.942								
1.50	1.000					1.000		0.938								
2.00	1.494					0.937		0.937								
3.00	1.732					0.937		0.937								
4.00	2.000					0.935		0.936								
5.00	2.449					0.934		0.934								
6.00	2.828					0.933		0.934								
7.00	3.162					0.933		0.933								
8.00	4.472					0.933		0.932								
9.00	5.000					0.933		0.932								
10.0	5.477					0.933		0.932								
11.0	5.916					0.933		0.932								
12.0	6.325					0.933		0.932								
13.0	7.071					0.933		0.931								
14.0	7.662					0.933		0.931								
15.0	8.444					0.933		0.931								

Figura 26. Datos capturados por deformímetro descargue.



Figura 27. Análisis según Taylor.



Figura 28. Análisis según Casagrande.

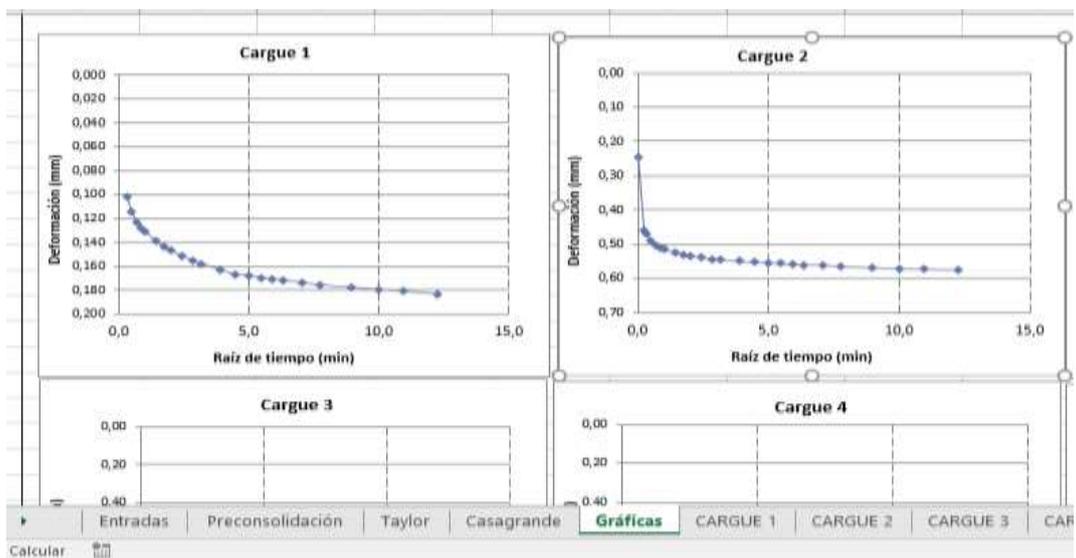


Figura 29. Gráficas de carga.

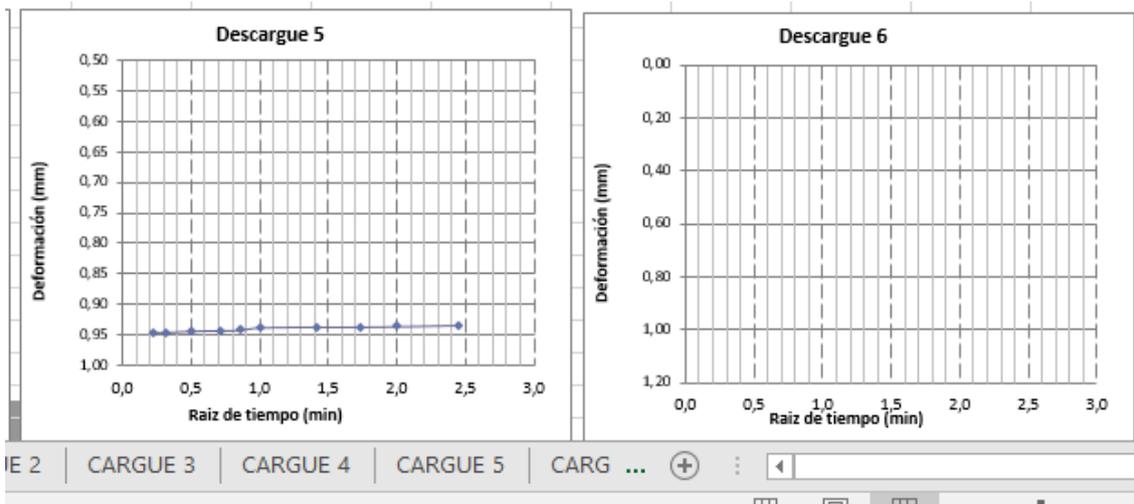


Figura 30. Gráficas de descargue.

- **Paso 5.** Extracción de espécimen de suelo de la recámara de consolidación.
Ya finalizado el ensayo y apagado los equipos, se desmonta la muestra y se determina su humedad final.



Figura 31. Extracción espécimen.

9. RESULTADOS

9.1. Ensayos de caracterización

De acuerdo a lo descrito en la metodología se presentaron los siguientes resultados.

9.1.1. Análisis granulométrico de suelos por tamizado (INV E-123)

Se realizaron 3 ensayos del material escogido para saber con certeza la cantidad que predomina, determinando el porcentaje de gravas, finos y arenas que presenta.

	% Gravas	% Arenas	% Finos
Prueba 1	8.49	29.29	62.12
Prueba 2	6.48	31.8	61.72
Prueba 3	6.97	29.14	63.89
Promedio	7.31	30.08	62.58

Tabla 3. Análisis granulométrico.

Se encontró un material que posee un contenido del 62.58% de finos, 30.08% de arenas y 7.31% de gravas, siendo este una arcilla o limo por retener más del 50% del material en el tamiz número 200, sin embargo, teniendo los límites de Atterberg se podrá clasificar el suelo.

La gráfica obtenida de los 3 ensayos granulométricos se mostrará a continuación:

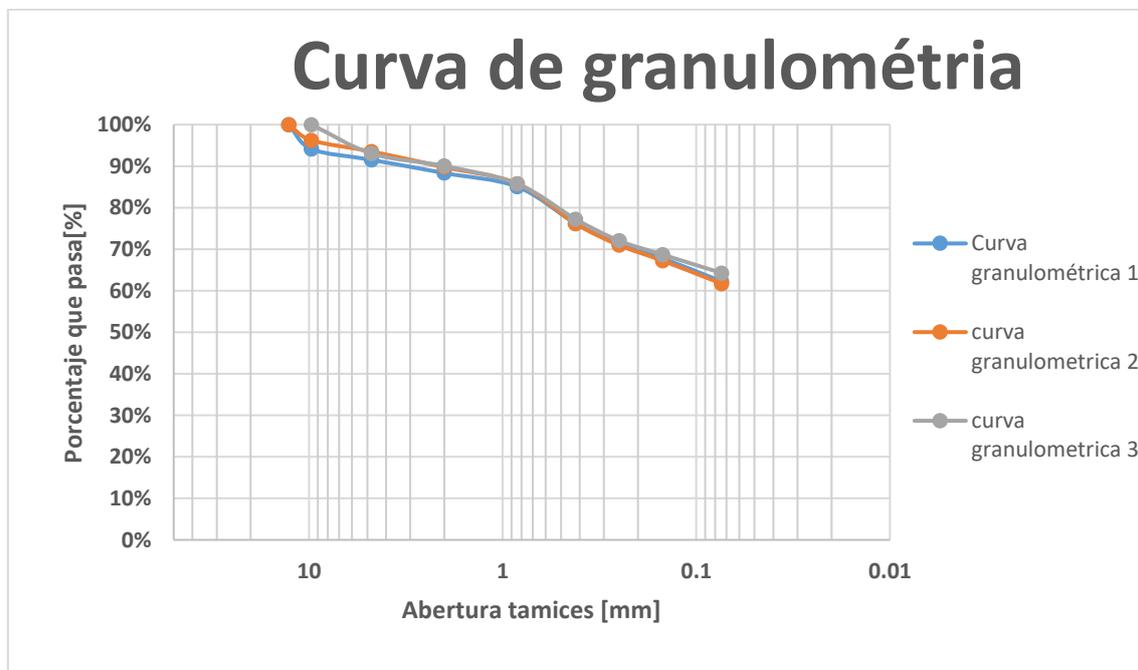


Figura 32. Gráfica ensayos granulométricos.

9.1.2. Determinación límite líquido, límite plástico (INV E- 125 - INV E-126)

Se realizaron 3 ensayos para la determinación del límite líquido y 3 para el límite plástico, y de esta manera clasificar correctamente el suelo de acuerdo a S.U.C.S.

Prueba	L. líquido (%)	L. Plástico (%)	I. Plasticidad (%)
1	35.52	20.62	14.90
2	35.84	21.32	14.52
3	35.83	20.80	15.03
Promedio	35.73	20.91	14.82

Tabla 4. Determinación límite líquido y plástico

9.1.3. Clasificación del suelo por SUCS

Debido a que el material estudiado en el presente trabajo corresponde a un suelo fino, su clasificación según SUCS viene dado únicamente por la entrada a la carta de plasticidad de Casagrande. Con los valores promedio del límite líquido y el índice de plasticidad se ingresa a la carta de plasticidad y de esta manera el material queda ubicado en la zona por encima de la línea A con un índice de plasticidad superior al 7% y un límite líquido inferior al 50% que corresponde a las arcillas de baja plasticidad (CL)

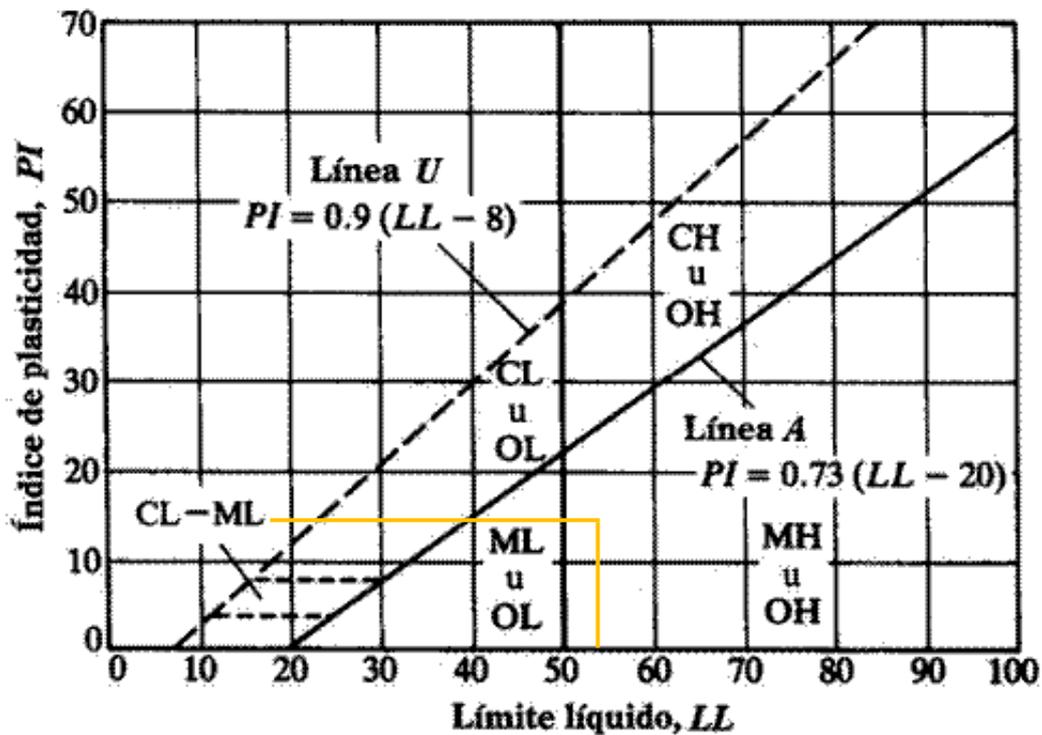


Figura 33. Carta de plasticidad SUCS.

9.1.4. Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO

Clasificación general	Materiales Granulares (35% o menos para el tamiz #299)							Materiales Limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Clasificación de grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado % que pasa											
Nº10 (2.00mm)	50 máx	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Nº40 (425 µm)	30 máx	50 máx	51 máx	--	--	--	--	--	--	--	--
Nº200 (75 µm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 min	36 min	36 min
Límite líquido				40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min
Índice de plasticidad	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 min	11 min	10 máx	10 máx	11 min	11 min
Tipos de materiales característicos	Cantos, gravas y arena		Arena fina	Gravas y arenas limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación	Excelente a bueno							Regular a malo			
IG	0		0				0	0	A-7-5 A-7-6	IG < LL-30 IG > LL-30	

Tabla 5. Clasificación de suelos AASHTO.

Propiedad	Porcentaje presente
Material fino	62.58 %
Límite líquido	35.73 %
Límite plástico	20.91 %
Índice plástico	14.82 %
IG	7.22

Tabla 6. Datos para clasificación AASHTO.

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

$$IG = (62.58 - 35)(0.2 + 0.005(35.73 - 40)) + 0.01(62.58 - 15)(14.82 - 10)$$

$$IG = 7.22$$

Se promedió de los ensayos de granulometría lo que pasa por el tamiz #200 dando un valor de 62.58% de finos, clasificándolo como un material limo arcilloso, luego con el límite líquido de 35.73% se obtiene que es un material A-6, el índice de plasticidad de 14.82% también lo clasifica en A-6 y finalmente tenemos un Suelo arcilloso tipo A-6.

A-6 SUELO ARCILLOSO

9.1.5. Ensayo modificado de compactación (INV E-142)

Se realizaron 3 ensayos con el fin de determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo trabajado.

Ensayo	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
1	1.89	13.5
2	1.85	12.6
3	1.89	12
Promedio	1.88	12.70

Tabla 7. Ensayo modificado de compactación.

Para el material objeto de estudio en el presente trabajo de grado se obtuvo una humedad óptima promedio de 12.7% y un peso específico seco de 1.88 gr/cm³, tal como se aprecia en la tabla 7.

9.1.6. Ensayos consolidación unidimensional de suelos (INV E-151)

Se realizaron 6 ensayos de consolidación para determinar los asentamientos a diferentes cargas, del suelo trabajado.

Uno de los parámetros importantes que se puede obtener en los ensayos de consolidación es el coeficiente de consolidación C_v . Normalmente este parámetro se obtiene a partir del t_{50} hallado en las curvas de consolidación por medio del método de Casagrande, sin embargo, esto está condicionado a la semejanza entre las curvas de consolidación de cada ciclo de carga y la teórica.

En el presente trabajo todas las curvas de consolidación obtenidas no tienen ninguna semejanza con la teórica, de tal forma que los coeficientes de consolidación se estimaron mediante el método de Taylor, a partir del t_{90} hallado en las curvas de consolidación Deformación VS Raíz del tiempo (escala aritmética).

9.1.6.1. Carga consolidación análogos 1

Los ensayos de consolidación se realizaron para las cargas de 0.02 kg/cm², 0.05 kg/cm², 0.5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm² y 4 kg/cm².

La curva de consolidación obtenida para cada ciclo de carga no tiene una forma similar a la teórica de tal forma que se pudiera determinar el t_{50} , por lo que se hizo necesario dibujar la curva de deformación contra raíz de tiempo para determinar el valor de t_{90} por el método de Taylor y así poder calcular el coeficiente de consolidación (C_v). Para obtener el t_{90} se prolonga el tramo recto de consolidación hasta que este corte el eje x, el valor de la abscisa que corte el eje x se multiplica por 1.15 y desde este punto se traza una recta hasta el origen de la curva; la abscisa del punto donde esta última recta corte a la curva de consolidación corresponde a la raíz del t_{90} .

Los valores de los coeficientes de consolidación obtenidos para los ciclos de carga que se usaron en el ensayo realizado con el consolidómetro análogo 1 se muestran en la tabla 8.

σ (kg/cm ²)	T ₉₀ (min)	t ₉₀ (min)	H (cm)	$C_v = \frac{T_{90} \cdot H^2}{t_{90}}$ (cm ² /min)
0.02	0.848	0.6	0.990	2.307
0.05	0.848	0.5	0.989	3.317
0.5	0.848	0.5	0.988	3.312
1	0.848	0.35	0.984	6.707
2	0.848	0.6	0.978	2.255
4	0.848	0.5	0.969	3.188

Tabla 8. Datos para cálculo de C_v .

Una vez finaliza en ensayo de consolidación se procede a dibujar la curva de compresibilidad, en la cual las ordenadas corresponden a la relación de vacíos al final de cada ciclo y las abscisas corresponden al logaritmo de la presión normal utilizada en cada ciclo. A partir de esta grafica se obtienen las relaciones de vacíos iniciales y finales requeridas para estimar el asentamiento de un estrato arcilloso sometido a una sobrecarga estática de 0.05 Kg/cm² para después comparar dichos asentamientos con los realmente sucedidos en un modelo a escala

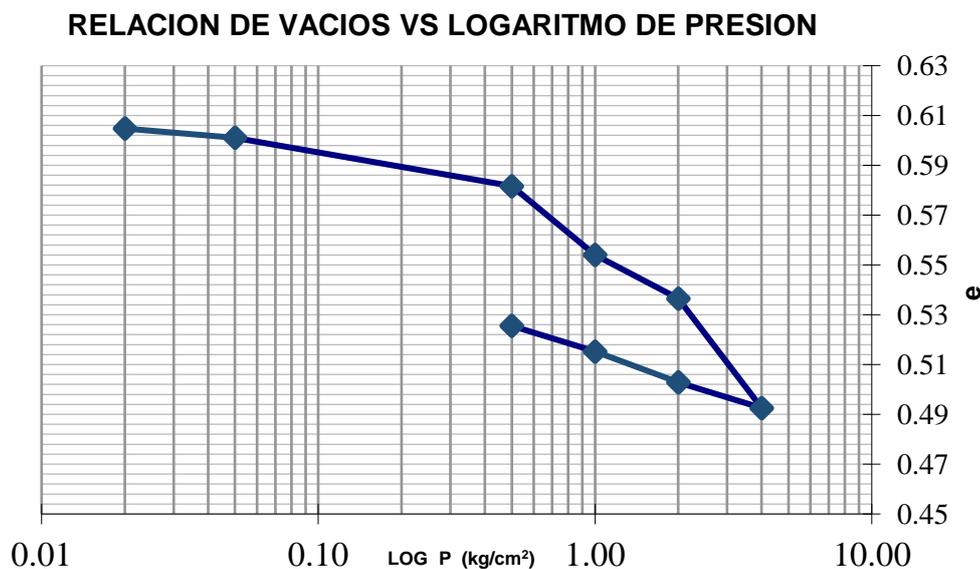


Figura 34. Relación de vacíos vs presión.

9.1.6.2. Consolidación análogos 2

Los valores de los coeficientes de consolidación obtenidos para los ciclos de carga que se usaron en el ensayo realizado con el consolidómetro análogo 2 se muestran en la tabla 9.

σ (kg/cm ²)	T ₉₀ (min)	t ₉₀ (min)	H (cm)	$Cv = \frac{T_{90} \cdot H^2}{t_{90}}$ (cm ² /min)
0.02	0.848	1	0.990	0.830
0.05	0.848	0.5	0.989	3.318
0.5	0.848	0.5	0.989	3.317
1	0.848	2	0.988	0.207
2	0.848	0.6	0.986	2.290
4	0.848	0.5	0.981	3.268

Tabla 9. Datos para cálculo de Cv.

Una vez finaliza en ensayo de consolidación se procede a dibujar la curva de compresibilidad, en la cual las ordenadas corresponden a la relación de vacíos al final de cada ciclo y las abscisas corresponden al logaritmo de la presión normal utilizada en cada ciclo. A partir de esta grafica se obtienen las relaciones de vacíos iniciales y finales requeridas para estimar el asentamiento de un estrato arcilloso sometido a una sobrecarga estática de 0.05 Kg/cm² para después comparar dichos asentamientos con los realmente sucedidos en un modelo a escala:

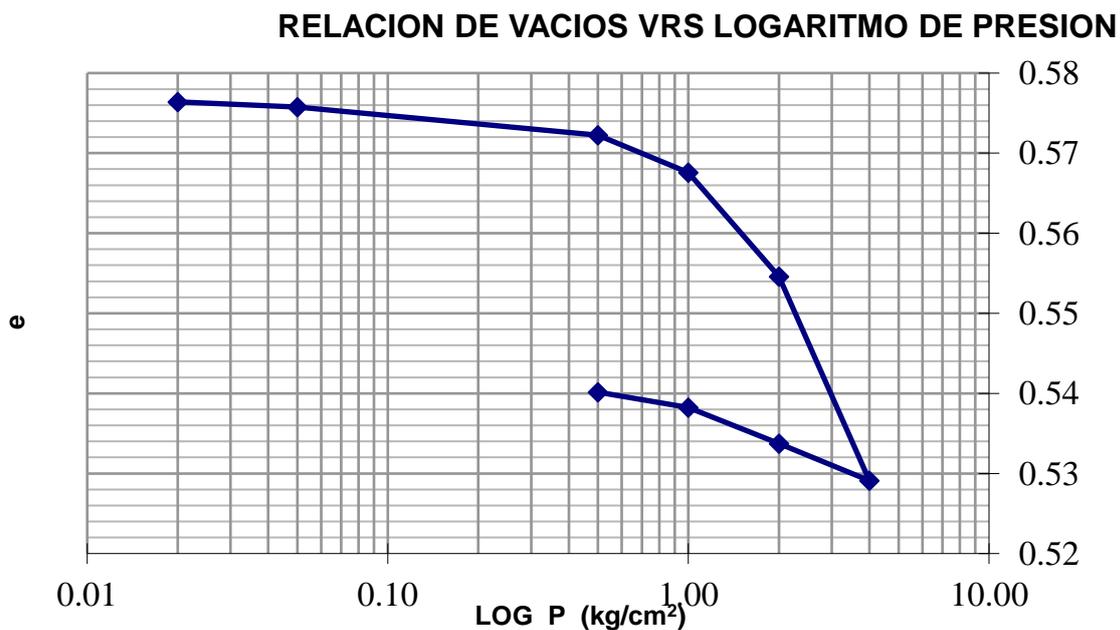


Figura 35. Relación de vacíos vs presión.

9.1.6.3. Consolidación análogos 3

Los valores de los coeficientes de consolidación obtenidos para los ciclos de carga que se usaron en el ensayo realizado con el consolidómetro análogo 2 se muestran en la tabla 10.

σ (kg/cm ²)	T ₉₀ (min)	t ₉₀ (min)	H (cm)	$Cv = \frac{T_{90} * H^2}{t_{90}}$ (cm ² /min)
0.02	0.848	1.1	0.99	0.686
0.05	0.848	0.8	0.989	1.296
0.5	0.848	0.5	0.987	3.307
1	0.848	1.5	0.983	0.364
2	0.848	1.1	0.978	0.670
4	0.848	0.7	0.969	1.626

Tabla 10. Datos para cálculo de Cv.

Una vez finaliza en ensayo de consolidación se procede a dibujar la curva de compresibilidad, en la cual las ordenadas corresponden a la relación de vacíos al final de cada ciclo y las abscisas corresponden al logaritmo de la presión normal utilizada en cada ciclo. A partir de esta grafica se obtienen las relaciones de vacíos iniciales y finales requeridas para estimar el asentamiento de un estrato arcilloso sometido a una sobrecarga estática de 0.05 Kg/cm² para después comparar dichos asentamientos con los realmente sucedidos en un modelo a escala:

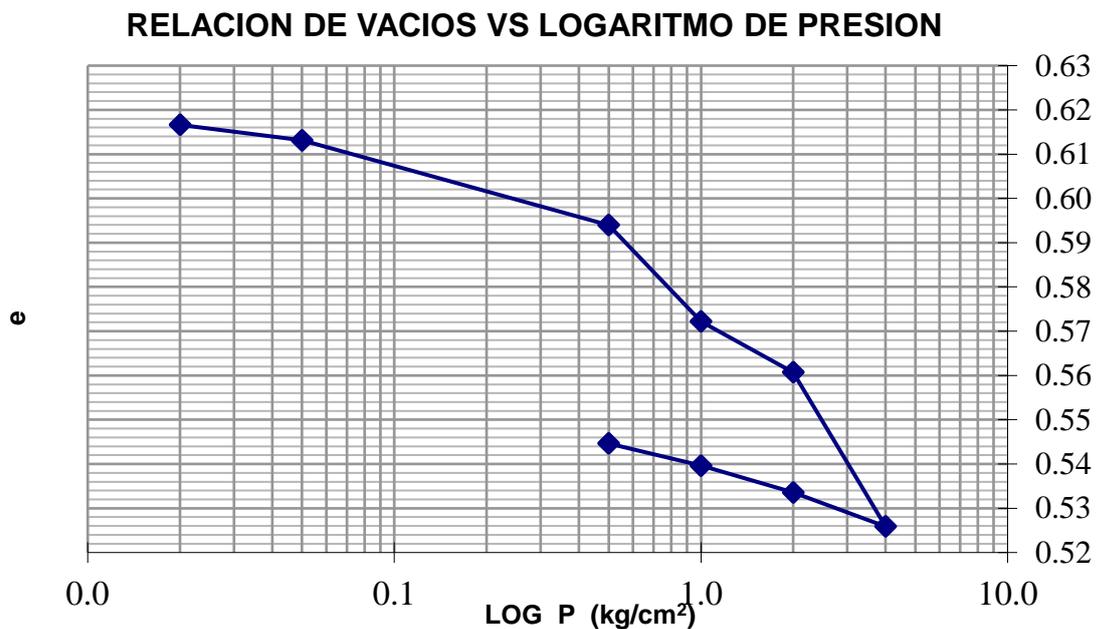


Figura 36. Relación de vacíos vs presión.

9.1.6.4. Consolidación digital 1

Se realizó la toma de datos en los equipos con deformímetros digitales con el software, debido a que el programa en algunas ocasiones presentaba problemas en medio del ensayo se tomaron igualmente de forma manual.

La curva de consolidación obtenida para cada ciclo de carga no tiene una forma similar a la teórica de tal forma que se pudiera determinar el t₅₀, por lo que se hizo

necesario dibujar la curva de deformación contra raíz de tiempo para determinar el valor de t_{90} por el método de Taylor y así poder calcular el coeficiente de consolidación (C_v).

Los valores de los coeficientes de consolidación obtenidos para los ciclos de carga que se usaron en el ensayo realizado con el consolidómetro digital 1 se muestran en la tabla 11.

σ (kg/cm ²)	T ₉₀	t ₉₀	H	$C_v = \frac{T_{90} \cdot H^2}{t_{90}}$ (cm ² /min)
0.02	0.848	3.95	0.990	0.068
0.05	0.848	0.8	0.989	1.296
0.5	0.848	0.6	0.987	2.293
1	0.848	0.45	0.982	4.036
2	0.848	0.5	0.974	3.220
4	0.848	0.5	0.964	3.152

Tabla 11. Datos para cálculo de C_v .

Una vez finaliza en ensayo de consolidación se procede a dibujar la curva de compresibilidad, en la cual las ordenadas corresponden a la relación de vacíos al final de cada ciclo y las abscisas corresponden al logaritmo de la presión normal utilizada en cada ciclo. A partir de esta grafica se obtienen las relaciones de vacíos iniciales y finales requeridas para estimar el asentamiento de un estrato arcilloso sometido a una sobrecarga estática de 0.05 Kg/cm² para después comparar dichos asentamientos con los realmente sucedidos en un modelo a escala:

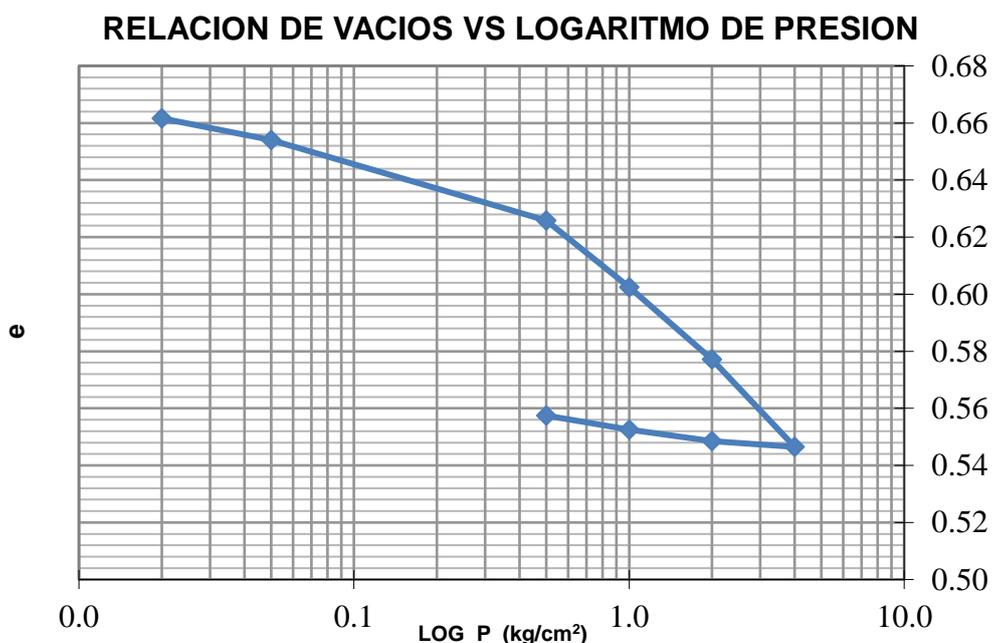


Figura 37. Relación de vacíos vs presión.

9.1.6.5. Consolidación digital 2

Los datos obtenidos con el digital 2 se realizaron de igual manera por el método de Taylor, por lo que se presenta únicamente la tabla 12 con los datos para el cálculo del Cv y la figura 38, correspondiente a la gráfica de relación de vacíos vs presión.

σ (kg/cm ²)	T90	t90	H	$Cv = \frac{T_{90} * H^2}{t_{90}}$ (cm ² /min)
0.02	0.848	1.6	0.99	0.324
0.05	0.848	1.7	0.989	0.287
0.5	0.848	0.5	0.988	3.308
1	0.848	0.4	0.985	5.143
2	0.848	0.6	0.981	2.267
4	0.848	0.6	0.974	2.235

Tabla 12. Datos para cálculo de Cv.

Una vez finaliza en ensayo de consolidación se procede a dibujar la curva de compresibilidad, en la cual las ordenadas corresponden a la relación de vacíos al final de cada ciclo y las abscisas corresponden al logaritmo de la presión normal utilizada en cada ciclo. A partir de esta grafica se obtienen las relaciones de vacíos iniciales y finales requeridas para estimar el asentamiento de un estrato arcilloso sometido a una sobrecarga estática de 0.05 Kg/cm² para después comparar dichos asentamientos con los realmente sucedidos en un modelo a escala:

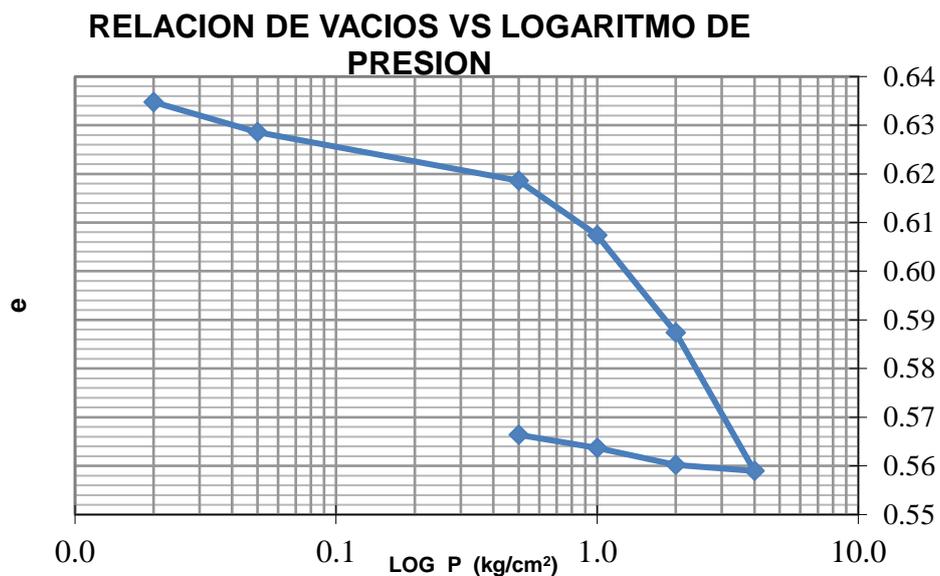


Figura 38. Relación de vacíos vs presión.

9.1.6.6. Consolidación digital 3

Los datos obtenidos con el digital 3 se realizaron de igual manera por el método de Taylor, por lo que se presenta únicamente la tabla 13 con los datos para el cálculo del Cv y la figura 39, correspondiente a la gráfica de relación de vacíos vs presión.

σ (kg/cm ²)	T90	t90	H	$Cv = \frac{T90 \cdot H^2}{t90}$ (cm ² /min)
0.02	0.848	2	0.989	0.207
0.05	0.848	3	0.989	0.092
0.5	0.848	0.6	0.986	2.290
1	0.848	0.5	0.981	3.267
2	0.848	0.5	0.974	3.22
4	0.848	0.5	0.964	3.153

Tabla 13. Datos para cálculo de Cv.

Una vez finaliza en ensayo de consolidación se procede a dibujar la curva de compresibilidad, en la cual las ordenadas corresponden a la relación de vacíos al final de cada ciclo y las abscisas corresponden al logaritmo de la presión normal utilizada en cada ciclo. A partir de esta grafica se obtienen las relaciones de vacíos iniciales y finales requeridas para estimar el asentamiento de un estrato arcilloso sometido a una sobrecarga estática de 0.05 Kg/cm² para después comparar dichos asentamientos con los realmente sucedidos en un modelo a escala:

RELACION DE VACIOS VS LOGARITMO DE PRESION

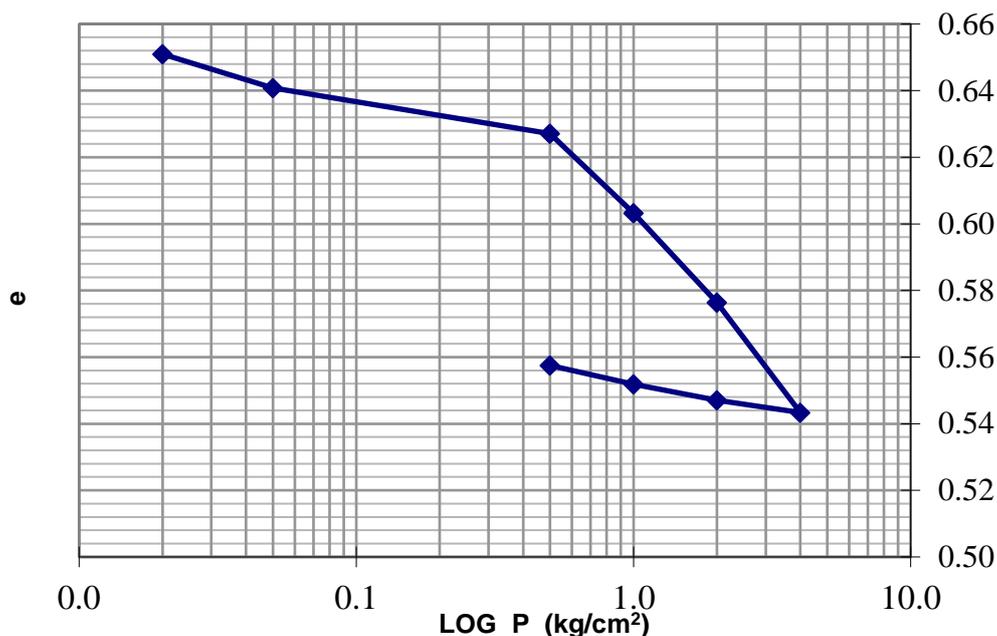


Figura 39. Relación de vacíos vs presión.

9.1.6.7. Resultados de asentamientos del modelo a escala

Con el fin de comparar los asentamientos estimados para un estrato arcilloso de 45 cm de espesor y drenado por las dos caras a partir de los resultados de los ensayos de consolidación, se construyó un modelo con esta arcilla, con dicho espesor y condiciones de drenaje mencionadas.

El modelo se instaló en el laboratorio de construcciones, y su proceso de fabricación e instalación puede verse en el anexo J.

9.1.6.8. Masa utilizada en el modelo a escala

En el momento de tomar la decisión acerca del esfuerzo que se debería utilizar tanto en los consolidómetros como en el modelo se tuvo en cuenta que dicho esfuerzo no debería ser muy grande ya que de ser así el peso a utilizar en el modelo sería muy alto, comprometiendo la estabilidad del modelo y la seguridad de los estudiantes a cargo; este esfuerzo tampoco debería ser muy bajo ya que su efecto sería imperceptible en los consolidómetros. Por esta razón se decidió utilizar un esfuerzo normal de 0.05 Kg/cm².

El área del modelo a escala utilizada fue de 4225 cm², para producir un esfuerzo normal de 0.05 Kg/cm² fue necesario colocar un peso total de 211.36 Kg. En la tabla 14 muestra la distribución de los pesos en el modelo a escala con las respectivas pesas.

Pesas	Peso (gramos)
1	15.63
2	16.26
3	16.26
4	16.26
5	12
6	10
7	10
8	10
9	10
10	10
11	10
12	10
13	10
14	10
15	9.06
16	9.07
17	3.97
18	22.85
TOTAL	211.36

AREA (cm ²)	4225
σ (kg/cm ²)	0.05

Tabla 14. Masa modelo a escala.

9.1.6.9. Mediciones modelo a escala

La tabla 15 presenta el registro de las deformaciones ocurridas en el modelo a escala durante tres meses de someter la arcilla a la presión de 0.05 Kg/cm²

Tiempo (min)	Lectura deformímetros 10 ⁻⁴ pulg				Lectura deformímetros mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4
0.1	20	4	36	45	0.051	0.010	0.091	0.114
0.25	28	10	36	45	0.071	0.025	0.091	0.114
0.5	28	10	36	45	0.071	0.025	0.091	0.114
1	28	18	45	54	0.071	0.046	0.114	0.137
2	34	18	53	54	0.086	0.046	0.135	0.137
4	36	24	51	61	0.091	0.061	0.130	0.155
8	42	25	58	62	0.107	0.064	0.147	0.157
15	51	35	66	74	0.130	0.089	0.168	0.188
30	57	96	66	81	0.145	0.244	0.168	0.206
60	58	92	85	86	0.147	0.234	0.216	0.218
120	72	91	93	93	0.183	0.231	0.236	0.236
240	81	107	122	118	0.206	0.272	0.310	0.300
460	92	113	130.5	122	0.234	0.287	0.331	0.310
1400	120	122	161	173	0.305	0.310	0.409	0.439
2880	146	131.5	185	210	0.371	0.334	0.470	0.533
11520	172	215	203	264	0.437	0.546	0.516	0.671
23040	196	242	223	286	0.498	0.615	0.566	0.726
46080	232	266	231	301	0.589	0.676	0.587	0.765
51840	267	282	246	336	0.678	0.716	0.625	0.853
83520	286	301	278	345	0.726	0.765	0.706	0.876
129600	286	301	278	345	0.726	0.765	0.706	0.876
	Deformación total (mm)=				0.726	0.765	0.706	0.876

Tabla 15. Mediciones modelo a escala.

10. ANALISIS DE RESULTADOS

10.1. Asentamientos del modelo a escala.

El modelo a escala se ubicó en un espacio del laboratorio de construcciones, debajo de una carpa donde no recibía mucho sol ni lluvia. Dicho modelo se construyó de la siguiente manera, primero se compactó una capa de triturado de 10 cm de espesor sobre la cual se colocó un manto de geotextil no tejido, por encima de este manto se compactó una capa de 45 cm de arcilla de baja plasticidad. Sobre la capa de arcilla se colocó otro manto de geotextil no tejido y por encima de este, se compactó una capa de triturado de 15 cm.

A la altura de la capa inferior de triturado se construyó un orificio en cada cara vertical del modelo con el fin de drenar el agua. El estrato de arcilla se compactó en capas de 7 cm con un pisón de madera.

Finalmente, sobre el estrato superior de triturado se colocó una placa de acero de 8 mm de espesor para colocar sobre ella el peso requerido para producir un esfuerzo de 0.05 Kg/cm^2 de manera uniforme. El peso total utilizado fue de 211.36 Kg ya que el área sobre el cual se colocó era de 4225 cm^2 .

Una vez colocada la carga se tomaron deformaciones durante un periodo de 3 meses. La variación de las deformaciones en el tiempo para cada uno de los 4 deformímetros utilizados se puede apreciar en la *figura 40*.

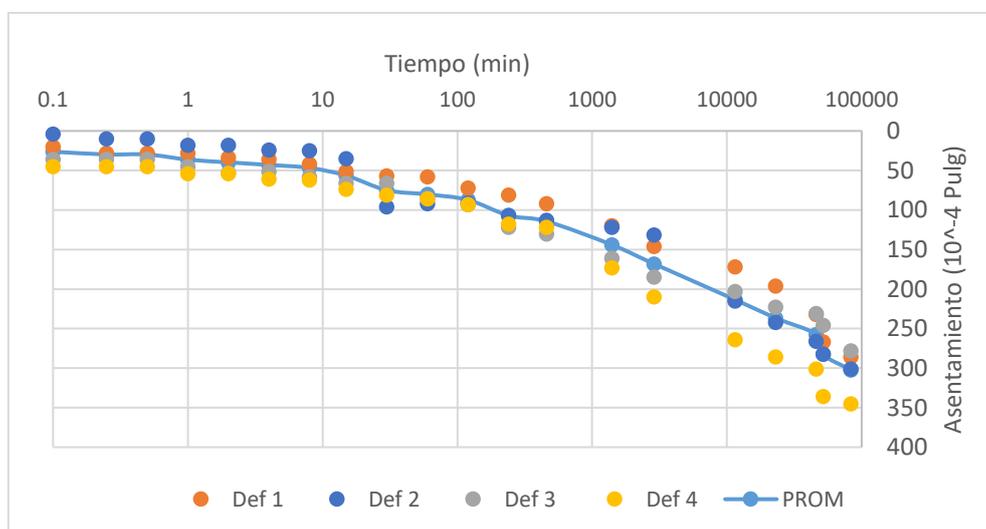


Figura 40. Datos modelo a escala.

10.2. Asentamientos estimados a partir de la ecuación de la teoría de consolidación

El asentamiento total primario de un estrato de arcilla, debido al proceso de consolidación unidimensional se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1+e_0} * Ht \quad (1)$$

Donde:

Δe : Diferencia de relación de vacíos

Ht : Espesor estrato arcilloso

e_0 : Relación de vacíos inicial

Las relaciones de vacíos se obtienen en la curva de compresibilidad de la siguiente manera: con las presiones inicial y final como abscisas se entra a la curva de compresibilidad y las ordenadas correspondientes serán las relaciones de vacíos inicial y final.

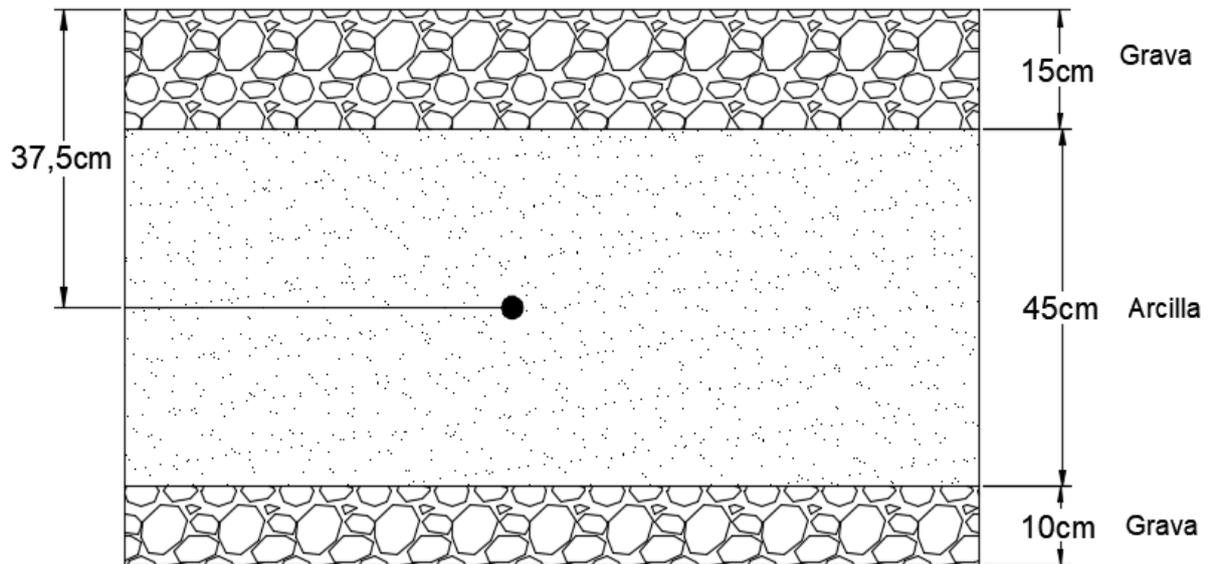


Figura 41. Estratos de suelo del modelo a escala.

La presión vertical efectiva inicial (P_0) en la mitad del estrato arcilloso se calculó con la siguiente ecuación:

$$P_o' = (\gamma_{triturado}) * (ESPESOR_{TRITURADO}) + (\gamma_{Arcilla}) * \left(\frac{[[ESPESOR]_{Arcilla}}{2} \right)$$

La presión vertical efectiva final (P_f) en la mitad del estrato arcilloso se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$P_f = P_o' + \Delta P$$

Donde ΔP corresponde al incremento en la presión vertical efectiva producido por la sobrecarga en la mitad del estrato arcilloso.

Para hallar ΔP primero se estima el siguiente valor:

$$\tan^{-1} \frac{2xyz(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}}{z^2(x^2 + y^2 + z^2) - x^2y^2}$$

Si el valor del arco tangente es positivo entonces ΔP se puede obtener por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \frac{w}{4\pi} \left(\frac{2xyz(x^2+y^2+z^2)}{z^2(x^2+y^2+z^2)+x^2y^2} * \frac{(x^2+y^2+2z^2)}{(x^2+y^2+z^2)} * \tan^{-1} \frac{2xy(x^2+y^2+z^2)^{1/2}}{z^2(x^2+y^2+z^2)-x^2y^2} \right)$$

Si el valor del arco tangente es negativo entonces ΔP se puede obtener por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \frac{w}{4\pi} \left(\frac{2xyz(x^2+y^2+z^2)}{z^2(x^2+y^2+z^2)+x^2y^2} * \frac{(x^2+y^2+2z^2)}{(x^2+y^2+z^2)} * \tan^{-1} \frac{2xy(x^2+y^2+z^2)^{1/2}}{z^2(x^2+y^2+z^2)-x^2y^2} + \pi \right)$$

10.2.1. Asentamiento análogo 1

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.2, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro análogo 1.

ANALOGO 1			
Triturado(cm)=	15	Arcilla(cm)=	22.5
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)=$	1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)=$	1.05
$\omega(\text{Kg/cm}^2)=$	0.05	$\gamma(\text{m})=$	70
$x(\text{m})=$	70	$z(\text{m})=$	37.5
$P_0(\text{Kg/cm}^2)=$	0.048	$e_0=$	0.601
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)=$	0.011	$e_r=$	0.599
$P_f(\text{Kg/cm}^2)=$	0.059	$\Delta e=$	0.002
ASENTAMIENTO			
CALCULADO		MODELO	
$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.562	$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.768
Error=	26.84	%	

Tabla 16. Asentamiento de análogo 1.

Comparando el asentamiento estimado con los parámetros de consolidación obtenidos con el consolidómetro análogo 1, con el asentamiento promedio de los cuatro deformímetros utilizados en el modelo a escala se obtuvo un porcentaje de error del 26.84%.

Como se mencionó anteriormente tanto las relaciones de vacíos inicial como la final se obtuvieron de la curva de compresibilidad de cada ensayo de consolidación. La siguiente figura muestra la estimación de dichas relaciones de vacíos para la muestra de arcilla ensayada en el consolidómetro análogo 1.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

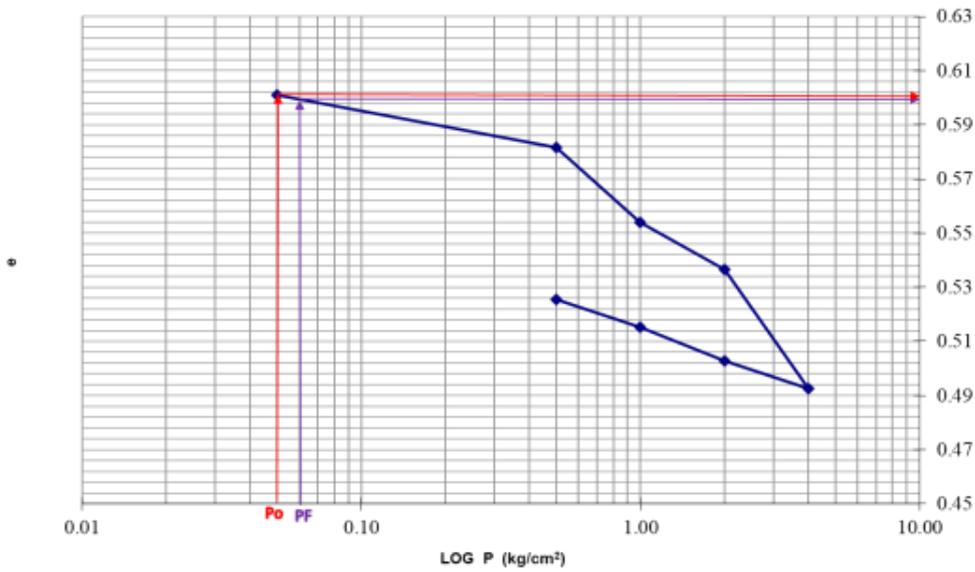


Figura 42. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.

10.2.2. Asentamiento ensayo análogo 2

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.2, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro análogo 2.

ANALOGO 2			
$T_{\text{triturado}}(\text{cm})=$	15	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$	22.5
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.065
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.05	$y(\text{m})=$	70
$x(\text{m})=$	70	$z(\text{m})=$	37.5
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.048	$e_0=$	0.576
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.011	$e_f=$	0.574
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.059	$\Delta e=$	0.002
ASENTAMIENTO			
CALCULADO		MODELO	
$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.571	$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.768
Error=	25.68		%

Tabla 17. Asentamiento de análogo 2.

Comparando el asentamiento estimado con los parámetros de consolidación obtenidos con el consolidómetro análogo 2, con el asentamiento promedio de los cuatro deformímetros utilizados en el modelo a escala se obtuvo un porcentaje de error del 25.68%.

Como se mencionó anteriormente tanto las relaciones de vacíos inicial como la final se obtuvieron de la curva de compresibilidad de cada ensayo de consolidación. La siguiente figura muestra la estimación de dichas relaciones de vacíos para la muestra de arcilla ensayada en el consolidómetro análogo 2.

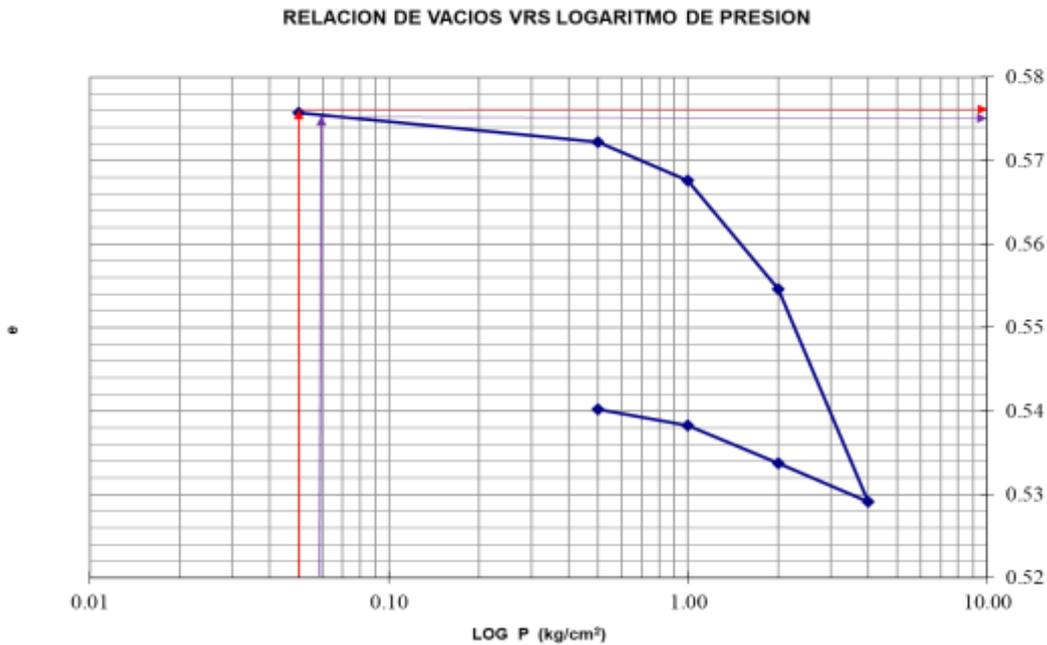


Figura 43. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.

10.2.3. Asentamiento ensayo análogo 3

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.2, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro análogo 3.

ANALOGO 3			
$T_{riturado}(cm)=$	15	$A_{arcilla}(cm)=$	22.5
$\gamma'_{riturado}(g/cm^3)=$	1.6	$\gamma'_{arcilla}(g/cm^3)=$	1.035
$\omega(Kg/cm^2)=$	0.05	$\gamma(m)=$	70
$x(m)=$	70	$z(m)=$	37.5
$P_0(Kg/cm^2)=$	0.047	$e_0=$	0.613
$\Delta P(Kg/cm^2)=$	0.011	$e_f=$	0.611
$P_f(Kg/cm^2)=$	0.059	$\Delta e=$	0.002
ASENTAMIENTO			
CALCULADO		MODELO	
$\Delta H_T(mm)=$	0.558	$\Delta H_T(mm)=$	0.768
Error=	27.38	%	

Tabla 18. Asentamiento de análogo 3.

Comparando el asentamiento estimado con los parámetros de consolidación obtenidos con el consolidómetro análogo 3, con el asentamiento promedio de los cuatro deformímetros utilizados en el modelo a escala se obtuvo un porcentaje de error del 27.38%.

Como se mencionó anteriormente tanto las relaciones de vacíos inicial como la final se obtuvieron de la curva de compresibilidad de cada ensayo de consolidación. La siguiente figura muestra la estimación de dichas relaciones de vacíos para la muestra de arcilla ensayada en el consolidómetro análogo 3.

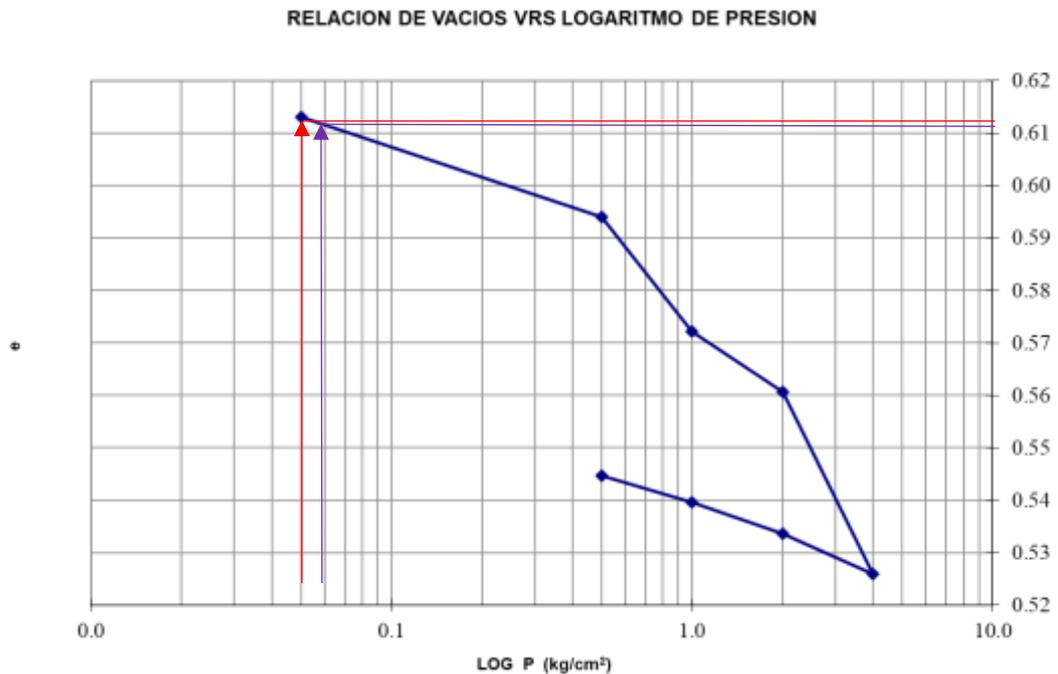


Figura 44. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.

10.2.4. Asentamiento ensayo digital 1

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.2, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro digital 1.

DIGITAL 1			
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})=$	15	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$	22.5
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.005
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.05	$\gamma(\text{m})=$	70
$x(\text{m})=$	70	$z(\text{m})=$	37.5
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.047	$e_0=$	0.654
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.011	$e_f=$	0.651
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.058	$\Delta e=$	0.003

ASENTAMIENTO			
CALCULADO		MODELO	
$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.816	$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.768
Error=	6.23		%

Tabla 19. Asentamiento de digital 1.

Comparando el asentamiento estimado con los parámetros de consolidación obtenidos con el consolidómetro digital 1, con el asentamiento promedio de los cuatro deformímetros utilizados en el modelo a escala se obtuvo un porcentaje de error del 6.23%.

Como se mencionó anteriormente tanto las relaciones de vacíos inicial como la final se obtuvieron de la curva de compresibilidad de cada ensayo de consolidación. La siguiente figura muestra la estimación de dichas relaciones de vacíos para la muestra de arcilla ensayada en el consolidómetro digital 1.

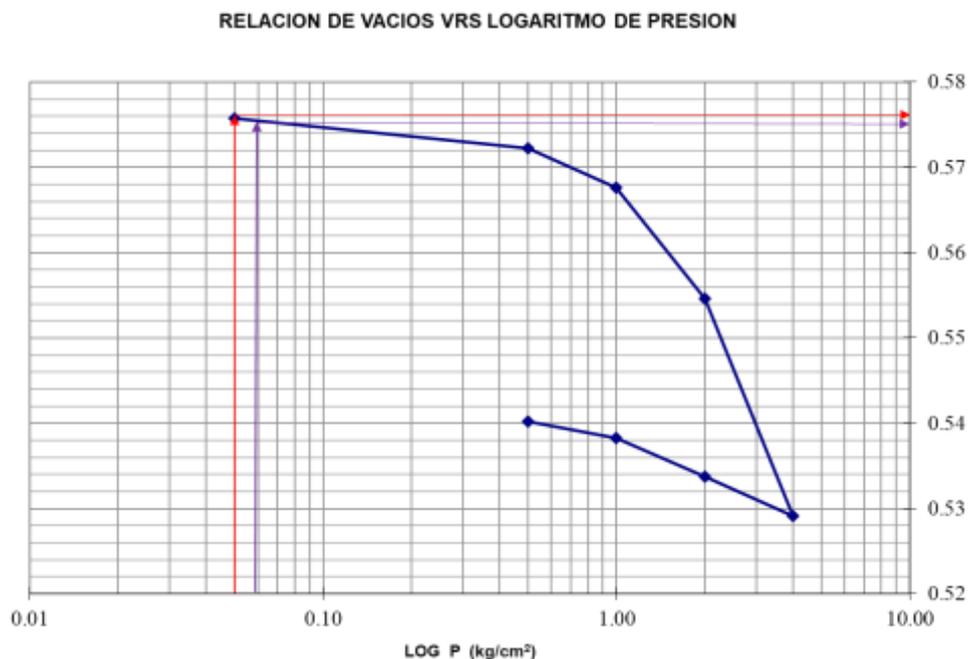


Figura 45. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.

10.2.5. Asentamiento ensayo digital 2

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.2, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro digital 2.

DIGITAL 2			
Triturado(cm)= 15		Arcilla(cm)= 22.5	
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)= 1.6$		$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)= 1.02$	
$\omega(\text{Kg/cm}^2)= 0.05$		$\gamma(\text{m})= 70$	
$x(\text{m})= 70$		$z(\text{m})= 37.5$	
$P_0(\text{Kg/cm}^2)= 0.047$		$e_0= 0.630$	
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)= 0.011$		$e_f= 0.6272$	
$P_f(\text{Kg/cm}^2)= 0.058$		$\Delta e= 0.0023$	
ASENTAMIENTO			
CALCULADO		MODELO	
$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.635	$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.768
Error=		17.33	%

Tabla 20. Asentamiento de digital 2.

Comparando el asentamiento estimado con los parámetros de consolidación obtenidos con el consolidómetro digital 2, con el asentamiento promedio de los cuatro deformímetros utilizados en el modelo a escala se obtuvo un porcentaje de error del 17.33%.

Como se mencionó anteriormente tanto las relaciones de vacíos inicial como la final se obtuvieron de la curva de compresibilidad de cada ensayo de consolidación. La siguiente figura muestra la estimación de dichas relaciones de vacíos para la muestra de arcilla ensayada en el consolidómetro digital 2.

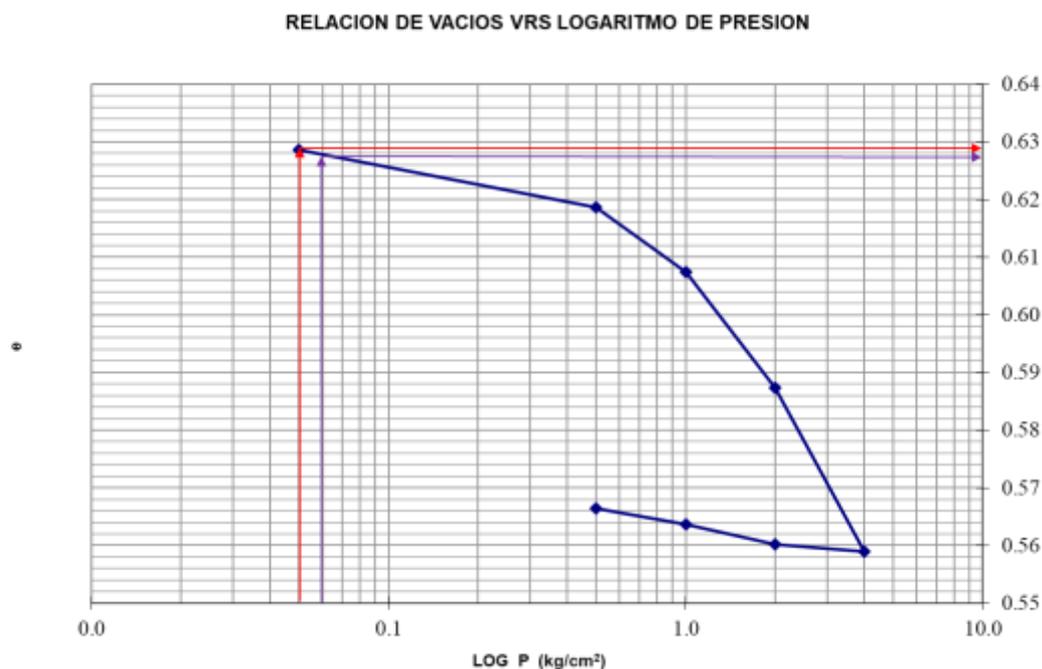


Figura 46. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.

10.2.6. Asentamiento ensayo digital 3

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.2, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro digital 3.

DIGITAL 3			
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})=$	15	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$	22.5
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.005
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.05	$\gamma(\text{m})=$	70
$x(\text{m})=$	70	$z(\text{m})=$	37.5
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.047	$e_0=$	0.6415
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.011	$e_f=$	0.639
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.058	$\Delta e=$	0.0025
ASENTAMIENTO			
CALCULADO		MODELO	
$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.685	$\Delta H_T(\text{mm})=$	0.768
Error=	10.80		%

Tabla 21. Asentamiento de digital 3.

Comparando el asentamiento estimado con los parámetros de consolidación obtenidos con el consolidómetro digital 3, con el asentamiento promedio de los cuatro deformímetros utilizados en el modelo a escala se obtuvo un porcentaje de error del 10.80%.

Como se mencionó anteriormente tanto las relaciones de vacíos inicial como la final se obtuvieron de la curva de compresibilidad de cada ensayo de consolidación. La siguiente figura muestra la estimación de dichas relaciones de vacíos para la muestra de arcilla ensayada en el consolidómetro digital 3.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

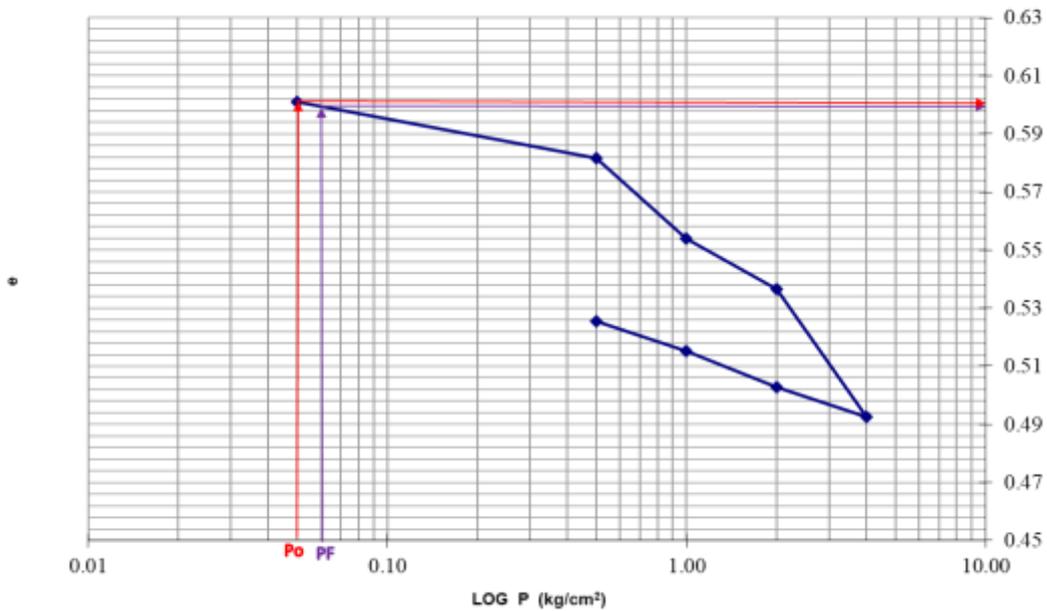


Figura 47. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento.

10.3. Asentamientos estimados a partir de la integral de la teoría de consolidación

Otra forma de estimar asentamientos por consolidación primaria es utilizar la siguiente ecuación:

$$\Delta H = \int_0^H \frac{\Delta e}{1 + e_0} * dz$$

Dónde:

ΔH =Deformación total de estrato arcilloso

Δe =Variación de relación de vacíos debido a sobrecarga inducida.

e_0 = Relación de vacíos inicial.

H= Espesor total del estrato arcilloso

Las relaciones de vacíos se obtienen en la curva de compresibilidad de la siguiente manera: con las presiones inicial y final como abscisas se entra a la curva de compresibilidad y las ordenadas correspondientes serán las relaciones de vacíos inicial y final.

La presión vertical efectiva inicial (Po) se calcula a diferentes profundidades en el estrato arcilloso (cada 5 cm) por medio de la siguiente ecuación:

$$P_o' = (\gamma'_{triturado}) * (ESPESOR_{TRITURADO}) + (\gamma'_{Arcilla}) * (h)$$

Donde h es la distancia medida desde la parte superior del estrato arcilloso.

La presión vertical efectiva final (Pf) en la mitad del estrato arcilloso se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$Pf = P_o' + \Delta P$$

Donde ΔP corresponde al incremento en la presión vertical efectiva producido por la sobrecarga en la mitad del estrato arcilloso

Para hallar ΔP primero se estima el siguiente valor:

$$\tan^{-1} \frac{2xyz(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}}{z^2(x^2 + y^2 + z^2) - x^2y^2}$$

Si el valor del arco tangente es positivo entonces ΔP se puede obtener por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \frac{w}{4\pi} \left(\frac{2xyz(x^2+y^2+z^2)}{z^2(x^2+y^2+z^2)+x^2y^2} * \frac{(x^2+y^2+2z^2)}{(x^2+y^2+z^2)} * \tan^{-1} \frac{2xy(x^2+y^2+z^2)^{1/2}}{z^2(x^2+y^2+z^2)-x^2y^2} \right)$$

Si el valor del arco tangente es negativo entonces ΔP se puede obtener por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \frac{w}{4\pi} \left(\frac{2xyz(x^2+y^2+z^2)}{z^2(x^2+y^2+z^2)+x^2y^2} * \frac{(x^2+y^2+2z^2)}{(x^2+y^2+z^2)} * \tan^{-1} \frac{2xy(x^2+y^2+z^2)^{1/2}}{z^2(x^2+y^2+z^2)-x^2y^2} + \pi \right)$$

10.3.1. Asentamiento ensayo análogo 1

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.3, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro análogo 1.

ANALOGO 1 PROFUNDIDAD 15CM			
T _{riturado} (cm)=	15	A _{rcilla} (cm)=	0
$\gamma'_{triturado}$ (g/cm ³)=	1.6	$\gamma'_{arcilla}$ (g/cm ³)=	1.05
ω (Kg/cm ²)=	0.05	γ (m)=	70
x(m)=	70	z(m)=	15
P ₀ (Kg/cm ²)=	0.024	e ₀ =	0.605
ΔP (Kg/cm ²)=	0.012	e _f =	0.601
Pf(Kg/cm ²)=	0.036	$\Delta e/1+\Delta e_0$ =	0.00249

Tabla 22. Profundidad análogo 1 a 15 cm.

ANALOGO 1 PROFUNDIDAD 20CM			
$T_{riturado}(cm)=$	15	$A_{arcilla}(cm)=$	5
$\gamma'_{triturado}(g/cm^3)=$	1.6	$\gamma'_{arcilla}(g/cm^3)=$	1.05
$\omega(Kg/cm^2)=$	0.05	$y(m)=$	70
$x(m)=$	70	$z(m)=$	20
$P_0(Kg/cm^2)=$	0.029	$e_0=$	0.6035
$\Delta P(Kg/cm^2)=$	0.012	$e_f=$	0.6011
$P_f(Kg/cm^2)=$	0.042	$\Delta e/1+\Delta e_0=$	0.0015

Tabla 23. Profundidad análogo 1 a 20 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 1 PROFUNDIDAD 30CM			
$T_{riturado}(cm)=$	15	$A_{arcilla}(cm)=$	15
$\gamma'_{triturado}(g/cm^3)=$	1.6	$\gamma'_{arcilla}(g/cm^3)=$	1.05
$\omega(Kg/cm^2)=$	0.05	$y(m)=$	70
$x(m)=$	70	$z(m)=$	30
$P_0(Kg/cm^2)=$	0.040	$e_0=$	0.60211
$\Delta P(Kg/cm^2)=$	0.012	$e_f=$	0.60101
$P_f(Kg/cm^2)=$	0.052	$\Delta e/1+\Delta e_0=$	0.00069

Tabla 24. Profundidad análogo 1 a 30 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 1 PROFUNDIDAD 40CM			
$T_{riturado}(cm)=$	15	$A_{arcilla}(cm)=$	25
$\gamma'_{triturado}(g/cm^3)=$	1.6	$\gamma'_{arcilla}(g/cm^3)=$	1.05
$\omega(Kg/cm^2)=$	0.05	$y(m)=$	70
$x(m)=$	70	$z(m)=$	40
$P_0(Kg/cm^2)=$	0.050	$e_0=$	0.6005
$\Delta P(Kg/cm^2)=$	0.011	$e_f=$	0.59945
$P_f(Kg/cm^2)=$	0.062	$\Delta e/1+\Delta e_0=$	0.00066

Tabla 25. Profundidad análogo 1 a 40 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 1 PROFUNDIDAD 50CM	
T _{riturado} (cm)= 15	A _{arcilla} (cm)= 35
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)= 1.05$
$\omega(\text{Kg/cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
x(m)= 70	z(m)= 50
P ₀ (Kg/cm ²)= 0.061	e ₀ = 0.59889
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)= 0.011$	e _f = 0.59805
P _f (Kg/cm ²)= 0.071	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00053$

Tabla 26. Profundidad análogo 1 a 50 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 1 PROFUNDIDAD 60CM	
T _{riturado} (cm)= 15	A _{arcilla} (cm)= 45
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)= 1.05$
$\omega(\text{Kg/cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
x(m)= 70	z(m)= 60
P ₀ (Kg/cm ²)= 0.071	e ₀ = 0.5978
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)= 0.010$	e _f = 0.5974
P _f (Kg/cm ²)= 0.081	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00025$

Tabla 27. Profundidad análogo 1 a 60 cm.

Una vez realizados los cálculos anteriores se procede a ordenarlos de una manera sencilla con el fin de estimar el área bajo la curva de $\frac{\Delta e}{1+e_0}$

VS profundidad, el cual corresponde al asentamiento total primario. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Consolidómetro Análogo 1							
profundidad Z [cm]	Espesor de arcilla	P ₀ [Kg/cm ²]	ΔP [Kg/cm ²]	P _f [Kg/cm ²]	e ₀	e _f	$\frac{\Delta e}{1+e_0}$
15	0	0.024	0.0124	0.036	0.6050	0.6010	0.0025
20	5	0.029	0.0123	0.042	0.6035	0.6011	0.0015
25	10	0.035	0.0121	0.047	0.6026	0.6013	0.0008
30	15	0.040	0.0119	0.052	0.6021	0.6010	0.0007
35	20	0.045	0.0116	0.057	0.6013	0.6002	0.0007
40	25	0.050	0.0113	0.062	0.6005	0.5995	0.0007
45	30	0.056	0.0109	0.066	0.6000	0.5990	0.0006
50	35	0.061	0.0105	0.071	0.5989	0.5981	0.0005
55	40	0.066	0.0101	0.076	0.5981	0.5975	0.0004

60	45	0.071	0.0096	0.081	0.5978	0.5974	0.0003
----	----	-------	--------	-------	--------	--------	--------

Tabla 28. Datos de profundidades análogo 1.

Los valores de las relaciones de vacíos inicial y final presentados en la tabla anterior se obtuvieron de la curva de consolidación correspondiente al ensayo realizado en el consolidómetro análogo 1, esto se puede apreciar en las siguientes graficas:

En cada grafica se estimaron las relaciones de vacíos inicial y final correspondiente a dos profundidades con el fin de no saturar una sola gráfica.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

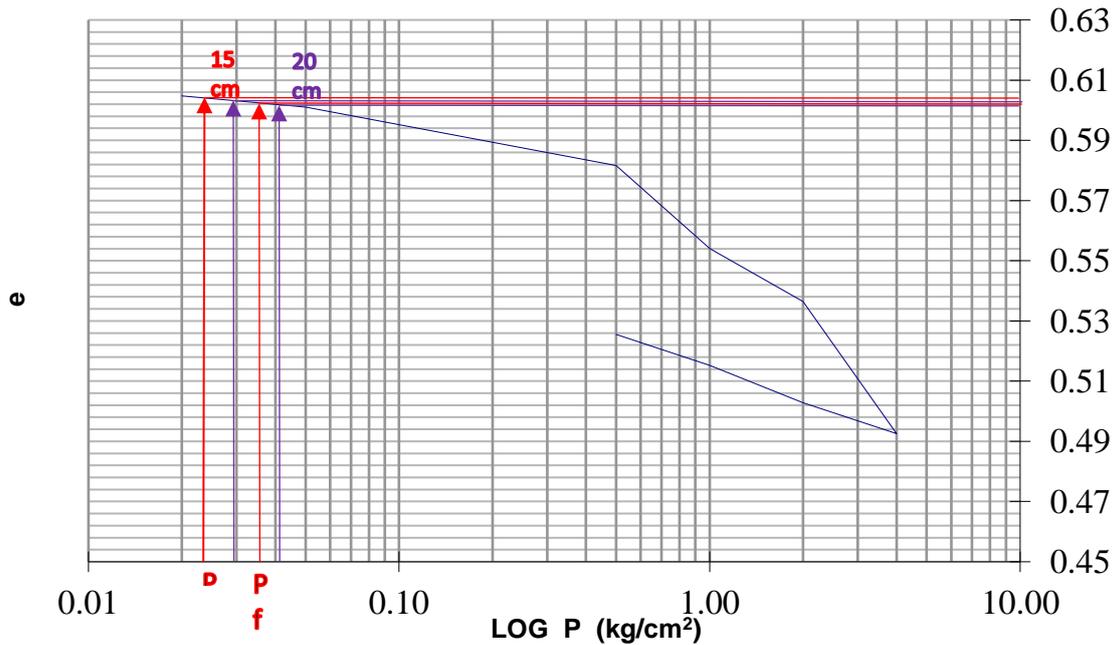


Figura 48. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

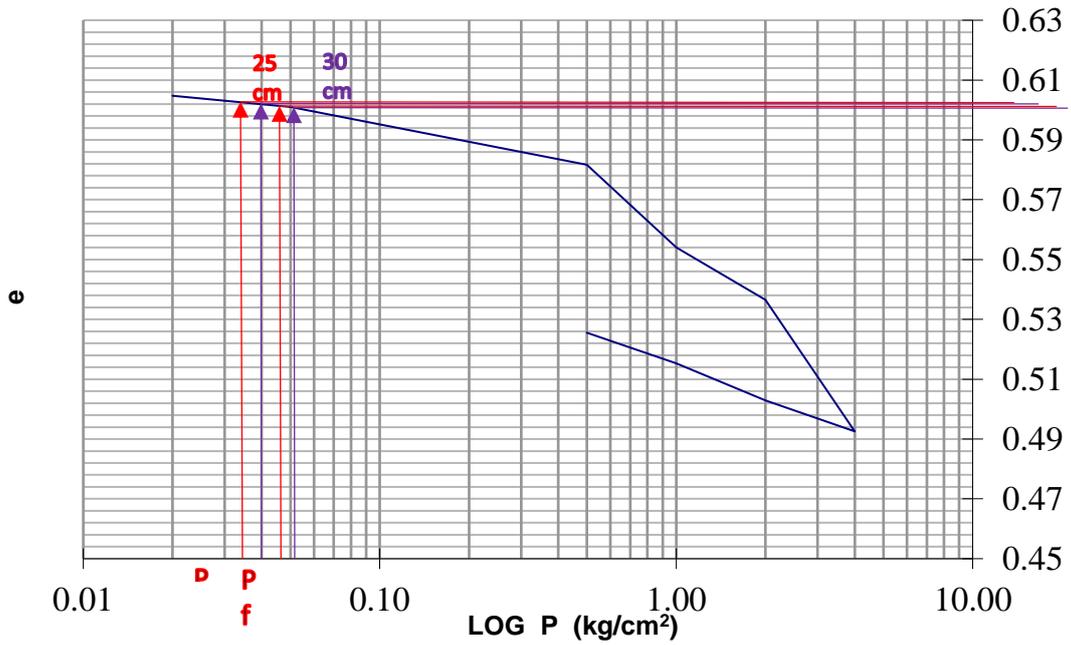


Figura 49. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

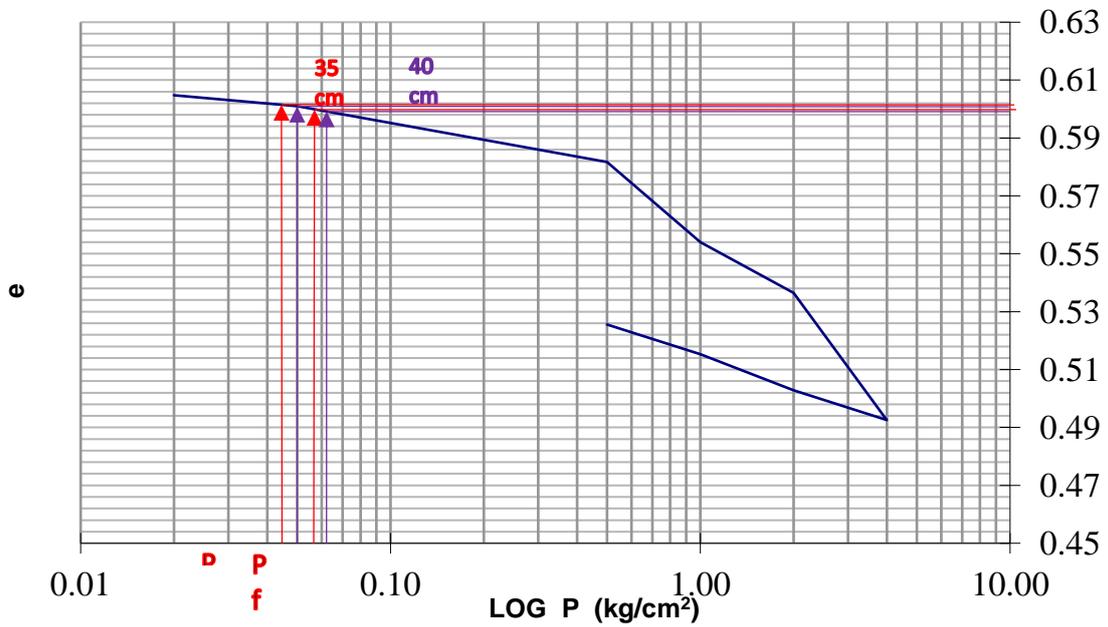


Figura 50. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

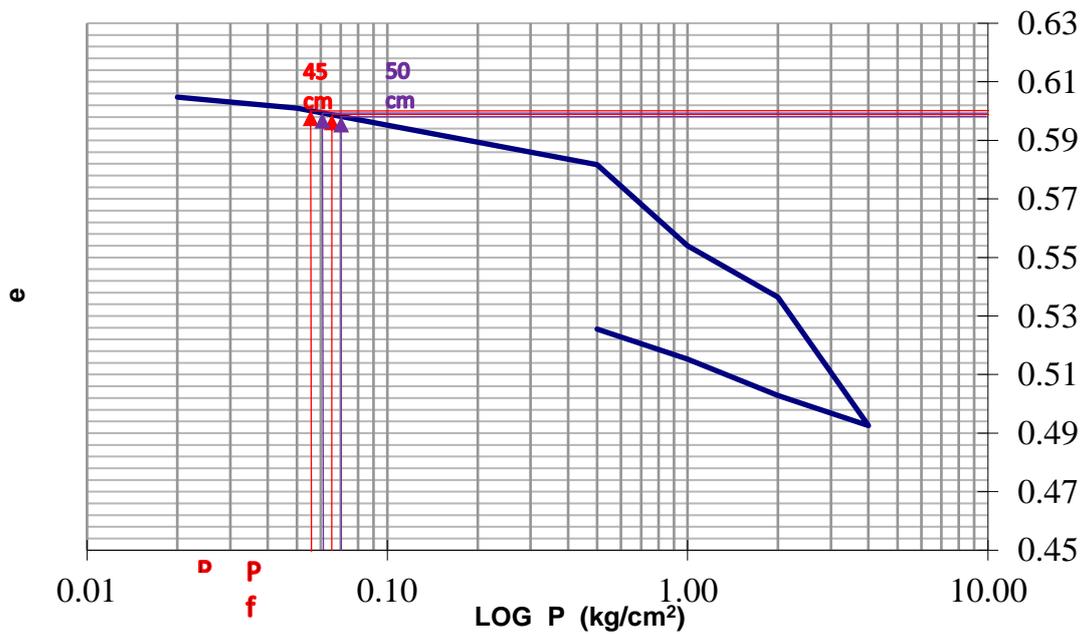


Figura 51. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

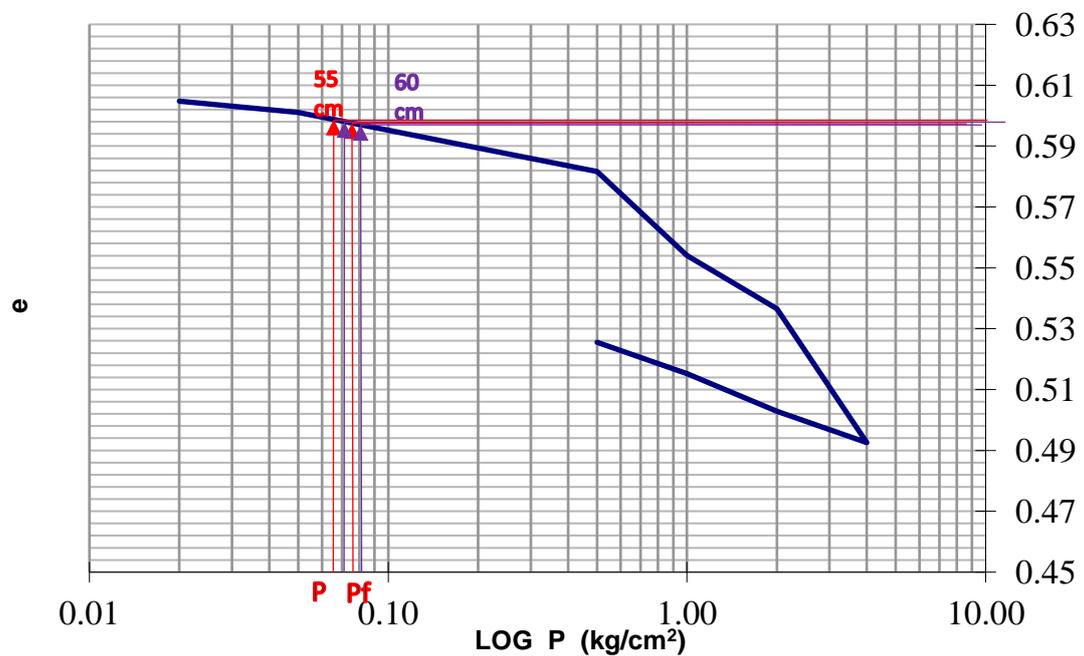


Figura 52. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 1.

Tal como se mencionó en el numeral 10.3 el asentamiento total primario corresponde al área bajo la curva $\frac{\Delta e}{1+e_0}$ VS profundidad. La figura 53 muestra esa variación para el consolidómetro análogo 1, así mismo se presenta la ecuación con mejor ajuste para

la tendencia obtenida, esta ecuación se integró y su valor corresponde al asentamiento total primario (ver resultados en el numeral 10.5)

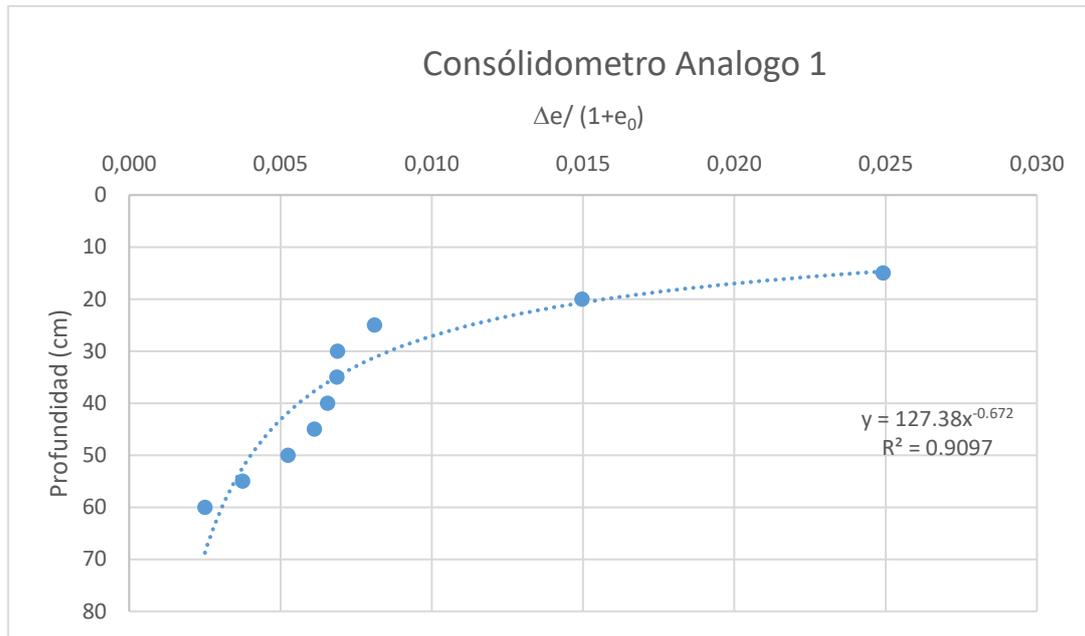


Figura 53. Variación para análogo 1.

Al integrar la ecuación de la línea de tendencia obtenida para el consolidómetro análogo 1 se obtiene un asentamiento total primario de 0.543 mm. Comparando este valor con el promedio de los asentamientos registrados en el modelo a escala se obtiene un porcentaje de error del 29.27%.

10.3.2. Asentamiento ensayo análogo 2

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.3, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro análogo 2.

ANALOGO 2 PROFUNDIDAD 15CM			
$T_{\text{triturado}}(\text{cm})=$	15	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$	0
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.065
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.05	$\gamma(\text{m})=$	70
$x(\text{m})=$	70	$z(\text{m})=$	15
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.024	$e_0=$	0.5765
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.012	$e_r=$	0.576
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.036	$\Delta e / (1 + \Delta e_0)=$	0.0003172

Tabla 29. Profundidad análogo 2 a 15 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 2	
PROFUNDIDAD 25CM	
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})= 15$	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 10$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.05$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$y(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 25$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.035$	$e_0= 0.5761$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_r= 0.5759$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.047$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.0001269$

Tabla 30. Profundidad análogo 2 a 25 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 2	
PROFUNDIDAD 35CM	
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})= 15$	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 20$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.05$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$y(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 35$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.045$	$e_0= 0.5759$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_r= 0.57578$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.057$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 7,62\text{E}-02$

Tabla 31. Profundidad análogo 2 a 35 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 2	
PROFUNDIDAD 45CM	
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})= 15$	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 30$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.05$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$y(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 45$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.056$	$e_0= 0.5757$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.011$	$e_r= 0.57568$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.066$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 1.3\text{E}-05$

Tabla 32. Profundidad análogo 2 a 45 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 2 PROFUNDIDAD 55CM	
$T_{riturado}(cm)=$ 15	$A_{arcilla}(cm)=$ 40
$\gamma'_{triturado}(g/cm^3)=$ 1.6	$\gamma'_{arcilla}(g/cm^3)=$ 1.05
$\omega(Kg/cm^2)=$ 0.05	$\gamma(m)=$ 70
$x(m)=$ 70	$z(m)=$ 55
$P_0(Kg/cm^2)=$ 0.066	$e_0=$ 0.575
$\Delta P(Kg/cm^2)=$ 0.010	$e_f=$ 0.57499
$P_f(Kg/cm^2)=$ 0.076	$\Delta e/1+\Delta e_0=$ 6.3E-06

Tabla 33. Profundidad análogo 2 a 55 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

Una vez realizados los cálculos anteriores se procede a ordenarlos de una manera sencilla con el fin de estimar el área bajo la curva de $\frac{\Delta e}{1+e_0}$

VS profundidad, el cual corresponde al asentamiento total primario. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Consolidómetro Análogo 2							
profundidad Z [cm]	Estrato de arcilla	P_0 [Kg/cm ²]	ΔP_y [Kg/cm ²]	PF [KG/cm ²]	e_0	e_f	$\Delta e/1+\Delta e_0$
15	0	0.024	0.012	0.036	0.5765	0.5760	0.00032
20	5	0.029	0.012	0.042	0.5762	0.5759	0.00019
25	10	0.035	0.012	0.047	0.5761	0.5759	0.00013
30	15	0.040	0.012	0.052	0.5760	0.5758	0.00011
35	20	0.045	0.012	0.057	0.5759	0.5758	0.00008
40	25	0.051	0.011	0.062	0.5758	0.5757	0.00007
45	30	0.056	0.011	0.067	0.5757	0.5757	0.00001
50	35	0.061	0.010	0.071	0.5750	0.5750	0.00001
55	40	0.067	0.010	0.076	0.5750	0.5750	0.00001
60	45	0.072	0.009	0.081	0.5750	0.5750	0.00000

Tabla 34. Datos de profundidades análogo 2.

Los valores de las relaciones de vacíos inicial y final presentados en la tabla anterior se obtuvieron de la curva de consolidación correspondiente al ensayo realizado en el consolidómetro análogo 2, esto se puede apreciar en las siguientes graficas:

En cada grafica se estimaron las relaciones de vacíos inicial y final correspondiente a dos profundidades con el fin de no saturar una sola gráfica.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

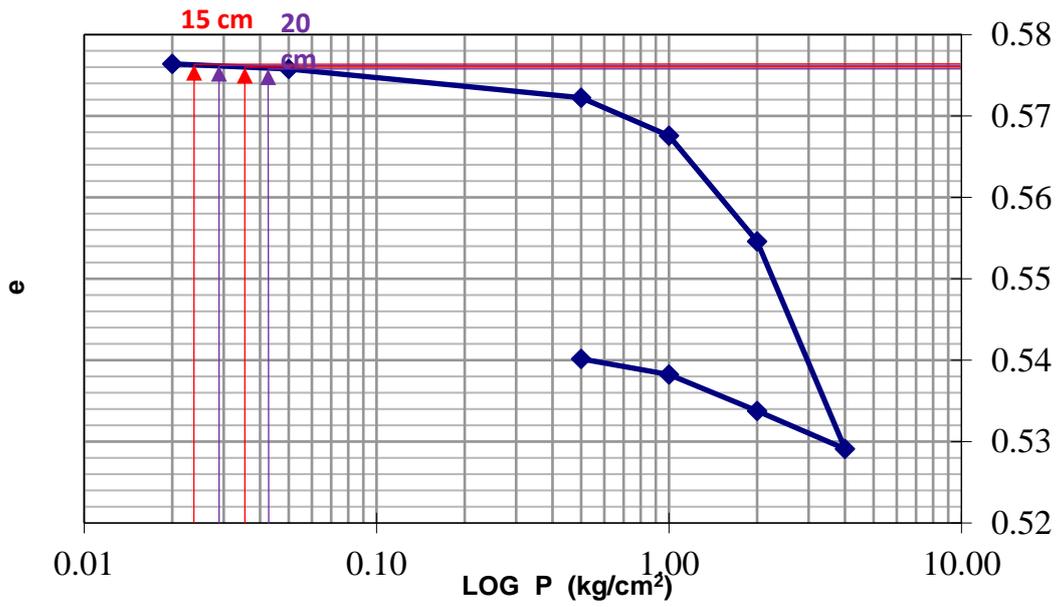


Figura 54. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

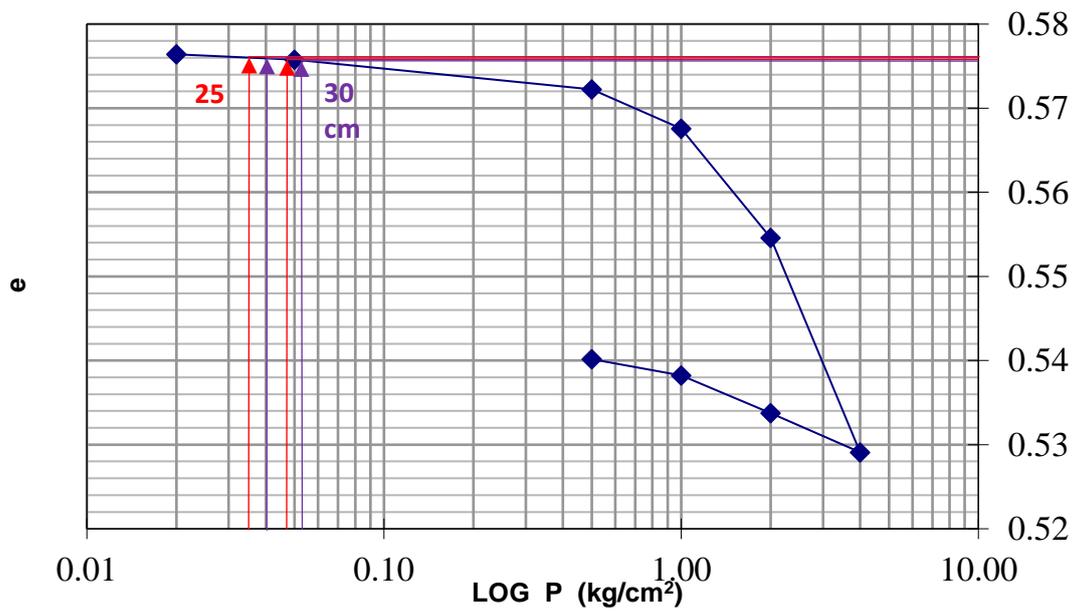


Figura 55. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

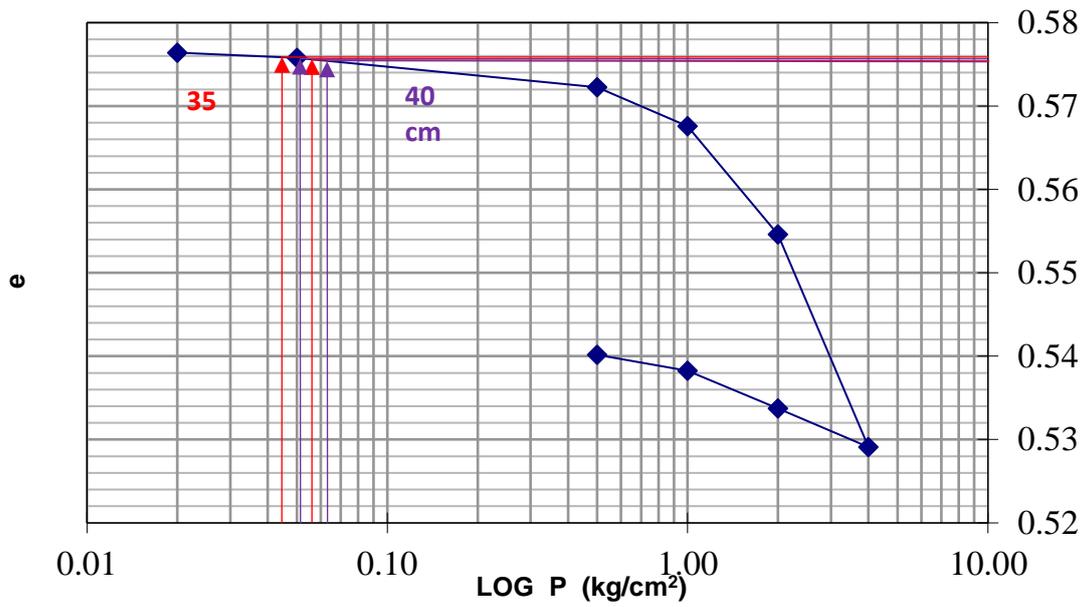


Figura 56. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

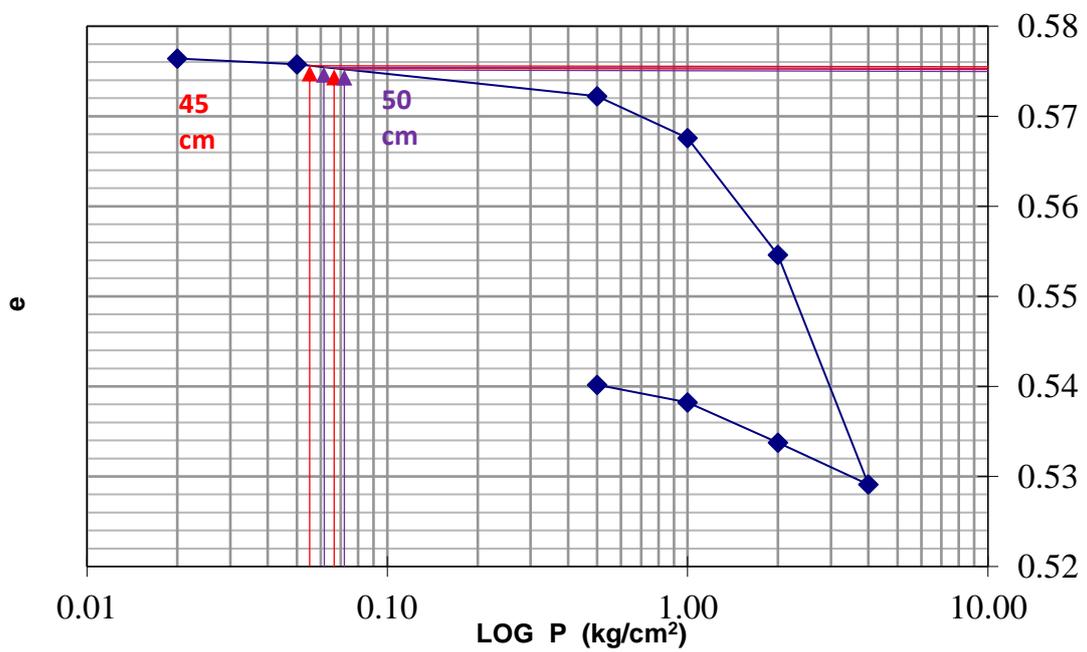


Figura 57. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

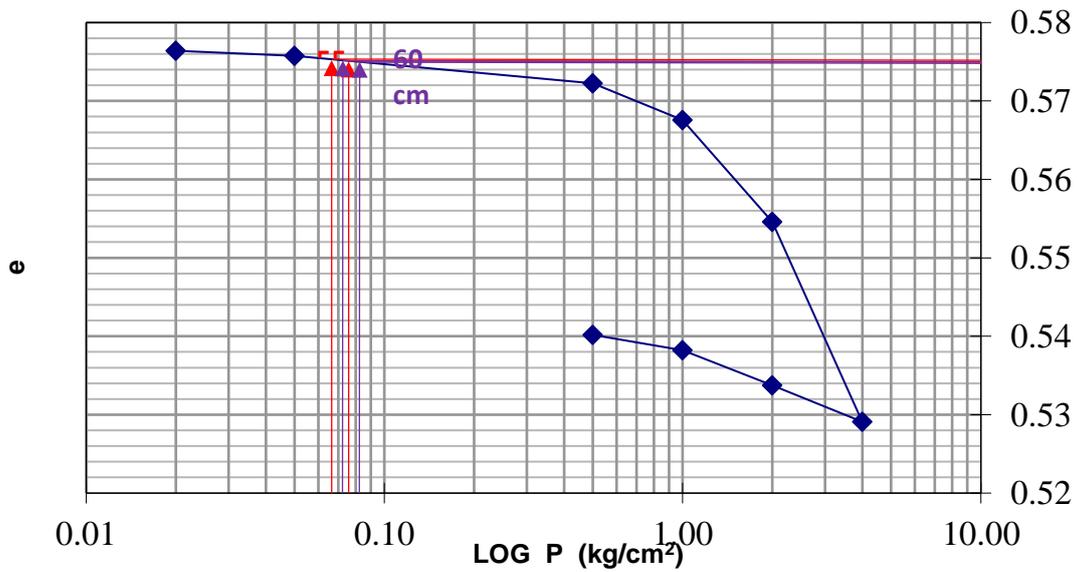


Figura 58. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 2.

Tal como se mencionó en el numeral 10.3 el asentamiento total primario corresponde al área bajo la curva $\frac{\Delta e}{1+e_0}$ VS profundidad. La *figura 59* muestra esa variación para el consolidómetro análogo 2, así mismo se presenta la ecuación con mejor ajuste para la tendencia obtenida, esta ecuación se integró y su valor corresponde al asentamiento total primario (ver resultados en el numeral 10.5)

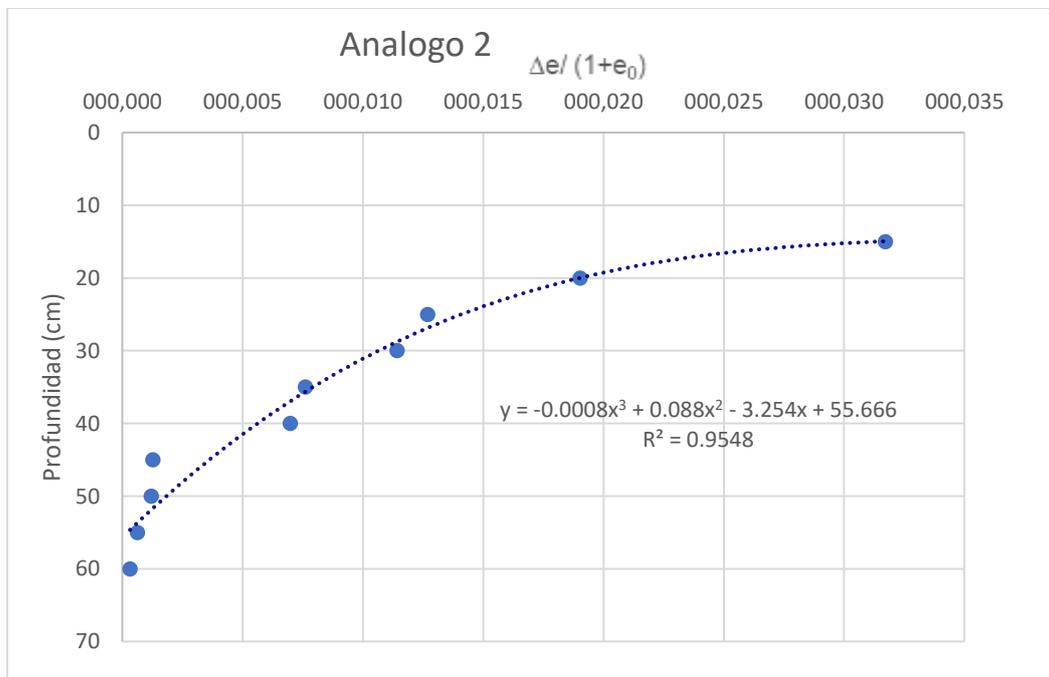


Figura 59. Variación para análogo 2.

Al integrar la ecuación de la línea de tendencia obtenida para el consolidómetro análogo 2 se obtiene un asentamiento total primario de 0.66 mm. Comparando este valor con el promedio de los asentamientos registrados en el modelo a escala se obtiene un porcentaje de error del 12.93%.

10.3.3. Asentamiento ensayo análogo 3

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.3, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro análogo 3.

ANALOGO 3	
PROFUNDIDAD 15CM	
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})= 15$	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 0$
$\gamma^1_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma^1_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.065$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$y(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 15$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.024$	$e_0= 0.616$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_r= 0.61415$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.036$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.0011448$

Tabla 35. Profundidad análogo 3 a 15 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 3	
PROFUNDIDAD 25CM	
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})= 15$	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 10$
$\gamma^1_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma^1_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.05$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$y(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 25$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.035$	$e_0= 0.6142$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_r= 0.6131$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.047$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.0006815$

Tabla 36. Profundidad análogo 3 a 25 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 3	
PROFUNDIDAD 35CM	
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})= 15$	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 20$
$\gamma^1_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma^1_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.05$

$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.05	$y(\text{m})=$ 70
$x(\text{m})=$ 70	$z(\text{m})=$ 35
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.045	$e_0=$ 0.6138
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.012	$e_f=$ 0.613
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.057	$\Delta e/1+\Delta e_0=$ 0.0004957

Tabla 37. Profundidad análogo 3 a 35 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 3 PROFUNDIDAD 45CM	
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})=$ 15	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$ 30
$\gamma^{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.6	$\gamma^{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.05
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.05	$y(\text{m})=$ 70
$x(\text{m})=$ 70	$z(\text{m})=$ 45
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.056	$e_0=$ 0.6119
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.011	$e_f=$ 0.61145
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.066	$\Delta e/1+\Delta e_0=$ 0.00028

Tabla 38. Profundidad análogo 3 a 45 cm.

¡Error! Vínculo no válido.

ANALOGO 3 PROFUNDIDAD 55CM	
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})=$ 15	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$ 40
$\gamma^{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.6	$\gamma^{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.05
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.05	$y(\text{m})=$ 70
$x(\text{m})=$ 70	$z(\text{m})=$ 55
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.066	$e_0=$ 0.61035
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.010	$e_f=$ 0.61005
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.076	$\Delta e/1+\Delta e_0=$ 0.00019

Tabla 39. Profundidad análogo 3 a 55 cm.

ANALOGO 3 PROFUNDIDAD 60CM	
$T_{\text{riturado}}(\text{cm})=$ 15	$A_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$ 45

$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)= 1.05$
$\omega(\text{Kg/cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 60$
$P_0(\text{Kg/cm}^2)= 0.071$	$e_0= 0.61009$
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)= 0.010$	$e_f= 0.60995$
$P_f(\text{Kg/cm}^2)= 0.081$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 8.7\text{E-}05$

Tabla 40. Profundidad análogo 3 a 60 cm.

Una vez realizados los cálculos anteriores se procede a ordenarlos de una manera sencilla con el fin de estimar el área bajo la curva de $\frac{\Delta e}{1+e_0}$

VS profundidad, el cual corresponde al asentamiento total primario. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Consolidómetro Análogo 3							
profundidad Z [cm]	Estrato de arcilla [cm]	Po [Kg/cm ²]	ΔP_y [Kg/cm ²]	PF [KG/cm ²]	eo	ef	$\Delta e/1+\Delta e_0$
15	0	0.024	0.012	0.036	0.6160	0.6142	0.0011
20	5	0.029	0.012	0.041	0.6153	0.6139	0.0009
25	10	0.034	0.012	0.046	0.6142	0.6131	0.0007
30	15	0.040	0.012	0.051	0.6137	0.6128	0.0006
35	20	0.045	0.012	0.056	0.6138	0.6130	0.0005
40	25	0.050	0.011	0.061	0.6127	0.6121	0.0004
45	30	0.055	0.011	0.066	0.6119	0.6115	0.0003
50	35	0.060	0.010	0.070	0.6114	0.6110	0.0002
55	40	0.065	0.010	0.075	0.6104	0.6101	0.0002
60	45	0.071	0.009	0.080	0.6101	0.6100	0.0001

Tabla 41. Datos de profundidades análogo 3.

Los valores de las relaciones de vacíos inicial y final presentados en la tabla anterior se obtuvieron de la curva de consolidación correspondiente al ensayo realizado en el consolidómetro análogo 3, esto se puede apreciar en las siguientes graficas:

En cada grafica se estimaron las relaciones de vacíos inicial y final correspondiente a dos profundidades con el fin de no saturar una sola gráfica.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

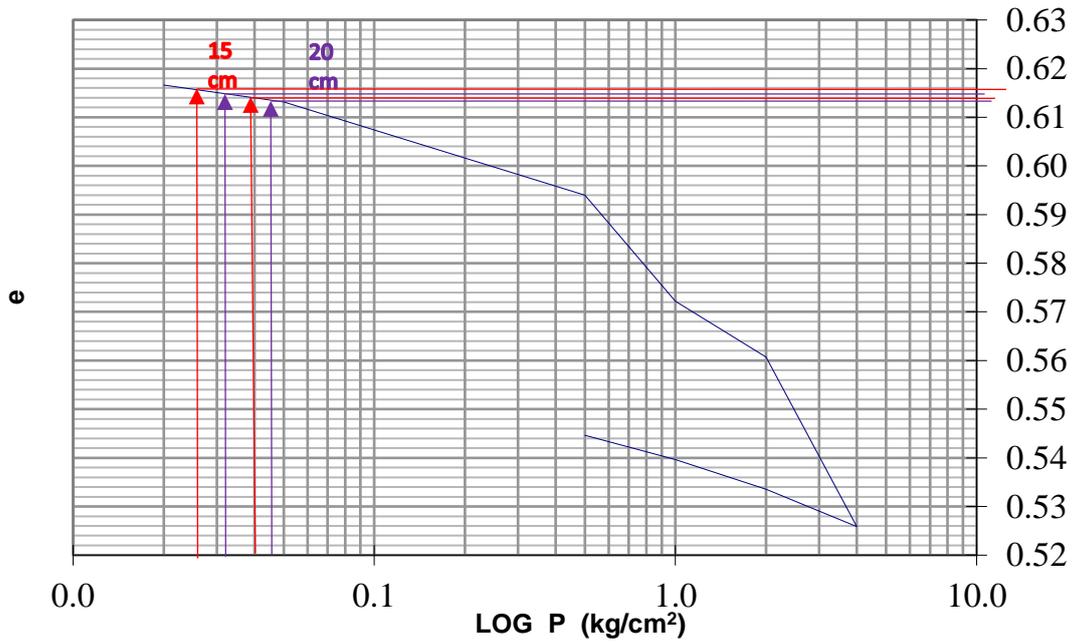


Figura 60. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

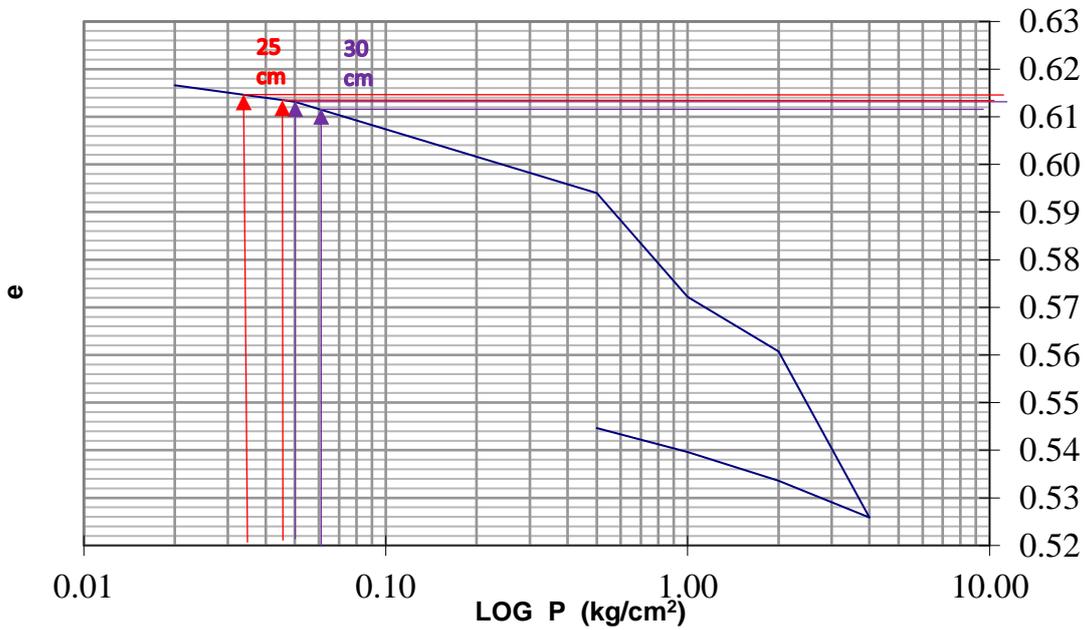


Figura 61. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

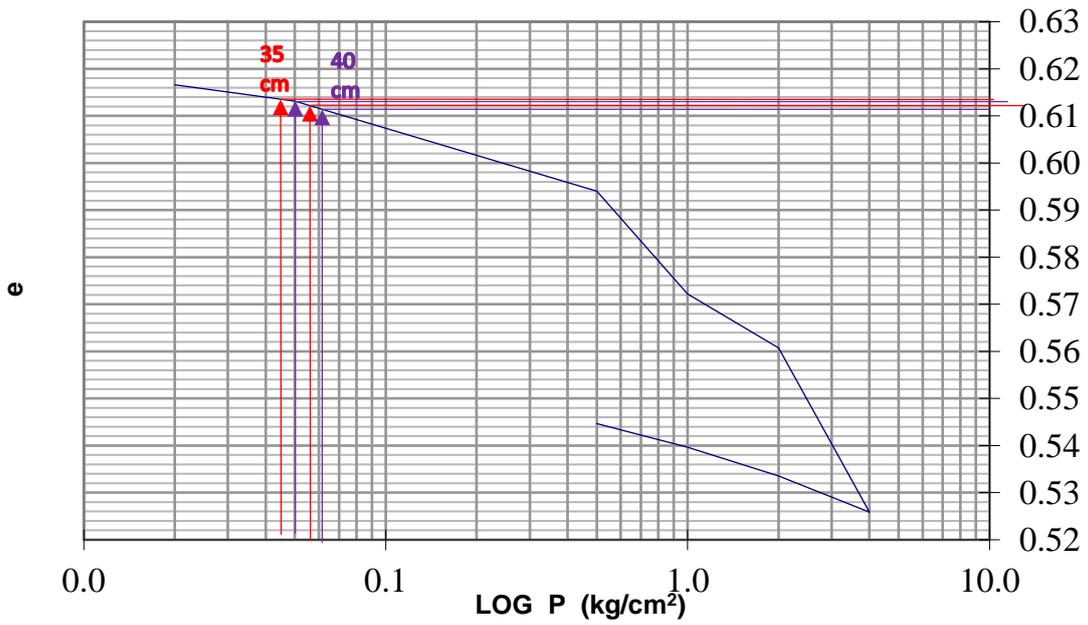


Figura 62. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

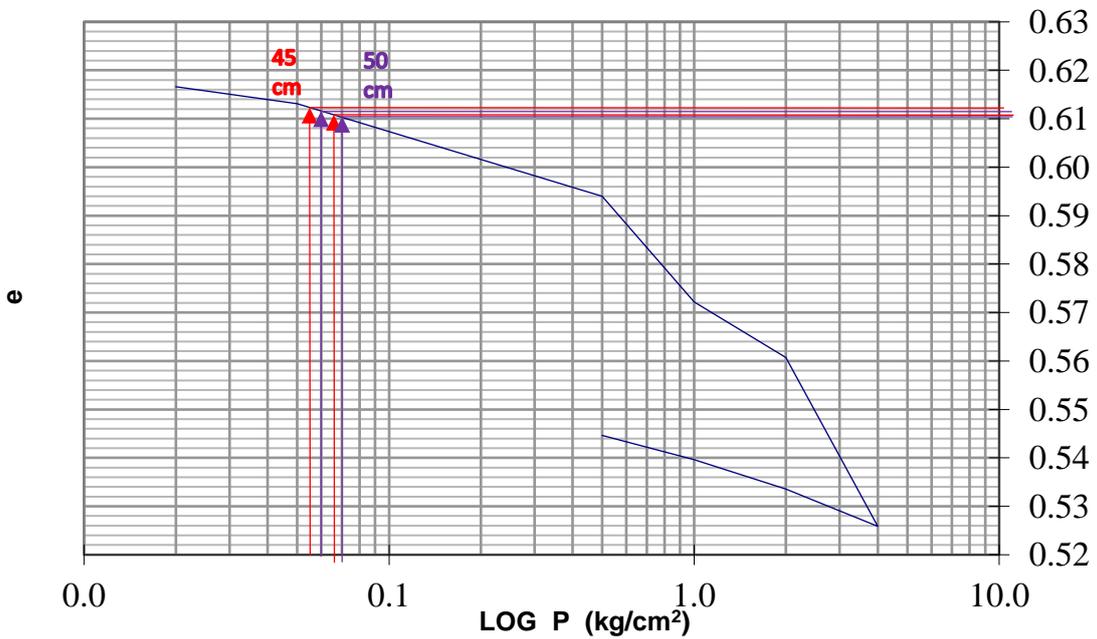


Figura 63. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

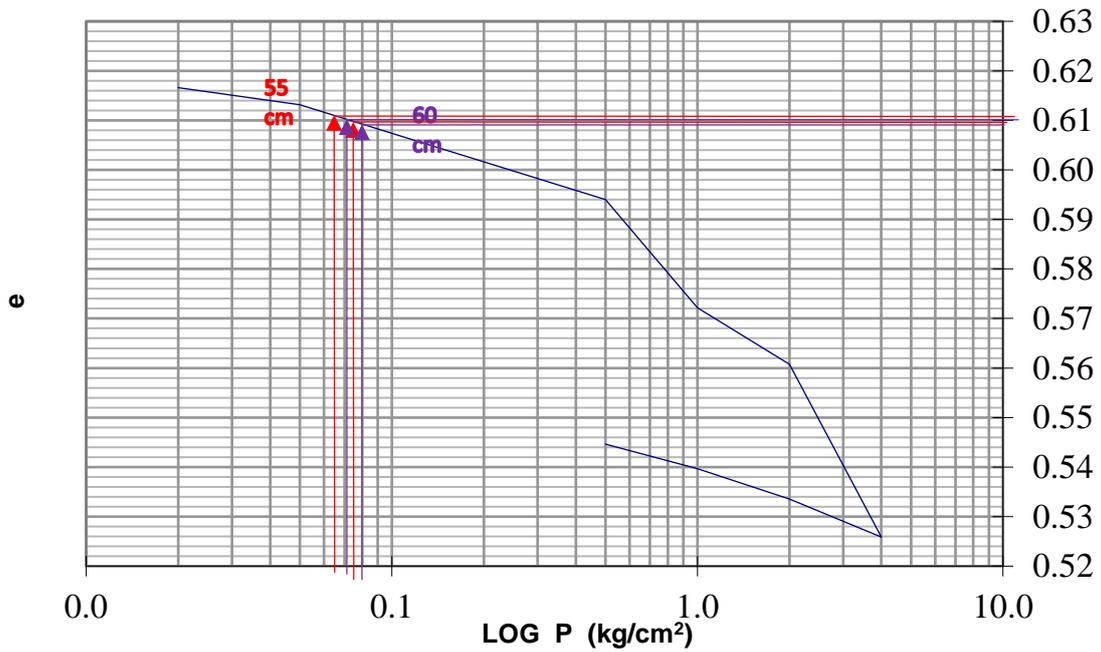


Figura 64. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento análogo 3.

Tal como se mencionó en el numeral 10.3 el asentamiento total primario corresponde al área bajo la curva $\frac{\Delta e}{1+e_0}$ VS profundidad. La *figura 65* muestra esa variación para el consolidómetro análogo 3, así mismo se presenta la ecuación con mejor ajuste para la tendencia obtenida, esta ecuación se integró y su valor corresponde al asentamiento total primario (ver resultados en el numeral 10.5)

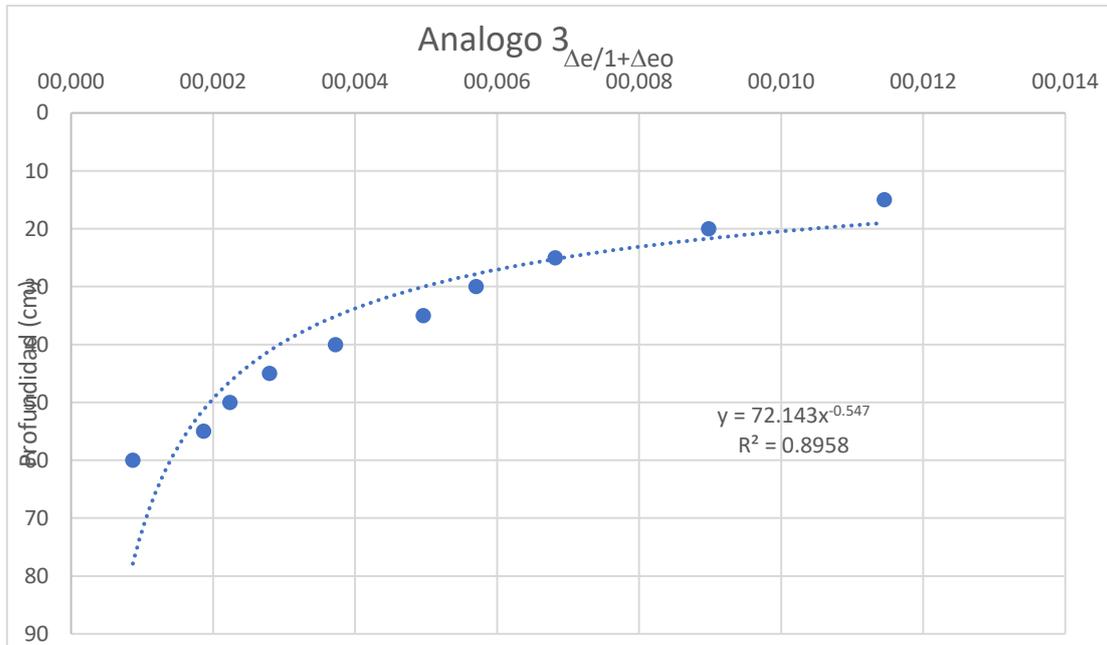


Figura 65. Variación para análogo 3.

Al integrar la ecuación de la línea de tendencia obtenida para el consolidómetro análogo 3 se obtiene un asentamiento total primario de 0.47 mm. Comparando este valor con el promedio de los asentamientos registrados en el modelo a escala se obtiene un porcentaje de error del 38.24%.

10.3.4. Asentamiento ensayo digital 1

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.3, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro digital 1.

DIGITAL 1 PROFUNDIDAD 15CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 0$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg/cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 15$
$P_0(\text{Kg/cm}^2)= 0.024$	$e_0= 0.6604$
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)= 0.012$	$e_f= 0.6567$
$P_f(\text{Kg/cm}^2)= 0.036$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00223$

Tabla 42. Profundidad digital 1 a 15 cm.

DIGITAL 1 PROFUNDIDAD 20CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 5$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg/cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 20$
$P_0(\text{Kg/cm}^2)= 0.029$	$e_0= 0.6585$
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)= 0.012$	$e_f= 0.6556$
$P_f(\text{Kg/cm}^2)= 0.042$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00175$

Tabla 43. Profundidad digital 1 a 20 cm.

DIGITAL 1 PROFUNDIDAD 25CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 10$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg/cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$

$x(m)=$	70	$z(m)=$	25
$P_0(Kg/cm^2)=$	0.034	$e_0=$	0.6574
$\Delta P(Kg/cm^2)=$	0.012	$e_f=$	0.655
$P_f(Kg/cm^2)=$	0.046	$\Delta e/1+\Delta e_0=$	0.00145

Tabla 44. Profundidad digital 1 a 25 cm.

DIGITAL 1			
PROFUNDIDAD 30CM			
$H_{triturado}(cm)=$	15	$H_{arcilla}(cm)=$	15
$\gamma'_{triturado}(g/cm^3)=$	1.6	$\gamma'_{arcilla}(g/cm^3)=$	1.005
$\omega(Kg/cm^2)=$	0.05	$\gamma(m)=$	70
$x(m)=$	70	$z(m)=$	30
$P_0(Kg/cm^2)=$	0.039	$e_0=$	0.656
$\Delta P(Kg/cm^2)=$	0.012	$e_f=$	0.654
$P_f(Kg/cm^2)=$	0.051	$\Delta e/1+\Delta e_0=$	0.00121

Tabla 45. Profundidad digital 1 a 30 cm.

DIGITAL 1			
PROFUNDIDAD 35CM			
$H_{triturado}(cm)=$	15	$H_{arcilla}(cm)=$	20
$\gamma'_{triturado}(g/cm^3)=$	1.6	$\gamma'_{arcilla}(g/cm^3)=$	1.005
$\omega(Kg/cm^2)=$	0.05	$\gamma(m)=$	70
$x(m)=$	70	$z(m)=$	35
$P_0(Kg/cm^2)=$	0.044	$e_0=$	0.6554
$\Delta P(Kg/cm^2)=$	0.012	$e_f=$	0.6537
$P_f(Kg/cm^2)=$	0.056	$\Delta e/1+\Delta e_0=$	0.00103

Tabla 46. Profundidad digital 1 a 35 cm.

DIGITAL 1			
PROFUNDIDAD 40CM			
$H_{triturado}(cm)=$	15	$H_{arcilla}(cm)=$	25
$\gamma'_{triturado}(g/cm^3)=$	1.6	$\gamma'_{arcilla}(g/cm^3)=$	1.005
$\omega(Kg/cm^2)=$	0.05	$\gamma(m)=$	70
$x(m)=$	70	$z(m)=$	40
$P_0(Kg/cm^2)=$	0.049	$e_0=$	0.6537

$\Delta P(\text{Kg/cm}^2) = 0.011$	$e_f =$	0.6522
$P_f(\text{Kg/cm}^2) = 0.060$	$\Delta e/1 + \Delta e_0 =$	0.00091

Tabla 47. Profundidad digital 1 a 40 cm.

DIGITAL 1 PROFUNDIDAD 45CM		
$H_{\text{triturado}}(\text{cm}) = 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm}) =$	30
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3) = 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3) =$	1.005
$\omega(\text{Kg/cm}^2) = 0.05$	$\gamma(\text{m}) =$	70
$x(\text{m}) = 70$	$z(\text{m}) =$	45
$P_0(\text{Kg/cm}^2) = 0.054$	$e_0 =$	0.6526
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2) = 0.011$	$e_f =$	0.6514
$P_f(\text{Kg/cm}^2) = 0.065$	$\Delta e/1 + \Delta e_0 =$	0.00073

Tabla 48. Profundidad digital 1 a 45 cm.

DIGITAL 1 PROFUNDIDAD 50CM		
$H_{\text{triturado}}(\text{cm}) = 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm}) =$	35
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3) = 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3) =$	1.005
$\omega(\text{Kg/cm}^2) = 0.05$	$\gamma(\text{m}) =$	70
$x(\text{m}) = 70$	$z(\text{m}) =$	50
$P_0(\text{Kg/cm}^2) = 0.059$	$e_0 =$	0.651
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2) = 0.011$	$e_f =$	0.64999
$P_f(\text{Kg/cm}^2) = 0.070$	$\Delta e/1 + \Delta e_0 =$	0.00061

Tabla 49. Profundidad digital 1 a 50 cm.

DIGITAL 1 PROFUNDIDAD 55CM		
$H_{\text{triturado}}(\text{cm}) = 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm}) =$	40
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3) = 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3) =$	1.005
$\omega(\text{Kg/cm}^2) = 0.05$	$\gamma(\text{m}) =$	70
$x(\text{m}) = 70$	$z(\text{m}) =$	55
$P_0(\text{Kg/cm}^2) = 0.064$	$e_0 =$	0.6506
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2) = 0.010$	$e_f =$	0.6499

Pf(Kg/cm ²)= 0.074	$\Delta e/1+\Delta e_0=$ 0.00042
--------------------------------	----------------------------------

Tabla 50. Profundidad digital 1 a 55 cm.

DIGITAL 1 PROFUNDIDAD 60CM	
H _{triturado} (cm)= 15	H _{arcilla} (cm)= 45
$\gamma'_{triturado}$ (g/cm ³)= 1.6	$\gamma'_{arcilla}$ (g/cm ³)= 1.005
ω (Kg/cm ²)= 0.05	γ (m)= 70
x(m)= 70	z(m)= 60
P ₀ (Kg/cm ²)= 0.069	e ₀ = 0.649
ΔP (Kg/cm ²)= 0.010	e _f = 0.6485
Pf(Kg/cm ²)= 0.079	$\Delta e/1+\Delta e_0=$ 0.0003

Tabla 51. Profundidad digital 1 a 60 cm.

Una vez realizados los cálculos anteriores se procede a ordenarlos de una manera sencilla con el fin de estimar el área bajo la curva de $\frac{\Delta e}{1+e_0}$

VS profundidad, el cual corresponde al asentamiento total primario. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Consolidómetro digital 1							
profundidad Z [cm]	Espesor Arcilla [cm]	P ₀ [Kg/cm ²]	ΔP_y [Kg/cm ²]	PF [KG/cm ²]	e ₀	e _f	$\frac{\Delta e}{1 + e_0}$
15	0	0.024	0.0124	0.036	0.6604	0.6567	0.0022
20	5	0.029	0.0123	0.041	0.6585	0.6556	0.0017
25	10	0.034	0.0121	0.046	0.6574	0.655	0.0014
30	15	0.039	0.0119	0.051	0.656	0.654	0.0012
35	20	0.044	0.0116	0.056	0.6554	0.6537	0.0010
40	25	0.049	0.0113	0.060	0.6537	0.6522	0.0009
45	30	0.054	0.0109	0.065	0.6526	0.6514	0.0007
50	35	0.059	0.0105	0.070	0.651	0.64999	0.0006
55	40	0.064	0.0101	0.074	0.6506	0.6499	0.0004
60	45	0.069	0.0096	0.079	0.649	0.6485	0.0003

Tabla 52. Datos de profundidades digital 1.

Los valores de las relaciones de vacíos inicial y final presentados en la tabla anterior se obtuvieron de la curva de consolidación correspondiente al ensayo realizado en el consolidómetro digital 1, esto se puede apreciar en las siguientes graficas:

En cada grafica se estimaron las relaciones de vacíos inicial y final correspondiente a dos profundidades con el fin de no saturar una sola gráfica.

RELACION DE VACIOS VS LOGARITMO DE PRESION

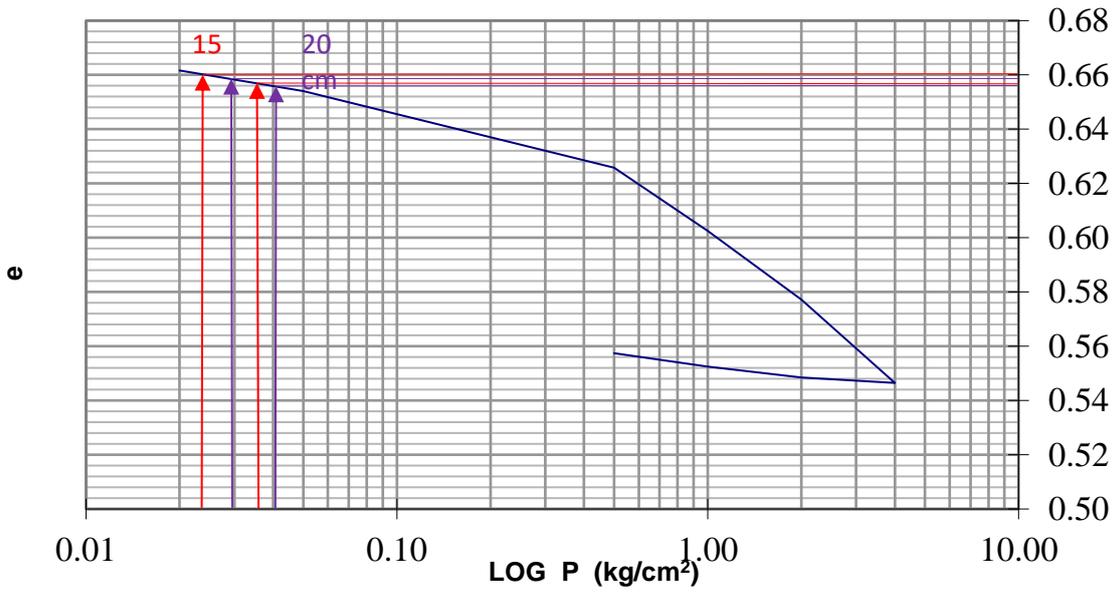


Figura 66. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

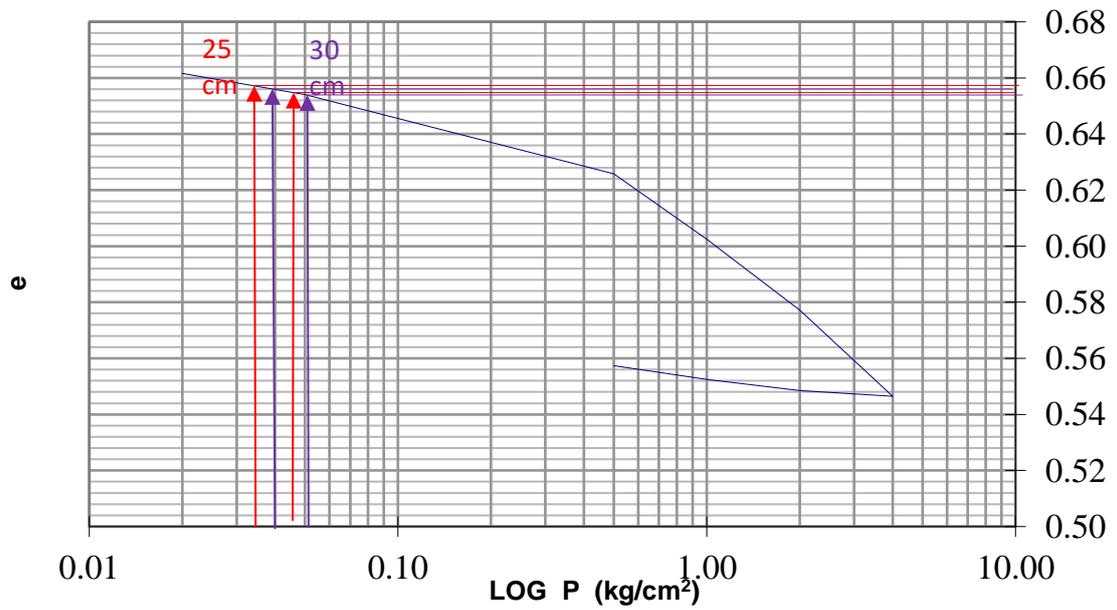


Figura 67. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

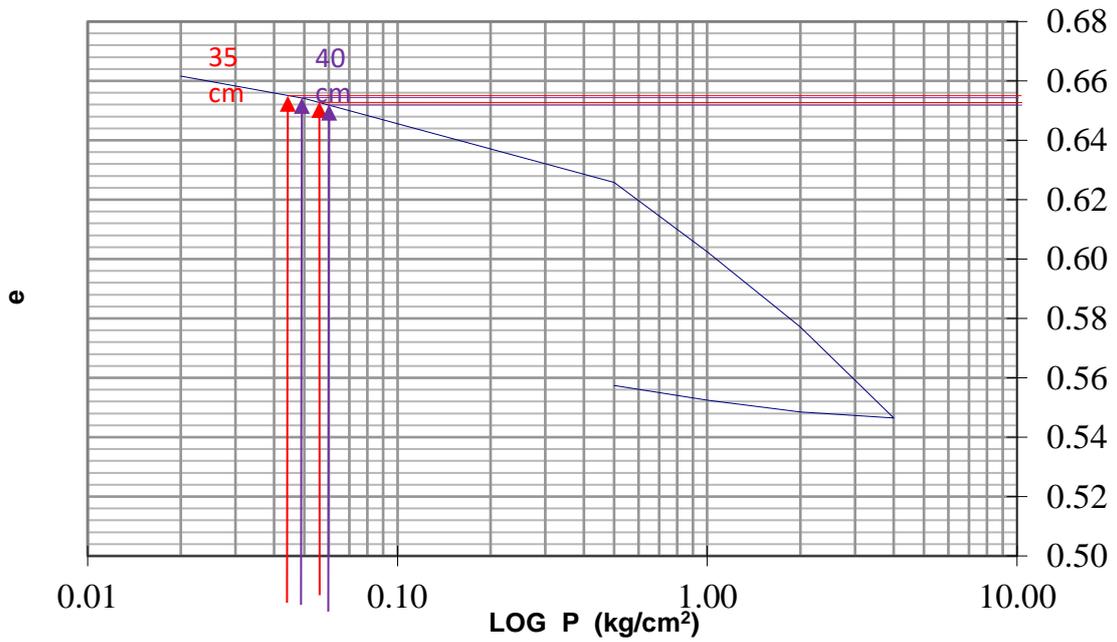


Figura 68. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

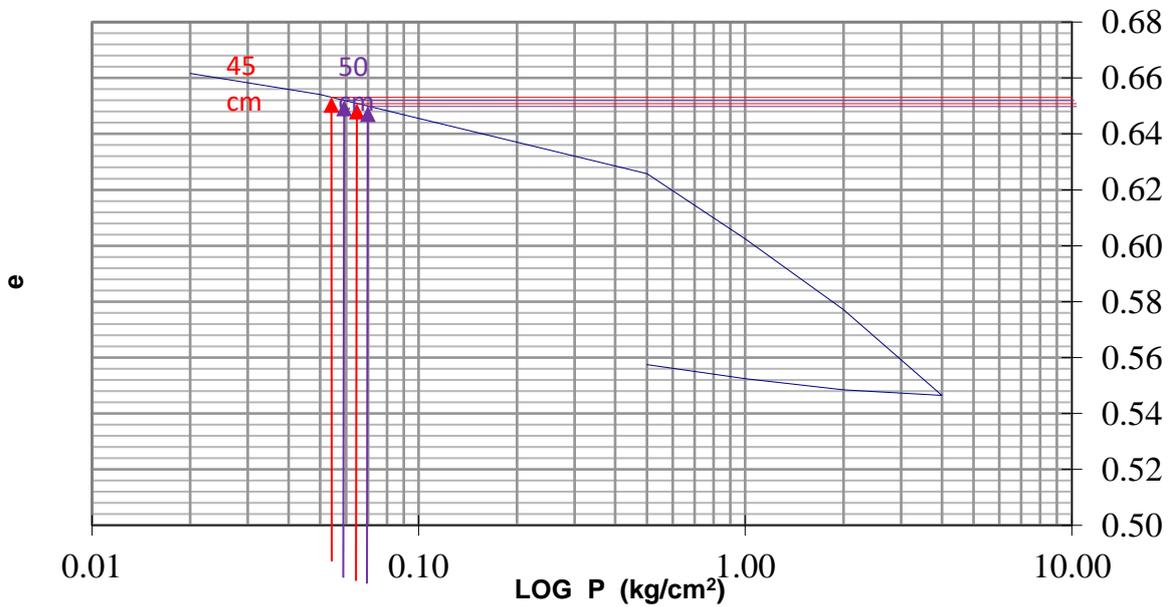


Figura 69. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

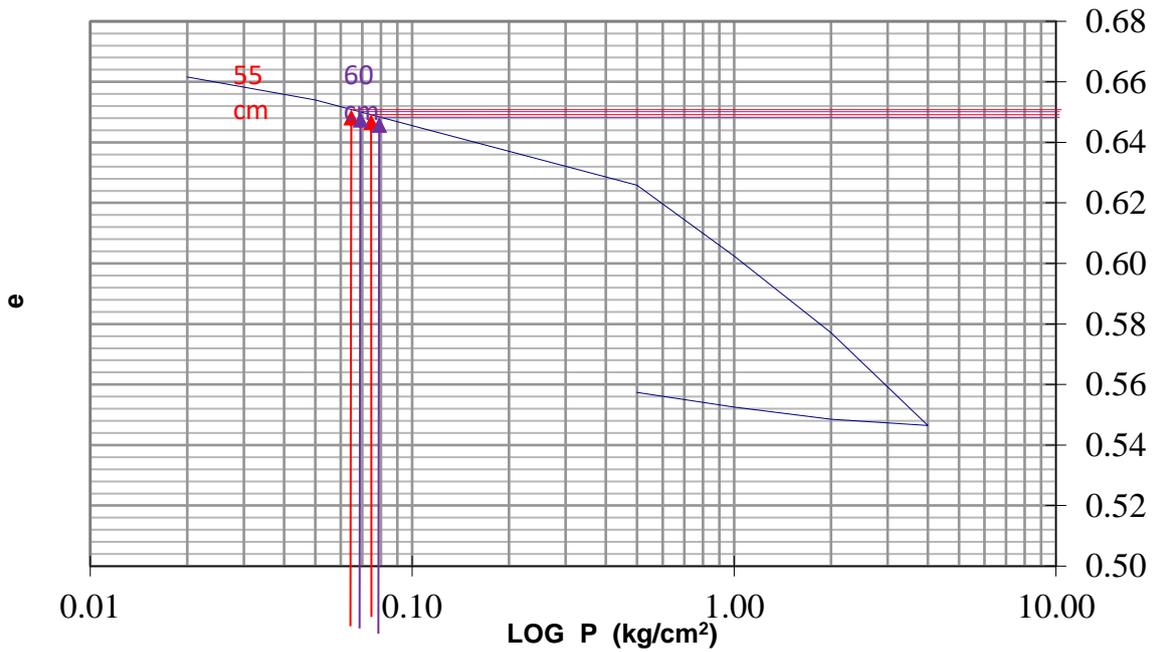


Figura 70. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital1.

Tal como se mencionó en el numeral 10.3 el asentamiento total primario corresponde al área bajo la curva $\frac{\Delta e}{1+e_0}$ VS profundidad. La *figura 71* muestra esa variación para el consolidómetro digital 1, así mismo se presenta la ecuación con mejor ajuste para la tendencia obtenida, esta ecuación se integró y su valor corresponde al asentamiento total primario (ver resultados en el numeral 10.5)

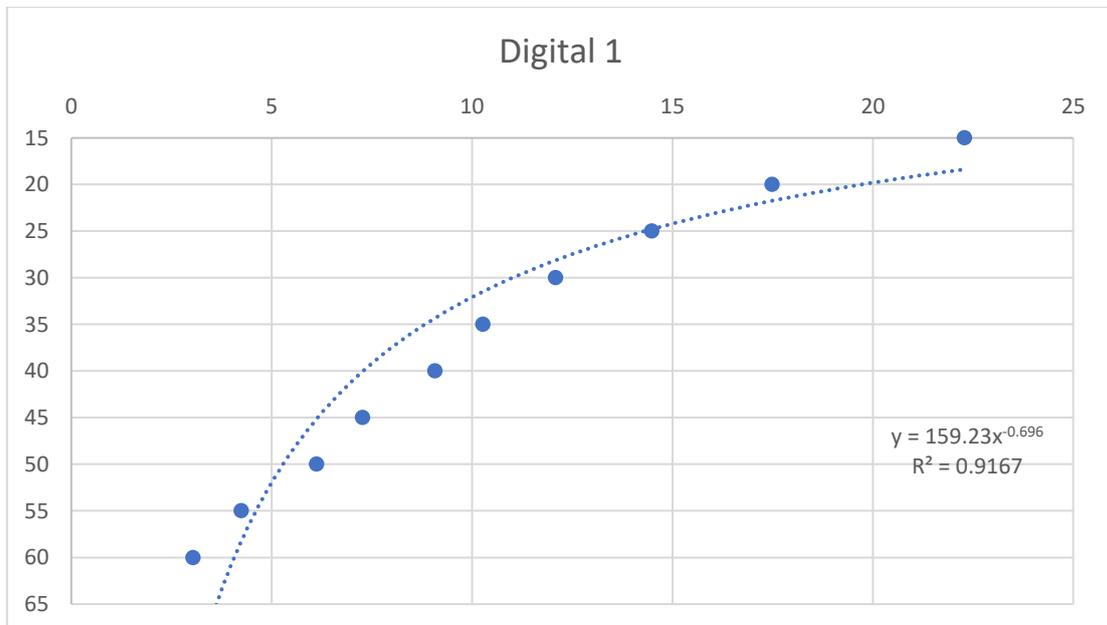


Figura 71. Variación para digital 1.

Al integrar la ecuación de la línea de tendencia obtenida para el consolidómetro digital 1 se obtiene un asentamiento total primario de 0.62 mm. Comparando este

valor con el promedio de los asentamientos registrados en el modelo a escala se obtiene un porcentaje de error del 18.61%.

10.3.5. Asentamiento ensayo digital 2

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.3, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro digital 2.

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 15CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 0$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.02$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 15$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.024$	$e_0= 0.6375$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_f= 0.632$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.036$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00336$

Tabla 53. Profundidad digital 2 a 15 cm.

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 20CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 5$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.02$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 20$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.029$	$e_0= 0.6323$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_f= 0.6304$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.042$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00116$

Tabla 54. Profundidad digital 2 a 20 cm.

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 25CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 10$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.02$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 25$

$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.034	$e_0=$ 0.6318
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.012	$e_f=$ 0.6299
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.046	$\Delta e/1+\Delta e_0=$ 0.00116

Tabla 55. Profundidad digital 2 a 25 cm.

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 30CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})=$ 15	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$ 15
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.02
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.05	$\gamma(\text{m})=$ 70
$x(\text{m})=$ 70	$z(\text{m})=$ 30
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.039	$e_0=$ 0.6309
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.012	$e_f=$ 0.6292
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.051	$\Delta e/1+\Delta e_0=$ 0.00104

Tabla 56. Profundidad digital 2 a 30 cm.

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 35CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})=$ 15	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$ 20
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.02
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.05	$\gamma(\text{m})=$ 70
$x(\text{m})=$ 70	$z(\text{m})=$ 35
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.044	$e_0=$ 0.63
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.012	$e_f=$ 0.6285
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.056	$\Delta e/1+\Delta e_0=$ 0.00092

Tabla 57. Profundidad digital 2 a 35 cm.

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 40CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})=$ 15	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$ 25
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$ 1.02
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.05	$\gamma(\text{m})=$ 70
$x(\text{m})=$ 70	$z(\text{m})=$ 40
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$ 0.050	$e_0=$ 0.6292

$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.011	$e_f=$ 0.62835
$P_f(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.061	$\Delta e/1+\Delta e_o=$ 0.00052

Tabla 58. Profundidad digital 2 a 40 cm.

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 45CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})=$ 15	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$ 30
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)=$ 1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)=$ 1.02
$\omega(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.05	$\gamma(\text{m})=$ 70
$x(\text{m})=$ 70	$z(\text{m})=$ 45
$P_o(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.055	$e_o=$ 0.6526
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.011	$e_f=$ 0.6514
$P_f(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.066	$\Delta e/1+\Delta e_o=$ 0.00073

Tabla 59. Profundidad digital 2 a 45 cm.

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 50CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})=$ 15	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$ 35
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)=$ 1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)=$ 1.02
$\omega(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.05	$\gamma(\text{m})=$ 70
$x(\text{m})=$ 70	$z(\text{m})=$ 50
$P_o(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.060	$e_o=$ 0.629
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.011	$e_f=$ 0.628
$P_f(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.070	$\Delta e/1+\Delta e_o=$ 0.00061

Tabla 60. Profundidad digital 2 a 50 cm .

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 55CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})=$ 15	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$ 40
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)=$ 1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)=$ 1.02
$\omega(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.05	$\gamma(\text{m})=$ 70
$x(\text{m})=$ 70	$z(\text{m})=$ 55
$P_o(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.065	$e_o=$ 0.6286
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)=$ 0.010	$e_f=$ 0.6277

Pf(Kg/cm ²)= 0.075	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00055$
--------------------------------	----------------------------------

Tabla 61. Profundidad digital 2 a 55 cm.

DIGITAL 2 PROFUNDIDAD 60CM	
H _{triturado} (cm)= 15	H _{arcilla} (cm)= 45
$\gamma'_{triturado}$ (g/cm ³)= 1.6	$\gamma'_{arcilla}$ (g/cm ³)= 1.02
ω (Kg/cm ²)= 0.05	γ (m)= 70
x(m)= 70	z(m)= 60
P ₀ (Kg/cm ²)= 0.070	e ₀ = 0.6281
ΔP (Kg/cm ²)= 0.010	e _f = 0.6272
Pf(Kg/cm ²)= 0.080	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00055$

Tabla 62. Profundidad digital 2 a 60 cm.

Una vez realizados los cálculos anteriores se procede a ordenarlos de una manera sencilla con el fin de estimar el área bajo la curva de $\frac{\Delta e}{1+e_0}$

VS profundidad, el cual corresponde al asentamiento total primario. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Consolidómetro digital 2							
profundidad Z [cm]	Espesor Arcilla [cm]	P ₀ [Kg/cm ²]	ΔP_y [Kg/cm ²]	PF [KG/cm ²]	e ₀	e _f	$\frac{\Delta e}{1 + e_0}$
15	0	0.024	0.0124	0.036	0.637	0.6325	0.0027
20	5	0.029	0.0123	0.041	0.6328	0.63	0.0017
25	10	0.034	0.0121	0.046	0.6318	0.6298	0.0012
30	15	0.039	0.0119	0.051	0.6309	0.6292	0.0010
35	20	0.044	0.0116	0.056	0.63	0.6285	0.0009
40	25	0.049	0.0113	0.060	0.6292	0.62835	0.0005
45	30	0.054	0.0109	0.065	0.629	0.628	0.0006
50	35	0.059	0.0105	0.070	0.6286	0.6277	0.0006
55	40	0.064	0.0101	0.074	0.6281	0.6272	0.0006
60	45	0.069	0.0096	0.079	0.6279	0.6275	0.0002

Los valores de las relaciones de vacíos inicial y final presentados en la tabla anterior se obtuvieron de la curva de consolidación correspondiente al ensayo realizado en el consolidómetro digital 2, esto se puede apreciar en las siguientes graficas:

En cada grafica se estimaron las relaciones de vacíos inicial y final correspondiente a dos profundidades con el fin de no saturar una sola gráfica.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

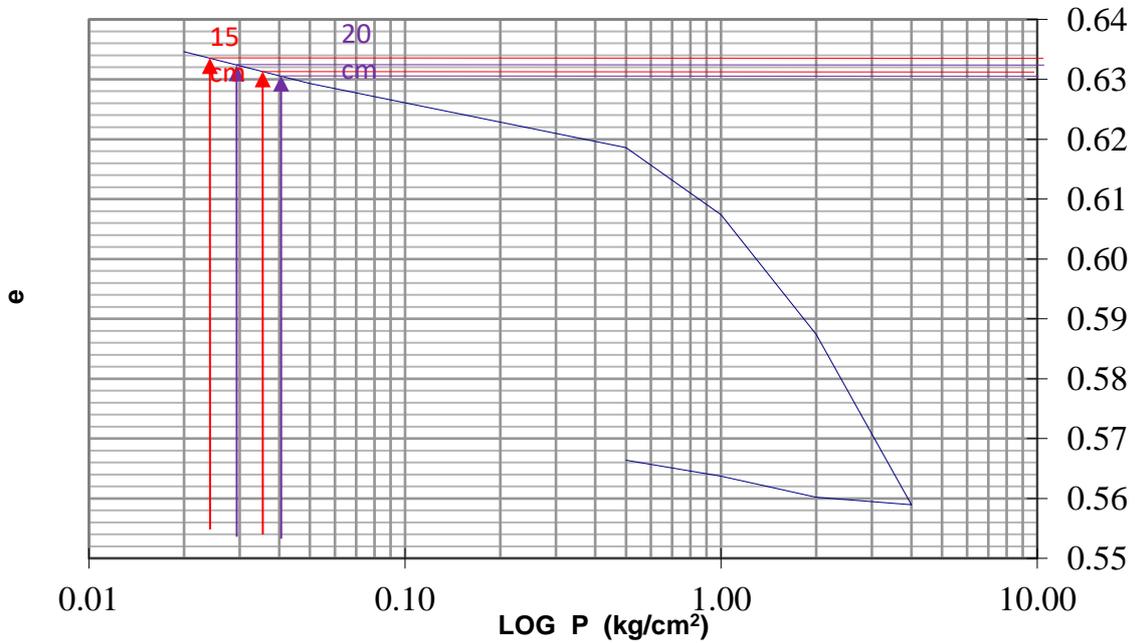


Figura 72. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

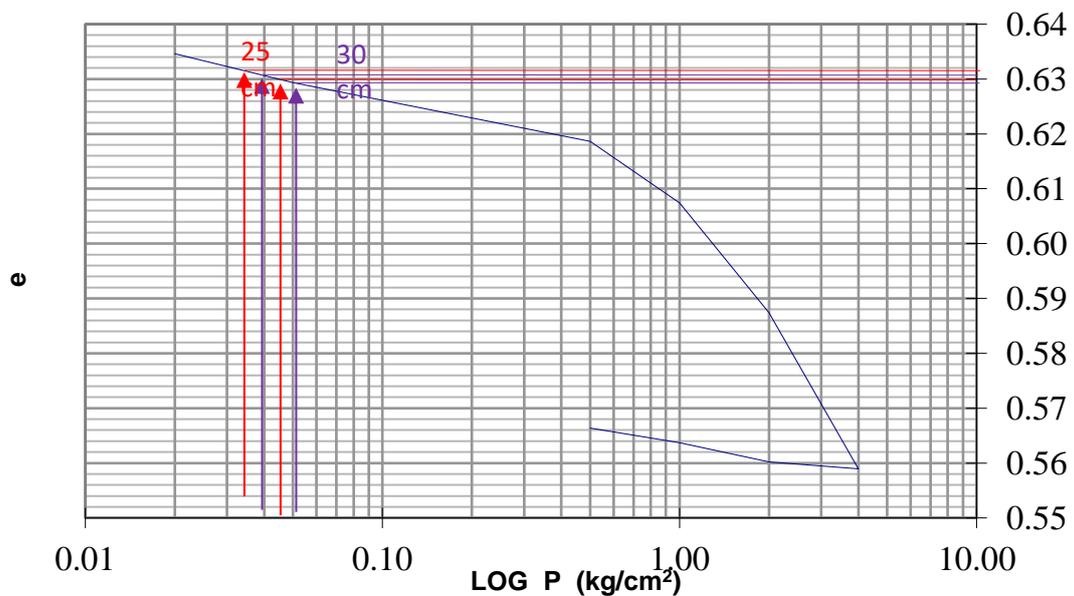


Figura 73. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

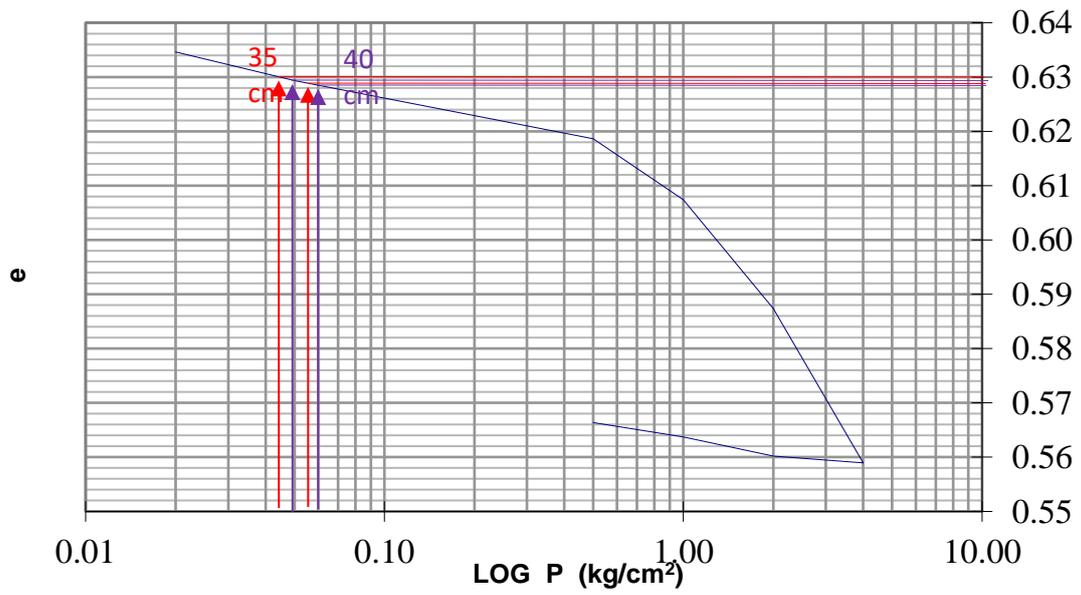


Figura 74. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.

RELACION DE VACIOS VS LOGARITMO DE PRESION

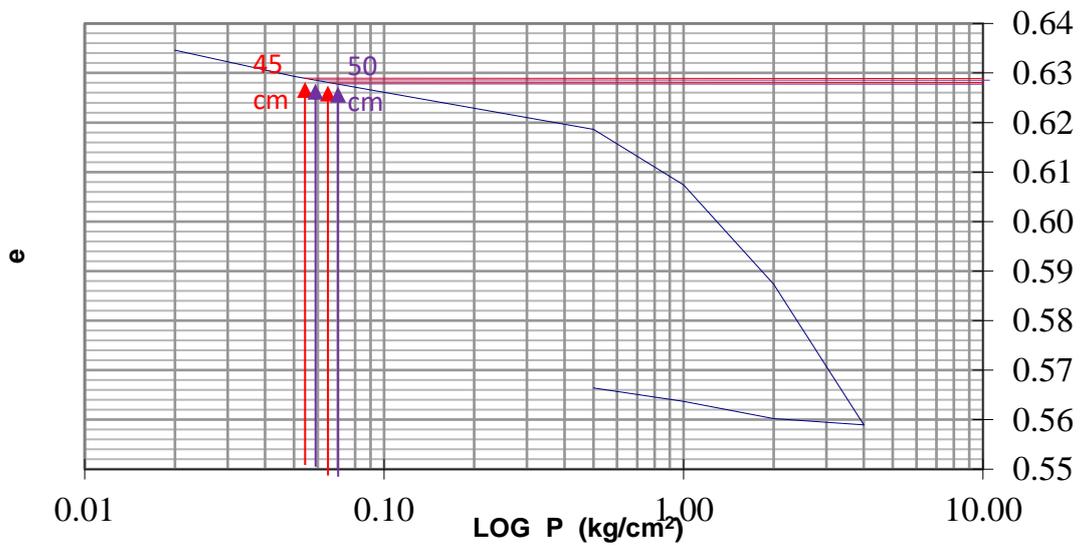


Figura 75. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

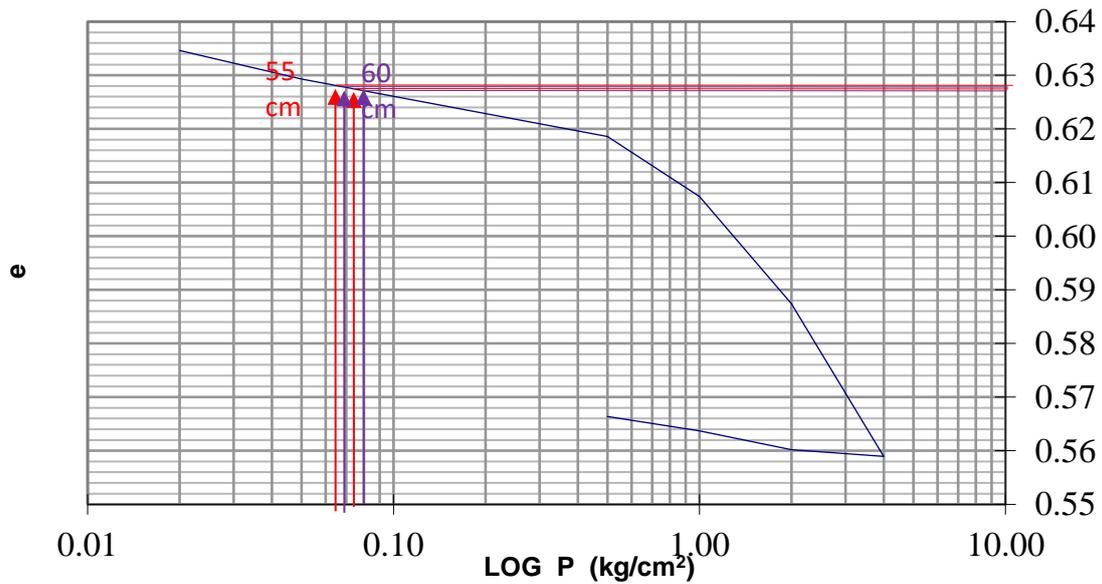


Figura 76. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 2.

Tal como se mencionó en el numeral 10.3 el asentamiento total primario corresponde al área bajo la curva $\frac{\Delta e}{1+e_0}$ VS profundidad. La figura 77 muestra esa variación para el consolidómetro digital 2, así mismo se presenta la ecuación con mejor ajuste para la tendencia obtenida, esta ecuación se integró y su valor corresponde al asentamiento total primario (ver resultados en el numeral 10.5)

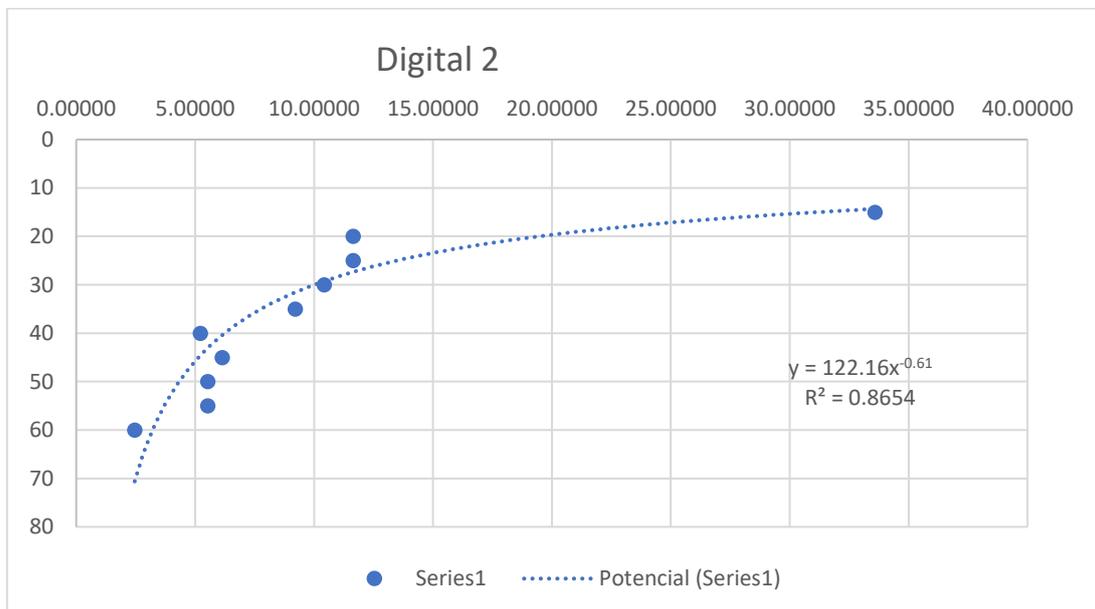


Figura 77. Variación para análogo 2.

Al integrar la ecuación de la línea de tendencia obtenida para el consolidómetro digital 2 se obtiene un asentamiento total primario de 0.63 mm. Comparando este valor con el promedio de los asentamientos registrados en el modelo a escala se obtiene un porcentaje de error del 17.18%.

10.3.6. Asentamiento ensayo digital 3

Con base en las ecuaciones descritas en el numeral 10.3, a continuación, se presentan los resultados del cálculo del asentamiento total primario por consolidación usando los parámetros obtenidos en el consolidómetro digital 3.

DIGITAL 3 PROFUNDIDAD 15CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 0$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 15$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.024$	$e_0= 0.6375$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_f= 0.632$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.036$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00336$

Tabla 63. Profundidad digital 3 a 15 cm.

DIGITAL 3 PROFUNDIDAD 20CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 5$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 20$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.029$	$e_0= 0.649$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_f= 0.6445$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.042$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00273$

Tabla 64. Profundidad digital 3 a 20 cm.

DIGITAL 3	
PROFUNDIDAD 25CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 10$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 25$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.034$	$e_0= 0.6469$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_f= 0.6425$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.046$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00267$

Tabla 65. Profundidad digital 3 a 25 cm.

DIGITAL 3	
PROFUNDIDAD 30CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 15$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 30$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.039$	$e_0= 0.6452$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_f= 0.6412$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.051$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00243$

Tabla 66. Profundidad digital 3 a 30 cm.

DIGITAL 3	
PROFUNDIDAD 35CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})= 15$	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})= 20$
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
$x(\text{m})= 70$	$z(\text{m})= 35$
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.044$	$e_0= 0.6426$
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.012$	$e_f= 0.64$
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)= 0.056$	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00158$

Tabla 67. Profundidad digital 3 a 35 cm.

DIGITAL 3		PROFUNDIDAD 40CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})=$	15	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$	25
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.005
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.05	$\gamma(\text{m})=$	70
$x(\text{m})=$	70	$z(\text{m})=$	40
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.049	$e_0=$	0.6415
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.011	$e_f=$	0.6398
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.060	$\Delta e/1+\Delta e_0=$	0.00104

Tabla 68. Profundidad digital 3 a 40 cm.

DIGITAL 3		PROFUNDIDAD 45CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})=$	15	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$	30
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.005
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.05	$\gamma(\text{m})=$	70
$x(\text{m})=$	70	$z(\text{m})=$	45
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.054	$e_0=$	0.6526
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.011	$e_f=$	0.6514
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.065	$\Delta e/1+\Delta e_0=$	0.00073

Tabla 69. Profundidad digital 3 a 45 cm .

DIGITAL 3		PROFUNDIDAD 50CM	
$H_{\text{triturado}}(\text{cm})=$	15	$H_{\text{arcilla}}(\text{cm})=$	35
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.6	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g}/\text{cm}^3)=$	1.005
$\omega(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.05	$\gamma(\text{m})=$	70
$x(\text{m})=$	70	$z(\text{m})=$	50
$P_0(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.059	$e_0=$	0.6405
$\Delta P(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.011	$e_f=$	0.639
$P_f(\text{Kg}/\text{cm}^2)=$	0.070	$\Delta e/1+\Delta e_0=$	0.00091

Tabla 70. Profundidad digital 3 a 50 cm .

DIGITAL 3 PROFUNDIDAD 55CM	
H _{triturado} (cm)= 15	H _{arcilla} (cm)= 40
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg/cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
x(m)= 70	z(m)= 55
P ₀ (Kg/cm ²)= 0.064	e ₀ = 0.639
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)= 0.010$	e _f = 0.6382
P _f (Kg/cm ²)= 0.074	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00049$

Tabla 71. Profundidad digital 3 a 55 cm.

DIGITAL 3 PROFUNDIDAD 60CM	
H _{triturado} (cm)= 15	H _{arcilla} (cm)= 45
$\gamma'_{\text{triturado}}(\text{g/cm}^3)= 1.6$	$\gamma'_{\text{arcilla}}(\text{g/cm}^3)= 1.005$
$\omega(\text{Kg/cm}^2)= 0.05$	$\gamma(\text{m})= 70$
x(m)= 70	z(m)= 60
P ₀ (Kg/cm ²)= 0.069	e ₀ = 0.6385
$\Delta P(\text{Kg/cm}^2)= 0.010$	e _f = 0.6379
P _f (Kg/cm ²)= 0.079	$\Delta e/1+\Delta e_0= 0.00037$

Tabla 72. Profundidad digital 3 a 60 cm.

Una vez realizados los cálculos anteriores se procede a ordenarlos de una manera sencilla con el fin de estimar el área bajo la curva de $\frac{\Delta e}{1+e_0}$ VS profundidad, el cual corresponde al asentamiento total primario. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Consolidómetro digital 3							
profundidad Z [cm]	Espesor Arcilla [cm]	P ₀ [Kg/cm ²]	ΔP_y [Kg/cm ²]	P _F [KG/cm ²]	e ₀	e _f	$\frac{\Delta e}{1+e_0}$
15	0	0.024	0.012413	0.036	0.649	0.6445	0.002729
20	5	0.029	0.012302	0.041	0.6469	0.6425	0.002672
25	10	0.034	0.012134	0.046	0.6452	0.6423	0.001763
30	15	0.039	0.011907	0.051	0.6439	0.6412	0.001642
35	20	0.044	0.011623	0.056	0.6426	0.64	0.001583
40	25	0.049	0.011290	0.060	0.6415	0.6398	0.001036
45	30	0.054	0.010916	0.065	0.6405	0.6395	0.000610
50	35	0.059	0.010500	0.070	0.6399	0.639	0.000549
55	40	0.064	0.010100	0.074	0.639	0.6382	0.000488
60	45	0.069	0.009600	0.079	0.6385	0.6379	0.000366

Tabla 73. Datos de profundidades digital 3.

Los valores de las relaciones de vacíos inicial y final presentados en la tabla anterior se obtuvieron de la curva de consolidación correspondiente al ensayo realizado en el consolidómetro digital 3, esto se puede apreciar en las siguientes graficas:

En cada grafica se estimaron las relaciones de vacíos inicial y final correspondiente a dos profundidades con el fin de no saturar una sola gráfica.

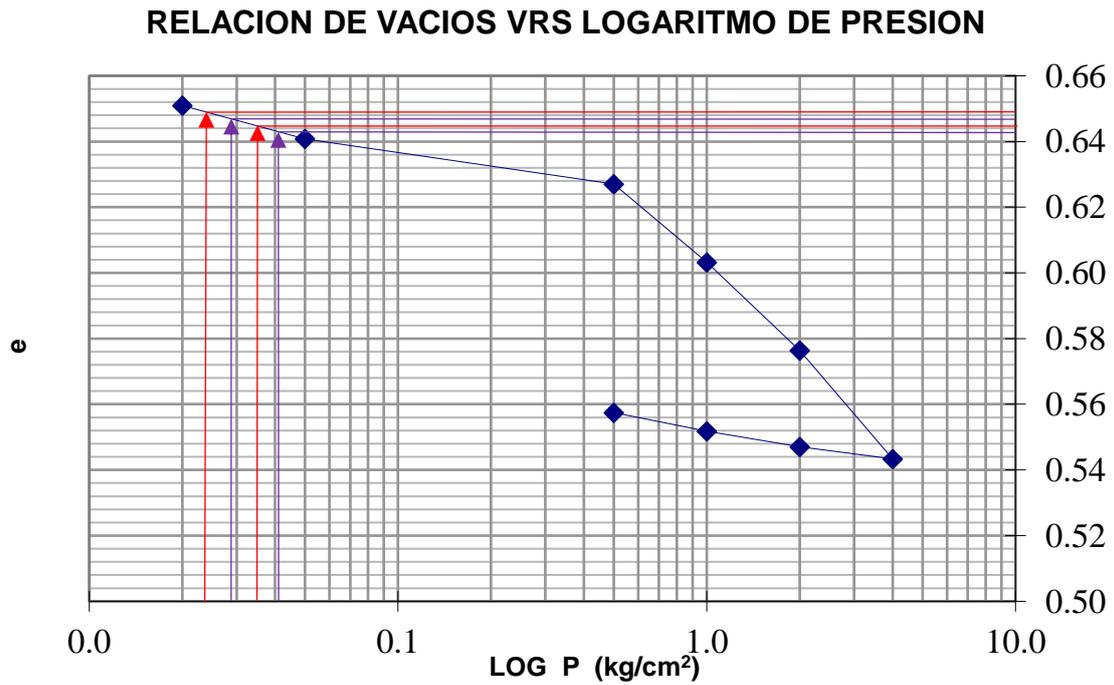


Figura 78. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

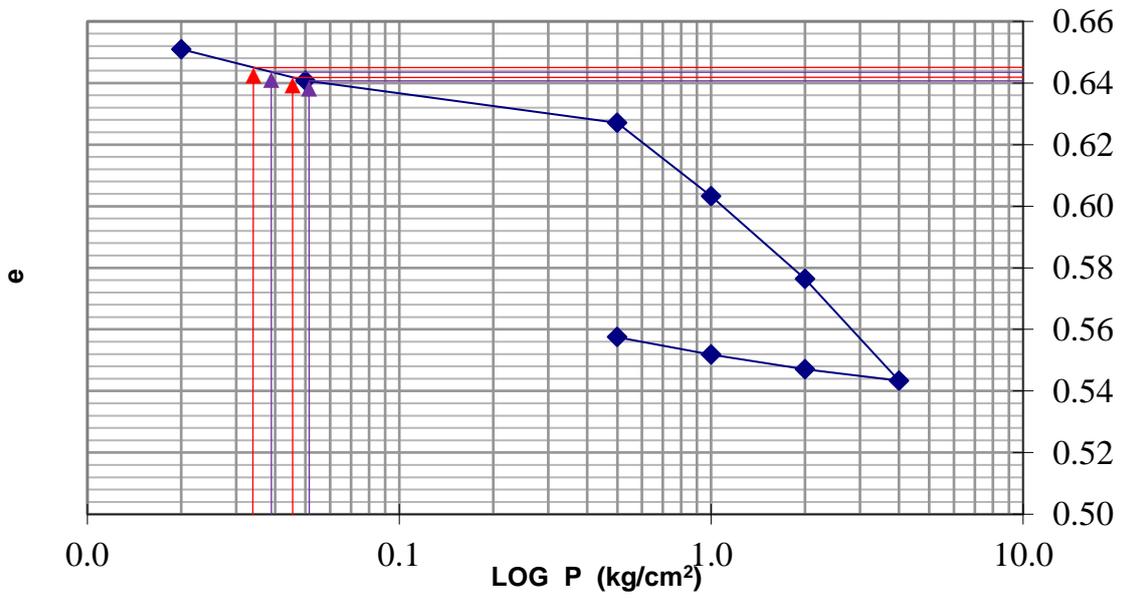


Figura 79. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

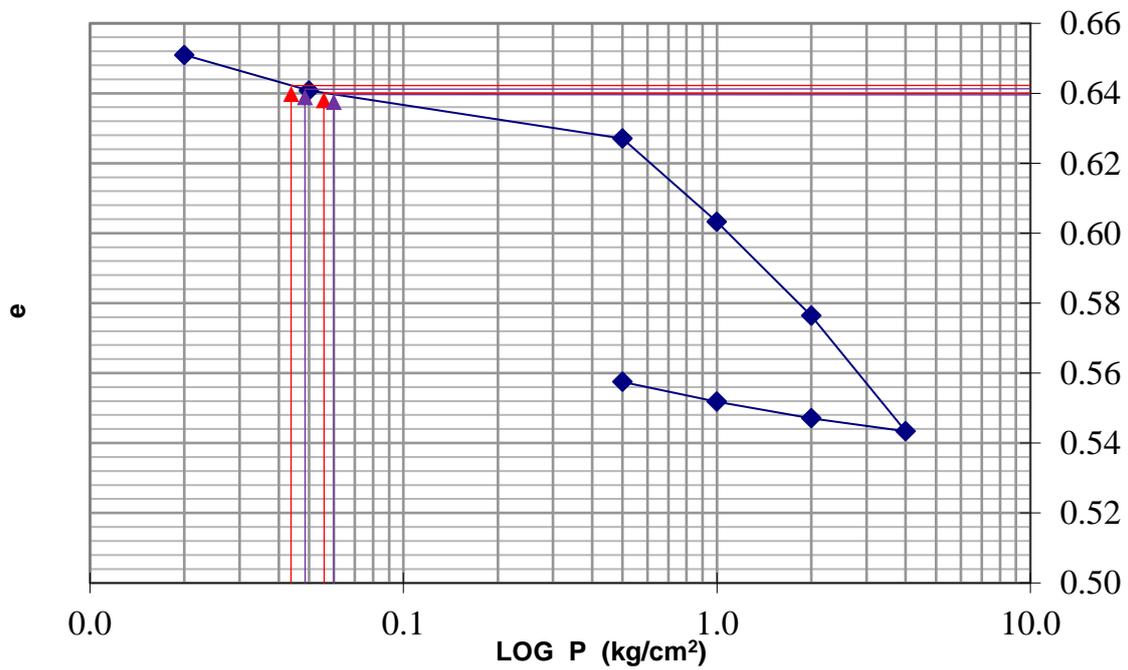


Figura 80. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

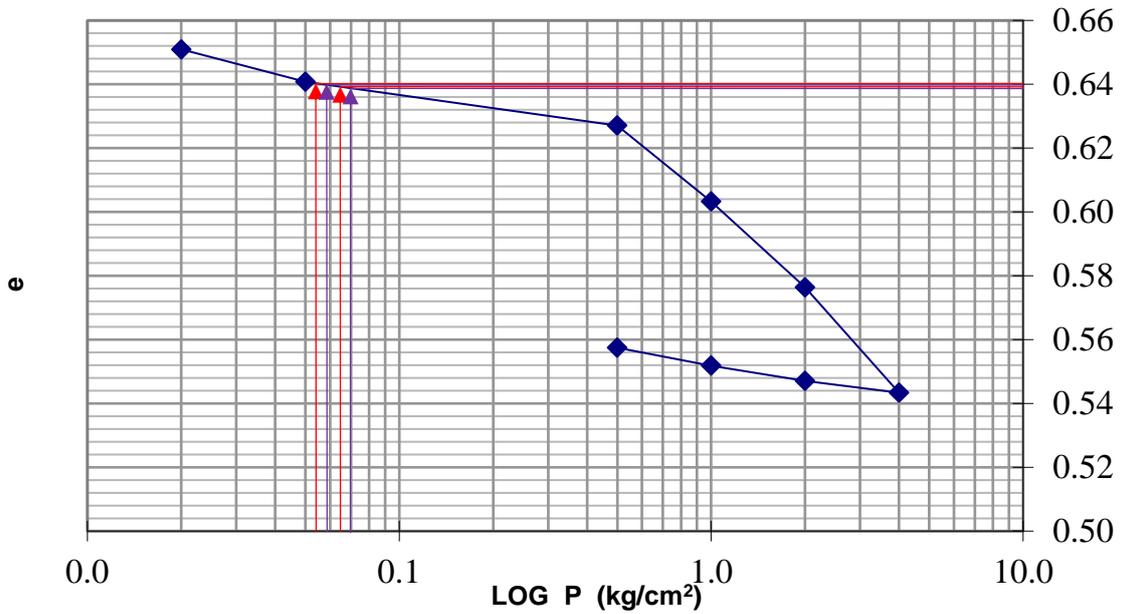


Figura 81. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION

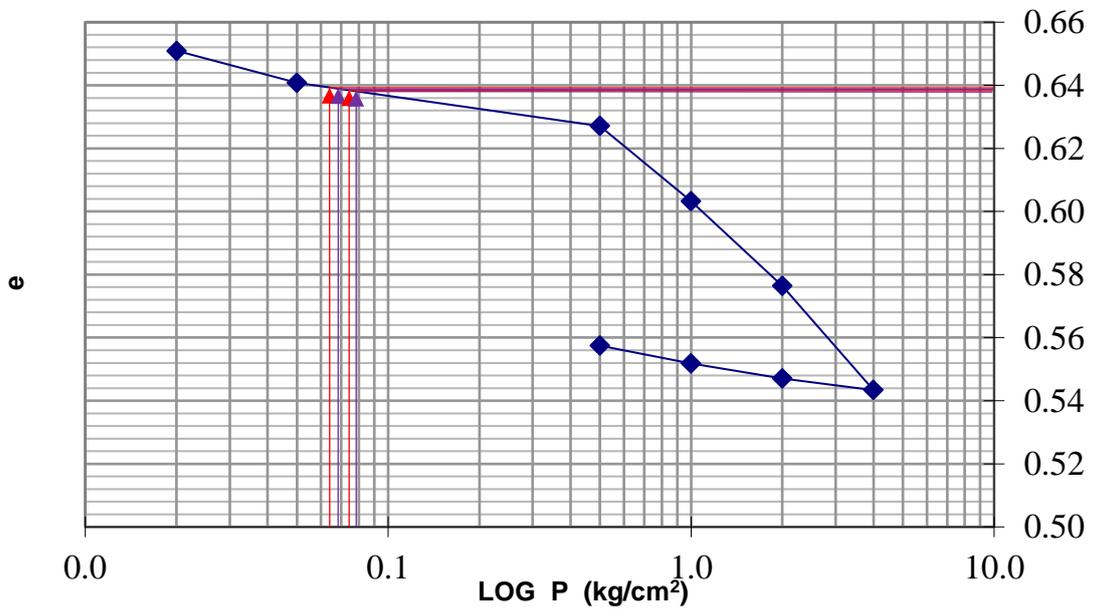


Figura 82. Curva de compresibilidad para cálculo de asentamiento digital 3.

Tal como se mencionó en el numeral 10.3 el asentamiento total primario corresponde al área bajo la curva $\frac{\Delta e}{1+e_0}$ VS profundidad. La *figura 83* muestra esa variación para el consolidómetro digital 3, así mismo se presenta la ecuación con mejor ajuste para la tendencia obtenida, esta ecuación se integró y su valor corresponde al asentamiento total primario (ver resultados en el numeral 10.5)

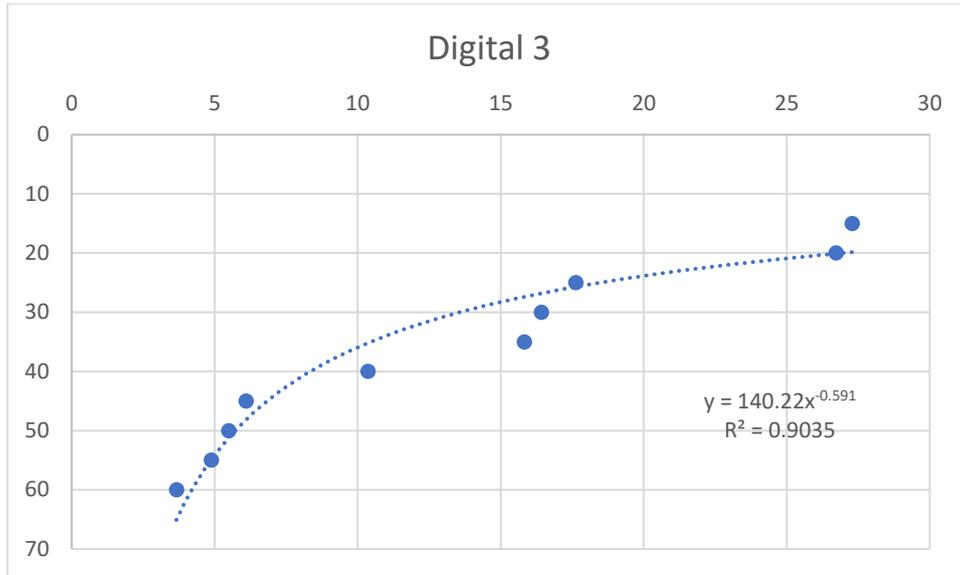


Figura 83. Variación para digital 3.

Al integrar la ecuación de la línea de tendencia obtenida para el consolidómetro digital 3 se obtiene un asentamiento total primario de 0.79 mm. Comparando este valor con el promedio de los asentamientos registrados en el modelo a escala se obtiene un porcentaje de error del 3.05%.

10.4. Comparación de asentamientos del modelo a escala con los obtenidos teóricamente para la fórmula 1

A continuación, se presentan los valores obtenidos en el modelo a escala:

DEFORMIMETRO No	ASENTAMIENTO TOTAL
1	0.726 mm
2	0.765 mm
3	0.706 mm
4	0.873 mm
PROMEDIO	0.768 mm

Tabla 74. Datos obtenidos en modelo a escala.

En la tabla 88 se presentan los resultados estimados con la ecuación 1, usando los parámetros obtenidos en los seis consolidómetros usados:

CONSOLIDÓMETRO	ASENTAMIENTO
Análogo 1	0.562 mm
Análogo 2	0.571 mm
Análogo 3	0.558 mm
Digital 1	0.816 mm
Digital 2	0.635 mm
Digital 3	0.685 mm

Tabla 75. Datos obtenidos con ecuación (1).

Se estimaron los porcentajes de error mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(\text{Valor Real} - \text{Valor Estimado})}{\text{Valor Real}} \times 100$$

Para el primer consolidómetro análogo tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.562)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{26.8\%}$$

Para el segundo consolidómetro análogo tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.571)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{25.7\%}$$

Para el tercer consolidómetro análogo tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.558)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{27.4\%}$$

Para el primer consolidómetro digital tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{|(0.768 - 0.816)|}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{6.2\%}$$

Para el segundo consolidómetro digital tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.635)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{17.3\%}$$

Para el tercer consolidómetro digital tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.685)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{10.8\%}$$

Los asentamientos estimados a partir de la ecuación 1 con base en los parámetros obtenidos en los 6 consolidómetros usados, presentan errores que van desde 6.2% hasta 27.4%.

10.5 Comparación de asentamientos del modelo a escala con los obtenidos según el método de la integral

A continuación, se presentan los valores obtenidos en el modelo a escala:

DEFORMIMETRO No	ASENTAMIENTO TOTAL
1	0.726 mm
2	0.765 mm
3	0.706 mm
4	0.873 mm
PROMEDIO	0.768 mm

Tabla 76. Datos obtenidos en modelo a escala.

En la tabla 90 se presentan los resultados obtenidos según la ecuación 2 con los parámetros obtenidos en los seis consolidómetros usados:

CONSOLIDÓMETRO	ASENTAMIENTO TOTAL
Análogo 1	0.544 mm
Análogo 2	0.669 mm
Análogo 3	0.475 mm
Digital 1	0.625 mm
Digital 2	0.636 mm
Digital 3	0.792 mm

Tabla 77. Datos obtenidos con ecuación (2).

Se estimarán los porcentajes de error mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(\text{Valor Real} - \text{Valor Estimado})}{\text{Valor Real}} \times 100$$

Para el primer consolidómetro análogo tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.544)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{29.27\%}$$

Para el segundo consolidómetro análogo tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.669)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{12.93\%}$$

Para el tercer consolidómetro análogo tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.475)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{38.24\%}$$

Para el primer consolidómetro digital tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{|(0.768 - 0.625)|}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{18.61\%}$$

Para el segundo consolidómetro digital tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.636)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{17.18\%}$$

Para el tercer consolidómetro digital tenemos:

$$\% \text{ de Error} = \frac{(0.768 - 0.792)}{0.768} \times 100$$

$$\% \text{ de Error} = \mathbf{3.05\%}$$

Los asentamientos estimados a partir de la ecuación 2 con base en los parámetros obtenidos en los 6 consolidómetros usados, presentan errores que van desde 3.05% hasta 38.24%.

A continuación, se presentan los porcentajes de error obtenidos al calcular los asentamientos a partir de la ecuación 1 y a partir de la ecuación 2 (integral)

CONSOLIDOMETRO	ERROR ECUACIÓN1 (%)	ERROR INTEGRAL (%)
ANALOGO 1	26.80	29.27
ANALOGO 2	25.70	12.93
ANALOGO 3	27.40	38.24
DIGITAL 1	6.20	18.61
DIGITAL 2	17.30	15.94
DIGITAL 3	10.80	3.05
PROMEDIO ANALOGO	26.60	26.80
PROMEDIO DIGITAL	11.50	12.90

Tabla 78. Porcentajes de error ecuación (1) y (2).

Al utilizar la ecuación 1 para estimar los asentamientos de un estrato arcilloso de 45cm de espesor drenado por las dos caras, producidos por una sobrecarga uniforme de 0.05kg/cm^2 , se obtuvo un error promedio de 26.6%, sin embargo, también puede observarse que los menores errores se obtuvieron al calcular las deformaciones con los equipos digitales (entre 6.2% y 17.3%). Por otra parte, también puede observarse que los mayores errores fueron obtenidos al estimar las deformaciones a partir de los parámetros obtenidos con los equipos análogos (25.7% y 27.4%)

Cuando se usa la ecuación 2 (integral) para estimar los asentamientos de un estrato arcilloso de 45cm de espesor drenado por las dos caras, producidos por una sobrecarga uniforme de 0.05kg/cm^2 , se obtiene un error promedio de 26.8%, sin embargo, también puede observarse que los menores errores se obtuvieron al calcular las deformaciones con los equipos digitales (entre 3.05% y 18.61%). Por otra parte, también puede observarse que los mayores errores fueron obtenidos al estimar las deformaciones a partir de los parámetros obtenidos con los equipos análogos (12.93% y 38.24%)

11. CONCLUSIONES

- Una vez analizadas diferentes fuentes de material, se decidió usar para este trabajo una arcilla de baja compresibilidad, ya que, si se hubiera utilizado una de alta compresibilidad, para contrarrestar la presión de expansión en los consolidómetros habría sido necesario usar una presión alta en el laboratorio. Al trasladar esta sobrecarga estática al modelo a escala, el peso a utilizar en el mismo sería 10 veces o más que el utilizado. Por este motivo el suelo objeto de estudio corresponde a una arcilla de baja compresibilidad perteneciente al grupo CL, según el SUCS y al grupo A-6 según el método AASHTO.
- Se determinó la humedad óptima con un valor de 12.7% y la densidad seca máxima de la arcilla con un valor de 1.88 gr/cm^3 mediante los ensayos de compactación tipo Proctor modificado. Estos parámetros se usaron tanto para compactar el estrato arcilloso en el modelo a escala, así como también para preparar las muestras del ensayo de consolidación.
- Después de 3 meses de someter el estrato de arcilla de 45cm de espesor y drenado por las dos caras a una sobrecarga estática de 0.05 Kg/cm^2 se obtuvo un valor promedio del asentamiento de 0.768 mm. A partir de la ecuación 1 se estimaron los asentamientos esperados en dicho modelo con base en los parámetros obtenidos en 6 ensayos de consolidación (3 análogos y 3 digitales), el asentamiento promedio obtenido por medio de dicha ecuación fue de 0.564 mm (consolidómetros análogos) y de 0.712 mm (consolidómetros digitales). Es decir, el asentamiento promedio estimado a partir de muestras ensayadas en los consolidómetros análogos es 1.36 veces menor al asentamiento promedio del modelo a escala, mientras que el asentamiento promedio estimado a partir de muestras ensayadas en los consolidómetros digitales es solamente 1.08 veces menor al del modelo a escala.
- Después de 3 meses de someter el estrato de arcilla de 45cm de espesor y drenado por las dos caras a una sobrecarga estática de 0.05 Kg/cm^2 se obtuvo un valor promedio del asentamiento de 0.768 mm. A partir de la ecuación 2 (integral) se estimaron los asentamientos esperados en dicho modelo con base en los parámetros obtenidos en 6 ensayos de consolidación (3 análogos y 3 digitales), el asentamiento promedio obtenido por medio de dicha ecuación fue de 0.562 mm (consolidómetros análogos) y de 0.684 mm (consolidómetros digitales). Es decir, el asentamiento promedio estimado a partir de muestras ensayadas en los consolidómetros análogos es 1.37 veces menor al asentamiento promedio del modelo a escala, mientras que el asentamiento promedio estimado a partir de muestras ensayadas en los consolidómetros digitales es solamente 1.12 veces menor al del modelo a escala
- Según lo observado en este trabajo, puede concluirse que los asentamientos estimados a partir de parámetros obtenidos en ensayos de consolidación

utilizando equipos digitales se acercan más a los obtenidos en estratos reales que aquellos calculados a partir de parámetros obtenidos en equipos análogos.

- En cuanto a los modelos matemáticos (ecuaciones 1 y 2) utilizados para el cálculo de asentamientos no se observó gran diferencia entre ellos, es decir, que para los resultados obtenidos en este trabajo de grado puede concluirse que más que depender del método utilizado, estos varían según la precisión de los equipos usados. Esto justifica plenamente la inversión realizada por la facultad de Ingeniería Civil con la adquisición de los 3 consolidómetros digitales.
- Los equipos digitales tienen grandes ventajas sobre los análogos, entre ellas: en los equipos digitales la toma de datos es automática, minimizando errores humanos, así mismo en estos equipos digitales los ciclos de carga pueden detenerse, bien sea de forma manual o de manera automática cuando se da el 100% de la consolidación (sin importar la hora), y además los equipos digitales usan deformímetros de mayor precisión que los usados en los análogos.
- Para una mejor apropiación del conocimiento por parte del personal del laboratorio (profesores, instructores y estudiantes) se elaboró un manual de operación de los consolidómetros digitales, el cual se incluye en el capítulo 8.

12. RECOMENDACIONES

- Para esfuerzos normales bajos, es conveniente dejar las muestras saturándolas antes de ingresarlas a la cámara del consolidómetro ya que, si la presión de expansión supera a dichos esfuerzos, el consolidómetro registrará datos equivocados o no se registrará ninguno.
- Antes de encender el equipo y verificar conexiones, asegurar que la fuente se encuentre conectada a un estabilizador y este se encuentre conectado a fuentes alternas de energía para evitar perder los datos en caso de variaciones de voltaje.
- Para usuarios que están aprendiendo a usar los consolidómetros digitales y su software, se recomienda tomar los datos de manera manual, como medio de seguridad para poder continuar con el ensayo así los datos capturados de manera automática se pierdan por diversos motivos.
- El modelo a escala se encontraba en estado saturado permanentemente. Con el fin de realizar esta labor de la manera más ambiental posible se utilizó una manguera de aguas lluvia procedente de un tanque de almacenamiento de la universidad. Por esta razón se recomienda para trabajos similares a este, estar verificando permanentemente el nivel del agua tanto en el modelo como en el tanque de almacenamiento, para tomar las medidas de contingencia respectivas.
- Se recomienda tener una señalización adecuada para el modelo a escala, así como también para los ensayos de consolidación dentro del laboratorio, debido a que durante la ejecución del ensayo es posible que el personal de aseo y el personal de seguridad cierre la manguera y también es posible que en los laboratorios algunos estudiantes pasen cerca de los consolidómetros,
- Para futuros trabajos de grado se recomienda ubicar el modelo a escala en un lugar con techo, debido a que al estar en la intemperie bajo una carpa es posible que el agua afecte las lecturas en los deformímetros o que los dañe.

13. BIBLIOGRAFÍAS

Pablo Carrillo (2009). *ASENTAMIENTOS EN SUELOS ARCILLOSOS EN CASOS EN QUE LOS CRITERIOS 1-D Y CONSOLIDACION PRIMARIA NO SON SUFICIENTES*. Santiago de Chile.

Juárez Badillo (2005). *Mecánica de suelos Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos*. México. Limusa.

B. M. Das (2001). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, Sacramento: Editorial Thompson international.

INV E 123-13 (2014). *Instituto Nacional de Vías*. Bogotá, Colombia: INVÍAS.

INV E 125-13 (2014). *Instituto Nacional de Vías*. Bogotá, Colombia: INVÍAS.

INV E 126-13 (2014). *Instituto Nacional de Vías*. Bogotá, Colombia: INVÍAS.

INV E 142-13 (2014). *Instituto Nacional de Vías*. Bogotá, Colombia: INVÍAS.

INV E 151-12 (2014). *Instituto Nacional de Vías*. Bogotá, Colombia: INVÍAS.

Peter L. Berry Y David Reid (1993). *Mecánica de suelos*, McGraw-Hill INTERAMERICANA, S.A, UK.

José A. Jiménez, José L. de Justo. (1975). *Geotecnia y Cimientos I, propiedades de los suelos y de las rocas*. Madrid. Ed Rueda.

R. Whitlow (1994). *Fundamentos de mecánica de suelos*, Ed Compañía Editorial Continental.

JOSEPH E. BOWLES (1980). *Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil*, Ed. McGraw-Hill. México

GEORGE B. SOWERS. (1972). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*. Ed Limusa- Wiley México

14. ANEXOS

ANEXO A
ENSAYOS GRANULOMETRICOS



Anexo: 1

Fecha de ensayo: 14 Agosto 2017

Director de proyecto:
Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

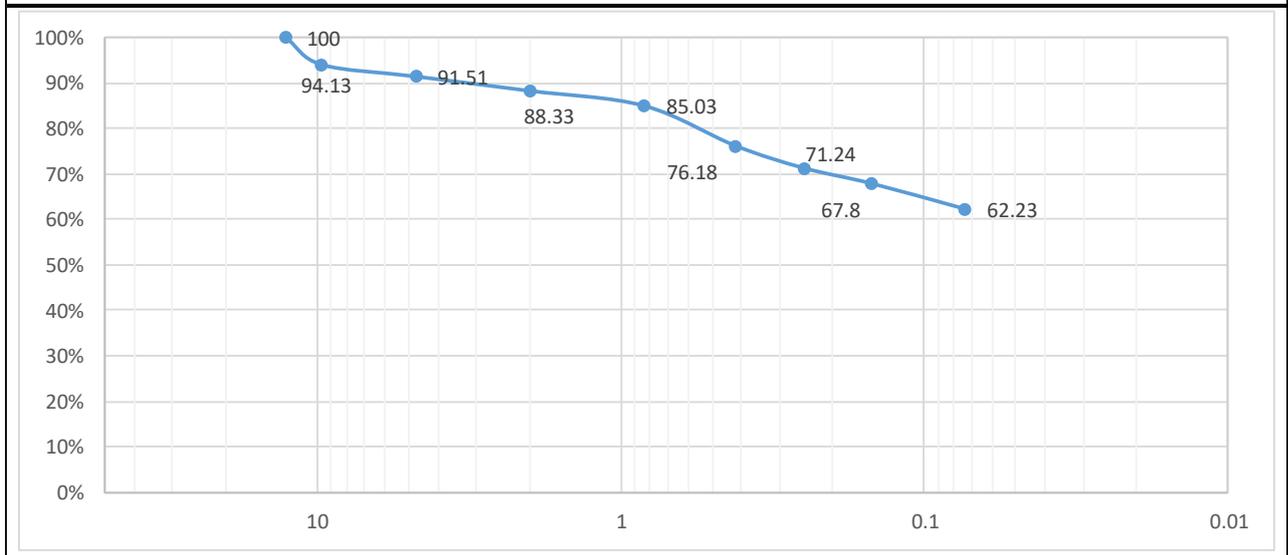
Ensayo: Análisis granulométrico de suelos por tamizado

Norma: INV-123

DATOS

Peso seco: 1000.08gr			P. después lavado: 408.82gr	
Malla No	Abertura	Peso suelo retenido (gr)	% retenido parcial	% que pasa
1/2"	12.7	0	0	100
3/8"	9.72	58.71	5.87	94.13
No 4	4.75	26.29	2.62	91.51
10	2	31.83	3.18	88.33
20	0.84	33.06	3.3	85.03
40	0.42	88.51	8.85	76.18
60	0.25	49.44	4.94	71.24
100	0.149	34.4	3.44	67.8
200	0.074	55.73	5.57	62.23
Pasa 200		621.31	62.12	
Porcentajes obtenidos		Grava	Fino	Arena
		8.49%	62.12%	29.29%

GRÁFICA GRANULOMÉTRICA 1





Anexo: 2

Fecha de ensayo: 14 Agosto 2017

Director de proyecto:
Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

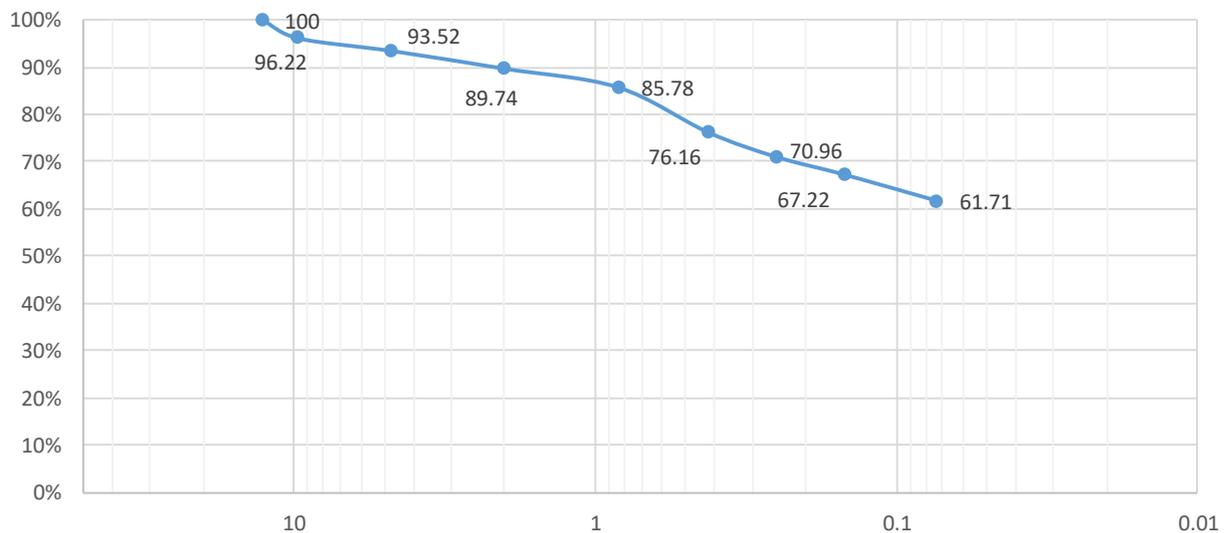
Ensayo: Análisis granulométrico de suelos por tamizado

Norma: INV-123

DATOS

Peso seco: 1000.1gr			P. después lavado: 499.55gr	
Malla No	Abertura	Peso suelo retenido (gr)	% retenido parcial	% que pasa
1/2"	12.7	0	0	100
3/8"	9.72	37.88	3.78	96.22
No 4	4.75	27.04	2.7	93.52
10	2	37.84	3.78	89.74
20	0.84	39.64	3.96	85.78
40	0.42	96.24	9.62	76.16
60	0.25	52.07	5.2	70.96
100	0.149	37.49	3.74	67.22
200	0.074	55.1	5.51	61.71
Pasa 200		617.4	61.72	
Porcentajes obtenidos		Grava	Fino	Arena
		6.48%	61.72%	31.80%

GRÁFICA GRANULOMÉTRICA 2





Anexo: 3

Fecha de ensayo: 14 Agosto 2017

Director de proyecto:
Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

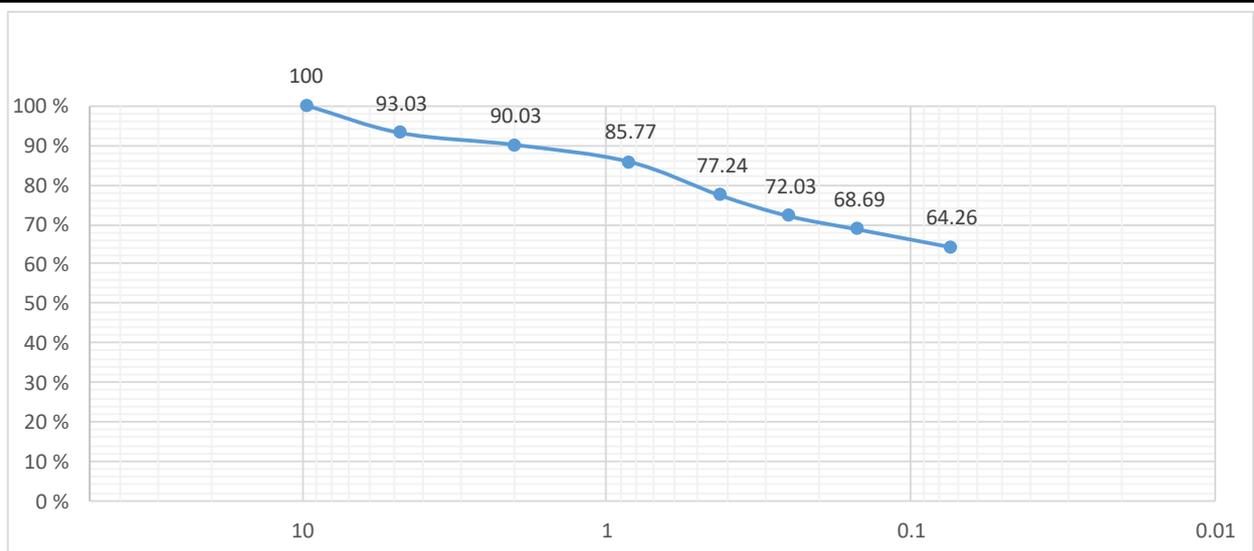
Ensayo: Análisis granulométrico de suelos por tamizado

Norma: INV-123

DATOS

Peso seco: 1000gr			P. después lavado: 356.8gr	
Malla No	Abertura	Peso suelo retenido (gr)	% retenido parcial	% que pasa
3/8"	9.72	0	0	100
No 4	4.75	69.7	6.97	93.03
10	2	30	3	90.03
20	0.84	42.6	4.26	85.77
40	0.42	85.3	8.53	77.24
60	0.25	52.1	5.21	72.03
100	0.149	33.4	3.34	68.69
200	0.074	44.3	4.43	64.26
Pasa 200		638.9	63.89	
Porcentajes obtenidos		Grava	Fino	Arena
		6.97%	63.89%	29.14%

GRÁFICA GRANULOMÉTRICA 3



ANEXO B
ENSAYOS DE LÍMITES



Anexo: 4

Fecha de ensayo: 15 Agosto 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Determinación Límite Líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Norma: INV-125, INV-126

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba No	Capsula No	Número de golpes	Peso cápsula+suelo húmedo	Peso cápsula+suelo seco	Peso del agua (Ww)	Peso cápsula	Peso suelo seco (Ws)	Contenido de agua
1	90	31	13.7	12.48	1.22	8.8	3.68	33.15
2	80	27	13.4	12.25	1.15	8.9	3.35	34.33
3	126	24	10.4	9.26	1.14	7	3.2	35.63
4	134	22	12.7	11.56	1.14	8.5	3.06	37.25
Promedio								35.52

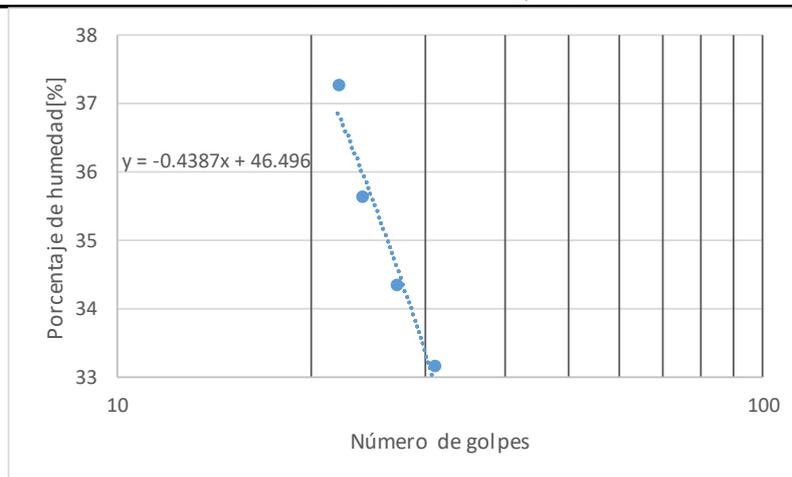
LÍMITE PLÁSTICO

1	55	-	28.5	28.2	0.3	26.8	1.4	21.43
2	307	-	28.9	27.7	0.2	26.7	1	20.00
3	162	-	41.99	41.8	0.19	40.87	0.93	20.43
Promedio								20.62

ÍNDICE DE PLASTICIDAD

14.90

GRÁFICA LÍMITE LÍQUIDO 1





Anexo: 5

Fecha de ensayo: 15 Agosto 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Determinación límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Norma: INV-125, INV-126

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba No	Capsula No	Número de golpes	Peso cápsula+suelo húmedo	Peso cápsula+suelo seco	Peso del agua (Ww)	Peso cápsula	Peso suelo seco (Ws)	Contenido de agua
1	138	37	13.7	12.38	1.32	8.4	3.98	33.17
2	1003	28	12.2	10.86	1.34	7	3.86	34.72
3	42	25	12.7	11.6	1.1	8.5	3.1	35.48
4	675	21	10.6	9.6	1	6.92	2.68	37.31
Promedio								35.84

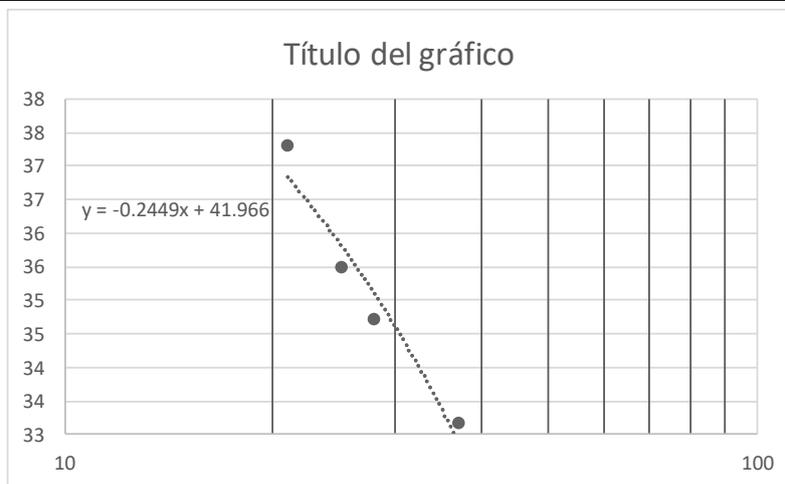
LÍMITE PLÁSTICO

1	27	-	22.26	22	0.26	20.73	1.27	20.47
2	12	-	22.43	22.2	0.23	21.08	1.12	20.54
3	23	-	29.29	28.9	0.39	27.2	1.7	22.94
Promedio								21.32

ÍNDICE DE PLASTICIDAD

14.52

GRÁFICA LÍMITE LÍQUIDO 2





Anexo: 6

Fecha de ensayo: 15 Agosto 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Determinación límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Norma: INV-125, INV-126

LÍMITE LÍQUIDO

Prueba No	Capsula No	Número de golpes	Peso cápsula+suelo húmedo	Peso cápsula+suelo seco	Peso del agua (Ww)	Peso cápsula	Peso suelo seco (Ws)	Contenido de agua
1	29	39	11.5	10.32	1.18	6.76	3.56	33.15
2	88	28	12.03	11.19	0.84	8.78	2.41	34.85
3	69	23	14.17	12.25	1.92	6.95	5.3	36.23
4	888	20	12.25	10.8	1.45	6.89	3.91	37.08
Promedio								35.83

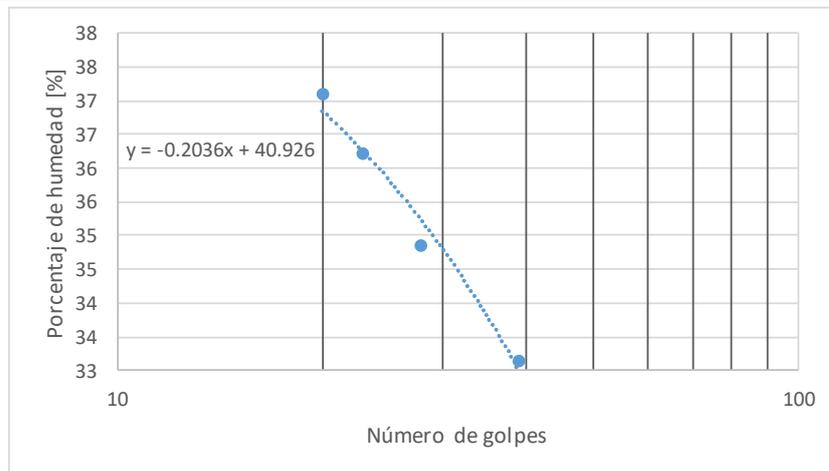
LÍMITE PLÁSTICO

1	51	-	28.02	27.82	0.2	26.95	0.87	22.99
2	57	-	28.46	28.3	0.16	27.35	0.95	16.84
3	303	-	28.7	28.4	0.3	27.07	1.33	22.56
Promedio								20.80

ÍNDICE DE PLASTICIDAD

15.03

GRÁFICA LÍMITE LÍQUIDO 3



ANEXO C
ENSAYOS MODIFICADOS DE COMPACTACIÓN



Anexo: 7

Fecha de ensayo: 6 Septiembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

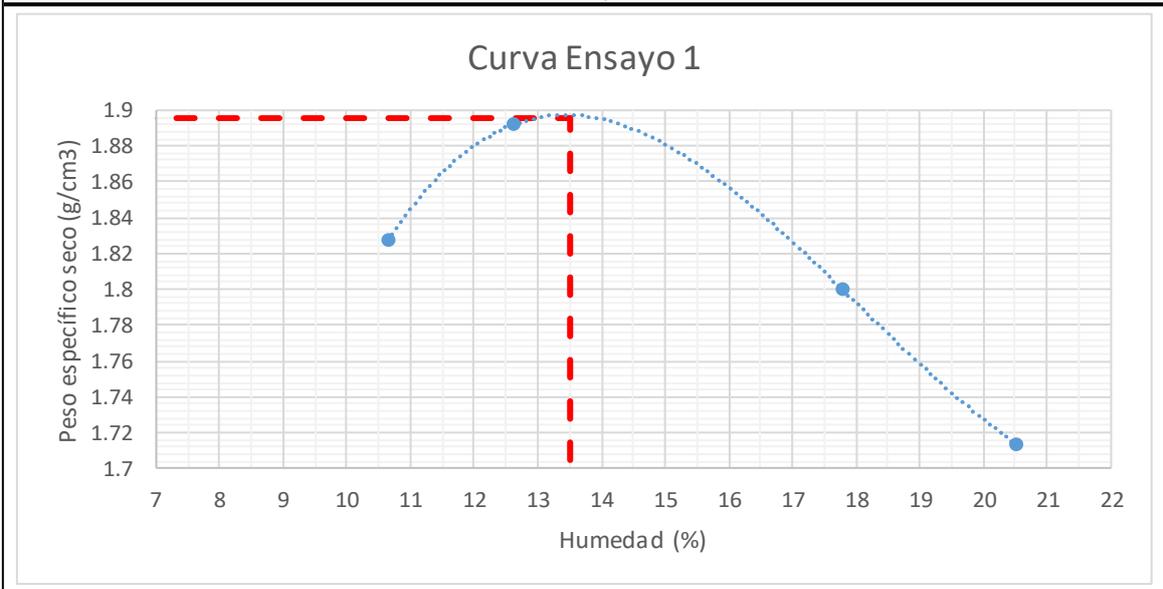
Ensayo: Ensayo modificado de compactación

Norma: INV-141

TOMA DE DATOS

Determinación	1	2	3	4
Peso molde+suelo húmedo	5910	6010	6000	5950
Peso molde	4052	4052	4052	4052
Peso suelo húmedo	1858	1958	1948	1898
Peso específico húmedo	2.02	2.13	2.12	2.07
Humedad				
Capsula No.	120	143	128	111
Peso capsula+suelo húmedo	21.62	24.06	15.77	29.2
Peso capsula+suelo seco	20.36	22.1	14.45	25.37
Peso del agua	1.26	1.96	1.32	3.83
Peso capsula	8.53	6.57	7.03	6.7
Peso suelo seco	11.83	15.53	7.42	18.67
Contenido de agua	10.65	12.62	17.79	20.51
Peso específico seco				
Peso específico seco	1.83	1.89	1.80	1.71
Humedad óptima	13.50%			
Densidad máxima seca	1.89			

Gráfica compactación





Anexo: 8

Fecha de ensayo: 6 Septiembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Ensayo modificado de compactación

Norma: INV-141

TOMA DE DATOS

Determinación	1	2	3	4
Peso molde+suelo húmedo	5800	5980	5960	5888
Peso molde	4052	4052	4052	4052
Peso suelo húmedo	1748	1928	1908	1836
Peso específico húmedo	1.90	2.10	2.08	2.00

Humedad

Capsula No.	88	102	10	888
Peso capsula+suelo húmedo	24.3	36.04	19.88	22.16
Peso capsula+suelo seco	23	32.6	18.1	19.7
Peso del agua	1.3	3.44	1.78	2.46
Peso capsula	8.8	8.7	7	6.9
Peso suelo seco	14.2	23.9	11.1	12.8
Contenido de agua	9.15	14.39	16.04	19.22

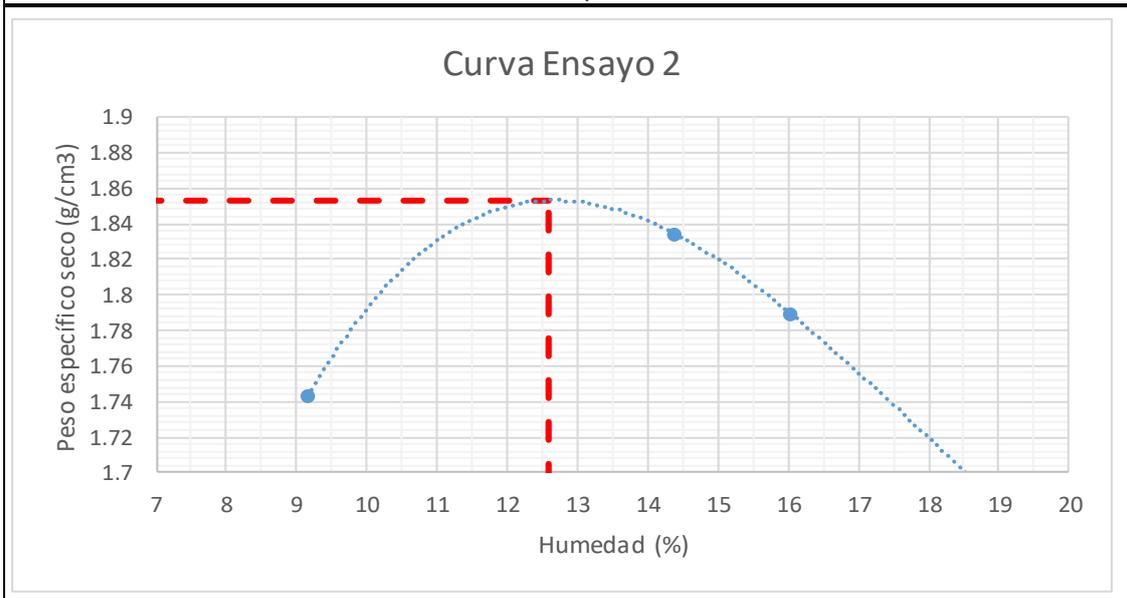
Peso específico seco

Peso específico seco	1.74	1.83	1.79	1.68
----------------------	------	------	------	------

Humedad óptima **12.60%**

Densidad máxima seca **1.85**

Gráfica compactación





Anexo: 9

Fecha de ensayo: 6 Septiembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Ensayo modificado de compactación

Norma: INV-141

TOMA DE DATOS

Determinación	1	2	3	4
Peso molde+suelo húmedo	5860	6010	6000	5950
Peso molde	4052	4052	4052	4052
Peso suelo húmedo	1808	1958	1948	1898
Peso específico húmedo	1.97	2.13	2.12	2.07

Humedad

Capsula No.	78	142	76	128
Peso capsula+suelo húmedo	23.72	25.06	19.77	28.2
Peso capsula+suelo seco	22.6	22.85	18.06	24.33
Peso del agua	1.12	2.21	1.71	3.87
Peso capsula	8.53	6.57	7.03	6.7
Peso suelo seco	14.07	16.28	11.03	17.63
Contenido de agua	7.96	13.57	15.50	21.95

Peso específico seco

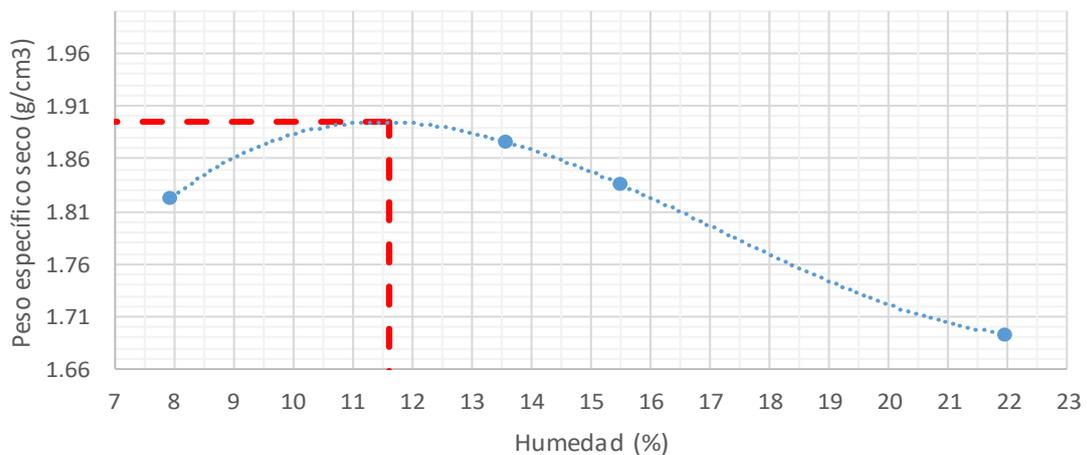
Peso específico seco	1.82	1.88	1.84	1.69
----------------------	------	------	------	------

Humedad óptima **12%**

Densidad máxima seca **1.89**

Gráfica compactación

Curva ensayo 3



ANEXO D
ENSAYO CONSOLIDACIÓN EN ANALOGO 1



Anexo: 10

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

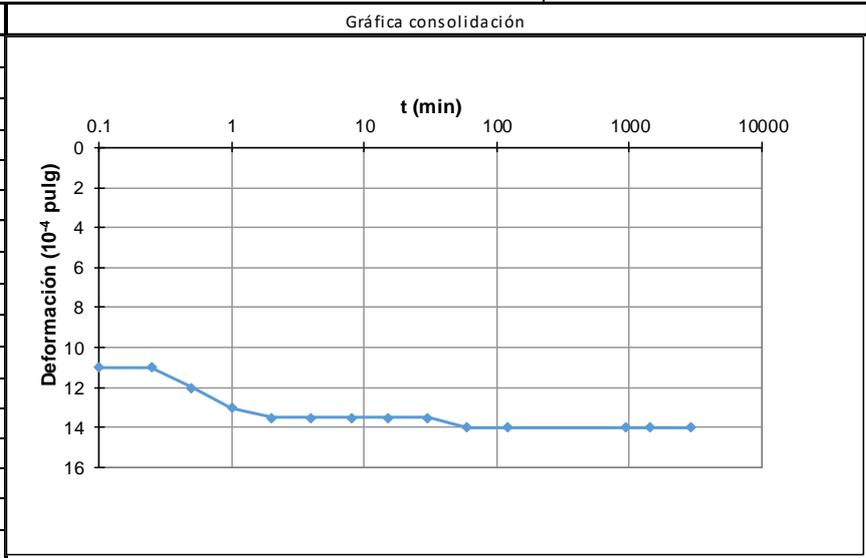
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

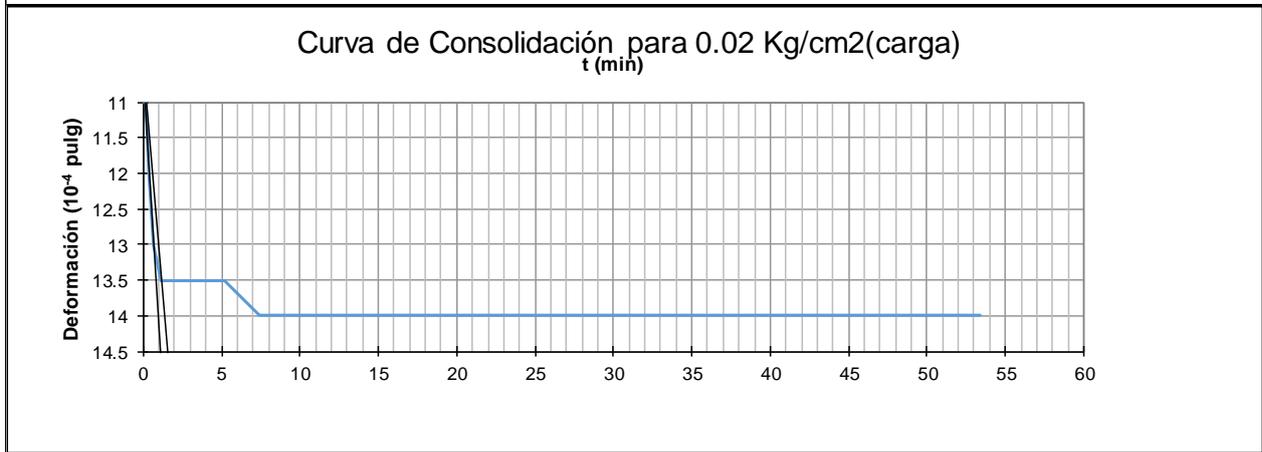
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS	
$\sigma=0.02 \text{ Kg/cm}^2(\text{carga})$	
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)
0	0
0.1	11
0.25	11
0.5	12
1	13
2	13.5
4	13.5
8	13.5
15	13.5
30	13.5
60	14
120	14
930	14
1440	14
2880	14



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 11

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

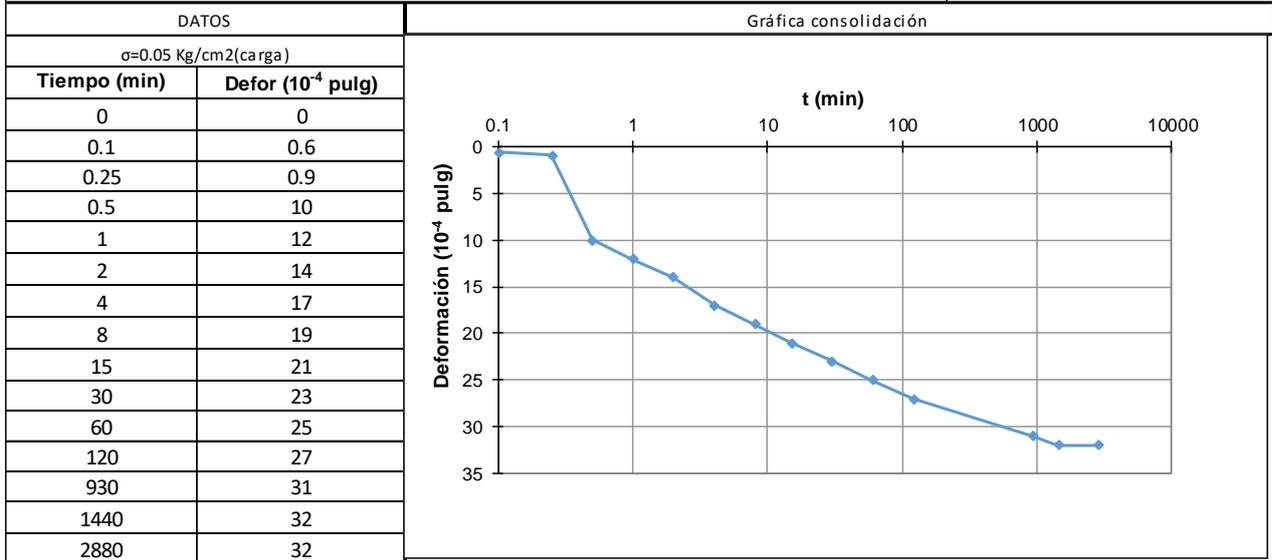
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

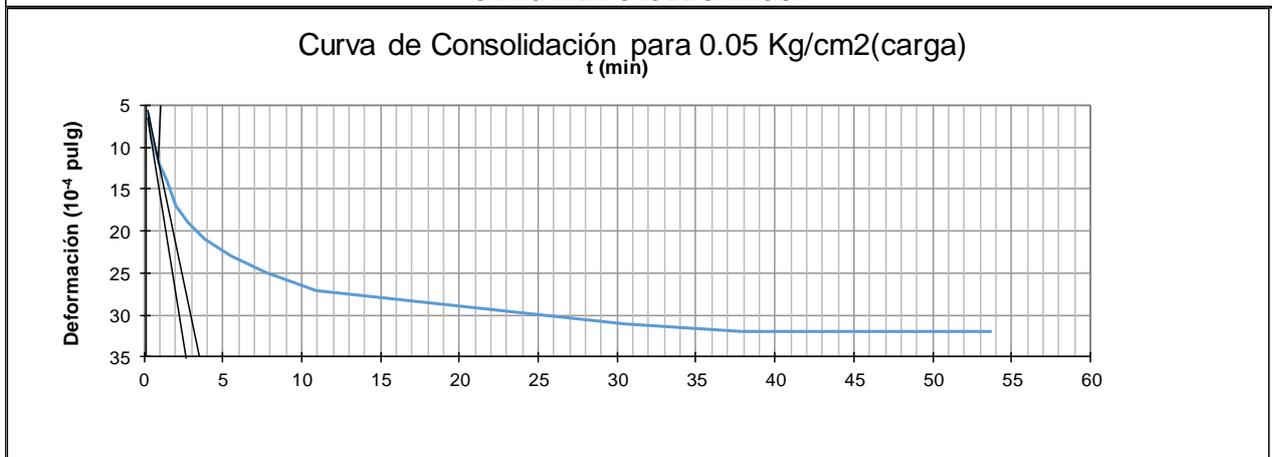
ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 12

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

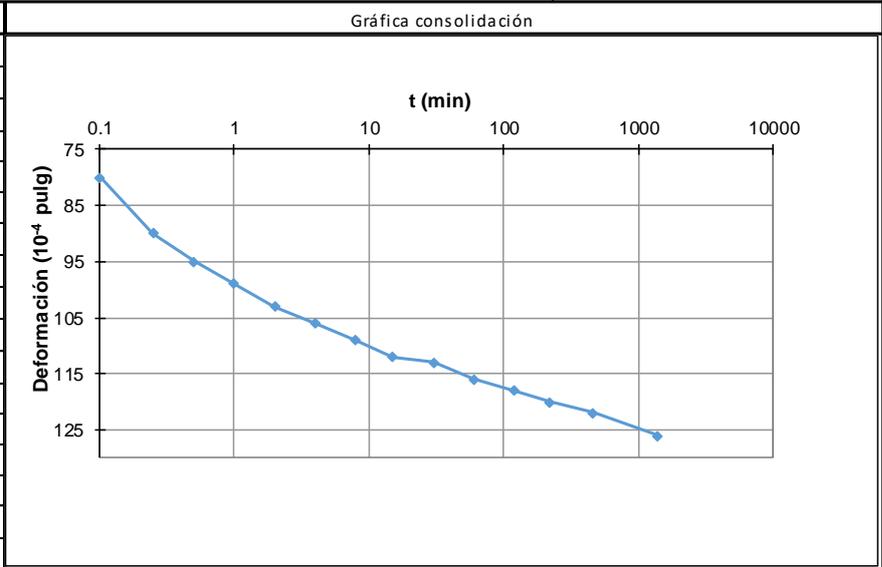
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

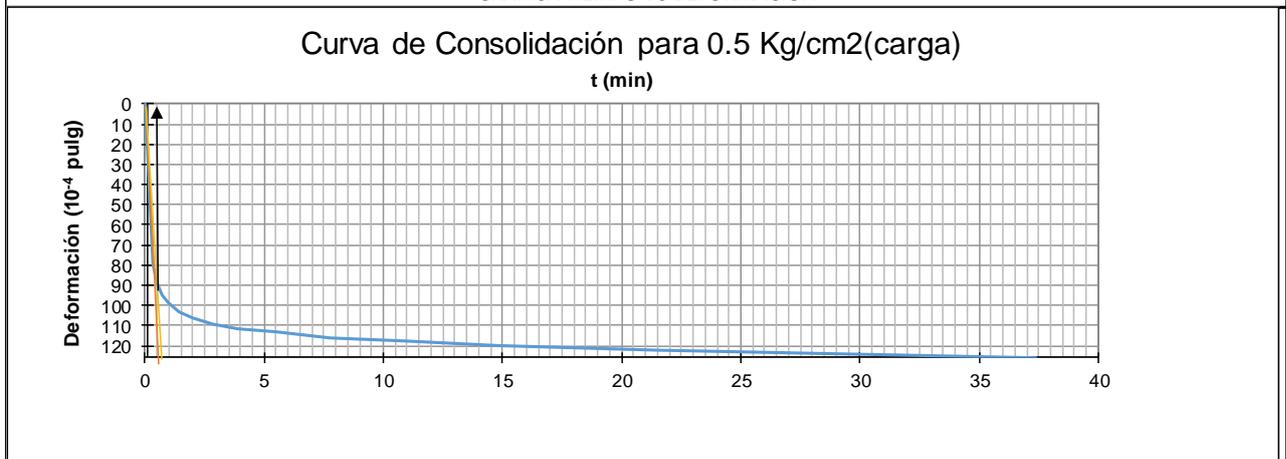
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS	
$\sigma=0.5 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)	
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)
0	0
0.1	80
0.25	90
0.5	95
1	99
2	103
4	106
8	109
15	112
30	113
60	116
120	118
220	120
460	122
1400	126



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 13

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

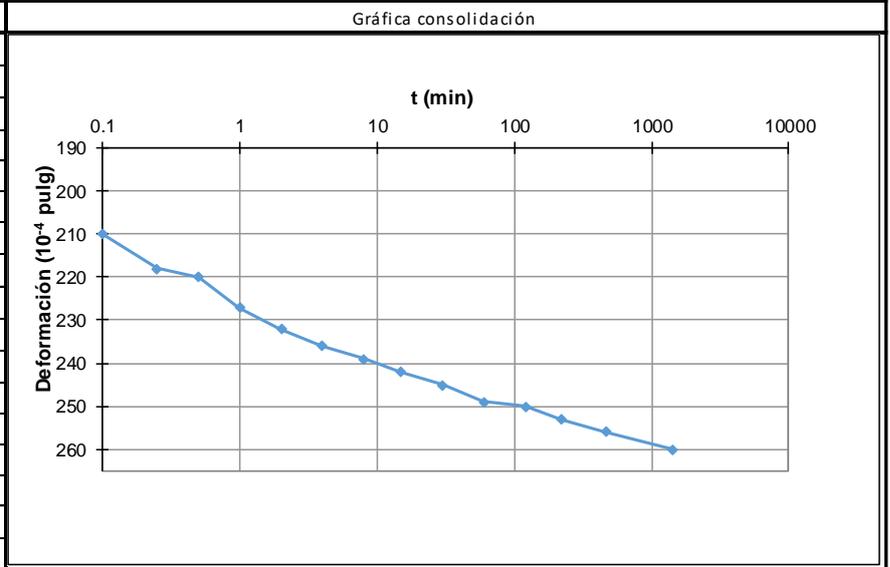
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

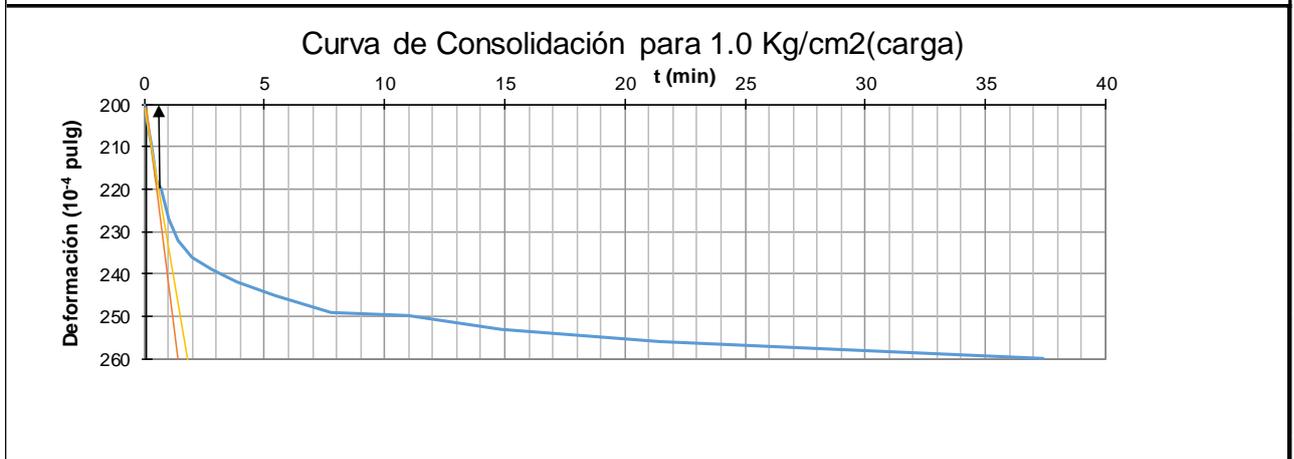
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS	
σ=1 Kg/cm2(carga)	
Tiempo (min)	Deform (10 ⁻⁴ pulg)
0	200
0.1	210
0.25	218
0.5	220
1	227
2	232
4	236
8	239
15	242
30	245
60	249
120	250
220	253
460	256
1400	260



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 14

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

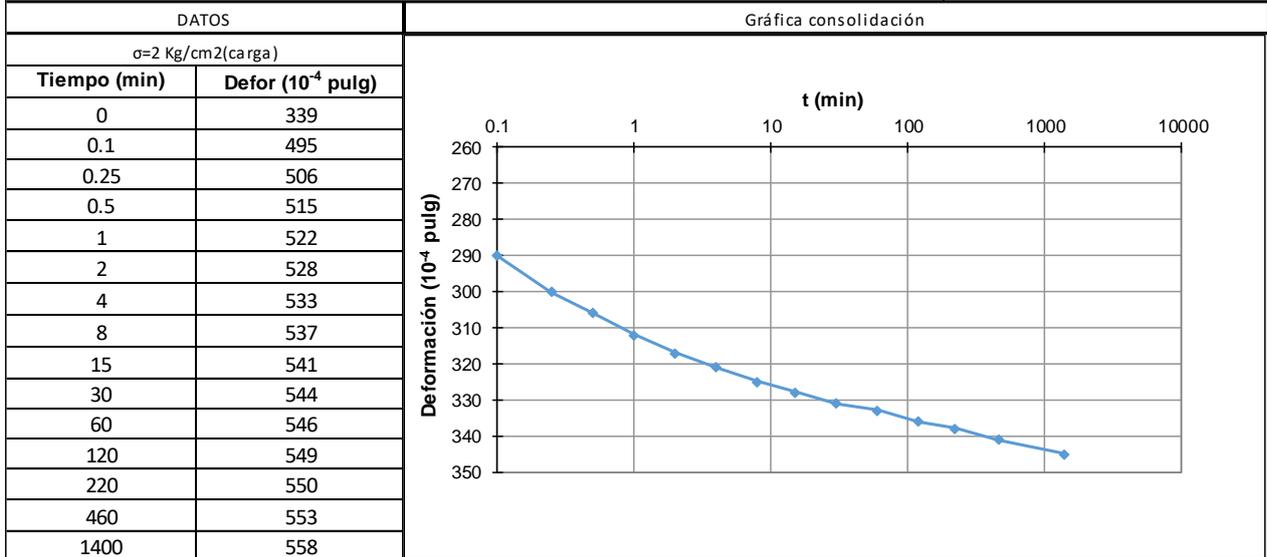
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

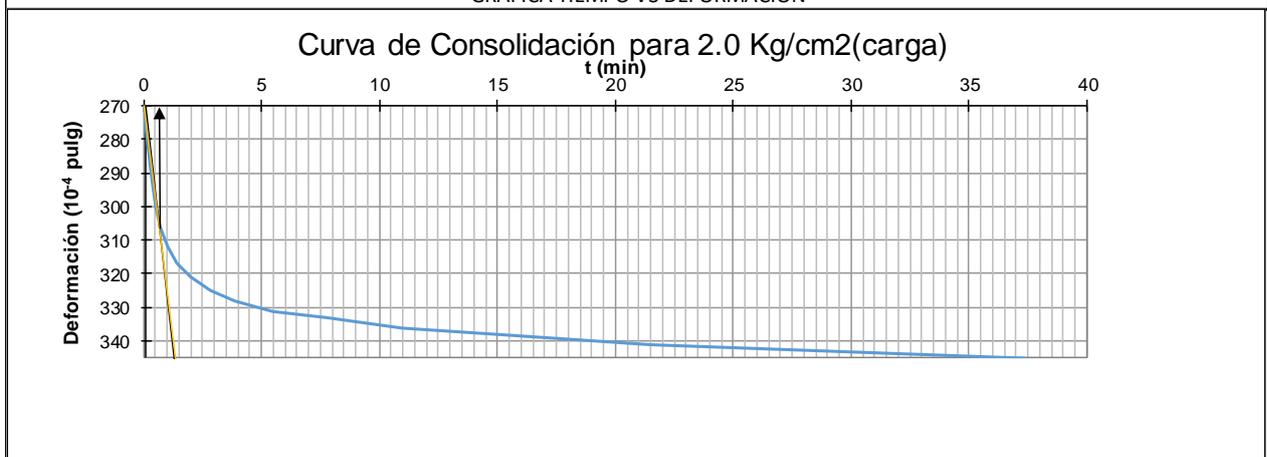
ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 15

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

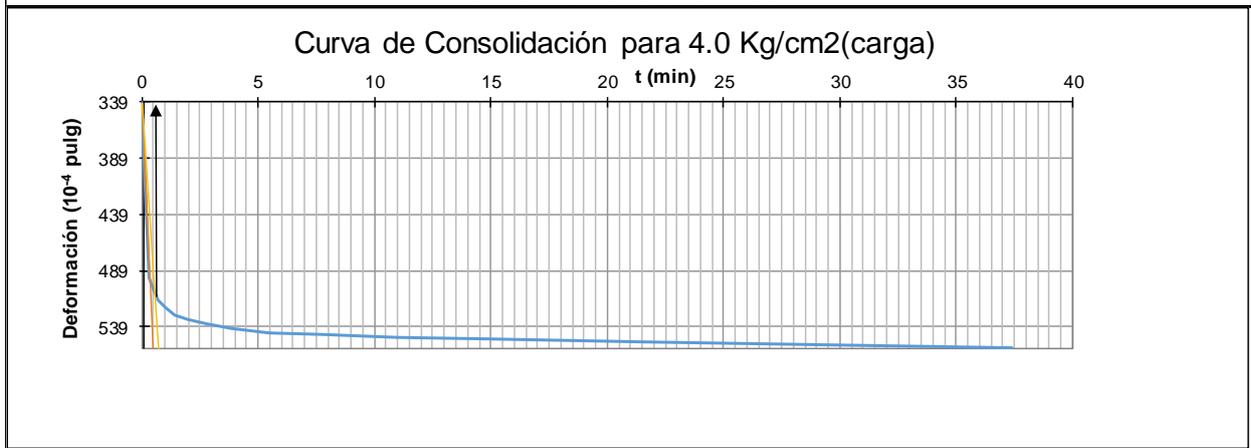
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS	
$\sigma=4 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)	
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)
0	339
0.1	495
0.25	506
0.5	515
1	522
2	528
4	533
8	537
15	541
30	544
60	546
120	549
220	550
460	553
1400	558



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 16

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

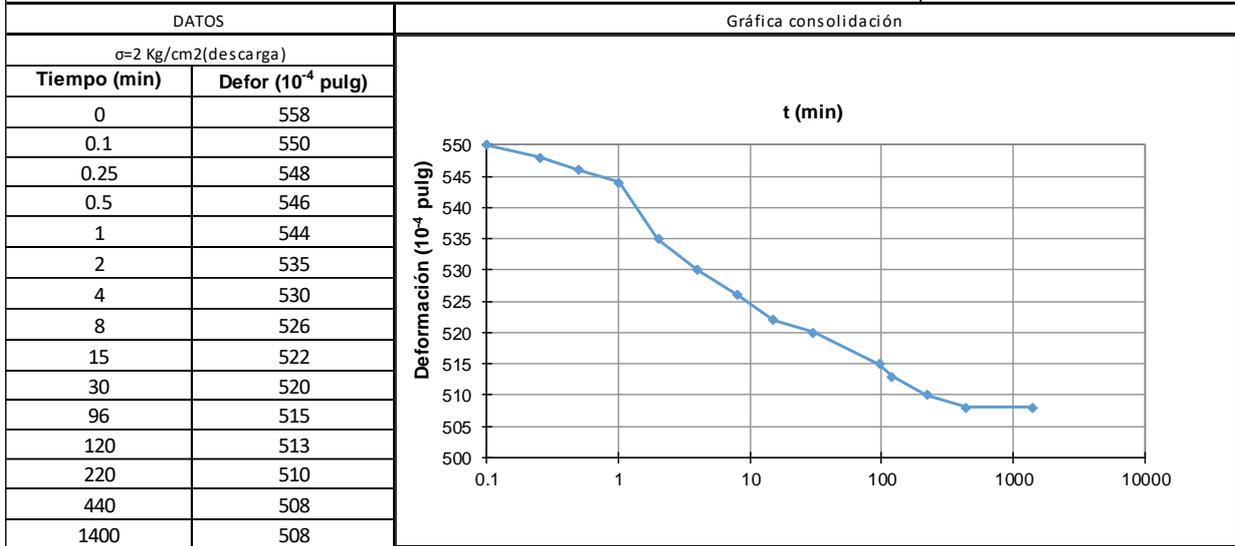
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



Anexo: 17

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

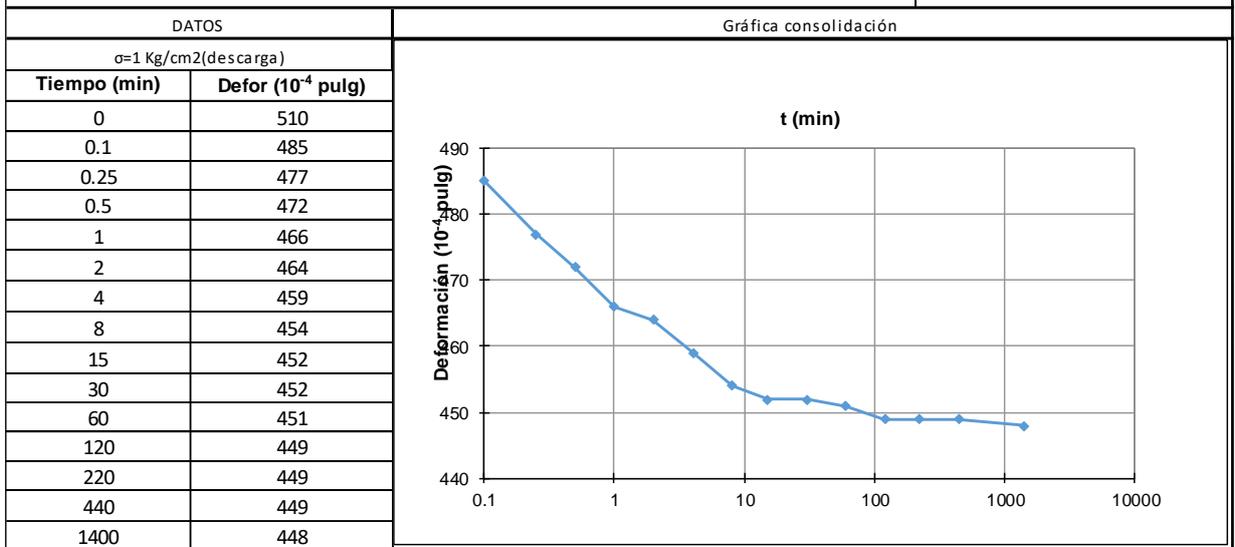
Director de proyecto: Gerardo Bautista

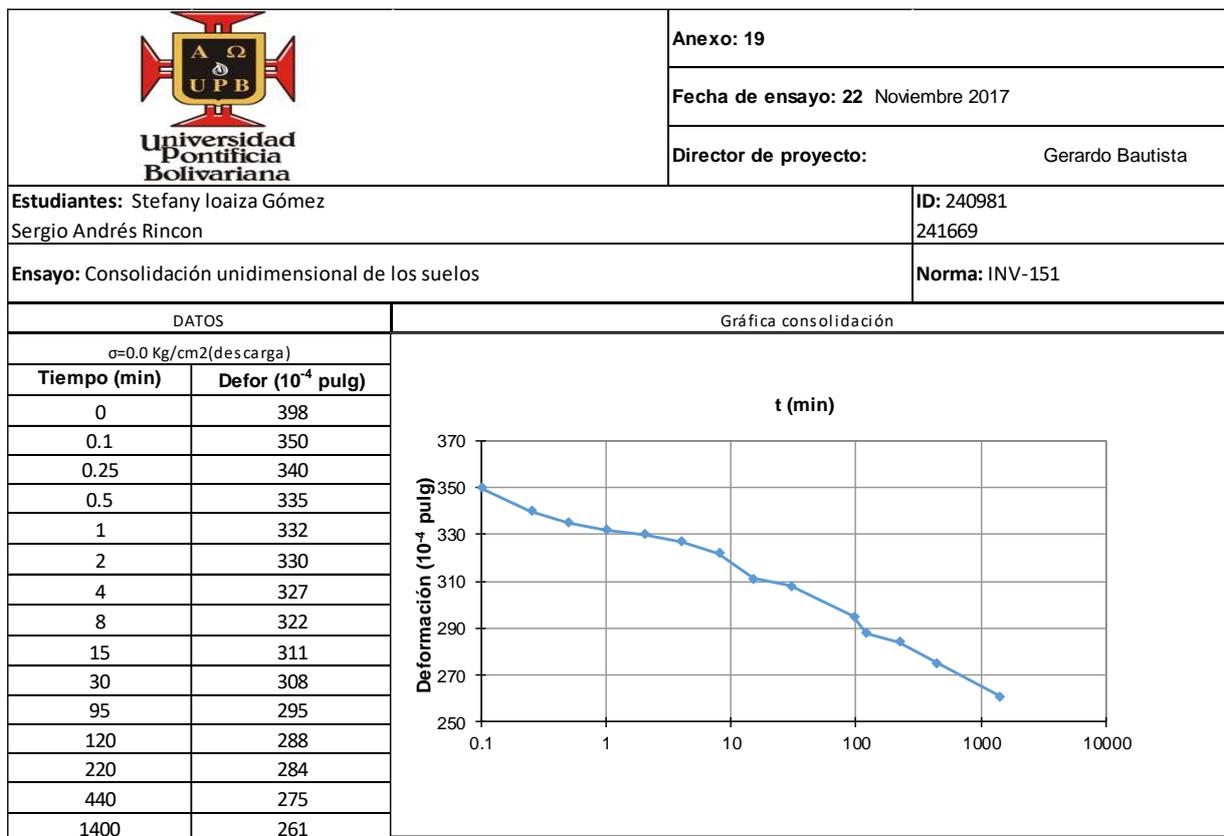
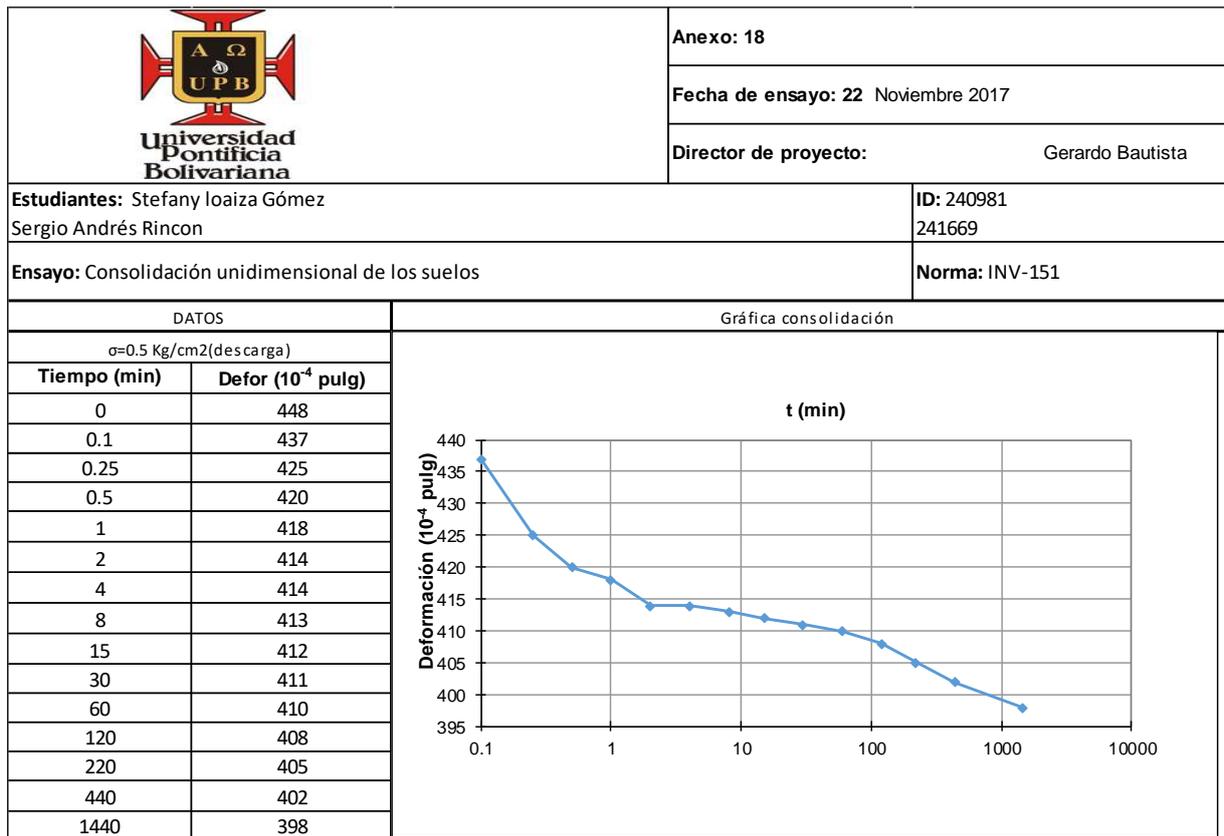
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



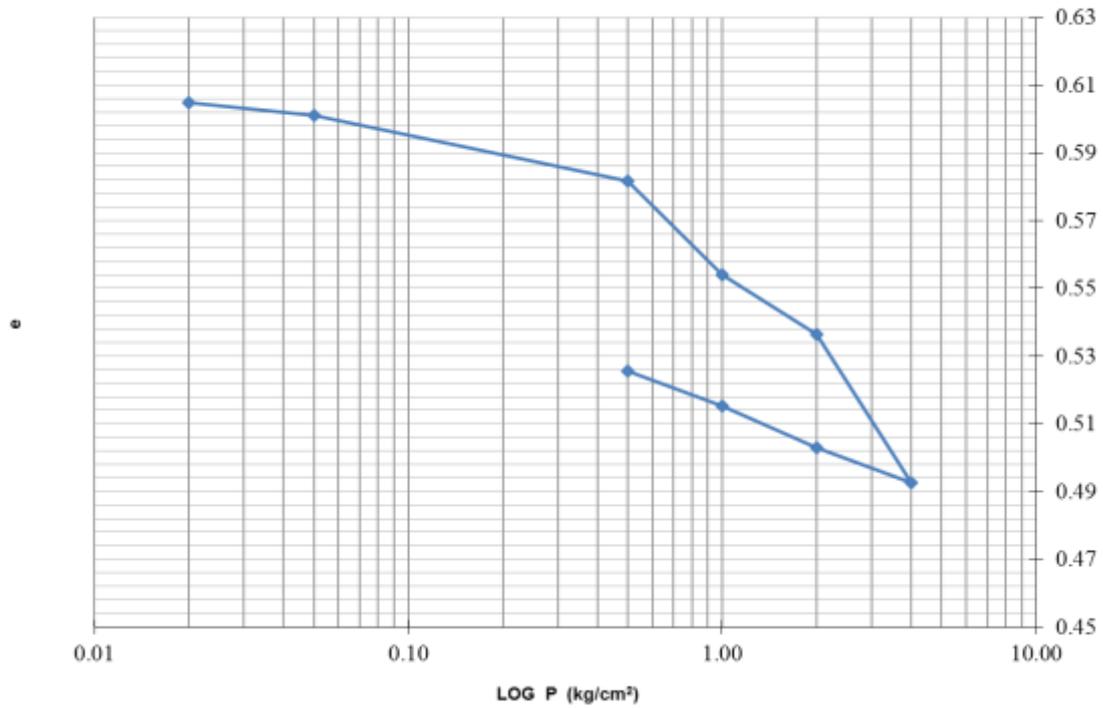


	Anexo: 20						
	Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017						
	Director de proyecto:		Gerardo Bautista				
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez Sergio Andrés Rincon			ID: 240981 241669				
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos			Norma: INV-151				
Diámetro de la muestra, d :		63 mm		Gravedad Específica, GS :		2.76	
Area de la Muestra, A :		31.17 cm ²		Masa Seca, W _s :		105.96 g	
Altura de la muestra, h _m :		1.98 cm		Ultima Medición, Me :		0.0663 cm	
densidad, r (inicial):		1.97 g/cm ³		densidad, r (final):		2.13 g/cm ³	
Altura de Sólidos,		$h_s = \frac{W_s}{A \gamma_s} =$ 1.23 cm		$h_m - h_s =$		0.75 cm	
ANTES DEL ENSAYO				DESPUES DEL ENSAYO			
Humedad	ω_{n1}	14.50%		ω_{n2}	20.07%		
Relación de Vacíos	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0.608		$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0.554		
Saturación	$G_{w1} = \frac{\omega_{n1} G_s}{\epsilon_1} \cdot 100$	65.9%		$G_{w2} = \frac{\omega_{n2} G_s}{\epsilon_2} \cdot 100$	100.0%		
Porosidad	$n_1 = \frac{e_1}{1 + e_1} \cdot 100$	37.8%		$n_2 = \frac{e_2}{1 + e_2} \cdot 100$	35.6%		
Poros Llenos con Agua	$n_{\omega_1} = \frac{n_1 G_{w1}}{100}$	24.9%		$n_{\omega_2} = \frac{n_2 G_{w2}}{100}$	35.6%		
Poros Llenos con Aire	$n_{l1} = n_1 - n_{\omega_1}$	12.9%		$n_{l2} = n_2 - n_{\omega_2}$	0.0%		
Altura de sólidos	h_s	1.23 cm		h_s	1.23 cm		
Altura de agua	$h_{\omega_1} = \frac{\omega_{n1} W_s}{A}$	0.493 cm		$h_{\omega_2} = \frac{\omega_{n2} W_s}{A}$	0.682 cm		
Altura de Aire	$h_{l1} = \frac{n_{l1}}{100} h_m$	0.255 cm		$h_{l2} = \frac{n_{l2}}{100} [h_m - M_e]$	0.000 cm		
Ultima Medición antes del desmonte				Me	0.066294 cm		
$h'_1 \equiv h'_2 \equiv h_m$	$h'_1 = h_s + h_{\omega_1} + h_{l1}$	1.980 cm		$h'_2 = h_s + h_{\omega_2} + h_{l2} + Me$	1.980 cm		

Escalón de Carga	Carga, P (kg/cm ²)	Lectura, M	$\epsilon' = \frac{M}{h_m}$	$\frac{h_m - h_s - M}{h_s}$ (cm)	$e = \frac{h_m - h_s - M}{h_s}$
0	0.00	0.00	0.000	0.75	0.608
I	0.02	14.00	0.002	0.74	0.605
II	0.05	32.00	0.004	0.74	0.601
III	0.50	126.00	0.016	0.72	0.582
IV	1.00	260.00	0.033	0.68	0.554
V	2.00	345.00	0.044	0.66	0.536
VI	4.00	558.00	0.072	0.61	0.493
VII	2.00	508.00	0.065	0.62	0.503
VIII	1.00	448.00	0.057	0.63	0.515
IX	0.50	398.00	0.051	0.65	0.526
X	0.00	261.00	0.033	0.68	0.554

CALCULO HUMEDAD		
	Inicial	Final
$P_{m_{hum+anillo}}$	210.84	217.6
$P_{m_{sec+anillo}}$	193.21	193.21
P_{anillo}	71.66	71.66
$P_{suelo seco}$	121.55	121.55
Humedad(%)	14.50	20.07

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION



ANEXO E
ENSAYO CONSOLIDACIÓN EN ANALOGO 2



Anexo: 21

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

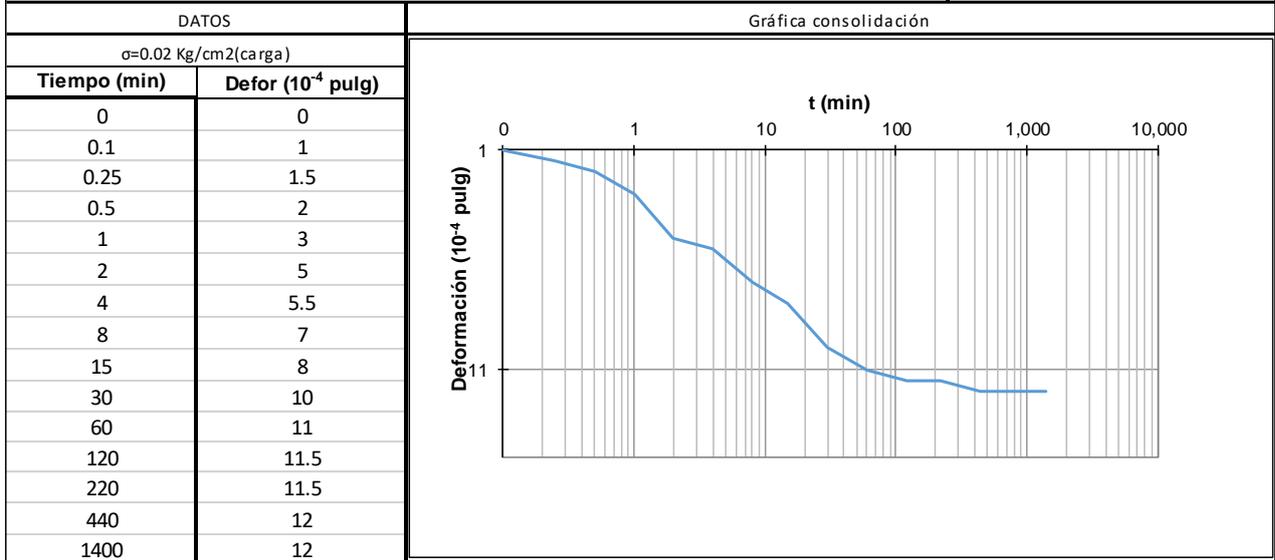
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

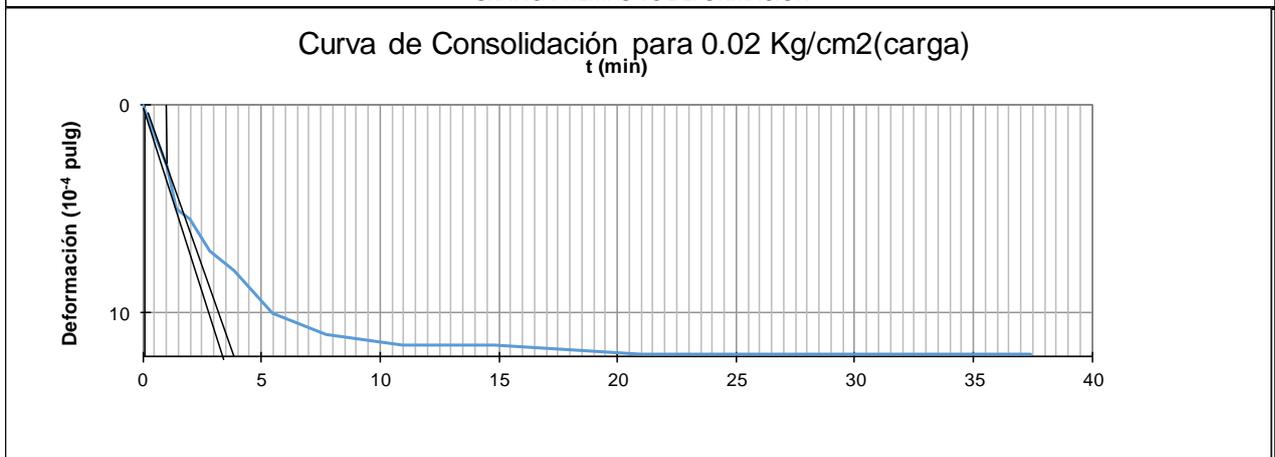
ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 22

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

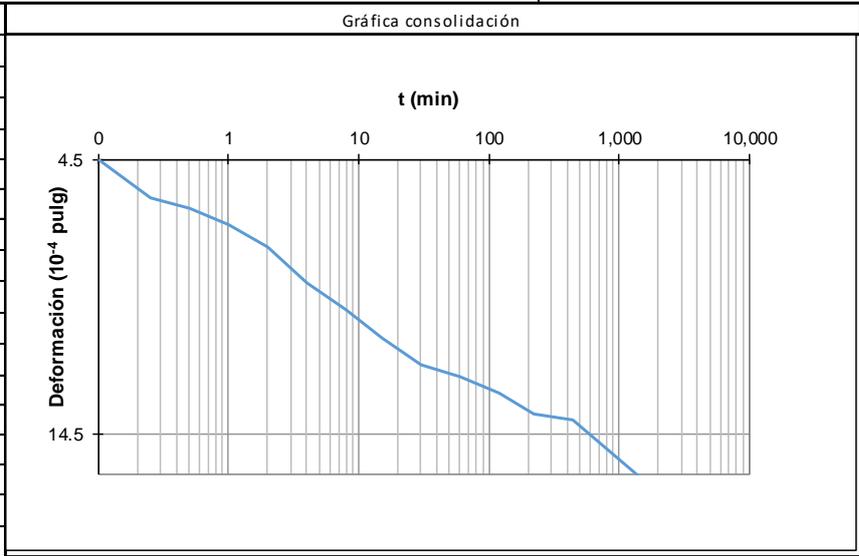
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

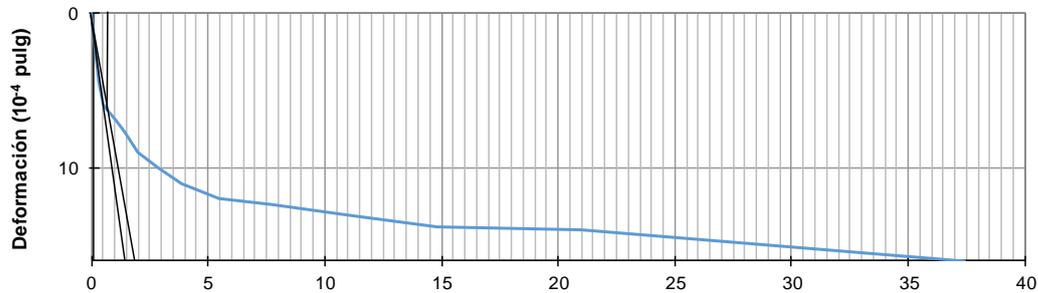
Norma: INV-151

DATOS	
$\sigma=0.05 \text{ Kg/cm}^2(\text{carga})$	
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)
0	0
0.1	4.5
0.25	5.9
0.5	6.3
1	6.9
2	7.7
4	9
8	10
15	11
30	12
60	12.4
120	13
220	13.8
440	14
1400	16



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN

Curva de Consolidación para $0.05 \text{ Kg/cm}^2(\text{carga})$
t (min)





Anexo: 23

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

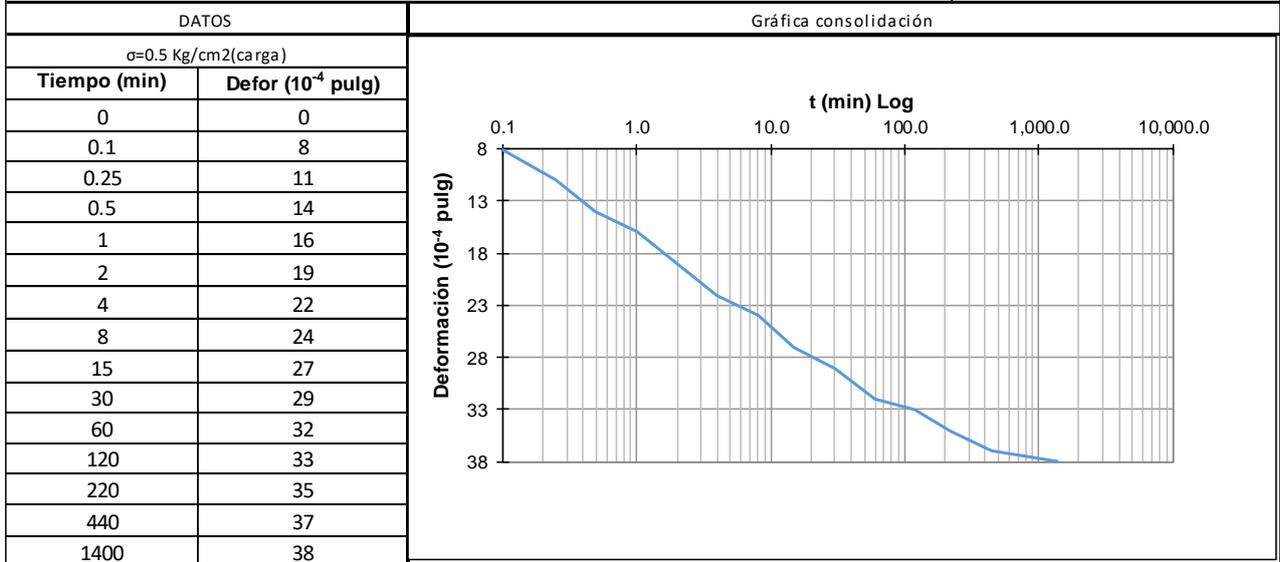
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

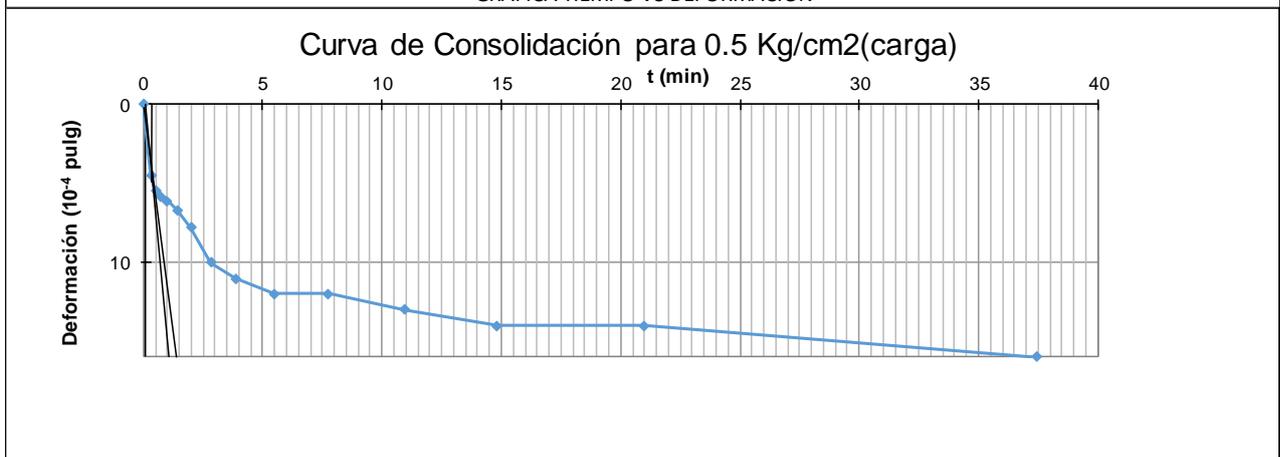
ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 24

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

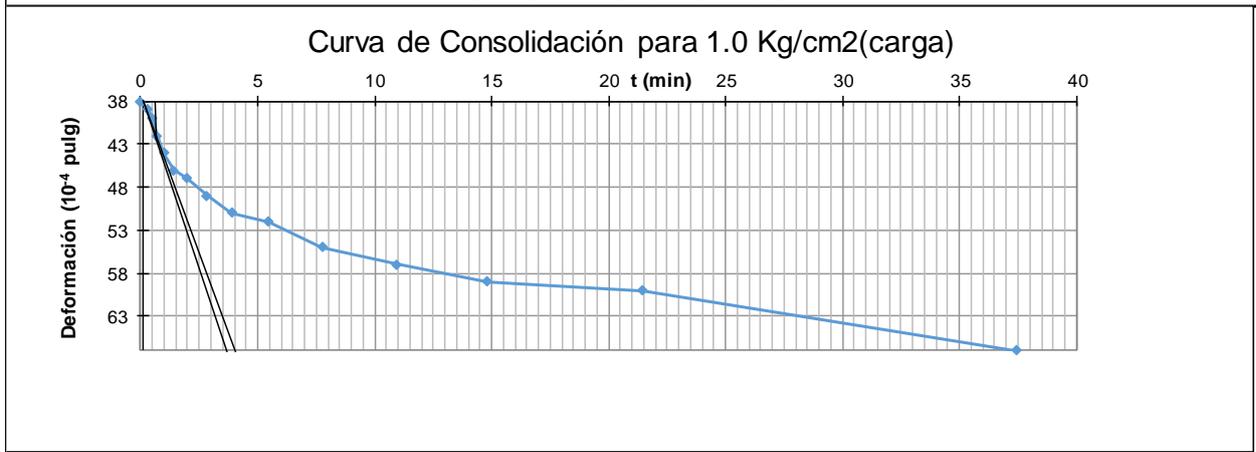
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS	
$\sigma=1 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)	
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)
0	38
0.1	39
0.25	40
0.5	42
1	44
2	46
4	47
8	49
15	51
30	52
60	55
120	57
220	59
460	60
1400	67



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 25

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

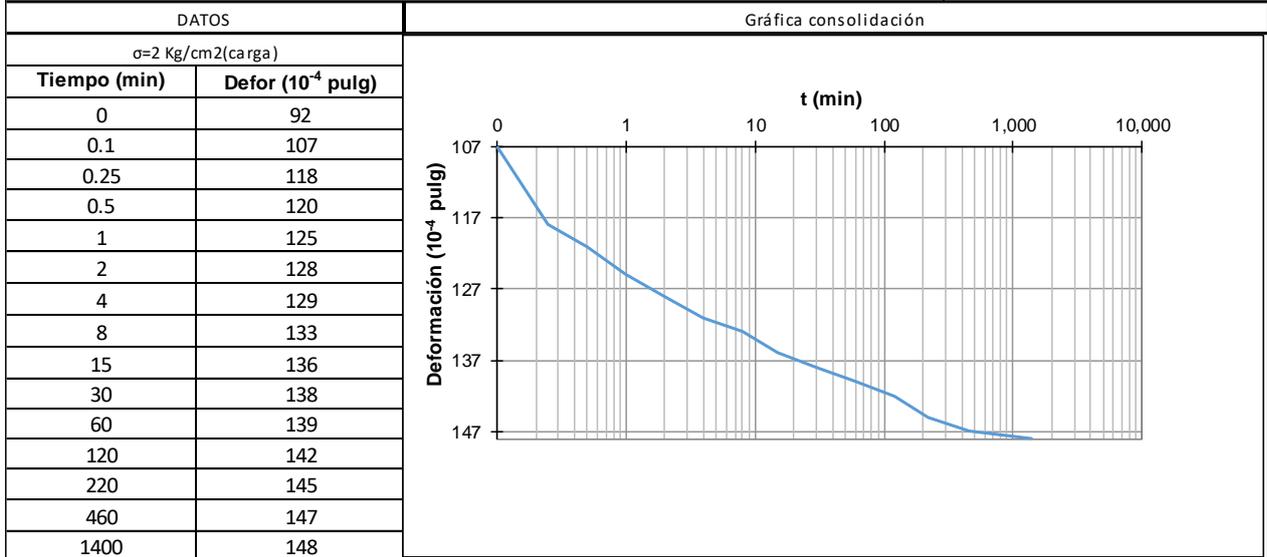
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

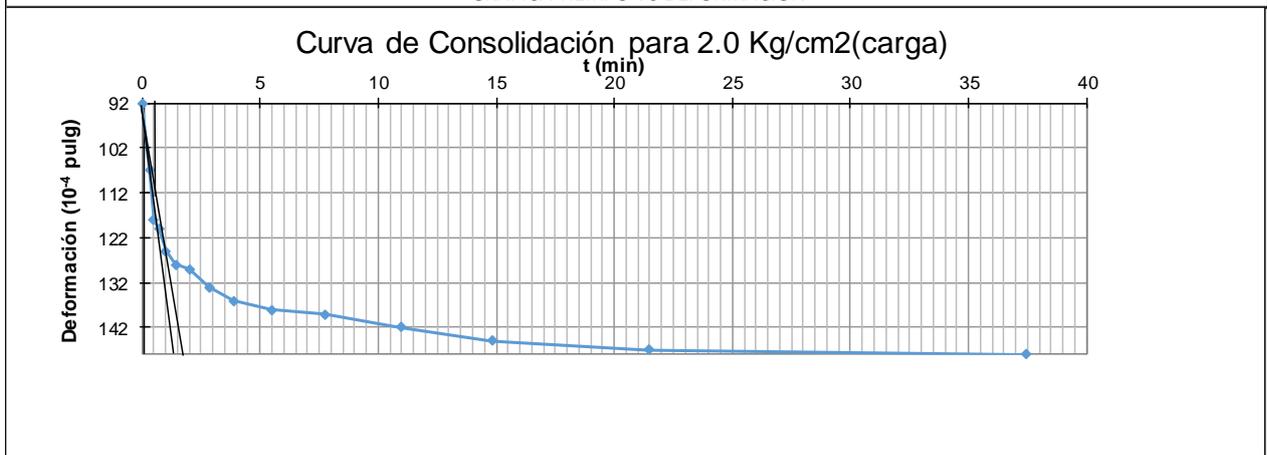
ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 26

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

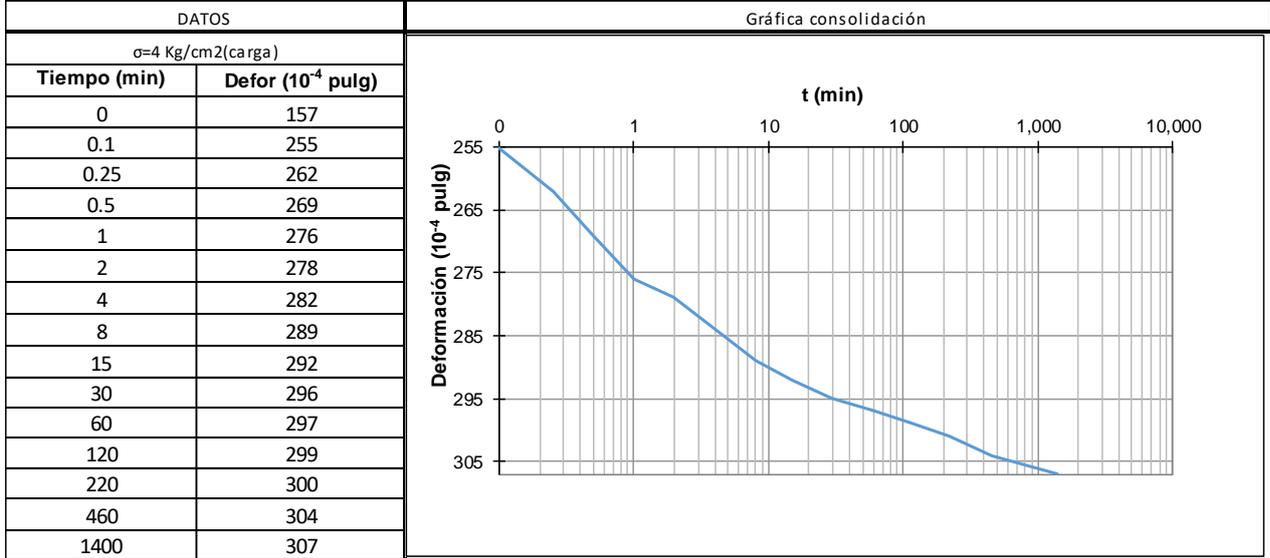
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

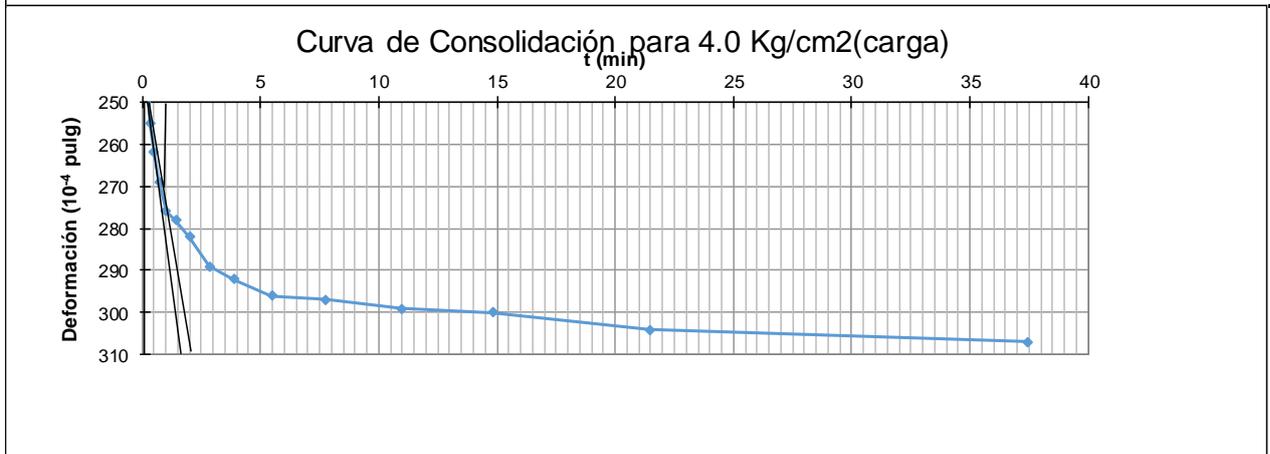
ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 27

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

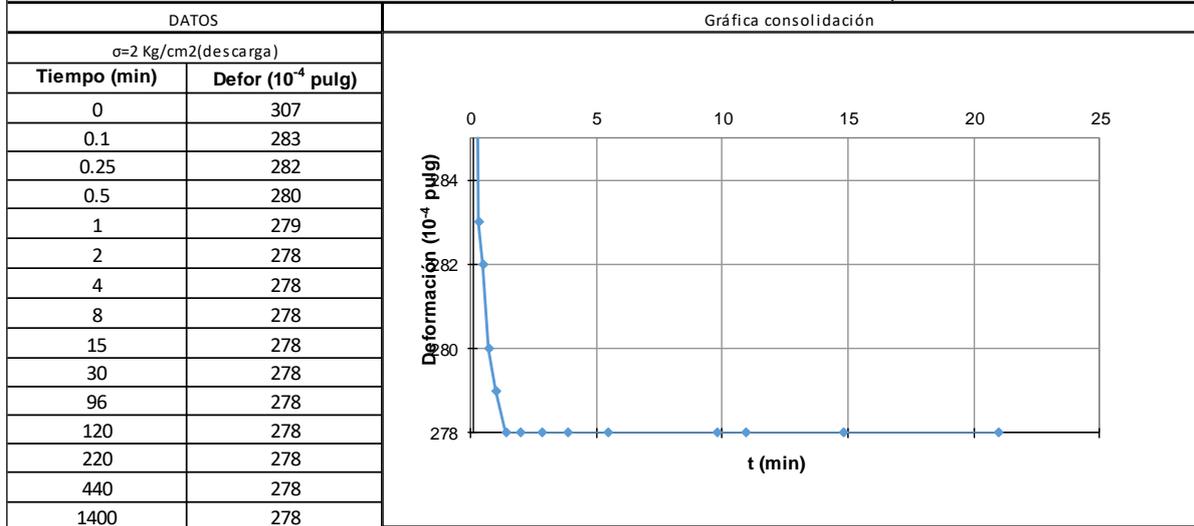
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



Anexo: 28

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

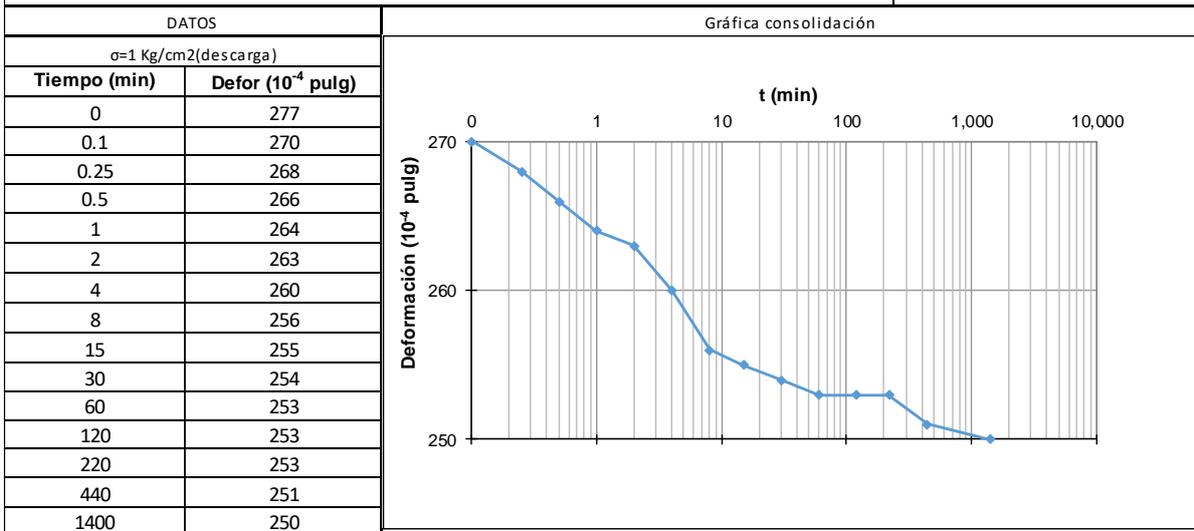
Director de proyecto: Gerardo Bautista

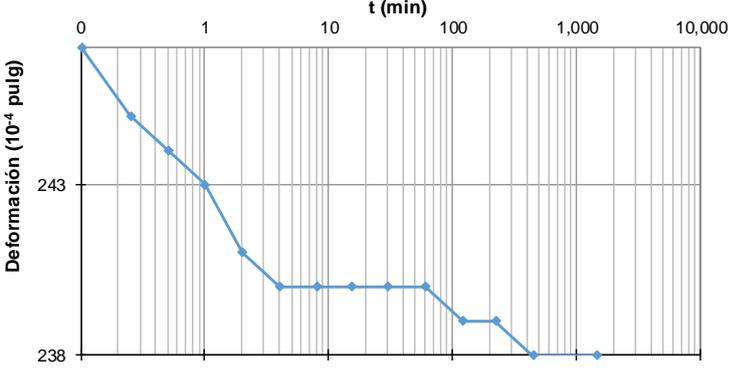
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

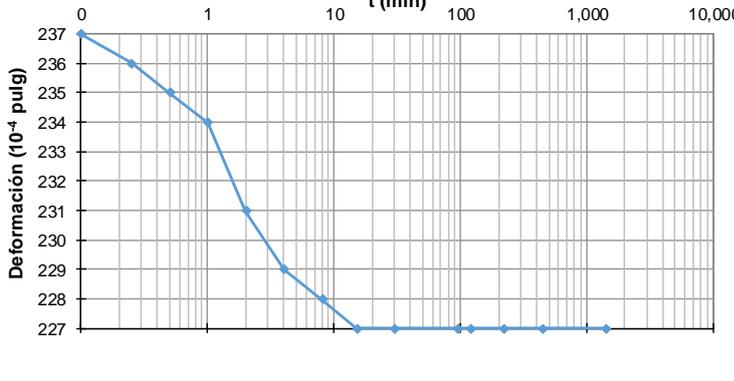
ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



 <p>Universidad Pontificia Bolivariana</p>		Anexo: 29	
		Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017	
		Director de proyecto: Gerardo Bautista	
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez Sergio Andrés Rincon		ID: 240981 241669	
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos		Norma: INV-151	
DATOS		Gráfica consolidación	
$\sigma=0.5 \text{ Kg/cm}^2(\text{descarga})$			
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)		
0	250		
0.1	247		
0.25	245		
0.5	244		
1	243		
2	241		
4	240		
8	240		
15	240		
30	240		
60	240		
120	239		
220	239		
440	238		
1440	238		

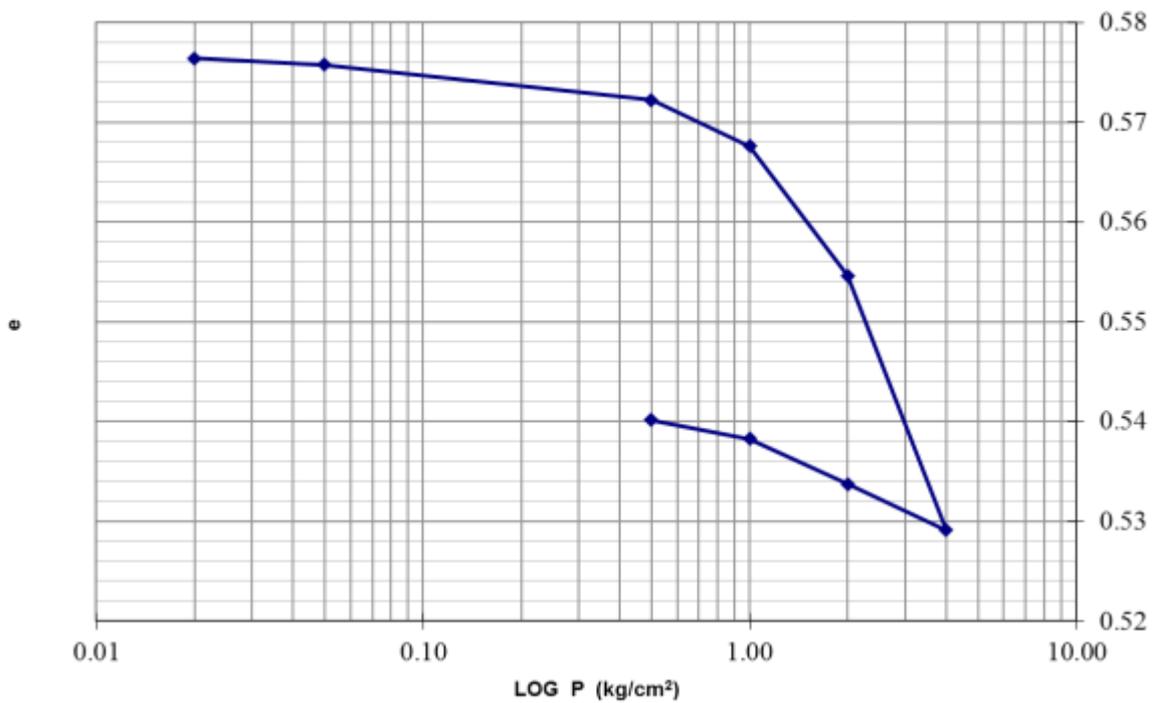
 <p>Universidad Pontificia Bolivariana</p>		Anexo: 30	
		Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017	
		Director de proyecto: Gerardo Bautista	
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez Sergio Andrés Rincon		ID: 240981 241669	
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos		Norma: INV-151	
DATOS		Gráfica consolidación	
$\sigma=0.0 \text{ Kg/cm}^2(\text{descarga})$			
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)		
0	238		
0.1	237		
0.25	236		
0.5	235		
1	234		
2	231		
4	229		
8	228		
15	227		
30	227		
95	227		
120	227		
220	227		
440	227		
1400	227		

 Universidad Pontificia Bolivariana		Anexo: 31	
		Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017	
		Director de proyecto:	Gerardo Bautista
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez Sergio Andrés Rincon		ID: 240981	241669
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos		Norma: INV-151	
Diámetro de la muestra, d :	64 mm	Gravedad Específica, G_s :	2.76
Area de la Muestra, A :	32.17 cm ²	Masa Seca, W_s :	140.64 g
Altura de la muestra, h_m :	2.5 cm	Ultima Medición, M_e :	0.0577 cm
densidad, ρ (inicial):	1.99 g/cm ³	densidad, ρ (final):	2.14 g/cm ³
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{W_s}{A \gamma_s} =$	1.58 cm	$h_m - h_s =$	0.92 cm
ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	ω_{n1} 13.99%	ω_{n2} 19.64%	
Relación de Vacíos	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$ 0.578	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$ 0.542	
Saturación	$G_{w_1} = \frac{\omega_{n1} G_s}{\epsilon_1} \cdot 100$ 66.8%	$G_{w_2} = \frac{\omega_{n2} G_s}{\epsilon_2} \cdot 100$ 100.0%	
Porosidad	$n_1 = \frac{e_1}{1 + e_1} \cdot 100$ 36.6%	$n_2 = \frac{e_2}{1 + e_2} \cdot 100$ 35.1%	
Poros Llenos con Agua	$n_{\omega_1} = \frac{n_1 G_{w_1}}{100}$ 24.5%	$n_{\omega_2} = \frac{n_2 G_{w_2}}{100}$ 35.1%	
Poros Llenos con Aire	$n_{l_1} = n_1 - n_{\omega_1}$ 12.2%	$n_{l_2} = n_2 - n_{\omega_2}$ 0.0%	
Altura de sólidos	h_s 1.58 cm	h_s 1.58 cm	
Altura de Agua	$h_{\omega_1} = \frac{\omega_{n1} W_s}{A}$ 0.612 cm	$h_{\omega_2} = \frac{\omega_{n2} W_s}{A}$ 0.858 cm	
Altura de Aire	$h_{l_1} = \frac{n_{l_1}}{100} h_m$ 0.304 cm	$h_{l_2} = \frac{n_{l_2}}{100} [h_m - M_e]$ 0.000 cm	
Ultima Medición antes del desmonte		Me 0.057658 cm	
$h'_1 \equiv h'_2 \equiv h_m$	$h'_1 = h_s + h_{\omega_1} + h_{l_1}$ 2.500 cm	$h'_2 = h_s + h_{\omega_2} + h_{l_2} + Me$ 2.500 cm	

Escalón de Carga	Carga, P (kg/cm ²)	Lectura, M (¹ / ₁₀₀₀₀ inch)	$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	$h_m - h_s - M$ (cm)	$e = \frac{h_m - h_s - M}{h_s}$
0	0.00	0.00	0.000	0.92	0.578
I	0.02	12.00	0.001	0.91	0.576
II	0.05	16.00	0.002	0.91	0.576
III	0.50	38.00	0.004	0.91	0.572
IV	1.00	67.00	0.007	0.90	0.568
V	2.00	148.00	0.015	0.88	0.555
VI	4.00	307.00	0.031	0.84	0.529
VII	2.00	278.00	0.028	0.85	0.534
VIII	1.00	250.00	0.025	0.85	0.538
IX	0.50	238.00	0.024	0.86	0.540
X	0.00	227.00	0.023	0.86	0.542

CALCULO HUMEDAD		
	Inicial	Final
$P_{m_{hum+capsula}}$	274.5	282.63
$P_{m_{sec+capsula}}$	254.33	254.33
$P_{capsula}$	110.2	110.2
$P_{suelo seco}$	144.13	144.13
Humedad(%)	13.99	19.64

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION



ANEXO F
ENSAYO CONSOLIDACIÓN EN ANALOGO 3



Anexo: 32

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

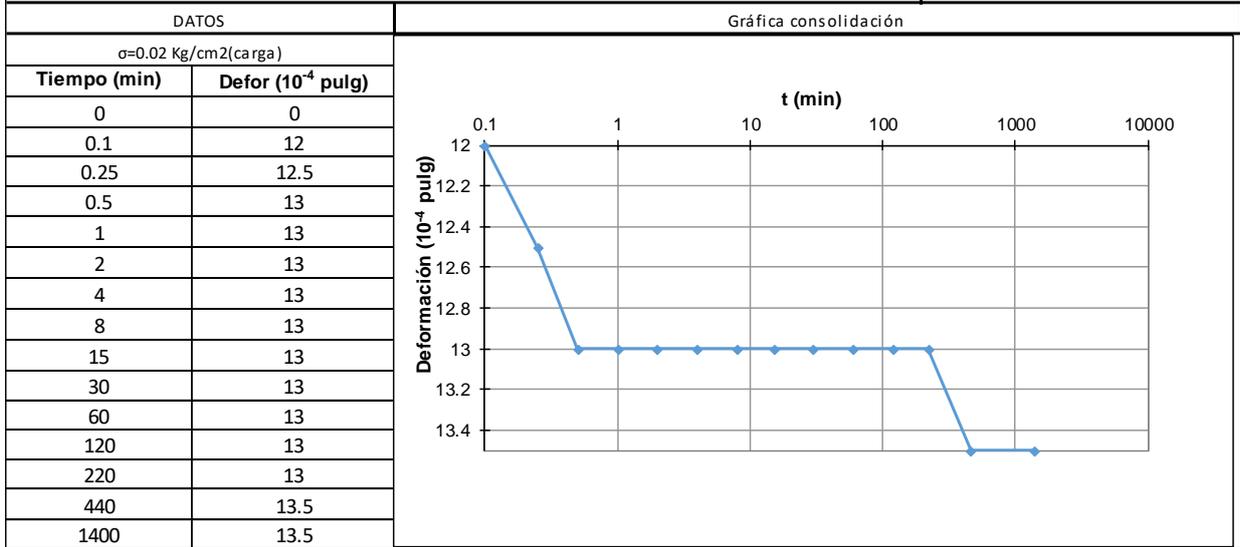
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 33

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

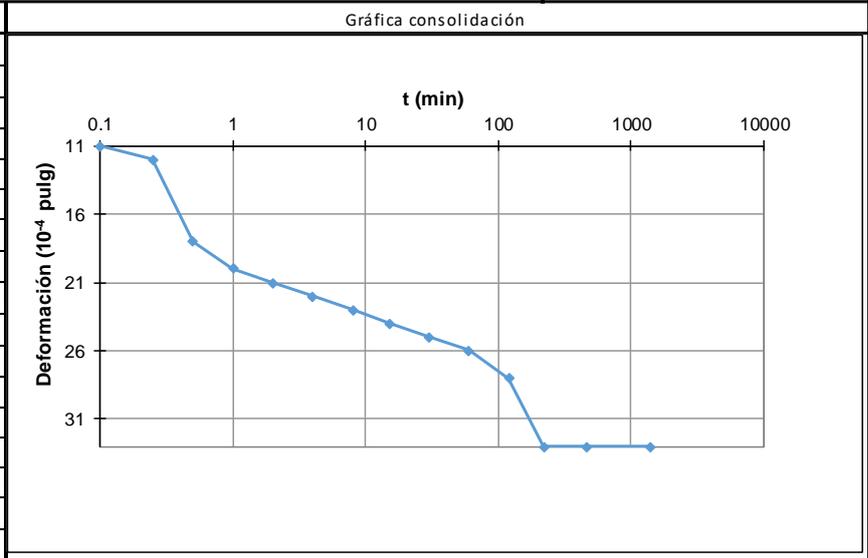
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

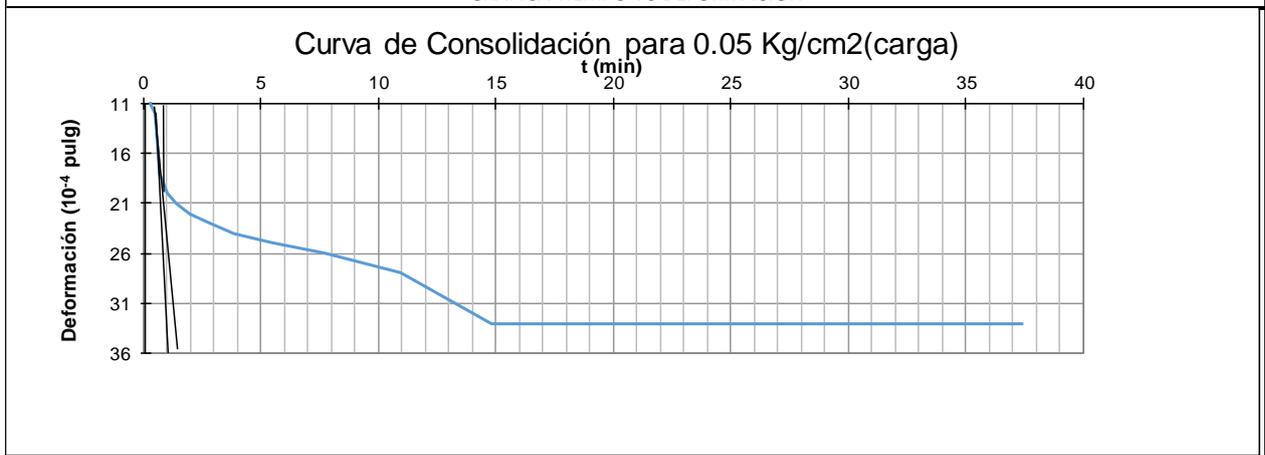
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS	
$\sigma=0.05 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)	
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)
0	0
0.1	11
0.25	12
0.5	18
1	20
2	21
4	22
8	23
15	24
30	25
60	26
120	28
220	33
440	33
1400	33



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 34

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

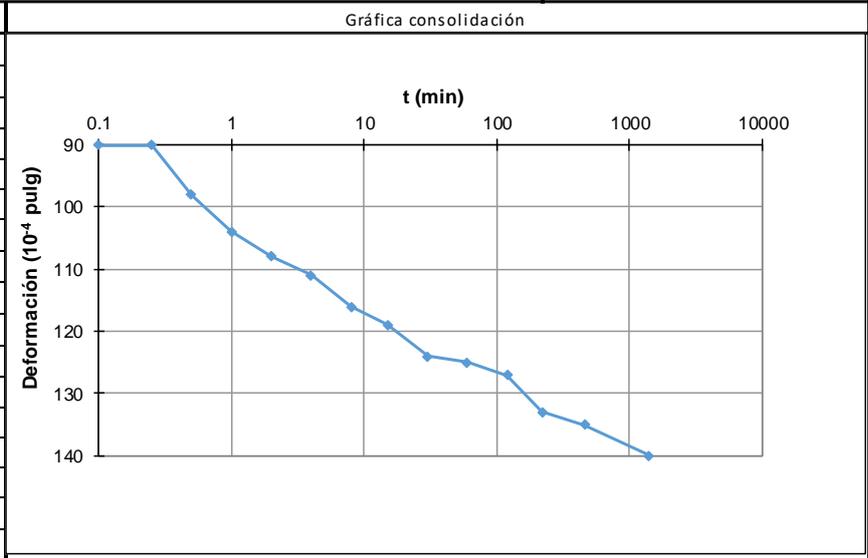
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

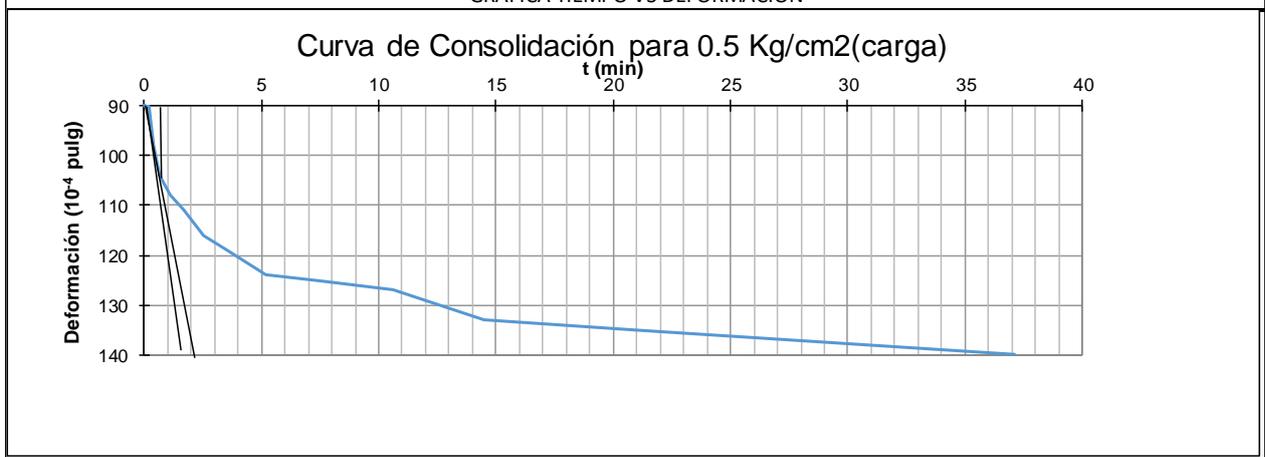
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS	
$\sigma=0.5 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)	
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)
0	0
0.1	90
0.25	90
0.5	98
1	104
2	108
4	111
8	116
15	119
30	124
60	125
120	127
220	133
440	135
1400	140



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 35

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

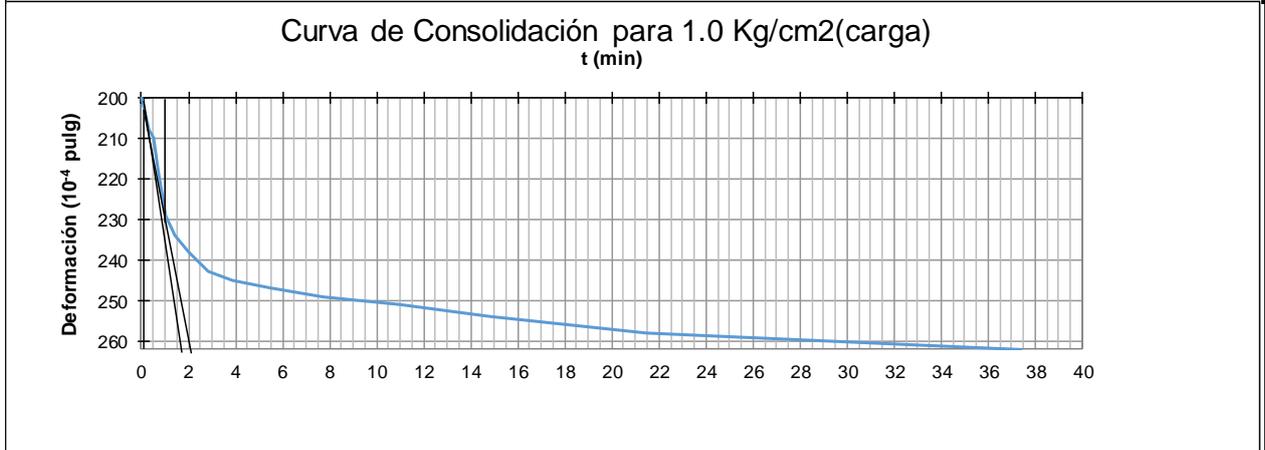
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS	
$\sigma=1 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)	
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)
0	200
0.1	205
0.25	210
0.5	218
1	229
2	234
4	238
8	243
15	245
30	247
60	249
120	251
220	254
460	258
1400	262



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 36

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

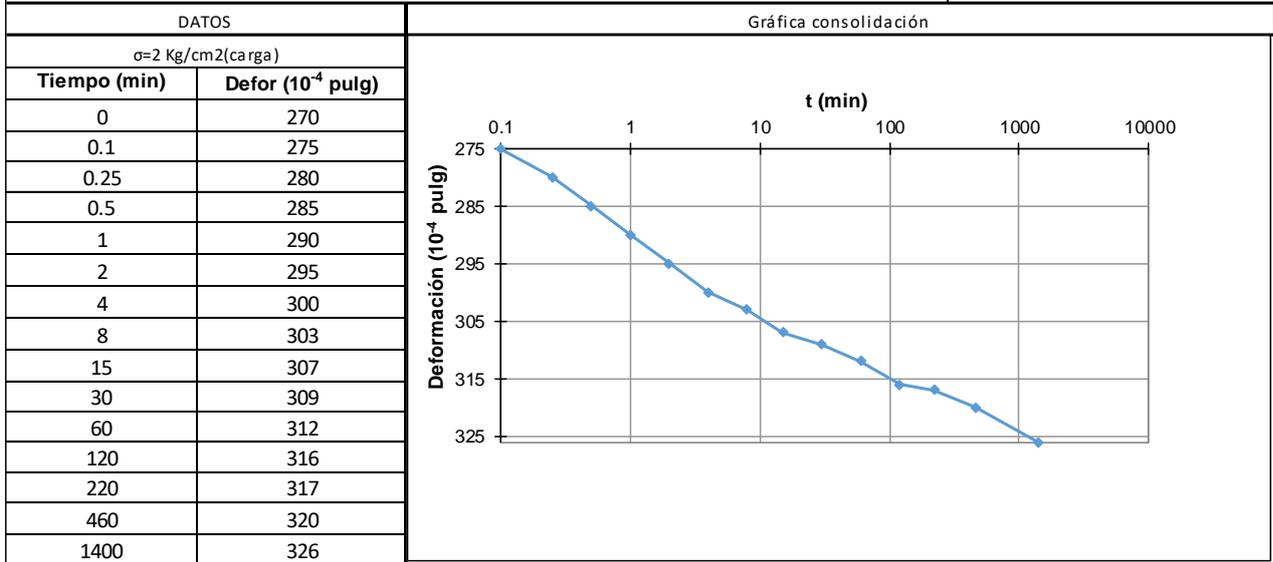
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

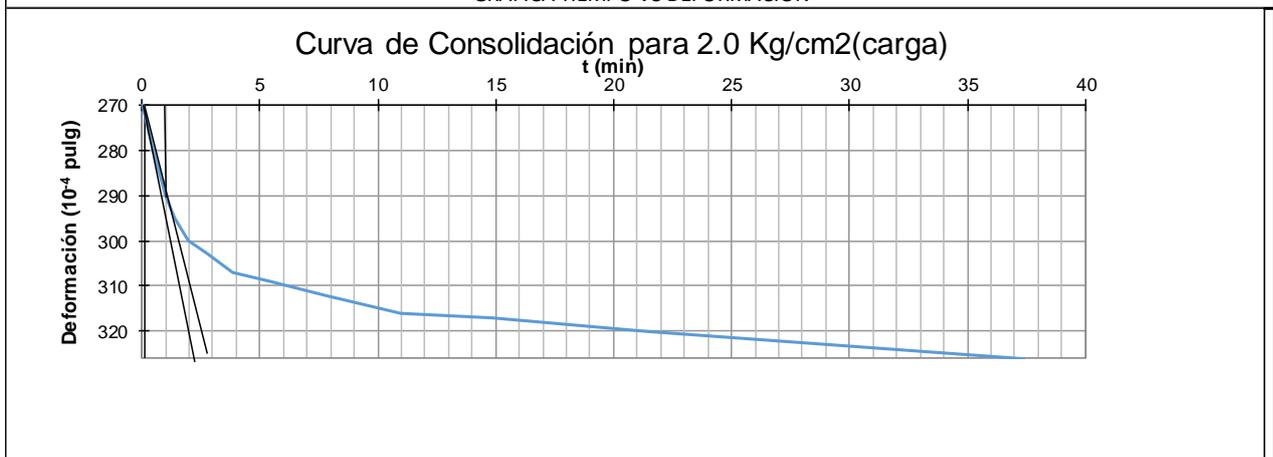
ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 37

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

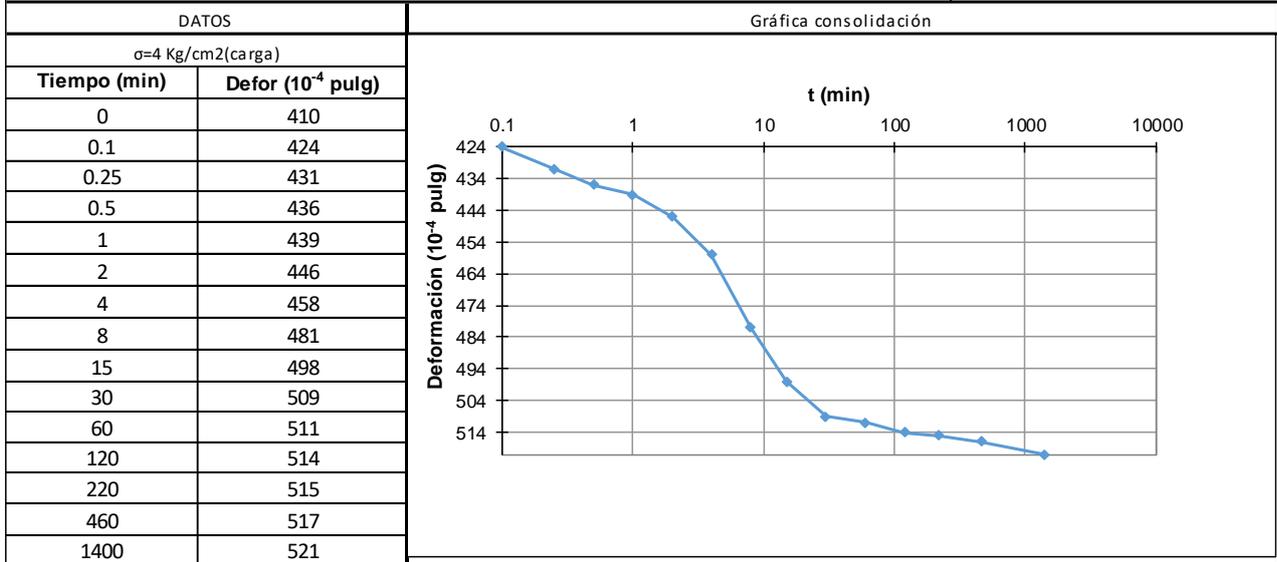
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

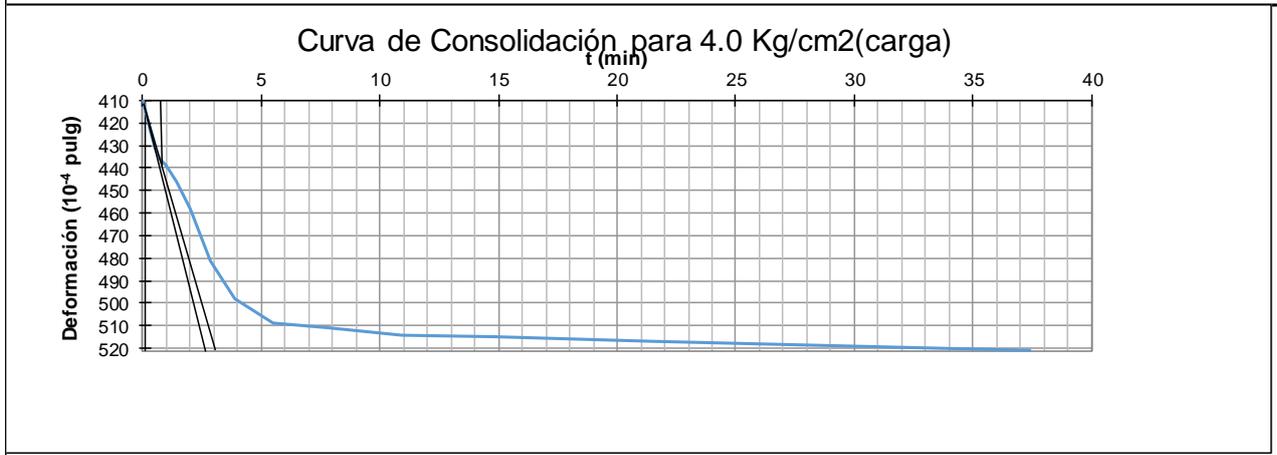
ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 38

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

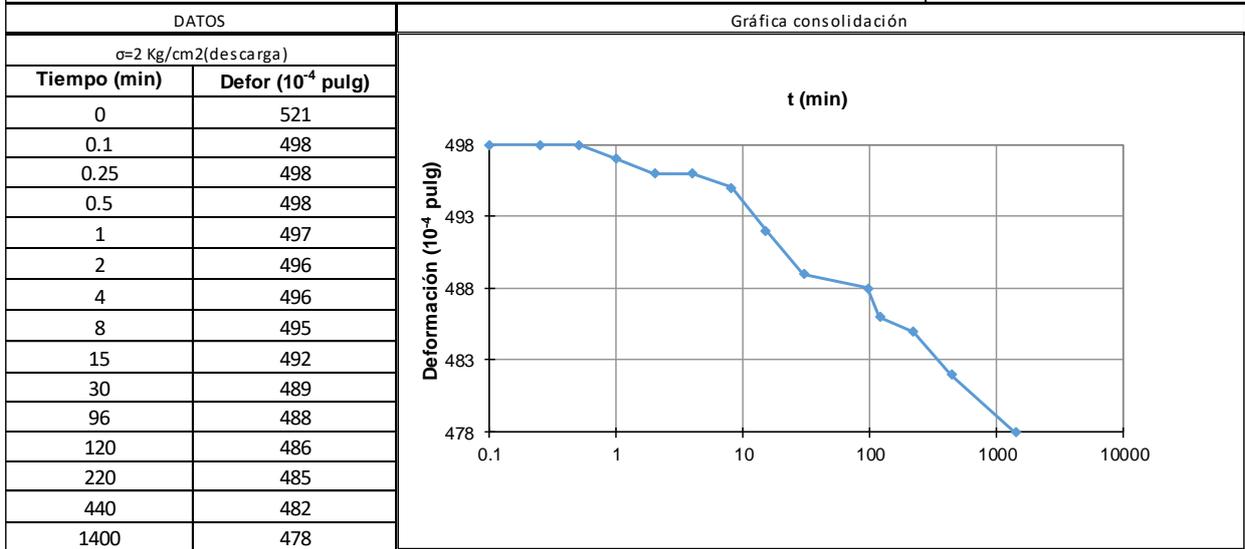
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



Anexo: 39

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

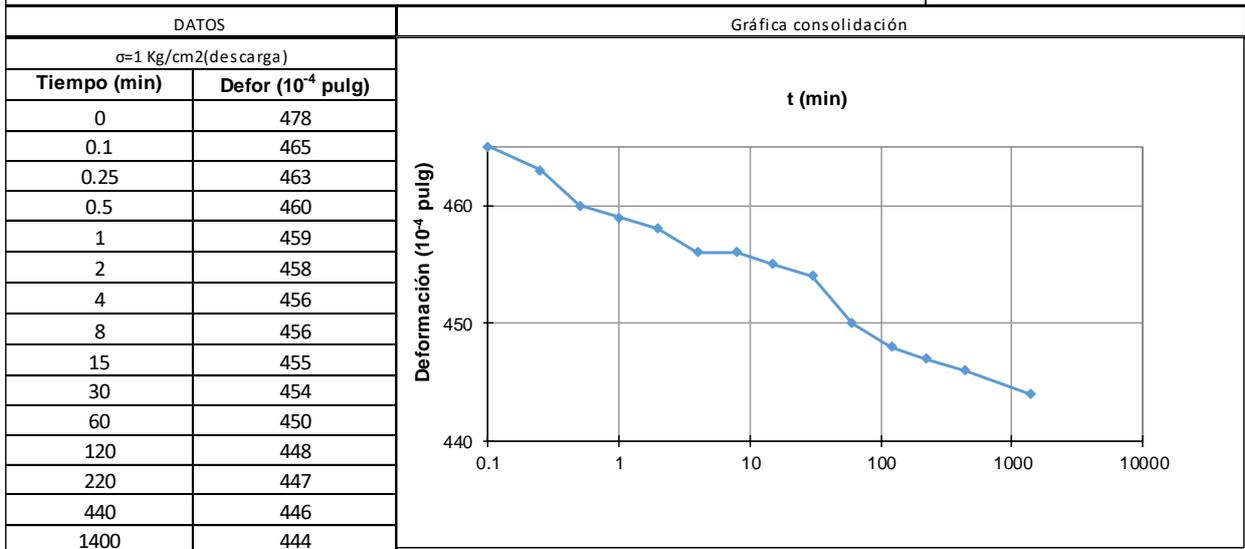
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151





Anexo: 40

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

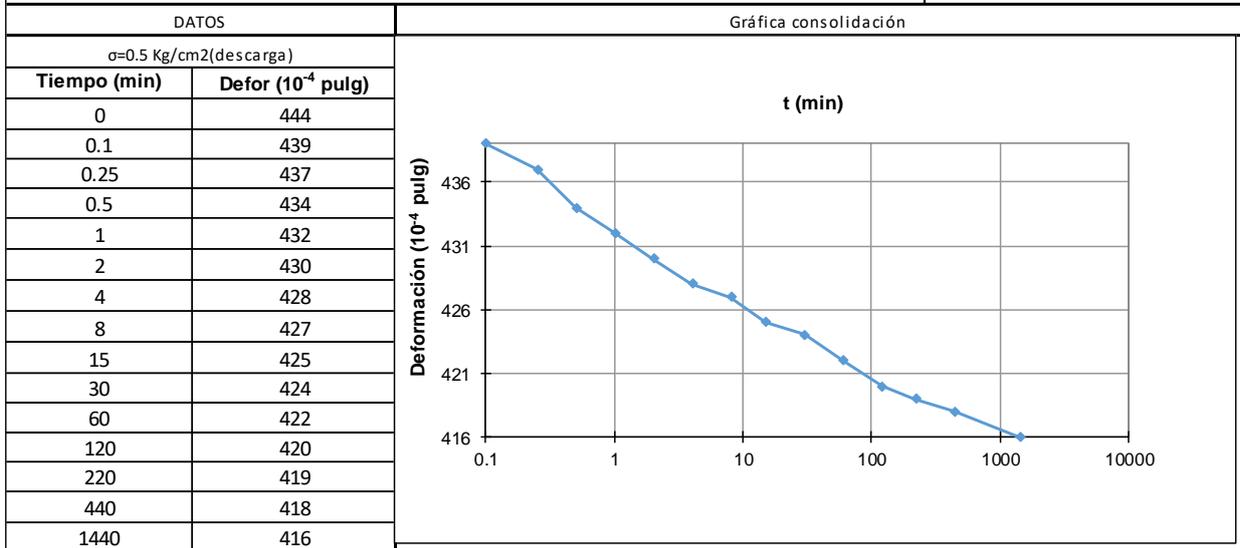
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



Anexo: 41

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

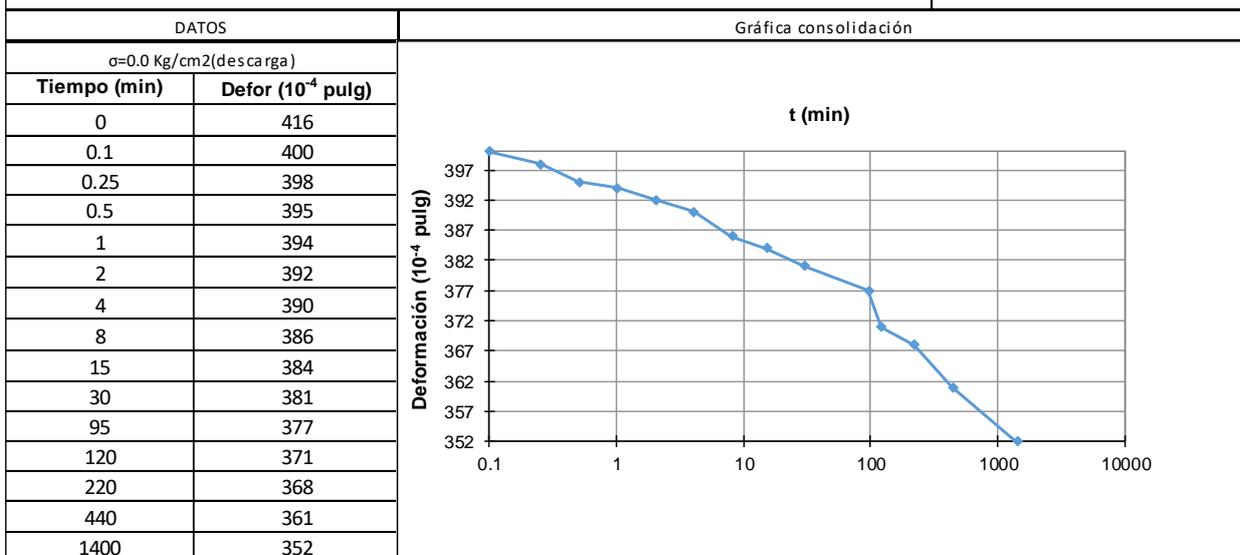
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981
241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

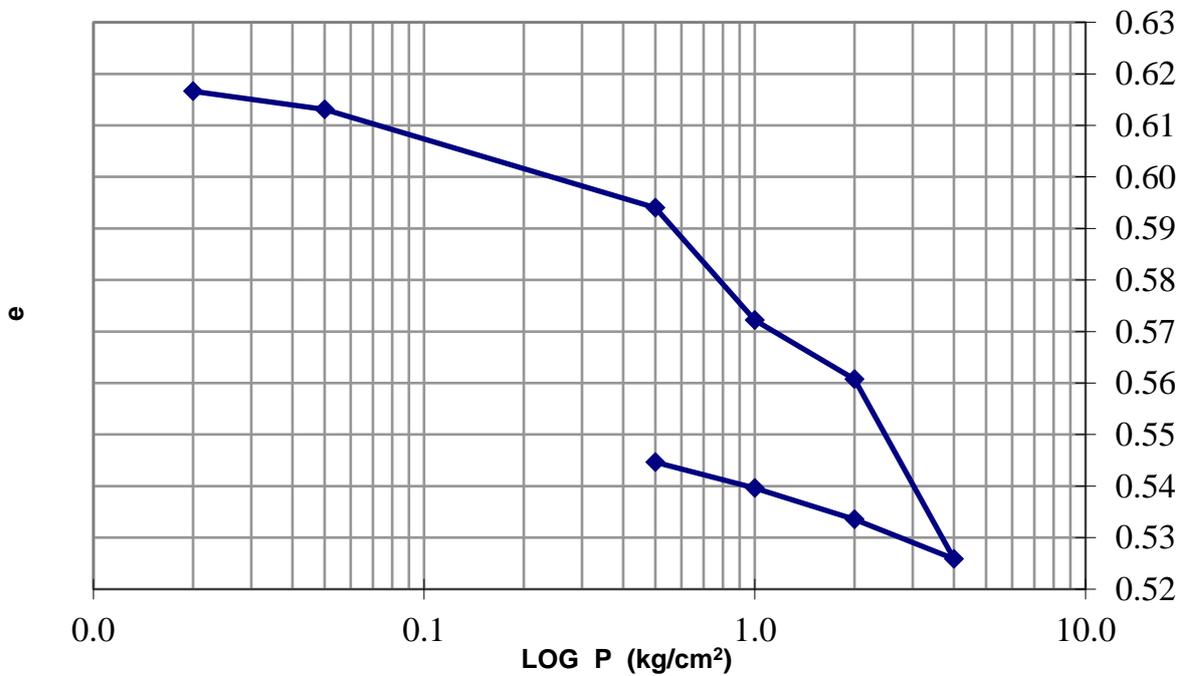


	Anexo: 42				
	Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017				
	Director de proyecto:		Gerardo Bautista		
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez Sergio Andrés Rincon			ID: 240981	241669	
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos			Norma: INV-151		
Diámetro de la muestra, d :		62 mm	Gravedad Específica, G_s :		2.76
Area de la Muestra, A :		30.19 cm²	Masa Seca, W_s :		118.37 g
Altura de la muestra, h_m :		2.3 cm	Ultima Medición, M_e :		0.0894 cm
densidad, ρ (inicial):		1.94 g/cm³	densidad, ρ (final):		2.13 g/cm³
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{W_s}{A\gamma_s} =$		1.42 cm	$h_m - h_s =$		0.88 cm
ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO			
Humedad	ω_{n1}	14.02%	ω_{n2}	20.15%	
Relación de Vacíos	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0.619	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0.556	
Saturación	$G_{w1} = \frac{\omega_{n1} G_s}{\epsilon_1} \cdot 100$	62.5%	$G_{w2} = \frac{\omega_{n2} G_s}{\epsilon_2} \cdot 100$	100.0%	
Porosidad	$n_1 = \frac{e_1}{1 + e_1} \cdot 100$	38.2%	$n_2 = \frac{e_2}{1 + e_2} \cdot 100$	35.7%	
Poros Llenos con Agua	$n_{\omega_1} = \frac{n_1 G_{w1}}{100}$	23.9%	$n_{\omega_2} = \frac{n_2 G_{w2}}{100}$	35.7%	
Poros Llenos con Aire	$n_{l_1} = n_1 - n_{\omega_1}$	14.3%	$n_{l_2} = n_2 - n_{\omega_2}$	0.0%	
Altura de sólidos	h_s	1.42 cm	h_s	1.42 cm	
Altura de Agua	$h_{\omega_1} = \frac{\omega_{n1} W_s}{A}$	0.550 cm	$h_{\omega_2} = \frac{\omega_{n2} W_s}{A}$	0.790 cm	
Altura de Aire	$h_{l_1} = \frac{n_{l_1}}{100} h_m$	0.330 cm	$h_{l_2} = \frac{n_{l_2}}{100} [h_m - M_e]$	0.000 cm	
Ultima Medición antes del desmonte			M_e	0.089408 cm	
$h'_1 \equiv h'_2 \equiv h_m$	$h'_1 = h_s + h_{\omega_1} + h_{l_1}$	2.300 cm	$h'_2 = h_s + h_{\omega_2} + h_{l_2} + M_e$	2.300 cm	

Escalón de Carga	Carga, P (kg/cm ²)	Lectura, M (1/10000 inch)	$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	$h_m - h_s - M$ (cm)	$e = \frac{h_m - h_s - M}{h_s}$
0	0.00	0.00	0.000	0.88	0.619
I	0.02	13.50	0.001	0.88	0.617
II	0.05	33.00	0.004	0.87	0.613
III	0.50	140.00	0.015	0.84	0.594
IV	1.00	262.00	0.029	0.81	0.572
V	2.00	326.00	0.036	0.80	0.561
VI	4.00	521.00	0.058	0.75	0.526
VII	2.00	478.00	0.053	0.76	0.534
VIII	1.00	444.00	0.049	0.77	0.540
IX	0.50	416.00	0.046	0.77	0.545
X	0.00	352.00	0.039	0.79	0.556

CALCULO HUMEDAD		
	Inicial	Final
$P_{m_{hum+capsula}}$	209.7	217.7
$P_{m_{sec+capsula}}$	193.24	193.21
$P_{capsula}$	75.8	71.66
$P_{suelo\ seco}$	117.44	121.55
Humedad(%)	14.02	20.15

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION



ANEXO G
ENSAYO CONSOLIDACIÓN EN DIGITALES 1



Anexo: 43

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

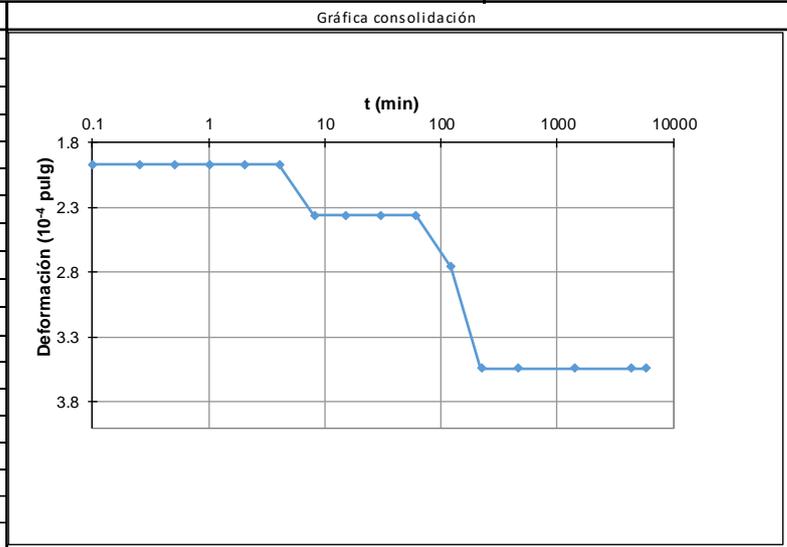
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

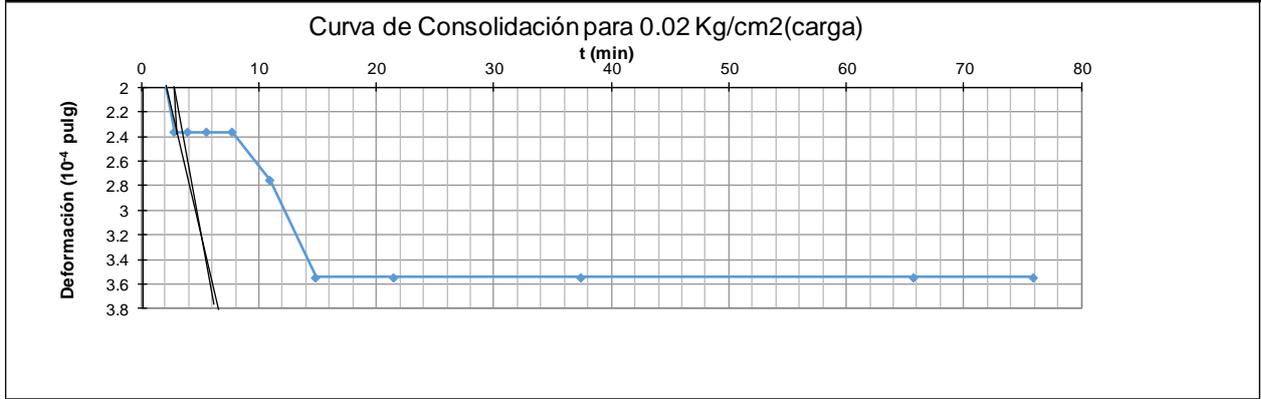
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.02 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	0	0
0.1	2	0.005
0.25	2	0.005
0.5	2	0.005
1	2	0.005
2	2	0.005
4	2	0.005
8	2	0.006
15	2	0.006
30	2	0.006
60	2	0.006
120	3	0.007
220	4	0.009
460	4	0.009
1400	4	0.009
4320	4	0.009
5760	4	0.009



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 44

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

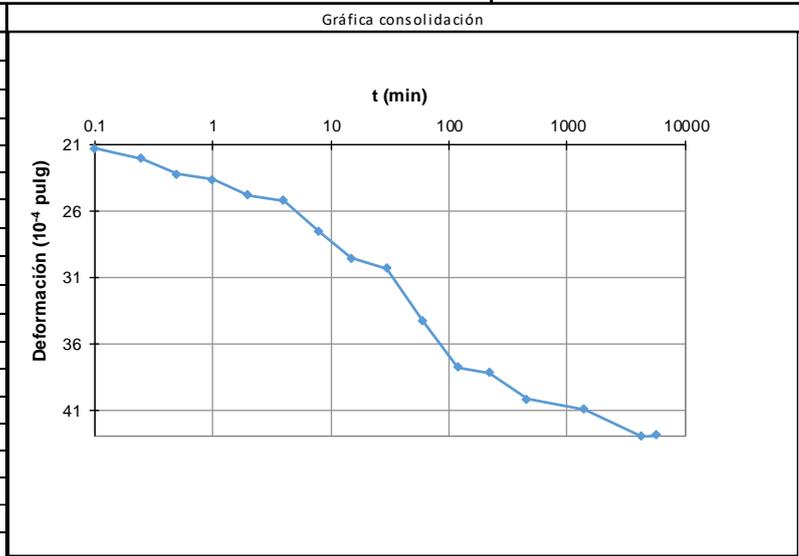
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

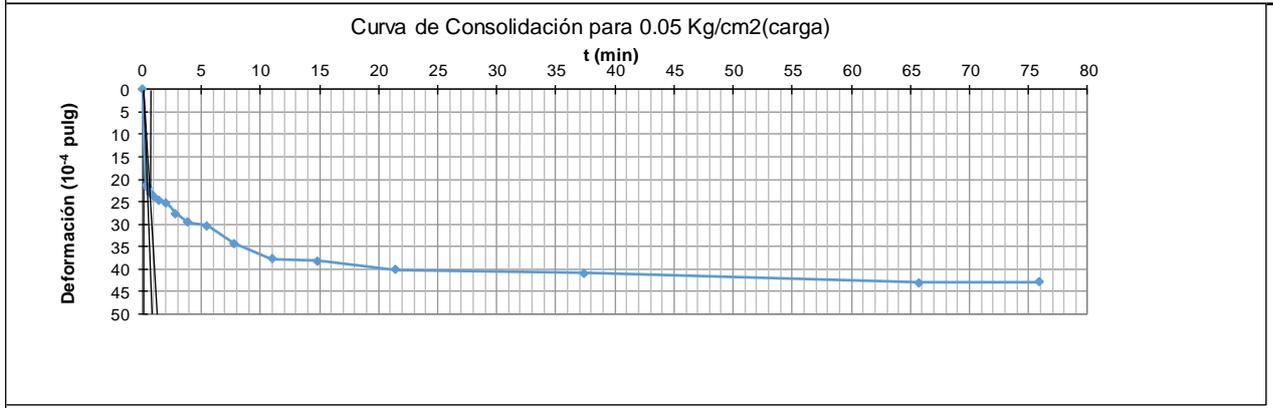
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.05 \text{ Kg/cm}^2(\text{carga})$		
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)	Deform (mm)
0	0	0
0.1	21	0.054
0.25	22	0.056
0.5	23	0.059
1	24	0.06
2	25	0.063
4	25	0.064
8	28	0.07
15	30	0.075
30	30	0.077
60	34	0.087
120	38	0.096
220	38	0.097
460	40	0.102
1400	41	0.104
4320	43	0.107
5760	43	0.109



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 45

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.5 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	0	0
0.1	138	0.35
0.25	146	0.371
0.5	150	0.38
1	152	0.386
2	155	0.394
4	160	0.407
8	164	0.417
15	168	0.427
30	172	0.436
60	175	0.444
120	178	0.452
220	182	0.462
460	185	0.471
1400	190	0.483



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 46

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

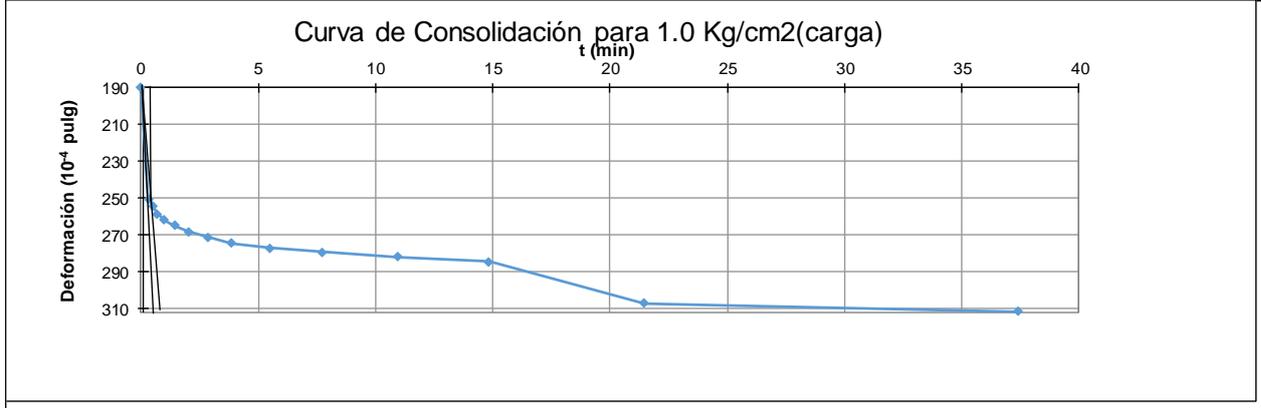
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=1 \text{ Kg/cm}^2(\text{carga})$		
Tiempo (min)	Deform (10 ⁻⁴ pulg)	Deform (mm)
0	190	0.483
0.1	250	0.636
0.25	254	0.646
0.5	259	0.657
1	262	0.665
2	265	0.673
4	268	0.681
8	271	0.689
15	274	0.697
30	277	0.704
60	280	0.71
120	282	0.716
220	285	0.723
460	307	0.78
1400	312	0.792



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 47

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

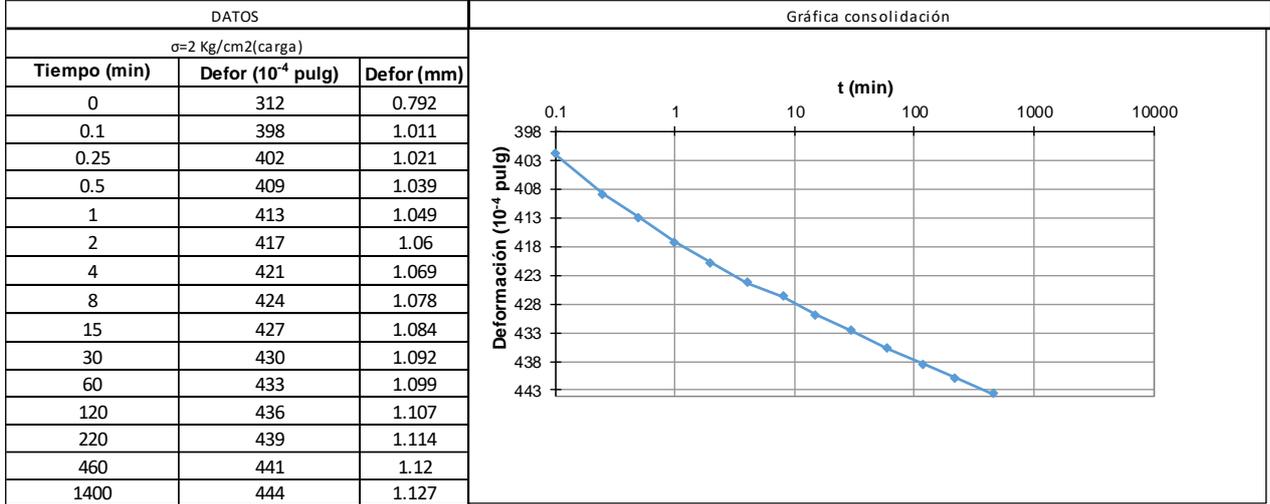
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

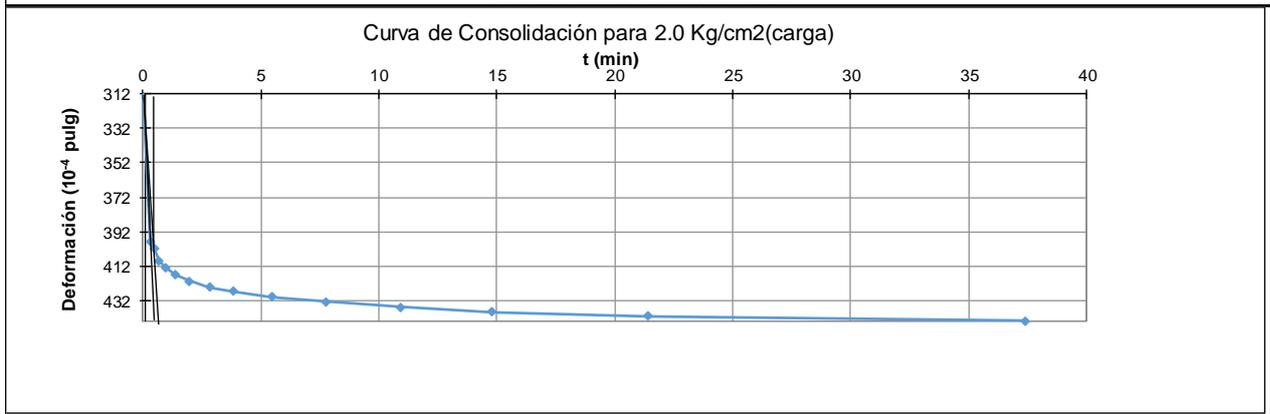
ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 48

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

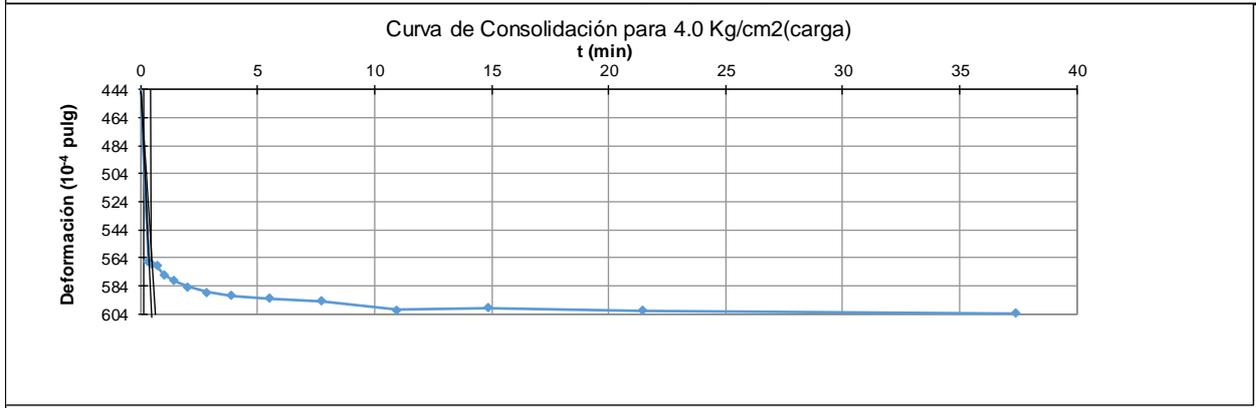
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=4 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)	Deform (mm)
0	444	1.127
0.1	567	1.439
0.25	569	1.445
0.5	570	1.448
1	576	1.463
2	581	1.475
4	585	1.486
8	589	1.495
15	591	1.501
30	593	1.506
60	595	1.512
120	602	1.528
220	600	1.524
460	602	1.529
1400	604	1.533



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 49

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=2 \text{ Kg/cm}^2(\text{descarga})$		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	604	1.533
0.1	595	1.511
0.25	594	1.51
0.5	594	1.509
1	594	1.509
2	594	1.509
4	594	1.508
8	593	1.507
15	593	1.507
30	593	1.507
60	593	1.507
120	593	1.507
220	593	1.507
460	593	1.507
1400	593	1.506



Anexo: 50

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=1 \text{ Kg/cm}^2(\text{descarga})$		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	593	1.506
0.1	582	1.479
0.25	582	1.478
0.5	581	1.477
1	580	1.472
2	579	1.471
4	579	1.47
8	578	1.468
15	578	1.467
30	577	1.466
60	577	1.465
120	576	1.464
220	576	1.463
460	574	1.458
1400	572	1.453





Anexo: 51

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

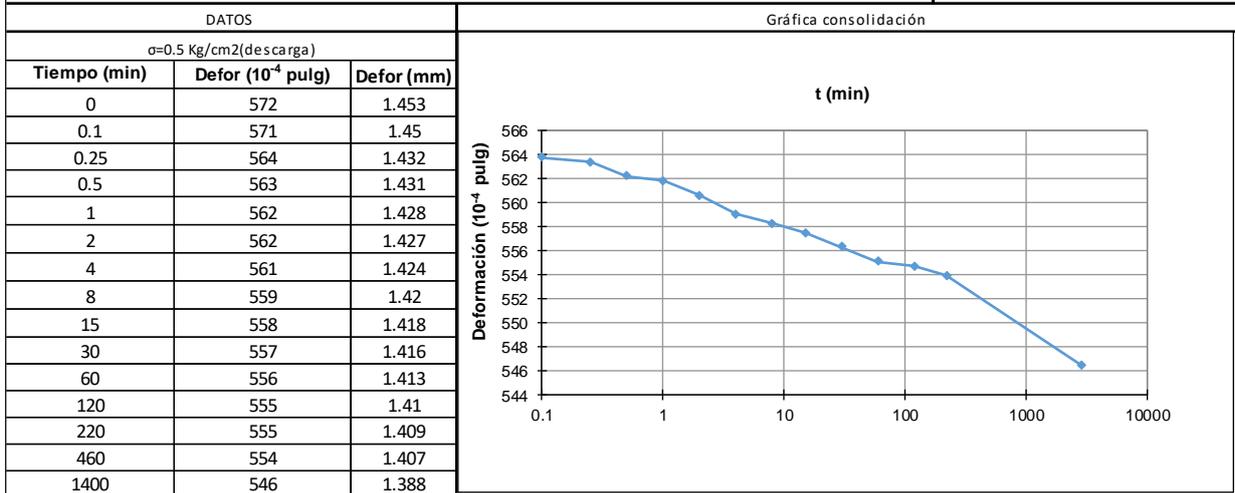
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



Anexo: 52

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

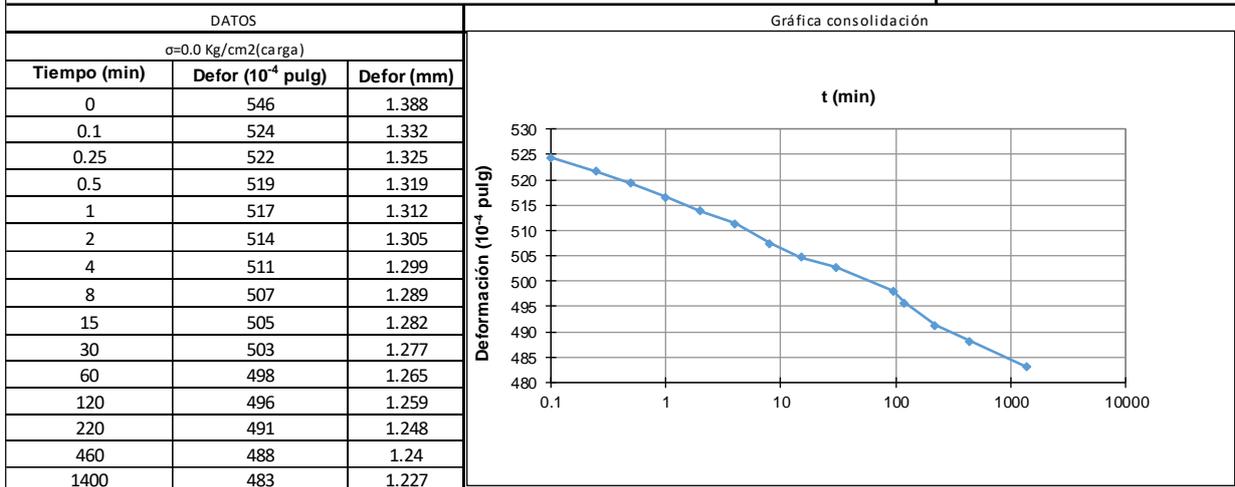
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

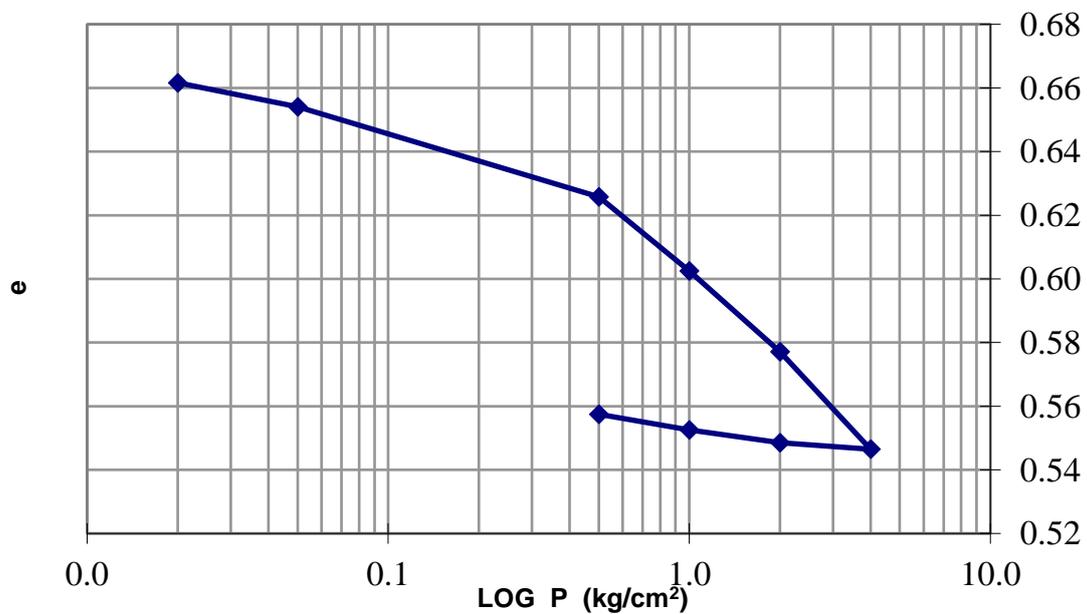


 <p>Universidad Pontificia Bolivariana</p>	Anexo: 53				
	Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017				
	Director de proyecto:		Gerardo Bautista		
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez Sergio Andrés Rincon			ID: 240981	241669	
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos			Norma: INV-151		
Diámetro de la muestra, d :		50.8 mm	Gravedad Específica, G_s :		2.76
Area de la Muestra, A :		20.27 cm ²	Masa Seca, W_s :		74.04 g
Altura de la muestra, h_m :		2.2 cm	Ultima Medición, M_e :		0.1227 cm
densidad, ρ (inicial):		1.89 g/cm ³	densidad, ρ (final):		2.12 g/cm ³
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{W_s}{A\gamma_s} =$		1.32 cm	$h_m - h_s =$		0.88 cm
ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO			
Humedad	ω_{n1}	13.97%	ω_{n2}	20.64%	
Relación de Vacios	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0.662	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0.570	
Saturación	$G_{w1} = \frac{\omega_{n1} G_s}{\epsilon_1} \cdot 100$	58.2%	$G_{w2} = \frac{\omega_{n2} G_s}{\epsilon_2} \cdot 100$	100.0%	
Porosidad	$n_1 = \frac{e_1}{1 + e_1} \cdot 100$	39.8%	$n_2 = \frac{e_2}{1 + e_2} \cdot 100$	36.3%	
Poros Llenos con Agua	$n_{\omega_1} = \frac{n_1 G_{w1}}{100}$	23.2%	$n_{\omega_2} = \frac{n_2 G_{w2}}{100}$	36.3%	
Poros Llenos con Aire	$n_{l_1} = n_1 - n_{\omega_1}$	16.7%	$n_{l_2} = n_2 - n_{\omega_2}$	0.0%	
Altura de sólidos	h_s	1.32 cm	h_s	1.32 cm	
Altura de Agua	$h_{\omega_1} = \frac{\omega_{n1} W_s}{A}$	0.510 cm	$h_{\omega_2} = \frac{\omega_{n2} W_s}{A}$	0.754 cm	
Altura de Aire	$h_{l_1} = \frac{n_{l_1}}{100} h_m$	0.366 cm	$h_{l_2} = \frac{n_{l_2}}{100} [h_m - M_e]$	0.000 cm	
Ultima Medición antes del desmonte			M_e	0.1227 cm	
$h'_1 \equiv h'_2 \equiv h_m$	$h'_1 = h_s + h_{\omega_1} + h_{l_1}$	2.200 cm	$h'_2 = h_s + h_{\omega_2} + h_{l_2} + M_e$	2.200 cm	

Escalón de Carga	Carga, P (kg/cm ²)	Lectura, M (¹ /10000 inch)	$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	$h_m - h_s - M$ (cm)	$e = \frac{h_m - h_s - M}{h_s}$
0	0.00	0.00	0.000	0.88	0.662
I	0.02	3.54	0.000	0.88	0.662
II	0.05	42.91	0.005	0.87	0.654
III	0.50	190.16	0.022	0.83	0.626
IV	1.00	311.81	0.036	0.80	0.602
V	2.00	443.70	0.051	0.76	0.577
VI	4.00	603.54	0.070	0.72	0.546
VII	2.00	592.91	0.068	0.73	0.549
VIII	1.00	572.05	0.066	0.73	0.553
IX	0.50	546.46	0.063	0.74	0.557
X	0.00	483.07	0.056	0.75	0.570

CALCULO HUMEDAD		
	Inicial	Final
$P_{m_{hum+capsula}}$	221.35	227.15
$P_{m_{sec+capsula}}$	209.21	209.21
$P_{capsula}$	122.28	122.28
$P_{suelo seco}$	86.93	86.93
Humedad(%)	13.97	20.64

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION



ANEXO H
ENSAYO CONSOLIDACIÓN EN DIGITALES 2



Anexo: 54

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.02 \text{ Kg/cm}^2(\text{carga})$		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	0	0
0.1	0	0.001
0.25	0	0.001
0.5	0	0.001
1	1	0.002
2	2	0.004
4	2	0.004
8	2	0.006
15	4	0.009
30	6	0.015
60	7	0.019
120	10	0.025
220	10	0.026
460	10	0.026
1400	10	0.026



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 55

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

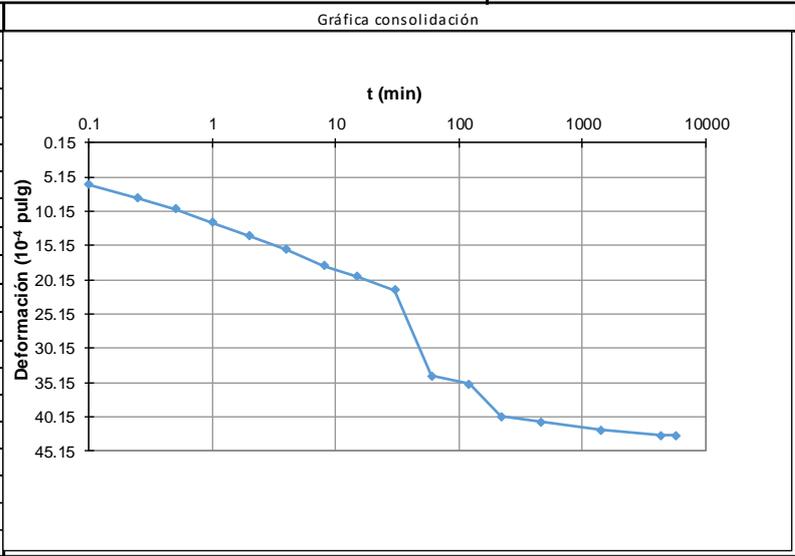
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

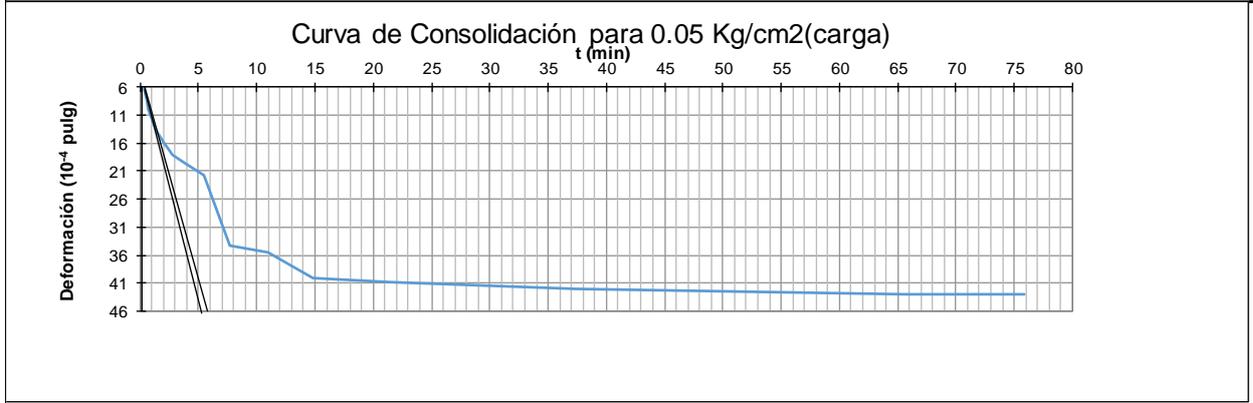
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.05 \text{ Kg/cm}^2(\text{carga})$		
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)	Deform (mm)
0	0	0
0.1	6	0.016
0.25	8	0.021
0.5	10	0.025
1	12	0.03
2	14	0.035
4	16	0.04
8	18	0.046
15	20	0.05
30	22	0.055
60	34	0.087
120	35	0.09
220	40	0.102
460	41	0.104
1400	42	0.107
4320	43	0.109
5760	43	0.109



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 56

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

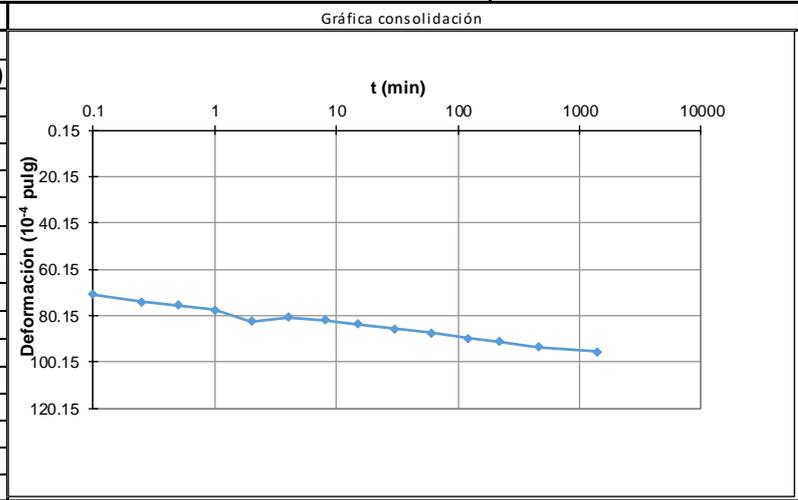
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

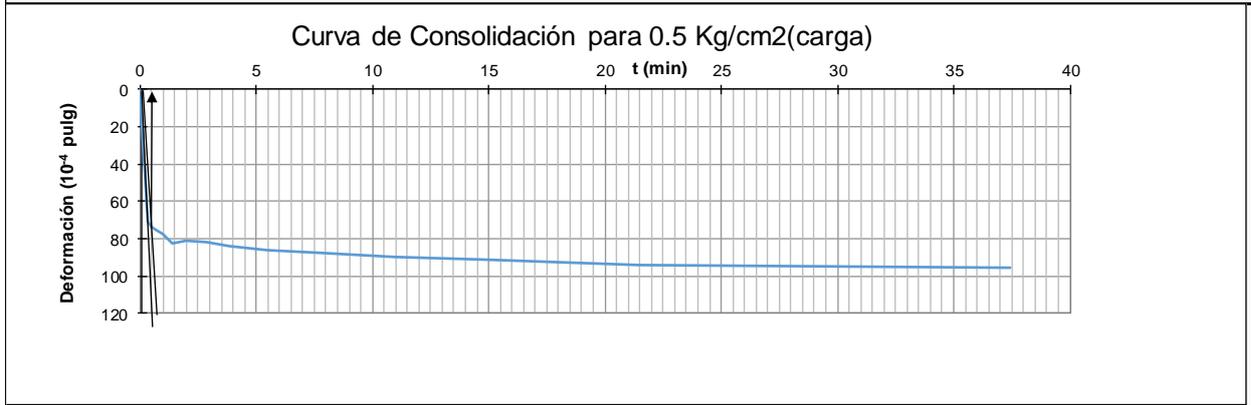
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.5 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	0	0
0.1	71	0.18
0.25	74	0.188
0.5	76	0.192
1	78	0.197
2	83	0.21
4	81	0.205
8	82	0.208
15	84	0.213
30	86	0.218
60	87	0.222
120	90	0.228
220	91	0.232
460	94	0.238
1400	96	0.243



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 57

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

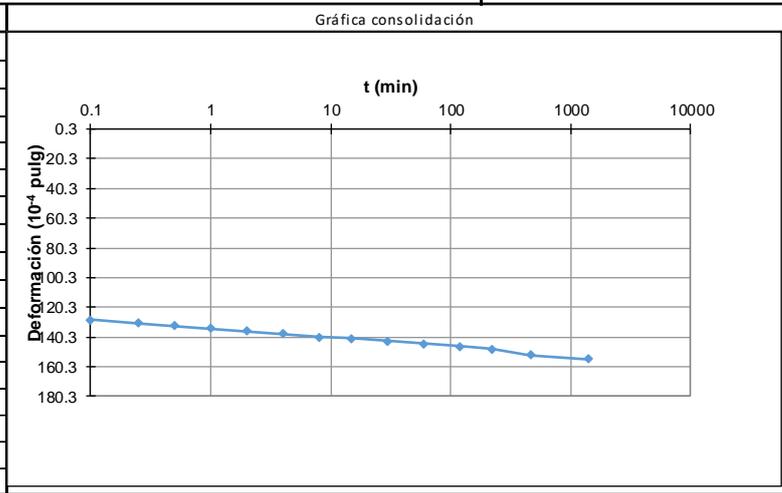
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

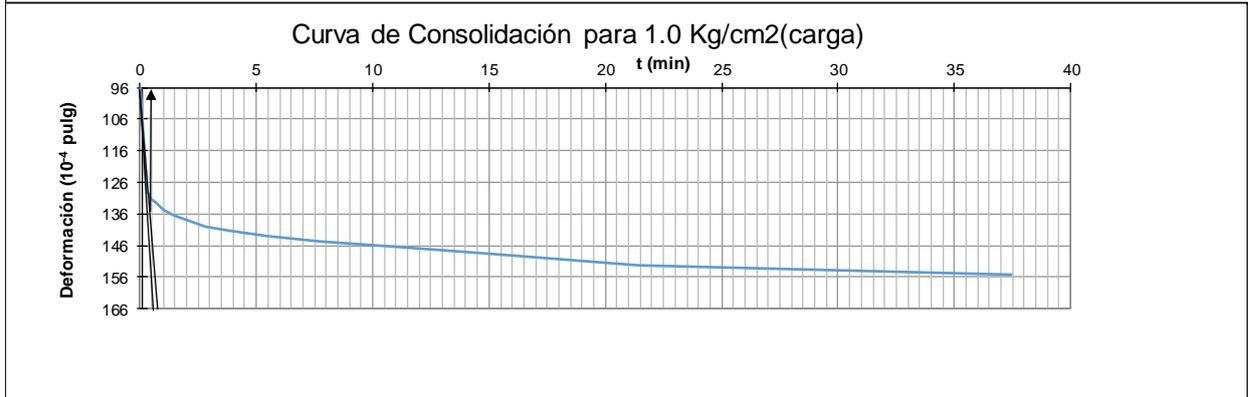
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=1 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)	Deform (mm)
0	96	0.243
0.1	129	0.327
0.25	131	0.333
0.5	133	0.337
1	135	0.342
2	136	0.346
4	138	0.351
8	140	0.356
15	141	0.359
30	143	0.363
60	145	0.368
120	146	0.372
220	148	0.377
460	152	0.387
1400	155	0.394



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 58

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=2 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)	Deform (mm)
0	155	0.394
0.1	225	0.571
0.25	229	0.581
0.5	233	0.592
1	236	0.6
2	239	0.607
4	241	0.613
8	244	0.62
15	246	0.625
30	249	0.632
60	251	0.637
120	253	0.643
220	255	0.648
460	257	0.653
1400	261	0.663



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 59

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

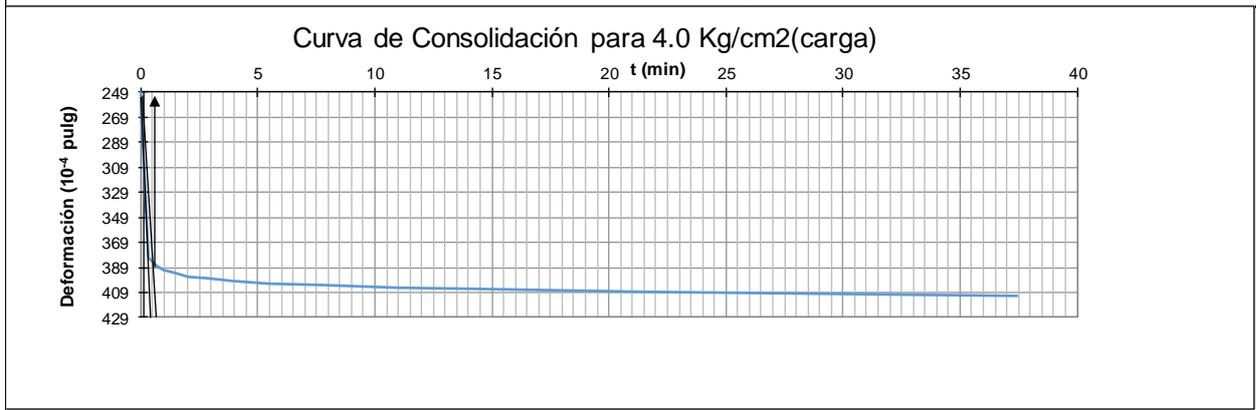
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=4 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)	Deform (mm)
0	249	0.633
0.1	381	0.968
0.25	384	0.976
0.5	388	0.985
1	391	0.993
2	393	0.999
4	396	1.006
8	398	1.011
15	400	1.016
30	402	1.02
60	403	1.024
120	405	1.028
220	407	1.033
460	409	1.038
1400	411	1.045



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 60

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

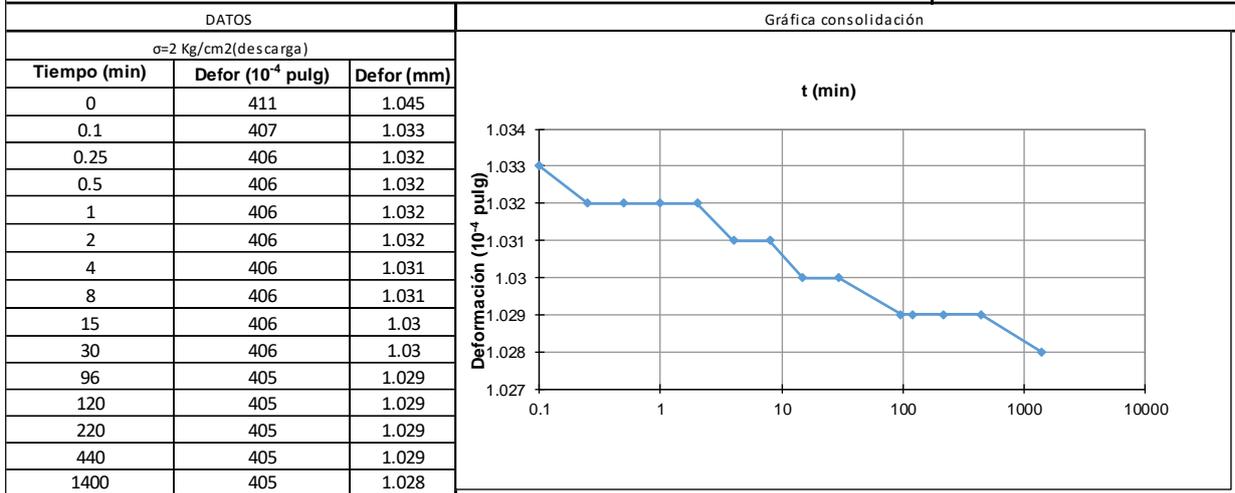
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151



Anexo: 61

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

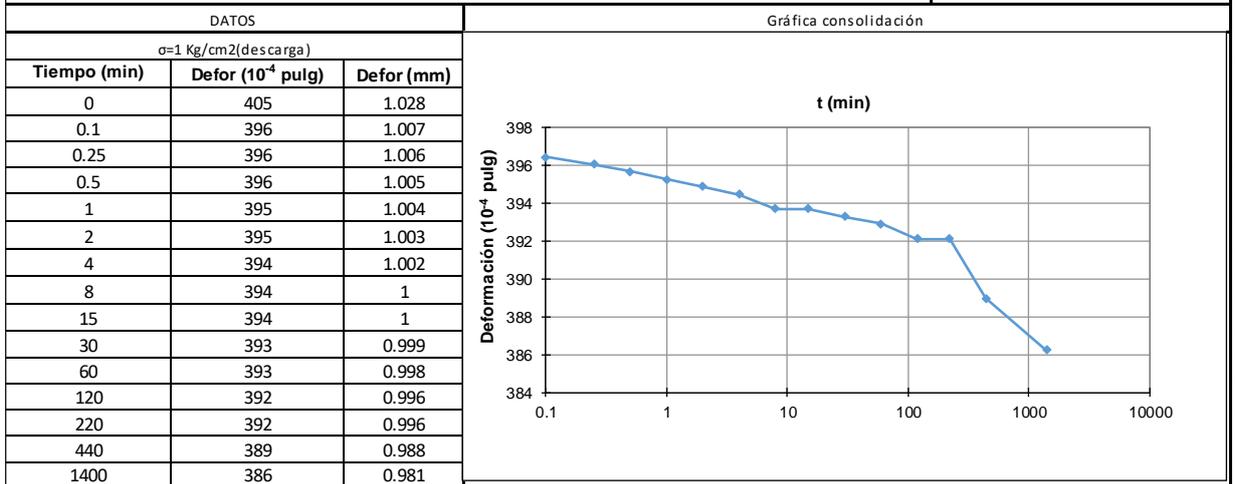
Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151





Anexo: 62

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.5 \text{ Kg/cm}^2$ (descarga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	390	0.991
0.1	384	0.975
0.25	383	0.974
0.5	383	0.973
1	383	0.972
2	382	0.971
4	382	0.97
8	381	0.968
15	381	0.967
30	380	0.965
60	379	0.963
120	378	0.961
220	378	0.96
2880	372	0.945



Anexo: 63

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.0 \text{ Kg/cm}^2$ (descarga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	372	0.945
0.1	357	0.907
0.25	355	0.902
0.5	353	0.896
1	350	0.89
2	347	0.882
4	344	0.875
8	342	0.868
15	339	0.86
30	335	0.852
95	333	0.846
120	331	0.84
220	328	0.833
440	324	0.823
1400	319	0.809

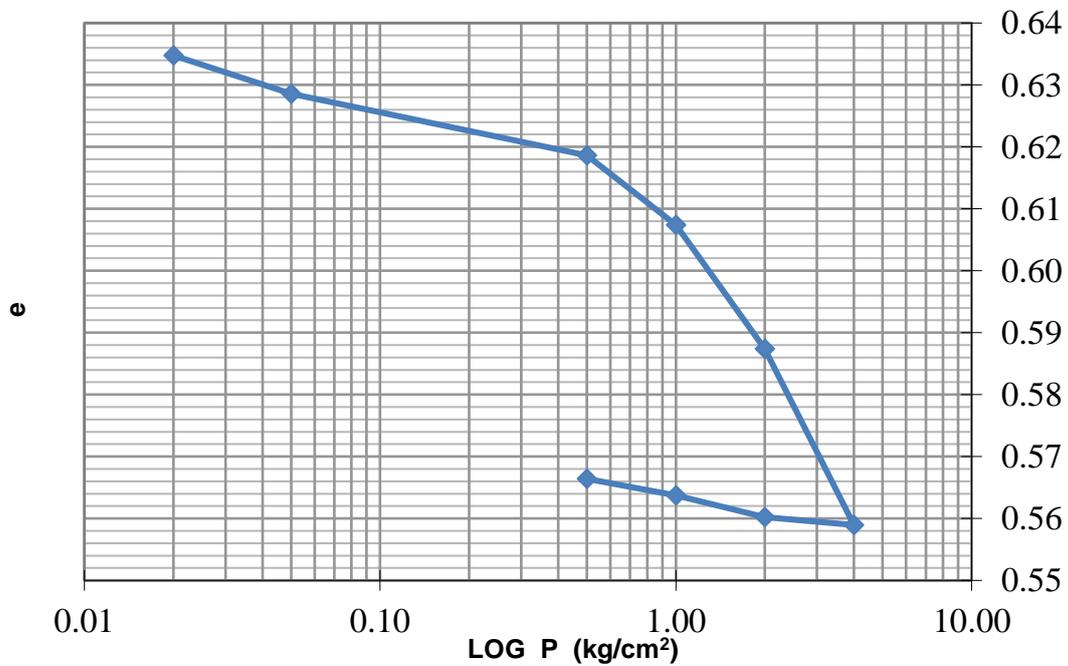


 <p>Universidad Pontificia Bolivariana</p>	Anexo: 64			
	Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017			
	Director de proyecto:		Gerardo Bautista	
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez Sergio Andrés Rincon			ID: 240981	241669
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos			Norma: INV-151	
Diámetro de la muestra, d :	50.8 mm	Gravedad Específica, G_s :	2.76	
Area de la Muestra, A :	20.27 cm ²	Masa Seca, W_s :	75.19 g	
Altura de la muestra, h_m :	2.2 cm	Ultima Medición, M_e :	0.0809 cm	
densidad, ρ (inicial):	1.92 g/cm ³	densidad, ρ (final):	2.12 g/cm ³	
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{W_s}{A \gamma_s} =$	1.34 cm	$h_m - h_s =$	0.86 cm	
	ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO	
Humedad	ω_{n1}	13.97%	ω_{n2}	20.89%
Relación de Vacíos	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0.637	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0.577
Saturación	$G_{w1} = \frac{\omega_{n1} G_s}{\varepsilon_1} \cdot 100$	60.6%	$G_{w2} = \frac{\omega_{n2} G_s}{\varepsilon_2} \cdot 100$	100.0%
Porosidad	$n_1 = \frac{e_1}{1 + e_1} \cdot 100$	38.9%	$n_2 = \frac{e_2}{1 + e_2} \cdot 100$	36.6%
Poros Llenos con Agua	$n_{\omega_1} = \frac{n_1 G_{w1}}{100}$	23.6%	$n_{\omega_2} = \frac{n_2 G_{w2}}{100}$	36.6%
Poros Llenos con Aire	$n_{l1} = n_1 - n_{\omega_1}$	15.3%	$n_{l2} = n_2 - n_{\omega_2}$	0.0%
Altura de sólidos	h_s	1.34 cm	h_s	1.34 cm
Altura de Agua	$h_{\omega_1} = \frac{\omega_{n1} W_s}{A}$	0.518 cm	$h_{\omega_2} = \frac{\omega_{n2} W_s}{A}$	0.775 cm
Altura de Aire	$h_{l1} = \frac{n_{l1}}{100} h_m$	0.337 cm	$h_{l2} = \frac{n_{l2}}{100} [h_m - M_e]$	0.000 cm
Ultima Medición antes del desmonte			M_e	0.0809 cm
$h'_1 \equiv h'_2 \equiv h_m$	$h'_1 = h_s + h_{\omega_1} + h_{l1}$	2.200 cm	$h'_2 = h_s + h_{\omega_2} + h_{l2} + M_e$	2.200 cm

Escalón de Carga	Carga, P (kg/cm ²)	Lectura, M (1/10000 inch)	$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	$h_m - h_s - M$ (cm)	$e = \frac{h_m - h_s - M}{h_s}$
0	0.00	0.00	0.000	0.86	0.637
I	0.02	10.24	0.001	0.85	0.635
II	0.05	42.91	0.005	0.84	0.629
III	0.50	95.67	0.011	0.83	0.619
IV	1.00	155.12	0.018	0.82	0.607
V	2.00	261.02	0.030	0.79	0.587
VI	4.00	411.42	0.048	0.75	0.559
VII	2.00	404.72	0.047	0.75	0.560
VIII	1.00	386.22	0.045	0.76	0.564
IX	0.50	372.05	0.043	0.76	0.566
X	0.00	318.50	0.037	0.77	0.577

CALCULO HUMEDAD		
	Inicial	Final
$P_{m_{hum+capsula}}$	218.04	223.85
$P_{m_{sec+capsula}}$	206.3	206.3
$P_{capsula}$	122.28	122.28
$P_{suelo seco}$	84.02	84.02
Humedad(%)	13.97	20.89

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION



ANEXO I
ENSAYO CONSOLIDACIÓN EN DIGITALES 3



Anexo: 65

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

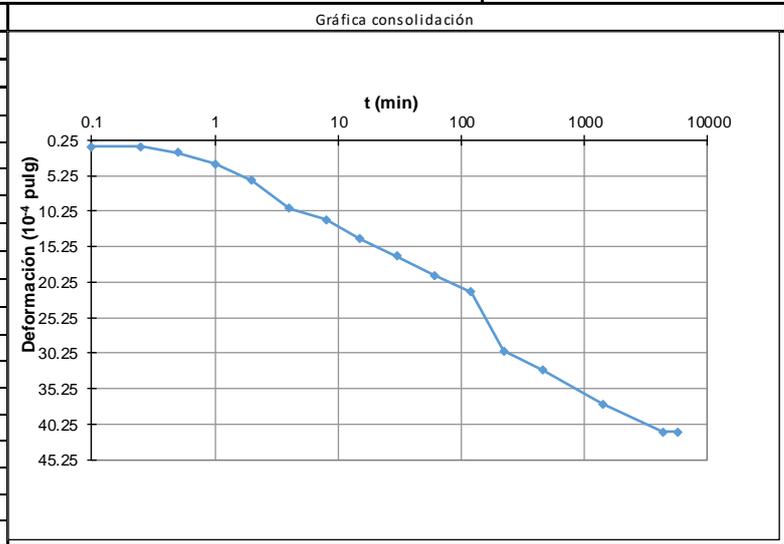
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

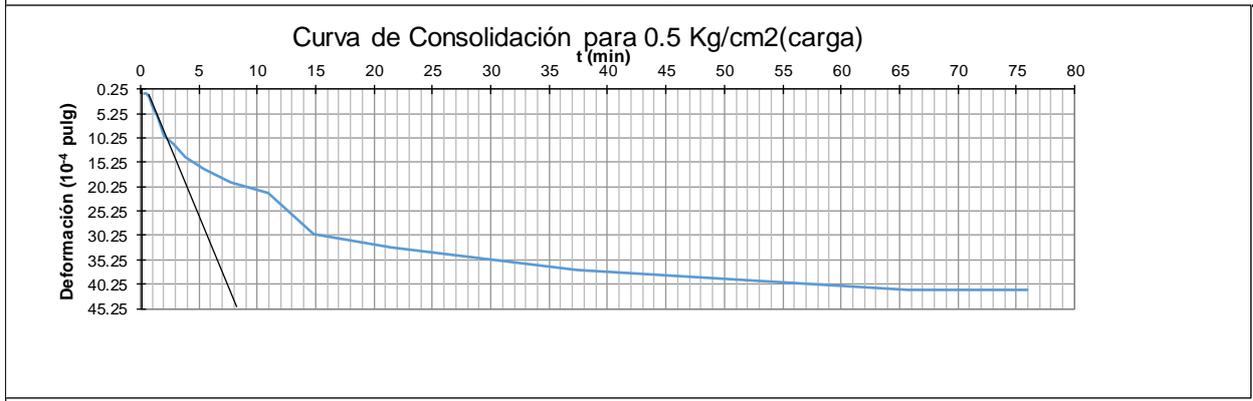
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.02 \text{ Kg/cm}^2(\text{carga})$		
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)	Deform (mm)
0	0	0
0.1	1	0.003
0.25	1	0.003
0.5	2	0.005
1	4	0.009
2	6	0.015
4	10	0.025
8	11	0.029
15	14	0.036
30	17	0.042
60	19	0.049
120	22	0.055
220	30	0.076
460	33	0.083
1400	37	0.095
4320	41	0.105
5760	41	0.105



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 66

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

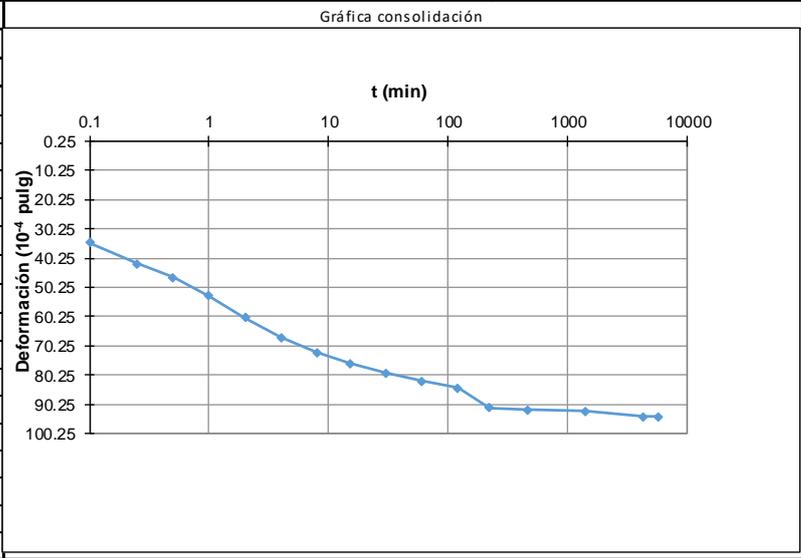
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

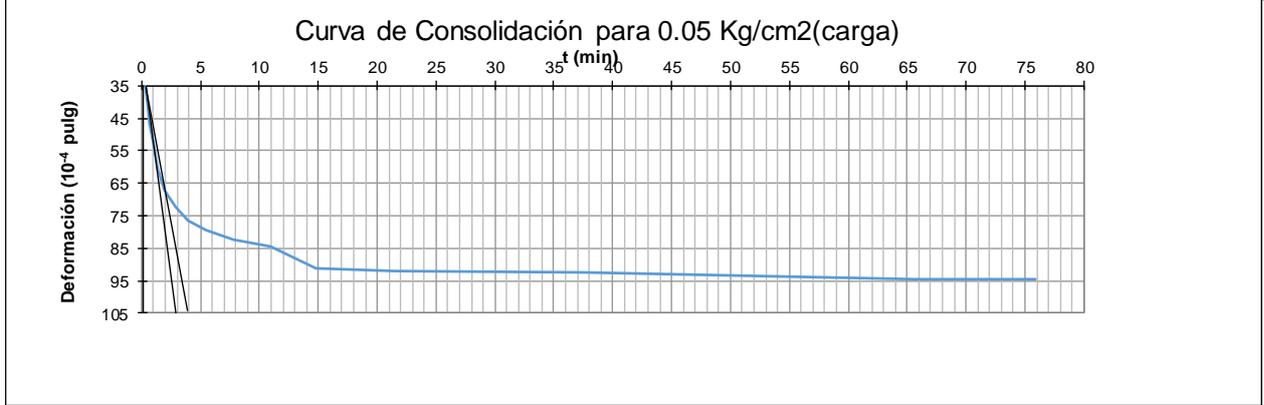
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.05 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Deform (10 ⁻⁴ pulg)	Deform (mm)
0	0	0
0.1	35	0.089
0.25	42	0.107
0.5	47	0.119
1	53	0.135
2	61	0.154
4	67	0.171
8	72	0.184
15	76	0.194
30	80	0.202
60	82	0.209
120	85	0.215
220	91	0.232
460	92	0.234
1400	93	0.235
4320	94	0.24
5760	94	0.24



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 67

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

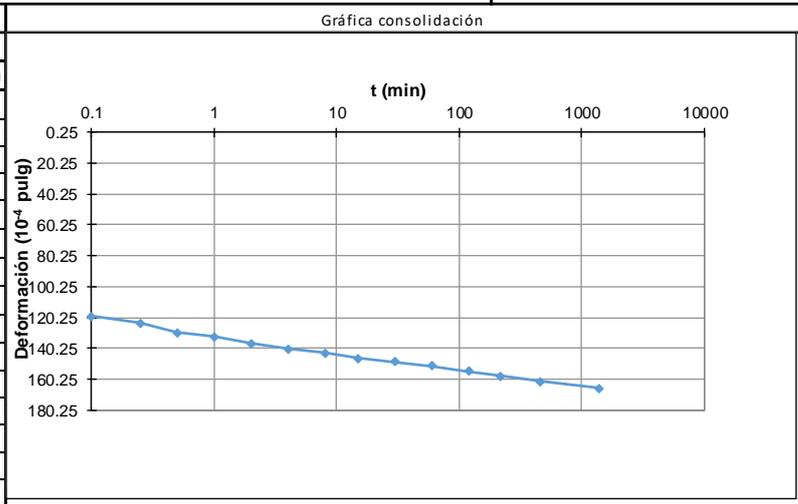
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

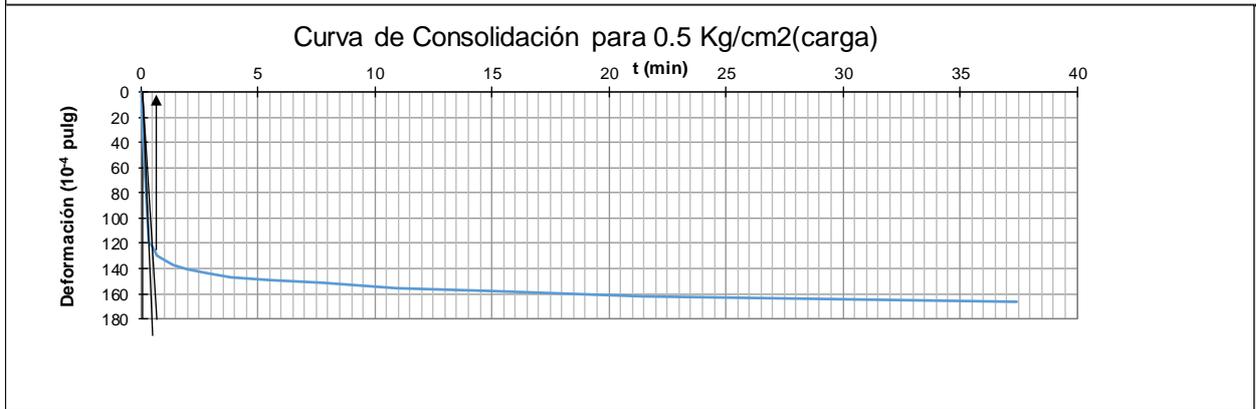
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.5 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	0	0
0.1	119	0.303
0.25	124	0.314
0.5	130	0.33
1	133	0.337
2	137	0.348
4	141	0.357
8	143	0.364
15	146	0.372
30	149	0.378
60	152	0.385
120	155	0.394
220	158	0.401
460	162	0.411
1400	166	0.422



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 68

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=1 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Deform (10^{-4} pulg)	Deform (mm)
0	166	0.422
0.1	231	0.586
0.25	238	0.604
0.5	245	0.623
1	249	0.632
2	250	0.635
4	252	0.64
8	255	0.648
15	258	0.656
30	261	0.662
60	263	0.669
120	267	0.677
220	269	0.683
460	286	0.726
1400	291	0.738



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 69

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

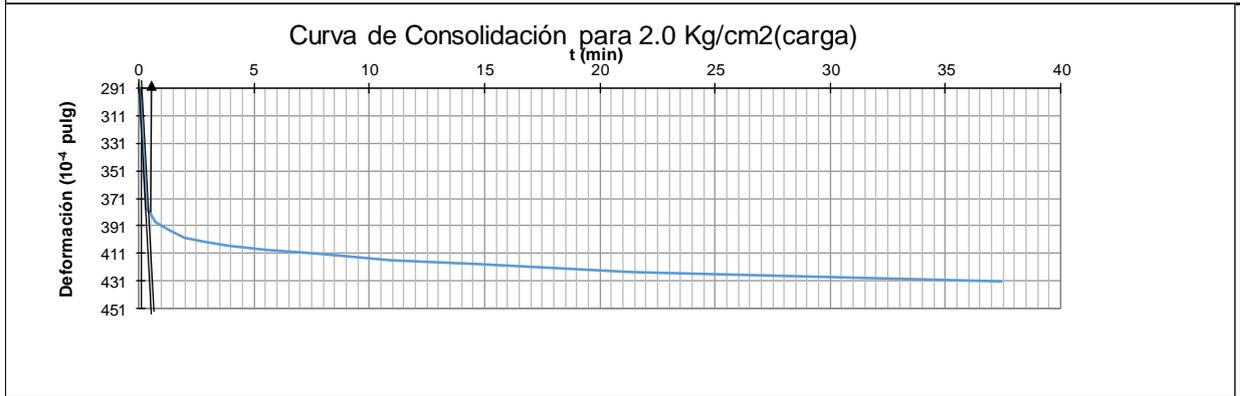
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
σ=2 Kg/cm2(carga)		
Tiempo (min)	Defor (10 ⁻⁴ pulg)	Defor (mm)
0	291	0.738
0.1	378	0.961
0.25	382	0.97
0.5	388	0.985
1	391	0.994
2	395	1.004
4	399	1.014
8	402	1.022
15	405	1.029
30	409	1.038
60	411	1.045
120	416	1.056
220	419	1.064
460	425	1.079
1400	431	1.094



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 70

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

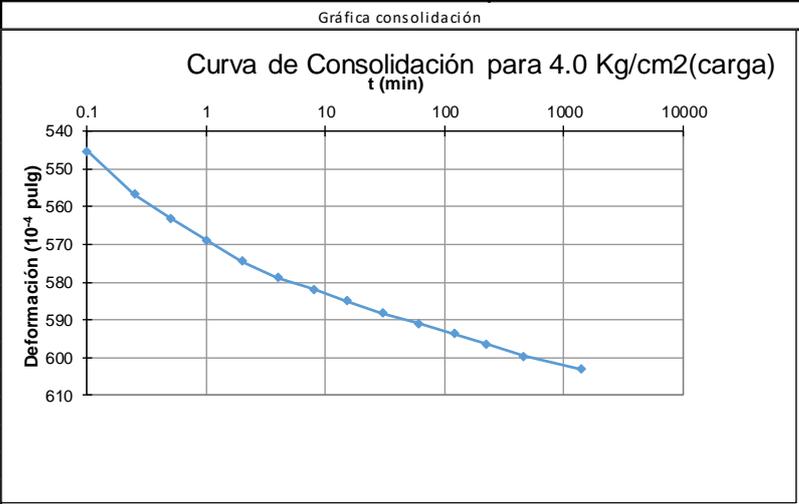
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

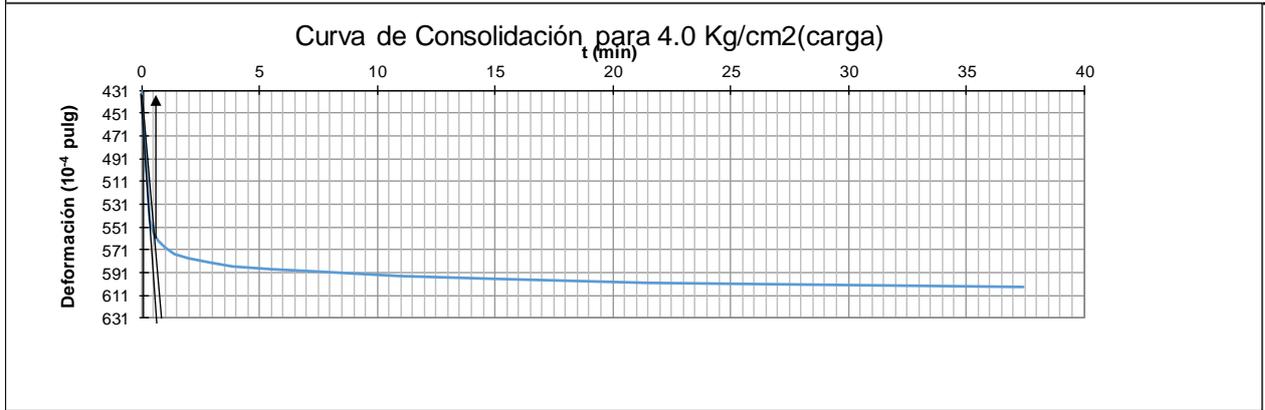
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=4 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	431	1.094
0.1	545	1.385
0.25	557	1.414
0.5	563	1.43
1	569	1.445
2	574	1.459
4	579	1.47
8	582	1.478
15	585	1.486
30	588	1.494
60	591	1.501
120	594	1.508
220	596	1.515
460	600	1.523
1400	603	1.532



GRÁFICA TIEMPO VS DEFORMACIÓN





Anexo: 71

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=2 \text{ Kg/cm}^2$ (descarga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	603	1.532
0.1	590	1.498
0.25	589	1.497
0.5	589	1.496
1	589	1.495
2	588	1.494
4	588	1.493
8	587	1.492
15	586	1.489
30	586	1.488
96	586	1.488
120	586	1.488
220	585	1.487
440	585	1.486
1400	584	1.483



Anexo: 72

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

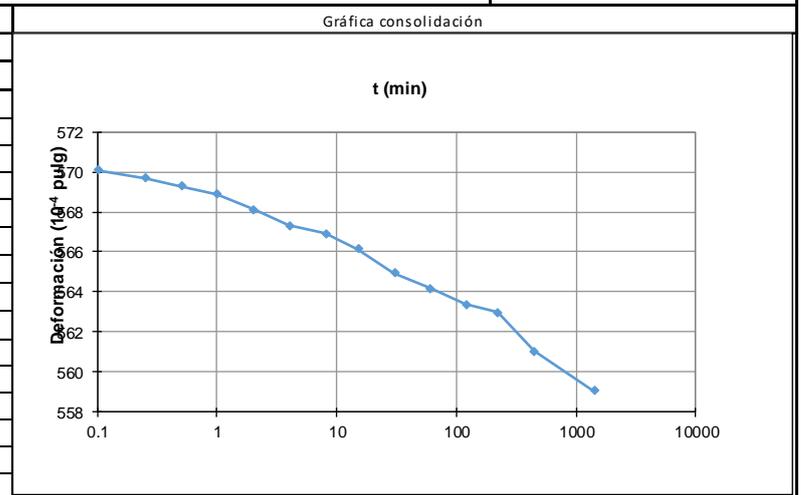
Estudiantes: Stefany loaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=1 \text{ Kg/cm}^2$ (descarga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	584	1.483
0.1	570	1.448
0.25	570	1.447
0.5	569	1.446
1	569	1.445
2	568	1.443
4	567	1.441
8	567	1.44
15	566	1.438
30	565	1.435
60	564	1.433
120	563	1.431
220	563	1.43
440	561	1.425
1400	559	1.42





Anexo: 73

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.5 \text{ Kg/cm}^2$ (descarga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	559	1.42
0.1	550	1.396
0.25	549	1.394
0.5	548	1.393
1	548	1.392
2	547	1.39
4	546	1.388
8	545	1.385
15	544	1.382
30	543	1.379
60	542	1.376
120	541	1.373
220	539	1.369
2880	530	1.345



Anexo: 74

Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017

Director de proyecto: Gerardo Bautista

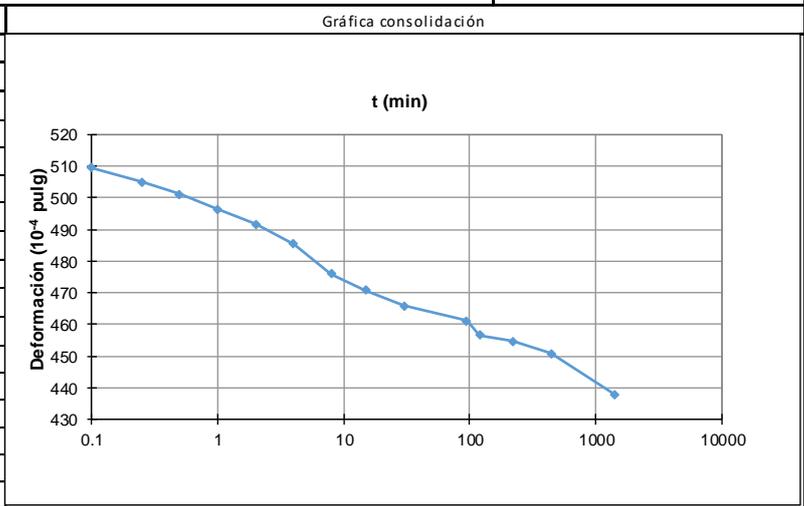
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez
Sergio Andrés Rincon

ID: 240981 241669

Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos

Norma: INV-151

DATOS		
$\sigma=0.0 \text{ Kg/cm}^2$ (carga)		
Tiempo (min)	Defor (10^{-4} pulg)	Defor (mm)
0	530	1.345
0.1	509	1.294
0.25	505	1.283
0.5	501	1.273
1	496	1.261
2	492	1.249
4	485	1.233
8	476	1.209
15	471	1.196
30	466	1.183
95	461	1.171
120	457	1.16
220	455	1.155
440	451	1.145
1400	438	1.112

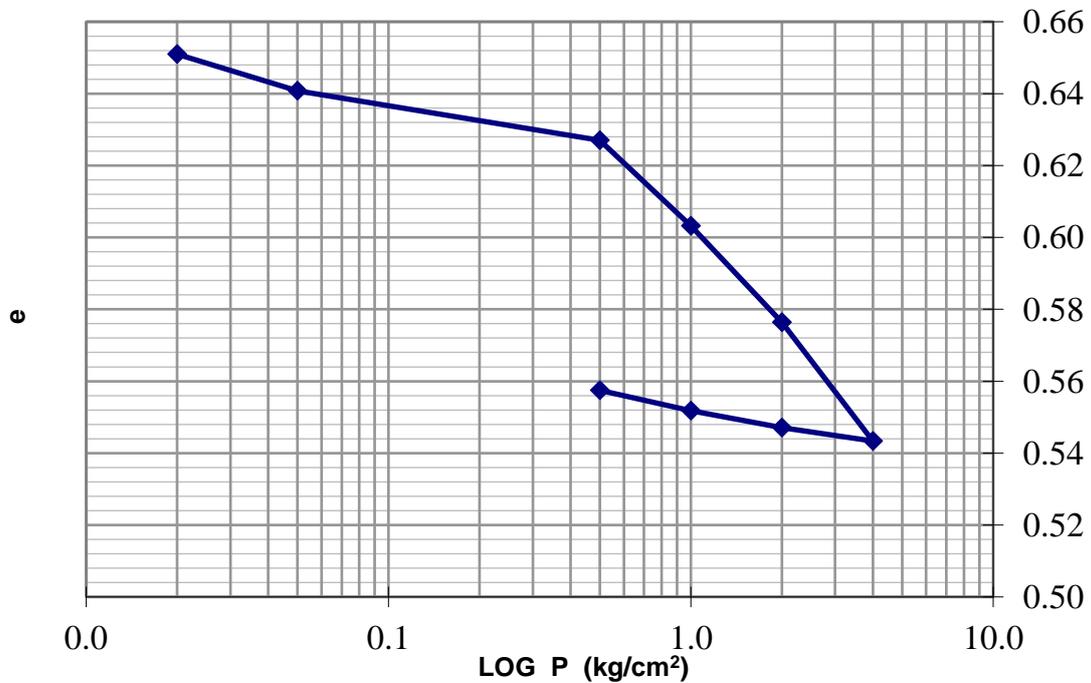


 <p>Universidad Pontificia Bolivariana</p>	Anexo: 75				
	Fecha de ensayo: 22 Noviembre 2017				
	Director de proyecto:		Gerardo Bautista		
Estudiantes: Stefany Ioaiza Gómez Sergio Andrés Rincon			ID: 240981	241669	
Ensayo: Consolidación unidimensional de los suelos			Norma: INV-151		
Diámetro de la muestra, d :		50.8 mm	Gravedad Específica, G_s :		2.76
Area de la Muestra, A :		20.27 cm ²	Masa Seca, W_s :		74.19 g
Altura de la muestra, h_m :		2.2 cm	Ultima Medición, M_e :		0.1112 cm
densidad, ρ (inicial):		1.89 g/cm ³	densidad, ρ (final):		2.12 g/cm ³
Altura de Sólidos, $h_s = \frac{W_s}{A\gamma_s} =$		1.33 cm	$h_m - h_s =$		0.87 cm
ANTES DEL ENSAYO		DESPUES DEL ENSAYO			
Humedad	ω_{n1}	13.63%	ω_{n2}	20.83%	
Relación de Vacios	$e_1 = \frac{h_m - h_s}{h_s}$	0.659	$e_2 = \frac{h_m - h_s - M_e}{h_s}$	0.575	
Saturación	$G_{w1} = \frac{\omega_{n1} G_s}{\varepsilon_1} \cdot 100$	57.1%	$G_{w2} = \frac{\omega_{n2} G_s}{\varepsilon_2} \cdot 100$	100.0%	
Porosidad	$n_1 = \frac{e_1}{1 + e_1} \cdot 100$	39.7%	$n_2 = \frac{e_2}{1 + e_2} \cdot 100$	36.5%	
Poros Llenos con Agua	$n_{\omega_1} = \frac{n_1 G_{w1}}{100}$	22.7%	$n_{\omega_2} = \frac{n_2 G_{w2}}{100}$	36.5%	
Poros Llenos con Aire	$n_{l_1} = n_1 - n_{\omega_1}$	17.0%	$n_{l_2} = n_2 - n_{\omega_2}$	0.0%	
Altura de sólidos	h_s	1.33 cm	h_s	1.33 cm	
Altura de Agua	$h_{\omega_1} = \frac{\omega_{n1} W_s}{A}$	0.499 cm	$h_{\omega_2} = \frac{\omega_{n2} W_s}{A}$	0.763 cm	
Altura de Aire	$h_{l_1} = \frac{n_{l_1}}{100} h_m$	0.375 cm	$h_{l_2} = \frac{n_{l_2}}{100} [h_m - M_e]$	0.000 cm	
Ultima Medición antes del desmonte			M_e	0.1112 cm	
$h'_1 \equiv h'_2 \equiv h_m$	$h'_1 = h_s + h_{\omega_1} + h_{l_1}$	2.200 cm	$h'_2 = h_s + h_{\omega_2} + h_{l_2} + M_e$	2.200 cm	

Escalón de Carga	Carga, P (kg/cm ²)	Lectura, M (1/10000 inch)	$\varepsilon' = \frac{M}{h_m}$	$h_m - h_s - M$ (cm)	$e = \frac{h_m - h_s - M}{h_s}$
0	0.00	0.00	0.000	0.87	0.659
I	0.02	41.34	0.005	0.86	0.651
II	0.05	94.49	0.011	0.85	0.641
III	0.50	166.14	0.019	0.83	0.627
IV	1.00	290.55	0.034	0.80	0.603
V	2.00	430.71	0.050	0.76	0.576
VI	4.00	603.15	0.070	0.72	0.543
VII	2.00	583.86	0.067	0.73	0.547
VIII	1.00	559.06	0.065	0.73	0.552
IX	0.50	529.53	0.061	0.74	0.557
X	0.00	437.80	0.051	0.76	0.575

CALCULO HUMEDAD		
	Inicial	Final
$P_{m_{hum+capsula}}$	216.8	222.79
$P_{m_{sec+capsula}}$	205.46	205.46
$P_{capsula}$	122.28	122.28
$P_{suelo seco}$	83.18	83.18
Humedad(%)	13.63	20.83

RELACION DE VACIOS VRS LOGARITMO DE PRESION



ANEXO J
PROCESO CONSTRUCTIVO MODELO A ESCALA

Recolección de material en la ciudad de Barrancabermeja



Construcción de modelo a escala



Capa de 10cm de triturado



Se realizó el respectivo tamizado del material arcilloso por la malla #4:



Se utilizaron geotextiles no tejidos para separar las capas de triturado de las de arcilla



Capas de 10cm de espesor



Se sacaron muestras a 25 cm de espesor para controlar la humedad:



Saturación completa y constante



Deformímetros puestos en 0



Aplicación de carga completa sobre el estrato de arcilla



ANEXO K
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
INV E 123-13

DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS DE LOS SUELOS

INV E – 123 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Esta norma se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo. La distribución de las partículas mayores de 75 μm (retenidas en el tamiz No. 200) se determina por tamizado, mientras que la distribución de los tamaños de las partículas menores de 75 μm se determina por un proceso de sedimentación empleando un hidrómetro (nota 1 y nota 2).

Nota 1: Si se desea, la separación de la muestra para aplicar el método descrito en esta norma se puede hacer en el tamiz No 4 (4.75 mm), en el No. 40 (425 μm), o en el tamiz No. 200 (75 μm), en vez del tamiz No 10. Se debe mencionar en el informe cuál fue el tamiz utilizado.

Nota 2: Se estipulan dos tipos de aparatos de dispersión: (1) un mezclador mecánico de alta velocidad y (2) dispersión por aire. Los resultados de muchas investigaciones indican que los equipos de dispersión por aire producen una dispersión más positiva en suelos finos plásticos con tamaños inferiores a 20 μm , así como una degradación apreciablemente inferior en todos los tamaños, cuando se usa con suelos arenosos. Debido a las ventajas definitivas de la dispersión por aire, se recomienda su uso. Los resultados obtenidos con los dos aparatos difieren en magnitud, dependiendo del tipo de suelo, especialmente para tamaños menores de 20 μm .

- 1.2 Esta norma reemplaza las normas INV E-123-07 e INV E-124-07.

2 EQUIPO

- 2.1 *Dos balanzas* – Una con sensibilidad de 0.01 g para pesar material que pasa el tamiz de 2.0 mm (No. 10) y otra con sensibilidad de 0.1 % de la masa de la muestra, para pesar los materiales retenidos en el tamiz de 2.0 mm (No. 10).

- 2.2 *Tamices de malla cuadrada* – Un juego completo de tamices, que incluye los siguientes:

75 mm (3")	2.00 mm (No. 10)
50 mm (2")	850 μm (No. 20)
37.5 mm (1-1/2")	425 μm (No. 40)
25 mm (1")	250 μm (No. 60)
19.0 mm (3/4")	106 μm (No. 140)
9.5 mm (3/8")	75 μm (No. 200)
4.75 mm (No. 4)	

1.1.1 De manera alternativa, se puede usar una serie de tamices tal, que al dibujar la curva granulométrica, se obtenga una separación uniforme entre los puntos del gráfico. Esta serie está integrada por los siguientes tamices:

75 mm (3")	1.10 mm (No. 16)
37.5 mm (1-½")	600 μm (No. 30)
19.0 mm (¾")	300 μm (No. 50)
9.5 mm (3/8")	150 μm (No. 100)
4.75 mm (No. 4)	75 μm (No. 200)
2.36 mm (No. 8)	

1.2 *Aparato agitador* – Se pueden emplear dos aparatos, denominados A y B:

1.2.1 *Aparato A* - Un agitador operado mecánicamente, en el cual un motor eléctrico apropiado hace girar un eje vertical a una velocidad no menor de 10 000 revoluciones por minuto, sin carga. El eje debe estar equipado con una paleta agitadora reemplazable, hecha de metal, plástico o caucho duro, como se muestra en la Figura 123 - 1. El eje debe ser de una longitud tal, que la paleta agitadora pueda operar a no menos de 19 mm (¾") ni más de 38.1 mm (1½") por encima del fondo del recipiente de dispersión. El recipiente de dispersión, que se debe ajustar a alguno de los diseños mostrados en la Figura 123 - 2, deberá contener la totalidad de la muestra mientras ella está siendo dispersada.

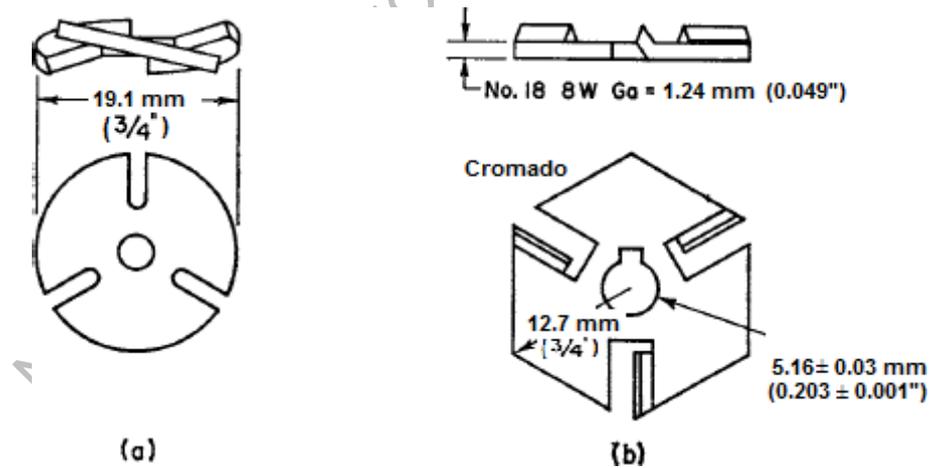


Figura 123 - 1. Detalles de paletas agitadoras

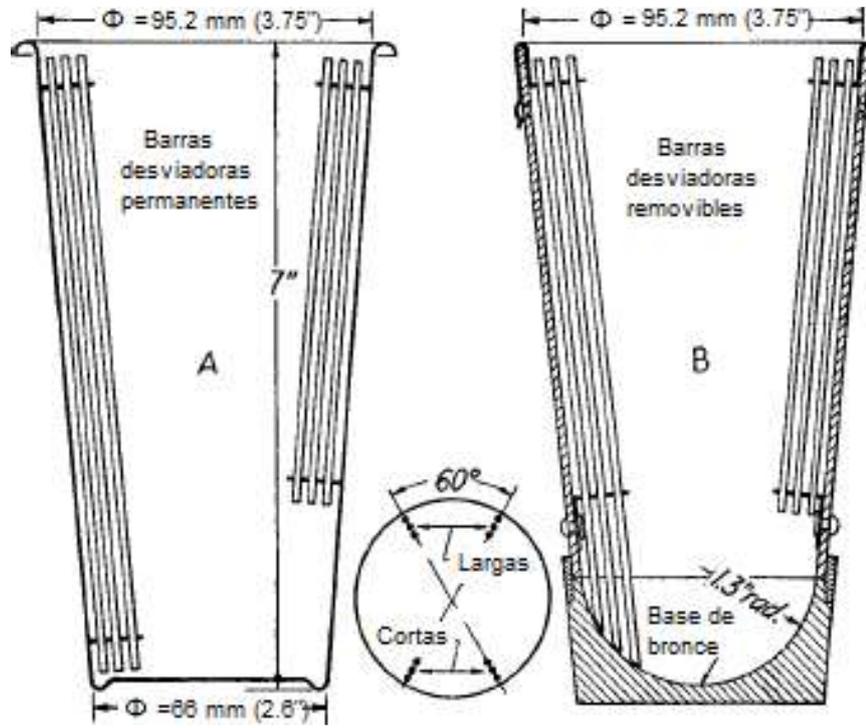


Figura 123 - 2. Recipientes de dispersión del Aparato A

1.1.1 *Aparato B* – Un recipiente de dispersión de chorro de aire, conforme con los detalles generales que muestra la Figura 123 - 3.

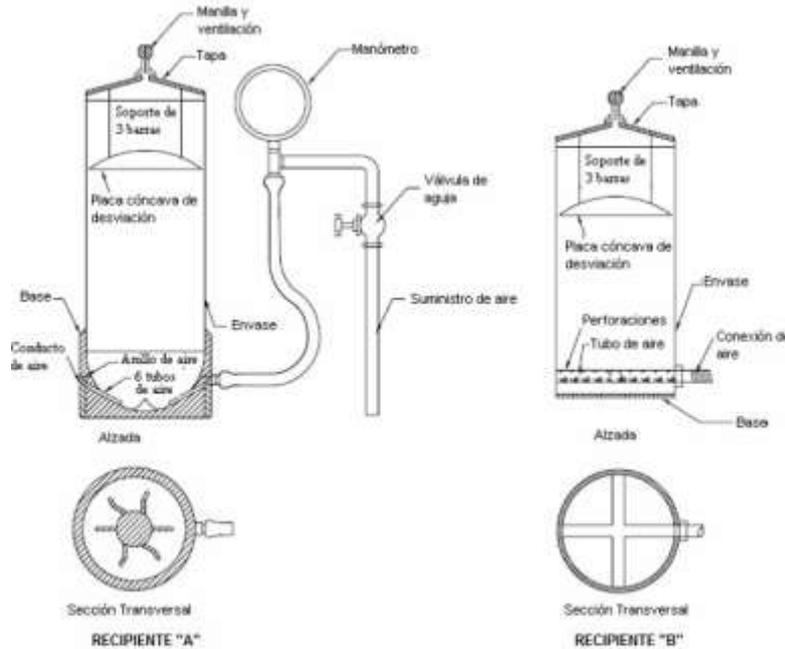


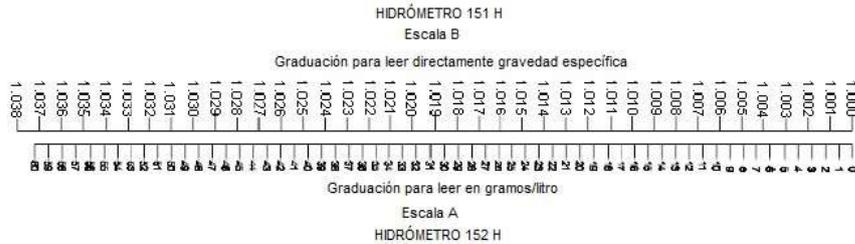
Figura 123 - 3. Recipientes de dispersión de chorro de aire del Aparato B

Nota 3: La cantidad de aire requerida para un recipiente de dispersión de chorro de aire (por inyección) es del orden de 0.06 m³/min (2 pies³/min); algunos compresores de aire pequeños no tienen la capacidad para proporcionar el aire suficiente para operar el recipiente.

Nota 4: Otro tipo de aparato de dispersión de aire, conocido como tubo de dispersión, desarrollado por Chu y Davidson en el Iowa State Collage, da resultados equivalentes a aquellos obtenidos con los recipientes de chorro de aire. Cuando se usa este aparato, la saturación de la muestra se puede hacer directamente en el cilindro de sedimentación, eliminando así la necesidad de transferir la lechada. Si se utiliza el tubo de dispersión, se debe hacer mención de ello en el informe.

Nota 5: El agua se puede condensar en los tubos de aire cuando ellos no están en uso. Esta agua debe ser retirada, ya sea usando una trampa de agua en la tubería de aire o soplando el agua fuera de la tubería antes de usar el aire con fines de dispersión.

- 1.1 Hidrómetro** – Conforme a los requisitos para los hidrómetros 151 H o 152 H de la norma ASTM E 100, graduado para leer, de acuerdo con la escala que tenga grabada, la gravedad específica de la suspensión o los gramos por litro de suspensión. En el primer caso, la escala tiene valores de gravedad específica que van de 0.995 a 1.038 y estará calibrado para leer 1.00 en agua destilada a 20° C (68° F). Este hidrómetro se identifica como 151 H. En el otro caso, la escala tiene valores de gramos de suelo por litro (g/l) que van de - 5 a + 60. Se identifica como 152 H y está calibrado para el supuesto de que el agua destilada tiene gravedad específica de 1.00 a 20° C (68° F) y que el suelo en suspensión tiene una gravedad específica de 2.65. Las dimensiones de estos hidrómetros son las mismas, siendo la escala la única característica que los distingue (Figura 123 - 4).



La escala de gravedad específica debe calibrarse para leer 1.000 a 20° C (68° F) y debe extenderse para una capacidad de lectura desde 0.995 hasta 1.038. La escala gramos/Litro debe extenderse desde -5 g/l, con respecto a cero (1.000 de gravedad específica) hasta 60 g/l. El bulbo debe ser simétrico por encima y por debajo del diámetro medio y debe soplar dentro de un molde para garantizar uniformidad del producto.

El diámetro del vástago puede variar para ajustar la longitud de la escala que se especifique pero debe ser de diámetro uniforme de extremo a extremo.

La exactitud de la escala debe ser de \pm una división de la misma. Distribuido uniformemente en toda su longitud.

- Hidrómetros provistos de escala "B" deben ser identificados como No. 151 H
- Hidrómetros provistos de escala "A" deben ser identificados como No. 152 H

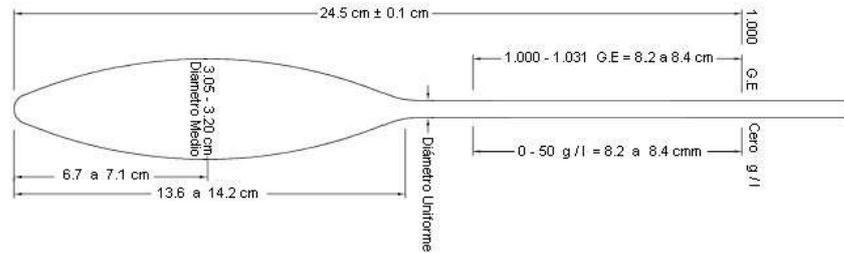


Figura 123 - 4. Hidrómetro

- 1.2 Cilindro de vidrio para sedimentación** – De unos 457 mm (18") de alto y 63.5 mm (2½") de diámetro, y marcado para un volumen de 1000 ml a 20° C (68°

). El diámetro interior debe ser tal, que la marca de 1000 ml se encuentre a 360 ± 20 mm (14 ± 1.0 ") del fondo, en el interior del cilindro (Figura 123 - 5).



Figura 123 - 5. Cilindros para sedimentación

- 1.1** *Termómetro de inmersión* – Con apreciación de 0.5° C (0.9° F).
- 1.2** *Cronómetro o reloj.*
- 1.3** *Horno* – Capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta $110 \pm 5^{\circ}$ C ($230 \pm 9^{\circ}$ F).
- 1.4** *Baño de agua o cuarto de temperatura constante* – Se utiliza para mantener la suspensión de suelo a temperatura constante durante el análisis del hidrómetro, evitándose de esta forma las correcciones por temperatura. Un baño de agua satisfactorio, es un tanque con aislamiento que mantiene la suspensión a una temperatura constante conveniente, del orden de 20° C (68° F). Este aparato se muestra en la Figura 123 - 6. En aquellos casos en los cuales el trabajo se lleve a cabo en un cuarto con temperatura constante controlada automáticamente, el baño de agua no es necesario.

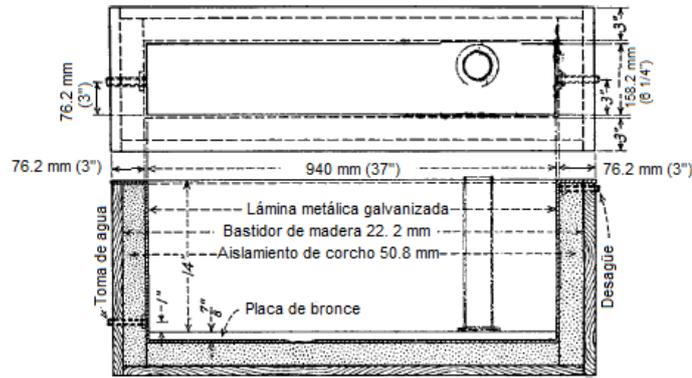


Figura 123 - 6. Esquema del baño de agua

- 1.1 *Vaso de precipitados (Beaker)* – Con una capacidad de 250 ml.
- 1.2 *Recipientes* – Recipientes apropiados, hechos de material no corrosible y que no estén sujetos a cambio de masa o desintegración a causa de repetidos calentamientos y enfriamientos. Los recipientes deben tener tapas que se ajusten perfectamente, para evitar pérdidas de humedad antes de determinar la masa inicial de las muestras y para prevenir la absorción de humedad de la atmósfera después del secado y antes de la determinación de la masa final.
- 1.3 *Varilla de vidrio* – Una varilla de vidrio apropiada para agitar la muestra.
- 1.4 *Cepillo y brocha* – Para limpiar las mallas de los tamices.

2 REACTIVOS

- 2.1 *Agente dispersante* – Una solución de hexametáfosfato de sodio en agua destilada o desmineralizada, en proporción de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución (nota 6).

Nota 6: Las soluciones de esta sal se deberán ser preparar frecuentemente (al menos una vez al mes) o ajustar su pH de 8 a 9, por medio de carbonato de sodio. Las botellas que contienen soluciones deberán tener marcada la fecha de preparación.

- 2.2 *Agua* – Toda agua utilizada deberá ser destilada o desmineralizada. El agua para la prueba con el hidrómetro se deberá llevar hasta la temperatura que prevalecerá durante el ensayo. Por ejemplo, si el cilindro de sedimentación se

va a colocar en el baño de agua, la temperatura del agua destilada o desmineralizada que se va a utilizar se deberá llevar a la temperatura controlada de dicho baño; o si el cilindro de sedimentación se va a colocar en el cuarto de temperatura controlada, el agua para el ensayo se deberá encontrar a la temperatura del cuarto. La temperatura normal de ensayo es 20° C (68° F).

1 MUESTRA

1.1 Se prepara la muestra de ensayo para el análisis mecánico como se describe en la norma INV E-106, la cual estará constituida por dos fracciones: una retenida sobre el tamiz de 2 mm (No. 10) y otra que pasa dicho tamiz. Ambas fracciones se ensayarán por separado. La masa del suelo secado al aire y seleccionado para el ensayo, como se indica en la norma INV E-106, deberá ser suficiente para producir las cantidades requeridas para el análisis mecánico, como sigue:

1.1.1 Para la porción de muestra retenida en el tamiz de 2 mm (No. 10), la masa dependerá del tamaño máximo de partícula, como se indica a continuación:

Diámetro nominal de las partículas mayores	Masa mínima aproximada de la porción, g
9.5 mm (3/8")	500
19.0 mm (3/4")	1000
25.4 mm (1")	2000
38.1 mm (1 1/2")	3000
50.8 mm (2")	4000
76.2 mm (3")	5000

1.1.2 El tamaño de la porción que pasa tamiz de 2 mm (No. 10) será, aproximadamente, de 115 g para suelos arenosos y de 65 g para suelos limosos y arcillosos.

1.2 En la norma INV E-106, se dan indicaciones para la pesada del suelo secado al aire y seleccionado para el ensayo, para la separación del suelo sobre el tamiz de 2.0 mm (No. 10) por medio del tamizado en seco y lavado, y para la pesada de la fracción lavada y secada, retenida en el tamiz de 2.0 mm (No. 10). Con estas dos masas, se pueden calcular los porcentajes retenido y que pasa el tamiz de 2.0 mm (No. 10), de acuerdo con el numeral 7.1.

Nota 7: Se pueden comprobar las masas, así como la completa pulverización de los terrones, pesando la porción de muestra que pasa el tamiz de 2 mm (No. 10) y agregándole este valor a la masa de la porción de muestra lavada y secada en el horno, retenida en el mismo tamiz.

1 ANÁLISIS POR MEDIO DE TAMIZADO, DE LA FRACCIÓN RETENIDA EN EL TAMIZ DE 2.0 mm (No. 10)

- 1.1** La porción de muestra retenida en el tamiz de 2.0 mm (No. 10) se separa en una serie de fracciones, usando los tamices de 75 mm (3"), 50 mm (2"), 37.5 mm (1 ½"), 25.0 mm (1"), 19.0 mm (¾"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (No. 4) y 2.00 mm (No. 10), o los que sean necesarios, dependiendo de la muestra o de las especificaciones aplicables al material que se ensaya.
- 5.2** En la operación de tamizado manual se sacude(n) el tamiz o tamices con un movimiento lateral y vertical acompañado de vibración y recorriendo circunferencias, de forma que la muestra se mantenga en movimiento continuo sobre las mallas. En ningún caso se permite girar o manipular fragmentos de la muestra para que pasen a través de un tamiz. Al desmontar los tamices se debe comprobar que la operación está terminada; esto se sabe cuando no pasa más del 1 % de la parte retenida al tamizar durante un minuto, operando cada tamiz individualmente. Si quedan partículas atrapadas en la malla, se deben separar con una brocha o cepillo y reunir las con lo retenido en el tamiz. Cuando se utilice una tamizadora mecánica, el resultado se puede verificar usando el método manual.
- 5.3** Se determina la masa de cada fracción en una balanza con una sensibilidad de 0.1 %. La suma de las masas de todas las fracciones y la masa inicial de la muestra no deben diferir en más de 1 %.

6 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA FRACCIÓN QUE PASA EL TAMIZ DE 2.0 mm (No. 10)

6.1 *Determinación de la corrección compuesta para la lectura del hidrómetro*

- 6.1.1** Las ecuaciones para los porcentajes de suelo que permanecen en suspensión, indicadas en el numeral 7.3.3, se basan en el uso de agua destilada o desmineralizada. Sin embargo, como se usa un agente dispersante en el agua, la gravedad específica del líquido resultante es apreciablemente mayor que la del agua sola.

- 6.1.1** Ambos hidrómetros se deben calibrar a 20° C (68° F) y las variaciones de temperatura producen imprecisiones en las lecturas reales del hidrómetro, las cuales son mayores a medida que la variación con respecto a la temperatura normalizada se hace más grande.
- 6.1.2** Los hidrómetros son graduados por los fabricantes para ser leídos en la parte inferior del menisco formado por el líquido en el vástago del hidrómetro. Puesto que no es posible asegurar que las lecturas de las suspensiones de suelo se harán exactamente en la parte inferior del menisco, éstas se toman en la parte superior y se aplica una corrección.
- 6.1.3** La magnitud neta de las correcciones por los tres motivos mencionados se denomina "corrección compuesta" y se puede determinar de manera experimental.
- 6.1.4** Por conveniencia, se puede elaborar y utilizar, siempre que sea necesario, un gráfico o una tabla de correcciones compuestas, para una serie de diferencias de temperatura de 1° C para el rango esperado de variaciones en la temperatura de ensayo. Las medidas de las correcciones compuestas se pueden efectuar a dos temperaturas extremas que abarquen el rango esperado de temperaturas de ensayo y las correcciones para las temperaturas intermedias se pueden calcular asumiendo una variación lineal recta entre los dos valores observados.
- 6.1.5** Se prepara 1 litro de líquido, compuesto por agua y agente dispersante, en las proporciones previstas para el ensayo de sedimentación (hidrómetro). Se coloca el líquido en el cilindro para sedimentación y se lleva el cilindro al baño de agua de temperatura constante, dispuesto a una de las dos temperaturas que se van a usar. Cuando la temperatura del líquido alcanza la del baño, se inserta el hidrómetro en el cilindro y, luego de un corto lapso para permitir que el hidrómetro también alcance la temperatura del líquido, se toma una lectura en la parte superior del menisco formado en el vástago. Para el hidrómetro 151 H, la corrección compuesta es la diferencia entre esta lectura y uno (1); mientras que para el hidrómetro 152 H es la diferencia entre la lectura y cero (0). A continuación, se llevan el líquido y el hidrómetro a la otra temperatura elegida y se determina de la misma manera la otra corrección compuesta.

6.1 Humedad higroscópica

6.1.1 Cuando una muestra de suelo secado al aire se pesa para el ensayo del hidrómetro, se debe pesar una segunda porción de 10 a 15 g en un pequeño recipiente metálico o de vidrio, la cual se seca en el horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) hasta masa constante y se pesa de nuevo. Se anotan los dos valores y se calcula la humedad higroscópica (w) de acuerdo con la norma INV E-122.

6.2 Dispersión de la muestra de suelo

6.2.1 Cuando en el suelo prevalecen las partículas de limo y arcilla, se pesa una muestra de suelo secado al aire de, aproximadamente, 50 g. Si el suelo es predominantemente arenoso, la muestra deberá ser del orden de 100 g.

6.2.2 Se coloca la muestra en el vaso de vidrio de 250 ml y se cubre con 125 ml de solución de hexametáfosfato de sodio (40 g/litro). Se agita con la varilla de vidrio hasta que el suelo esté humedecido completamente y se permite su saturación durante 16 horas, como mínimo.

6.2.3 Terminado el período de saturación, se dispersa nuevamente la muestra utilizando uno de los aparatos agitadores (A o B). Si se usa el aparato A, se transfiere la lechada suelo-agua del vaso al recipiente de dispersión mostrado en la Figura 123 - 2, lavando con agua cualquier residuo del vaso dentro del recipiente (nota 8). Si es necesario, se añade más agua para llenar el recipiente de dispersión más arriba de la mitad. En seguida, se agita durante un (1) minuto.

Nota 8: Se recomienda el uso de una jeringa grande para el manejo del agua durante la operación de lavado. También, se pueden emplear una botella rociadora de agua o una manguera conectada a un tanque con agua destilada a presión.

6.2.4 Si se usa el aparato B (Figura 123 - 3), se remueve la tapa de cubierta y se conecta el recipiente a una fuente de aire comprimido, por medio de una manguera plástica. Debe existir un manómetro en la línea, entre el recipiente y la válvula de control. Se abre la válvula de manera que el manómetro marque una presión de 7 kPa (1 lbf/pg²) (nota 9). Se transfiere la lechada del vaso al recipiente de dispersión a chorro, lavando con agua cualquier residuo del vaso dentro del recipiente. De ser necesario, se añade agua hasta el volumen ocupado en el recipiente sea, como máximo, 250 ml.

Nota 9: Se requiere una presión inicial de 7 kPa (1 lbf/pg²) para evitar que la lechada suelo- agua penetre dentro de la cámara de aire cuando se está transfiriendo al recipiente de dispersión.

- 6.1.1** Se coloca la tapa de cubierta sobre el recipiente y se abre la válvula de control de aire hasta que se alcance una presión de 140 kPa (20 lbf/pg²). Se dispersa el suelo según su plasticidad, de acuerdo con el tiempo que se muestra a continuación. Luego del período de dispersión, se reduce la presión a 7 kPa (1 lb/pg²).

Índice de plasticidad	Período de dispersión
≤ 5	5 minutos
6 - 20	10 minutos
> 20	15 minutos

Nota 10: Los suelos que contienen cantidades apreciables de mica se deben dispersar solamente durante un (1) minuto.

6.2 Ensayo del hidrómetro

- 6.2.1** Terminada la dispersión, se transfiere la lechada suelo-agua al cilindro para sedimentación y se añade agua destilada o desmineralizada, hasta que el volumen total sea 1000 ml.
- 6.2.2** Poniendo la palma de la mano sobre el extremo abierto del cilindro (o colocando un tapón de caucho), se voltea el cilindro patas arriba y viceversa durante un minuto para completar la agitación de la lechada (nota 11). Al término del minuto, se coloca el cilindro sobre una superficie plana y se hacen lecturas a los siguientes intervalos de tiempo, medidos desde el instante en el cual se inicia la sedimentación: 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos (nota 12). Si se usa el baño de agua de temperatura controlada, el cilindro se debe colocar dentro de él en algún instante correspondiente al intervalo comprendido entre las lecturas que se deben realizar a los 2 y a los 5 minutos.

Nota 11: El número de vueltas del cilindro durante el minuto deberá ser de unas 60, contando los dos movimientos descritos como dos vueltas. Cualquier porción de suelo que permanezca en el fondo del cilindro durante las primeras vueltas se debe sacudir vigorosamente mientras el cilindro está en posición vertical.

Nota 12: Se pueden usar otros tiempos para las lecturas, si así está especificado.

- 6.2.3** Cuando se vaya a tomar una lectura en el hidrómetro, se introduce éste de manera cuidadosa dentro de la suspensión unos 20 a 25 segundos antes del momento de la lectura, hasta una profundidad

similar a la que debe tener cuando se realice la lectura. Una vez hecha la lectura, se remueve el dispositivo con todo cuidado y se coloca dentro de una probeta con agua, aplicándole un movimiento rotatorio.

Nota 13: Es importante remover el hidrómetro inmediatamente después de cada lectura. Las lecturas se deben tomar en la parte superior del menisco formado por la suspensión alrededor del vástago, dada la imposibilidad de tomarlas en la parte inferior.

6.1.1 Luego de cada lectura, se inserta un termómetro dentro de la suspensión y se mide la temperatura.

6.2 Análisis por tamizado

6.2.1 Luego de tomar la última lectura con el hidrómetro, se transfiere la suspensión a un tamiz de 75 μm (No. 200) y se lava con agua potable hasta que el lavado se vuelva de color claro. En seguida, se transfiere el material retenido en el tamiz a un recipiente adecuado, se seca en el horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) y se le realiza un análisis por tamizado, usando tantos tamices como se desee o los que establezca la especificación del material que se está ensayando.

7 CÁLCULOS

7.1 Valores del análisis de tamizado para la porción retenida en el tamiz de 2.0 mm (No. 10)

7.1.1 Se calcula el porcentaje que pasa el tamiz de 2.0 mm (No. 10), dividiendo la masa que pasa dicho tamiz por la masa de suelo originalmente separada a través de él y multiplicando el resultado por 100. Para obtener la masa de la porción pasante por el tamiz de 2.0 mm (No. 10), se resta de la masa original, la masa retenida en dicho tamiz.

7.1.2 Para comprobar la masa total de suelo que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), se agrega a la masa del material que pasa el tamiz de 2.0 mm (No. 10), la masa de la fracción que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y que queda retenida en el de 2.0 mm (No. 10). Para comprobar la masa del material que pasa por el tamiz de 9.5 mm (3/8"), se agrega a la masa total del suelo que pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4), la masa de la fracción que pasa el tamiz de 9.5 mm (3/8") y que queda retenida en el de 4.75 mm (No. 4). Para los demás tamices, se continúa el cálculo de la misma manera.

6.1.1 Para determinar el porcentaje total que pasa por cada tamiz, se divide la masa total que pasa ese tamiz (numeral 7.1.2) por la masa total de la muestra y se multiplica el resultado por 100.

6.2 *Factor de corrección por humedad higroscópica*

6.2.1 Este factor es la relación entre la masa del suelo secado al horno y la masa del suelo seco al aire antes de colocarlo en el horno. Es un número menor de uno (1), excepto cuando no hay humedad higroscópica.

6.3 *Porcentajes de suelo en suspensión*

6.3.1 Se calcula la masa seca al horno del suelo empleado en el ensayo del hidrómetro, multiplicando la masa del suelo seco al aire por el factor de corrección por humedad higroscópica.

6.3.2 Se calcula la masa de una muestra total representada por la masa de suelo usada en el ensayo del hidrómetro, dividiendo la masa seca utilizada por el porcentaje pasante del tamiz de 2.0 mm (No. 10) y multiplicando el resultado por 100. Este valor será la masa W en la ecuación sobre el porcentaje de suelo que permanece en suspensión.

6.3.3 El porcentaje de suelo que permanece en suspensión al nivel al cual el hidrómetro mide la densidad de la suspensión, se calcula con alguna de las dos fórmulas que se presentan a continuación, dependiendo del hidrómetro utilizado (nota 14):

6.3.3.1 Si se empleó el hidrómetro 151 H:

$$P = \frac{100\,000}{W} \times \frac{G}{(G - G_1)} (R - G_1) \quad [123.1]$$

Nota 14: La porción que está dentro del paréntesis cuadrado de la ecuación para el hidrómetro 151 H es constante para una serie de lecturas y, por lo tanto, se puede calcular primero, para multiplicarla luego por la porción del paréntesis de la derecha.

6.1.1.1 Si se empleó el hidrómetro 152 H:

$$P = \frac{R \times a}{W} \times 100 \quad [123.2]$$

6.1.1.2 Los términos de estas dos expresiones significan:

P: Porcentaje de suelo que permanece en suspensión al nivel al cual midió el hidrómetro la densidad de la suspensión;

G: Gravedad específica de las partículas del suelo;

G₁: Gravedad específica del líquido dentro del cual están suspendidas las partículas del suelo. Se usa un valor numérico de uno (1) en los dos casos en que este valor está colocado en la ecuación del hidrómetro 151 H. En el primero, cualquier variación posible produce un efecto insignificante en el resultado, mientras que en el segundo, la corrección compuesta para R se basa en un valor de uno (1) para G₁;

R: Lectura del hidrómetro con la corrección compuesta aplicada (Ver numeral 6.1);

W: Masa del suelo seco al horno en una muestra de ensayo total representada por la masa de suelo dispersado (Ver numeral 7.3.2), g;

a: Factor de corrección por aplicar a la lectura del hidrómetro 152 H. Los valores mostrados en la escala del hidrómetro se basan en una gravedad específica de 2.65; por lo tanto, es necesaria una corrección si la gravedad específica del suelo es diferente (Ver Tabla 123 - 1).

Tabla 123 - 1. Valores del factor de corrección (a) para diferentes gravedades específicas de las partículas de suelo

GRAVEDAD ESPECÍFICA	FACTOR DE CORRECCIÓN
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

6.1 Diámetro de las partículas de suelo

6.1.1 El diámetro de una partícula correspondiente al porcentaje indicado por una lectura dada del hidrómetro, se debe calcular de acuerdo con la ley de Stokes (nota 15), sobre la base de que una partícula de este diámetro estaba en la superficie de la suspensión al inicio de la sedimentación y se ha asentado al nivel al cual midió el hidrómetro la densidad de la suspensión. De acuerdo con la ley de Stokes (Ver Tabla 123 - 2):

$$D = \sqrt{\frac{30 \eta}{980 (G - G_1)}} \frac{L}{T} \quad [123.3]$$

Donde: D: Diámetro de la partícula, mm;

η : Coeficiente de viscosidad del medio de la suspensión (en este caso agua) en Poises (varía con el cambio de temperatura del medio).

Tabla 123 - 2. Valores de profundidad efectiva, basados en hidrómetro y cilindro de tamaños especificados ⁽¹⁾

HIDRÓMETRO 151 H		HIDRÓMETRO 152 H			
LECTURA REAL DEL HIDRÓMETRO	PROFUNDIDAD EFECTIVA, L, cm	LECTURA REAL DEL HIDRÓMETRO	PROFUNDIDAD EFECTIVA, L, cm	LECTURA REAL DEL HIDRÓMETRO	PROFUNDIDAD EFECTIVA, L, cm
1	16.3	0	16.3	31	11.2
1.001	16.0	1	16.1	32	11.1
1.002	15.8	2	16.0	33	10.9
1.003	15.5	3	15.8	34	10.7
1.004	15.2	4	15.6	35	10.6
1.005	15.0	5	15.5		
1.006	14.7	6	15.3	36	10.4
1.007	14.4	7	15.2	37	10.2
1.008	14.2	8	15.0	38	10.1
1.009	13.9	9	14.8	39	9.9
1.010	13.7	10	14.7	40	9.7
1.011	13.4	11	14.5	41	9.6
1.012	13.1	12	14.3	42	9.4
1.013	12.9	13	14.2	43	9.2
1.014	12.6	14	14.0	44	9.1
1.015	12.3	15	13.8	45	8.9
1.016	12.1	16	13.7	46	8.8
1.017	11.8	17	13.5	47	8.6
1.018	11.5	18	13.3	48	8.4
1.019	11.3	19	13.2	49	8.3
1.020	11.0	20	13.0	50	8.1
1.021	10.7	21	12.9	51	7.9
1.022	10.5	22	12.7	52	7.8
1.023	10.2	23	12.5	53	7.6
1.024	10.0	24	12.4	54	7.4
1.025	9.7	25	12.2	55	7.3
1.026	9.4	26	12.0	56	7.1
1.027	9.2	27	11.9	57	7.0
1.028	8.9	28	11.7	58	6.8
1.029	8.6	29	11.5	59	6.6
1.030	8.4	30	11.4	60	6.5
1.031	8.1				
1.032	7.8				
1.033	7.6				
1.034	7.3				
1.035	7.0				
1.036	6.8				
1.037	6.5				
1.038	6.2				

⁽¹⁾ Los valores de la profundidad efectiva se han calculado a partir de la ecuación:

$$L = L_1 + 1/[2(L_2 - (V_B/A))]$$

Donde: L: Profundidad efectiva, cm;

L₁: Distancia, a lo largo del vástago del hidrómetro, entre la parte superior del bulbo y la marca de lectura del hidrómetro, cm;

L₂: Longitud total del bulbo del hidrómetro, cm;

V_B: Volumen del bulbo del hidrómetro, cm³;

A: Sección transversal del cilindro de sedimentación, cm².

Los valores usados para calcular los valores de la Tabla 123 - 2 son:

Para ambos hidrómetros:

- L₂ = 14.0 cm
- V_B = 67.0 cm³
- A = 27.8 cm²

Para el hidrómetro 151 H:

- L₁ = 10.5 cm para una lectura de 1.000
= 2.3 cm para una lectura de 1.031

Para el hidrómetro 152 H:

- L₁ = 10.5 cm para una lectura de 0 g/litro
= 2.3 cm para una lectura de 50 g/litro

L: Distancia entre la superficie de la suspensión y el nivel al cual se mide su densidad, cm (para un hidrómetro y un cilindro para sedimentación, los valores varían de acuerdo con la lectura del hidrómetro. Esta distancia se conoce como "profundidad efectiva" (ver Tabla 123 - 2));

T: Lapso transcurrido desde el comienzo de la sedimentación hasta la toma de la lectura, min;

G: Gravedad específica de las partículas del suelo;

G₁: Gravedad específica (densidad relativa) del líquido dentro del cual están suspendidas la partículas del suelo. Su valor se puede tomar igual a 1.000 para todos los fines prácticos.

6.1.1 Por facilidad de los cálculos, la ecuación del numeral 7.4.1 se puede escribir como:

$$D = K \sqrt{\frac{L}{T}}$$

[123.4]

Donde: K: Constante que depende del valor de la gravedad específica del suelo y de la temperatura de la suspensión. Los valores de K se presentan en la Tabla 123 - 3. El valor K no cambia para una serie de lecturas que constituyan un ensayo, mientras que los valores L y T sí varían.

Nota 15: Puesto que la ley de Stokes considera la velocidad terminal de una sola esfera cayendo dentro de un líquido, los tamaños calculados representan el diámetro de las esferas que caerían a la misma velocidad que las partículas de suelo.

Tabla 123 - 3. Valores de K para el cálculo del diámetro de las partículas

Temperatura °C	Gravedad específica de las partículas de suelo								
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.01510	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374	0.01356
17	0.01501	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356	0.01338
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339	0.01321
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.01323	0.01305
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307	0.01289
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291	0.01273
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276	0.01258
23	0.01404	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01297	0.01279	0.01261	0.01243
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246	0.01229
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232	0.01215
26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218	0.01201
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204	0.01188
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01225	0.01208	0.01191	0.01175
29	0.01312	0.01290	0.01269	0.01249	0.01230	0.01212	0.01195	0.01178	0.01162
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.01199	0.01182	0.01165	0.01149

Para: η en (g/cm.s); γ_w en (g/cm³); L en (cm); T en (min.)

7.5 Valores del análisis de tamizado para la porción que pasa el tamiz de 2.0 mm (No. 10)

7.5.1 El cálculo de los porcentajes que pasan los diferentes tamices usados para tamizar la porción de muestra del ensayo del hidrómetro involucra varios pasos. El primero de ellos consiste en calcular la masa de la fracción que debía haber sido retenida en el tamiz de 2.0 mm (No. 10) si no se hubiera removido. Esta masa es igual al porcentaje total retenido en el tamiz de 2.0 mm (No. 10) (100 menos el porcentaje que pasa), multiplicado por la masa de la muestra total representada

por la masa de suelo usada (calculada como se indica en el numeral 7.3.2), y dividiendo el resultado por 100.

- 7.5.1** A continuación, se calcula la masa total pasante del tamiz de 75 μm (No. 200). Para ello, se suman las masas de todas las fracciones retenidas en los diferentes tamices, incluyendo el de 2.0 mm (No. 10), y restando esta suma de la masa de la muestra total (Ver numeral 7.3.2).
- 7.5.2** Luego, se calcula la masa total que pasa cada uno de los otros tamices, de una manera similar a la descrita en el numeral 7.1.2.
- 7.5.3** Por último, se calculan los porcentajes totales que pasan, dividiendo la masa total pasante por cada tamiz (calculada según se indica en el numeral 7.5.3) por la masa total (calculada como se indica en el numeral 7.3.2) y multiplicando el resultado por 100.

7.6 Gráfica

- 7.6.1** Cuando se realiza el ensayo del hidrómetro, se debe elaborar una gráfica con los resultados del ensayo, colocando los diámetros de las partículas en una escala logarítmica de abscisas y los porcentajes menores que los diámetros correspondientes, en una escala aritmética de ordenadas. Si el análisis del hidrómetro no se ha realizado sobre una porción del suelo, la elaboración de la gráfica es opcional, por cuanto los valores se pueden obtener directamente de los resultados tabulados.

Nota 16: Es recomendable que los resultados se expresen mediante una curva granulométrica en la que se tengan en cuenta, simultáneamente, la fracción de suelo gruesa evaluada mediante el método de tamizado y la fina evaluada con el hidrómetro.

8 INFORME

8.1 El informe deberá incluir lo siguiente:

- 8.1.1** El tamaño máximo de las partículas contenidas en la muestra.
- 8.1.2** Los porcentajes retenidos y/o que pasan, para cada uno de los tamices utilizados. Los resultados se presentarán en forma tabulada o en forma gráfica (nota 17).

Nota 17: La tabla y la gráfica representan la gradación de la muestra utilizada. Si antes del ensayo fueron removidas algunas partículas de mayor tamaño, este hecho se debe anotar en el informe, indicando la cantidad y el tamaño máximo del material descartado para la prueba.

- 8.1.1** Descripción de las partículas de grava y arena (forma y dureza, según la norma INV E-102).
 - 8.1.2** Gravedad específica, si es inusualmente alta o baja.
 - 8.1.3** Dificultades que se hayan presentado al dispersar la fracción que pasa el tamiz de 2.0 mm (No. 10), indicando cualquier cambio en el tipo, dosificación y cantidad de agente dispersante.
 - 8.1.4** Dispositivo de dispersión utilizado y duración del período de dispersión.
- 8.2** Si el material se ha ensayado para verificar el cumplimiento de una especificación determinada, se deberán informar los porcentajes que pasan los tamices indicados en ella. Las fracciones menores de 2.0 mm se deberán leer en la gráfica.
- 8.3** En el caso de materiales que no deben cumplir el requisito granulométrico de ninguna especificación, y donde el suelo está compuesto principalmente por partículas de menos de 4.75 mm, los resultados de pueden leer en la gráfica y reportar de la siguiente manera:

Grava: material que pasa el tamiz de 75 mm (3") y queda retenido en el de 4.75 mm (No. 4)%

Arena: material que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y queda retenido en el de 75 μ m (No. 200)%

(a) Arena gruesa: material que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y queda retenido en el de 2.0 mm (No. 10)...%

(b) Arena media: Material que pasa el tamiz de 2.0 mm (No. 10) y queda retenido en el de 425 μ m (No. 40) ...%

(c) Arena fina: Material que pasa el tamiz de 425 μ m (No. 40) y queda retenido en el de 75 μ m (No. 200) ...%

Tamaños de limo: entre 75 μ m y 5 μ m%

Tamaños de arcilla: menores de 5 μ m (las partículas de menos de 1 μ m se denominan coloides)%

- 8.4** En el caso de materiales que no deben cumplir el requisito granulométrico de ninguna especificación, y donde el suelo contiene suficiente material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) como para requerir un análisis granulométrico de dicha porción, los resultados de pueden presentar de la siguiente manera:

ANÁLISIS POR TAMICES

Tamaño tamiz	Porcentaje que pasa
75 mm (3")
50 mm (2")
37.5 mm (1 ½")
25 mm (1")
19 mm (¾")
9.5 mm (3/8")
4.75 mm (No. 4)
2.0 mm (No. 10)
425 µm (No. 40)
75 µm (No. 200)

ANÁLISIS POR HIDRÓMETRO

75 µm
5 µm
1 µm

Nota 18: Los tamices de 2.0 mm (No. 10) y de 425 µm (No. 40) se pueden sustituir por los de 2.36 mm (No.8) y de 300 µm (No. 50)

8 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 422-63 (reaprobada2007)

ANEXO L
DETERMINACIÓN LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS
INV E 125-13

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS

INV E – 125 – 13

1 OBJETO

- 1.1** Esta norma se refiere a la determinación del límite líquido de los suelos, definido según se indica en la Sección 2.
- 1.2** Se presentan dos métodos para preparar las muestras de prueba: Por vía húmeda, descrito en el numeral 9.1, y por vía seca, como se describe en el numeral 9.2. El método por utilizar deberá ser especificado por el cliente. Si no se especifica ninguno, se empleará la preparación por vía húmeda.
- 1.3** La norma presenta dos métodos para determinar el límite líquido: el Método A, que consiste en un ensayo de varios puntos, el cual se describe en las secciones 10 y 11; y el Método B, consistente en un ensayo de un solo punto, el cual se describe en las secciones 12 y 13. El método por utilizar será especificado por el cliente. Si no se especifica ninguno, se deberá emplear el Método A.
- 131** El método multipunto es, por lo general, más preciso que el de un solo punto. Se recomienda que aquel se emplee en los casos donde los resultados puedan ser objeto de discusión o cuando se requiera una buena precisión.
- 132** No se recomienda que el método de un solo punto sea utilizado por operadores inexpertos, debido a requiere que el operador tenga la experiencia suficiente para saber que una muestra de ensayo se encuentra, aproximadamente, en su límite líquido.
- 133** La correlación a partir de la cual se basan los cálculos del método de un punto puede resultar inválida en ciertos suelos, tales como los orgánicos o los que se presentan en ambiente marino. Se recomienda que el límite líquido de estos suelos se determine mediante el método multipunto.
- 1.4** El método descrito en esta norma se debe aplicar únicamente sobre la porción de suelo que pasa el tamiz de 425 μm (No. 40). Por lo tanto, se deberá considerar la contribución relativa de esta fracción de suelo a las propiedades

de la muestra como conjunto, cuando se usen estos ensayos para evaluar las propiedades de un suelo.

- 1.1 A los fines de comparar valores medidos o calculados con límites especificados, el valor medido o calculado se deberá redondear al dígito significativo más próximo al del límite especificado.
- 1.2 Esta norma reemplaza la norma INV E-125-07.

2 DEFINICIONES

2.1 Las definiciones específicas aplicadas a esta norma son las siguientes:

2.1.1 *Límites de Atterberg* – Originalmente, Albert Atterberg definió seis “límites de consistencia” para los suelos finos: el límite superior del flujo viscoso, el límite líquido, el límite de pegajosidad, el límite de cohesión, el límite plástico y el límite de contracción. En el uso actual de la ingeniería el término se aplica solamente a los límites líquido y plástico y, en algunas referencias, también al límite de contracción. Los límites líquido y plástico de los suelos (junto con el límite de contracción) son mencionados a menudo en conjunto como límites de Atterberg. Estos límites dividen diferentes estados de consistencia de los suelos plásticos.

2.1.2 *Consistencia* – Facilidad relativa con la cual se puede deformar un suelo.

2.1.3 *Límite líquido (LL, w_L)* – Contenido de humedad del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados líquido y plástico.

3 RESUMEN DEL MÉTODO

3.1 Se procesa la muestra de suelo para remover cualquier porción retenida en el tamiz de 425 μm (No. 40). El límite líquido se determina mediante tanteos, en los cuales una porción de la muestra se esparce sobre una cazuela de bronce que se divide en dos partes con un ranurador, permitiendo que esas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base normalizada. El límite líquido multipunto, Método A,

requiere 3 o más tanteos sobre un rango de contenidos de agua, cuyos resultados se dibujan para establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido. El método de un punto, Método B, usa los datos de dos tanteos realizados con un solo contenido de agua, multiplicado el valor obtenido por un factor de corrección.

1 IMPORTANCIA Y USO

- 1.1 La determinación del límite líquido interviene en varios sistemas de clasificación de suelos, dado que contribuye en la caracterización de la fracción fina de los suelos. El límite líquido, solo o en conjunto con el límite plástico y el índice de plasticidad, se usa con otras propiedades del suelo para establecer correlaciones sobre su comportamiento ingenieril, tales como la compresibilidad, la permeabilidad, la compactabilidad, los procesos de expansión y contracción y la resistencia al corte.
- 1.2 Los límites líquido y plástico de un suelo, junto con su contenido de agua, se usan para calcular su consistencia relativa o índice de liquidez. Además, el índice de plasticidad, junto con el porcentaje de partículas menores de $2 \mu\text{m}$, brinda una idea aceptable de la actividad de la fracción fina de un suelo.
- 1.3 El límite líquido de un suelo que contiene cantidades apreciables de materia orgánica disminuye dramáticamente cuando el suelo es secado al horno antes del ensayo. La comparación de los valores de límite líquido de una muestra, antes y después de secada al horno, se puede emplear como una medida cualitativa del contenido de materia orgánica del suelo.

2 EQUIPO

- 2.1 *Aparato del límite líquido* – Dispositivo mecánico, consistente en una cazuela de bronce, suspendida de un soporte diseñado para controlar su caída sobre la superficie de un bloque de material resiliente, que sirve como base del aparato. La Figura 125 - 1 muestra las características principales y las dimensiones críticas del dispositivo, el cual puede ser operado manualmente o por medio de un motor eléctrico.

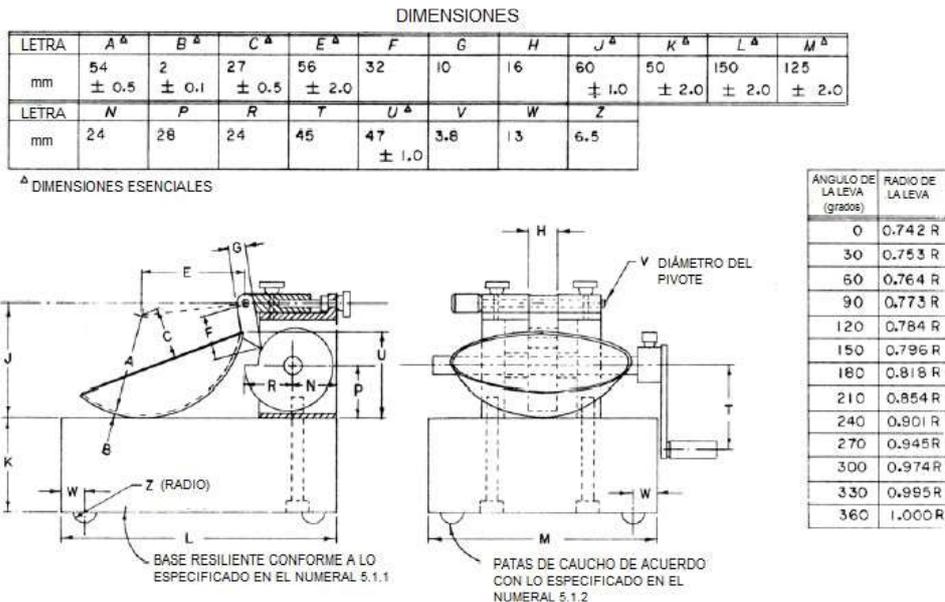


Figura 125 - 1. Aparato del límite líquido de operación manual

- 1.1.1** *Base* – Bloque de un material que presente un rebote resiliente entre 77 y 90 %. Detalles de la medida de la resiliencia de la base se presentan en el Anexo A.
- 1.1.2** *Patatas de caucho* – Para soportar la base, diseñadas para suministrar aislamiento dinámico de la base con respecto a la superficie de trabajo.
- 1.1.3** *Cazuela (copa)* – De bronce, con una masa de 185 a 215 g incluyendo el soporte de la copa.
- 1.1.4** *Leva* – Diseñada para elevar la copa de manera suave y continua hasta su altura máxima, sobre una distancia correspondiente a una rotación de la manija de, al menos, 180° sin desarrollar una velocidad ascendente o descendente de la cazuela cuando ésta es levantada por la leva (el movimiento preferido de la manija es el de una curva de levantamiento uniformemente acelerado).
- 1.1.5** *Soporte* – Construido de manera que permita el ajuste conveniente y seguro de la altura de caída de la cazuela a 10 mm (0.394"), diseñado de manera que el conjunto de la cazuela y su manivela esté unido al soporte únicamente por medio de un pivote removible. En el dibujo de la Figura 125 - 2 se puede ver la definición y la determinación de la altura de caída de la cazuela.

- 1.1.1** *Accionamiento por motor (opcional)* – Como alternativa a la manivela de operación manual, el dispositivo puede estar equipado con un motor que haga levantar la cazuela a 2 ± 0.1 revoluciones por segundo y que esté aislado del resto del aparato por soportes de caucho u otro medio que evite que la vibración del motor sea transmitida al resto del aparato. El motor debe estar equipado con un interruptor de encendido y apagado y un medio de situar convenientemente la cazuela para el ajuste de la altura de caída. El aparato a motor debe dar los mismos valores para el límite líquido que los obtenidos con el equipo de operación manual.

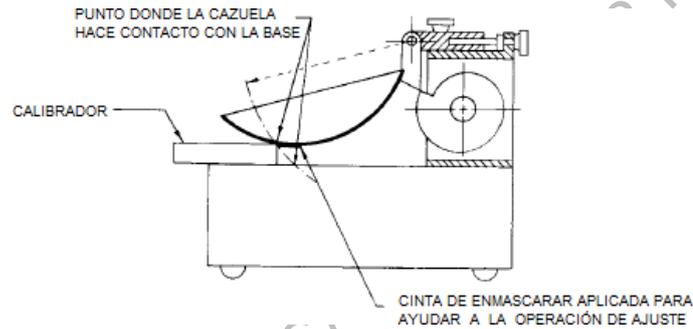


Figura 125 - 2. Calibración de la altura de caída

- 1.2** *Ranurador* – Herramienta plan hecha de plástico o de un metal no corrosivo, con las dimensiones mostradas en la Figura 125 - 3. El ranurador puede tener cualquier diseño, mientras se garantiza que se mantienen sus dimensiones esenciales. El ranurador puede tener, aunque no es obligatorio, un calibre para ajustar la altura de caída de la cazuela.

Nota 1: Antes de la adopción de esta norma, se especificaba el empleo de un ranurador curvo, el cual no es tan preciso como el plano, puesto que no controla la profundidad del suelo en la cazuela. Hay algunos datos que indican que el límite líquido determinado a partir del uso de un ranurador plano es ligeramente superior al determinado a partir del ranurador curvo.

DIMENSIONES

LETRA	A ^Δ	B ^Δ	C ^Δ	D ^Δ	E ^Δ	F ^Δ
mm	2 ± 0.1	11 ± 0.2	40 ± 0.5	8 ± 0.1	50 ± 0.5	2 ± 0.1
LETRA	G	H	J	K ^Δ	L ^Δ	N
mm	10 MÍNIMO	13	60	10 ± 0.05	60° ± 1°	20

Δ DIMENSIONES ESENCIALES

NOTA: LA DIMENSIÓN "A" DEBE SER 1.9 - 2.0 Y LA DIMENSIÓN "D" DEBE SER 8.0 - 8.1 CUANDO EL RANURADOR ES NUEVO, CON EL FIN DE PERMITIR UNA VIDA DE SERVICIO ADECUADA

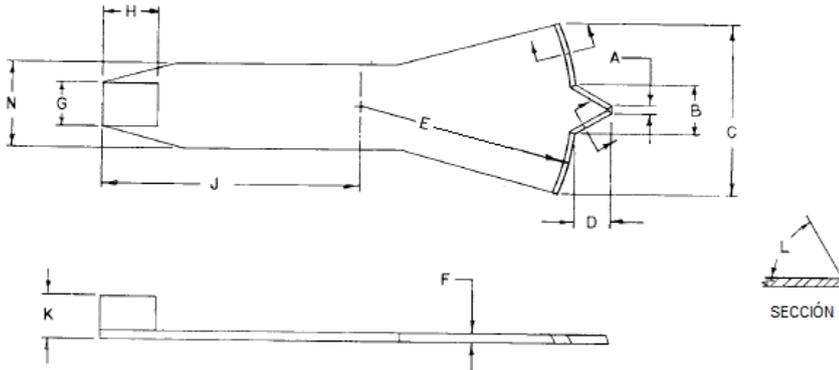


Figura 125 - 3. Ranurador plano

- 1.1 Calibrador** – Bloque metálico para ajustar la altura de caída libre de la cazuela, cuyas dimensiones se presentan en la Figura 125 - 4. El diseño del calibrador puede variar, siempre que le permita apoyarse de manera firme sobre la base sin sufrir oscilaciones, y que el lado que hace contacto con la cazuela durante la operación de ajuste de la altura de caída libre de ésta sea recto, de no menos de 10 mm (3/8") de ancho y sin biseles o curvaturas.

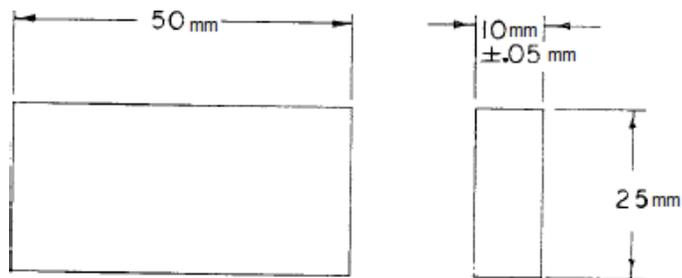


Figura 125 - 4. Calibrador de la altura de caída libre de la cazuela

- 1.1 *Recipientes para la determinación de la humedad* – Recipientes pequeños, hechos de un material resistente a la corrosión, con tapas de ajuste de precisión. Se pueden usar latas de aluminio o de acero inoxidable de 25.4 mm (1") de altura por 50.8 mm (2") de diámetro. Se requiere un recipiente para cada determinación del contenido de agua.
- 1.2 *Balanza* – Con legibilidad de 0.01 g.
- 1.3 *Recipiente para mezclar y almacenar las muestras preparadas* – Durante estas operaciones se debe impedir que la muestra pierda agua y que el recipiente contamine la muestra de cualquier manera. Al efecto, resulta apropiado un recipiente de plástico, vidrio o porcelana de 114 mm (4 ½") de diámetro y una bolsa plástica de tamaño suficiente para envolverlo completamente.
- 1.4 *Espátula* – Una espátula de hoja flexible de unos 75 a 100 mm (3 a 4") de longitud y 20 mm (¾") de ancho.
- 1.5 *Horno* – Un horno termostáticamente controlado para el secado de las muestras, capaz de mantener temperaturas de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).

2 MATERIALES

- 2.1 *Agua* – Se puede emplear agua destilada o desmineralizada.

3 MUESTREO Y ELABORACIÓN DEL ESPÉCIMEN DE ENSAYO

- 3.1 Las muestras deben ser representativas de los suelos cuyas características se desean conocer. Las muestras cuyos especímenes se van a preparar usando el método de preparación húmeda (numeral 9.1) se deben conservar con el contenido de agua con el cual fueron tomadas en el terreno hasta el instante de su preparación para el ensayo.

- 3.1.1 Donde las operaciones de muestreo han respetado la estratificación natural de la muestra, los diferentes estratos se deben mantener separados y los ensayos sobre el estrato de interés se realizarán sobre un espécimen que presente la menor contaminación posible de los materiales de los estratos vecinos. Cuando se pretenda usar una mezcla de suelos en la construcción, la muestra de ensayo se deberá

obtener combinando las muestras parciales en las mismas proporciones.

- 1.1** *Espécimen* – Se obtiene una porción representativa de la muestra, suficiente para suministrar de 150 a 200 g de material que pase el tamiz de 425 μm (No. 40). Las muestras que fluyen libremente, se pueden reducir por cuarteo. Los suelos cohesivos que no fluyen libremente se deben mezclar completamente con una espátula o un cucharón dentro de un recipiente, tomando como representativa una porción, recogida con el cucharón, de la masa mezclada.

2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

2.1 Verificación del desgaste

- 2.1.1** *Aparato del límite líquido* – Se comprueba que se encuentre limpio y en buen estado y se verifican los siguientes aspectos:

2.1.1.1 *Desgaste de la base* – El sitio de la base donde golpea la cazuela debe mostrar una huella de no más de 10 mm (3/8") de diámetro. Si es mayor, la base se debe maquinar para remover los rastros de desgaste, siempre que esta operación no haga que la base presente un espesor menor que el especificado en el numeral 5.1 y se mantengan las otras relaciones dimensionales.

2.1.1.2 *Desgaste de la cazuela* – La cazuela se debe reemplazar cuando la depresión debida al desgaste que produce el ranurador alcance 0.1 mm (0.004") o cuando su espesor original se haya reducido a la mitad. Se debe verificar que la cazuela se encuentre firmemente adherida al soporte.

2.1.1.3 *Desgaste del soporte de la cazuela* – Se debe verificar que su pivote no apriete y que no esté desgastado al punto de permitir un juego de más de 3 mm (1/8") en el punto más bajo del aro.

2.1.1.4 *Desgaste de la leva* – No podrá estar desgastada al punto de que la cazuela golpee la base antes de que el soporte de la cazuela pierda contacto con la leva.

1.1.1.1 Patas de caucho – Se deben reemplazar cuando a causa de la edad se vuelvan duras, agrietadas o quebradizas.

1.1.2 Ranuradores – Se debe verificar su desgaste de manera regular. La rapidez del desgaste depende del material de su construcción y de los tipos de suelo sobre los cuales se emplean. Los suelos con contenidos significativos de arena fina propician el desgaste rápido; por lo tanto, cuando se ensayen materiales de esta clase, los ranuradores se deberán verificar con mayor frecuencia que cuando se emplean con otros suelos.

Nota 2: Se puede verificar apropiadamente el ancho de la punta del ranurador usando un amplificador de medición equipado con una escala milimétrica. Este elemento se puede adquirir en muchas compañías que suministran equipos de laboratorio.

1.2 Ajuste de la altura de caída libre de la cazuela – La altura se debe ajustar de manera que la parte de la cazuela que golpea la base se eleve a una altura de 10 ± 2 mm. Ver las Figuras 125 – 2 y 125 - 5 para establecer la ubicación adecuada del calibrador en relación con la cazuela durante el ajuste.

Nota 3: Un buen procedimiento para ajustar la altura de caída es el siguiente: se coloca una pieza de cinta de enmascarar a través de la parte inferior de la cazuela, paralela al eje del pivote del soporte de la cazuela. El borde de la cinta que queda más alejado del soporte debe bisectar el punto en el cual la cazuela hace contacto con la base. Si la copa es nueva, se coloca un trozo de papel carbón sobre la base y se permite que la cazuela caiga varias veces sobre él para definir el punto de contacto. Se sujeta la cazuela al dispositivo y se gira la manivela hasta que la cazuela se eleva a su máxima altura. Se desliza el calibrador bajo la cazuela desde el frente del aparato y se verifica si hace contacto con ella o con la cinta (ver Figura 125 - 2). Si hace contacto con las dos al mismo tiempo, se considera que la altura de caída es correcta. En caso contrario, se deberá ajustar la cazuela hasta que se logre el contacto simultáneo. El ajuste se verifica girando la manivela a una velocidad de 2 revoluciones por segundo mientras se sostiene el calibrador en posición contra la cinta y la cazuela. Si se oye un ruido de roce o de campanilleo débil sin que la cazuela se eleve del calibrador, se considera que el ajuste es correcto. Si no se escucha el sonido, o la cazuela se separa del calibrador, se deberá ajustar la altura de caída. Si la cazuela se balancea sobre el calibrador durante la operación de verificación, significa que el pivote de la leva está muy desgastado y se deberán reemplazar las partes desgastadas. Terminada la operación de ajuste, se deberá remover la cinta de enmascarar de la cazuela.



Figura 125 - 5. Ajuste de la altura de caída libre de la cazuela

1 PREPARACIÓN DEL ESPÉCIMEN DE ENSAYO

1.1 *Método de preparación por vía húmeda* – Salvo que se especifique que la preparación se debe realizar por vía seca, el espécimen de prueba se deberá preparar como se describe a continuación:

1.1.1 *Material que pasa en su totalidad por el tamiz de 425 μm (No. 40):*

1.1.1.1 Empleando métodos manuales y visuales, se establece si el espécimen mencionado en el numeral 7.2 tiene poco o ningún material retenido en el tamiz de 425 μm (No. 40). Si es el caso, se preparan de 150 a 200 g de material mediante una mezcla íntima con agua en el recipiente de mezclado, usando la espátula. Si se desea, se moja el material con una pequeña cantidad de agua, suficiente para ablandar el material antes de proceder al mezclado. Si se usa el Método A, se ajusta la humedad del suelo de manera de llevarlo a una consistencia que requiera de 25 a 35 golpes de la cazuela para cerrar la ranura (Ver nota 4). Si se usa el método B, la consistencia del suelo debe ser tal, que dé lugar a un número de golpes comprendido entre 20 y 30.

1.1.1.2 Si durante el mezclado se encuentra que había una pequeña cantidad de material de tamaño mayor a 425 μm , esas partículas se deberán remover manualmente, si resulta posible. Si la remoción a mano no es factible, se deberán retirar esos pequeños porcentajes del material grueso (siempre que su proporción no supere el 15 %) trabajando el material sobre el tamiz de 425 μm (No. 40). Para efectuar este procedimiento, se usará una lámina de caucho u otro elemento que no distorsione el tamiz ni degrade el material que quedaría retenido si se usara el método descrito en el numeral 9.1.2. En caso de que se detecte un porcentaje más elevado de partículas gruesas o no se considere práctico removerlas como se acaba de describir, la muestra se deberá lavar como se describe en el numeral 9.1.2. Si las partículas gruesas halladas durante el mezclado son concreciones, conchillas u otras partículas frágiles, ellas no se deberán partir para obligarlas a pasar el tamiz de 425 μm (No. 40), sino que se deberán remover de manera manual o mediante lavado.

- 1.1.1.1** Se coloca el material preparado en el recipiente para mezcla y almacenamiento, se verifica su consistencia (se efectúan ajustes si se requieren), se cubre para prevenir pérdidas de humedad y se deja en reposo durante no menos de 16 horas (toda la noche). Cumplido este plazo, el suelo se remezcla antes de proceder al ensayo.

Nota 4: El tiempo necesario para mezclar un suelo de manera adecuada es muy variable, pues depende de su plasticidad y su contenido inicial de agua. En el caso de arcillas duras y pesadas se pueden requerir hasta 30 minutos.

1.12 *Material que contiene partículas retenidas en el tamiz de 425 μ m (No. 40):*

- 1.1.2.1** Se coloca el espécimen descrito en el numeral 7.2 dentro de un recipiente, con una cantidad de agua suficiente para cubrirlo y se permite que se empape hasta que se ablanden todos los terrones y no haya finos adheridos a las partículas gruesas (nota 5).

Nota 5: En algunos casos, los cationes de las sales presentes en el agua potable se intercambian con los cationes del suelo, alterando significativamente los resultados del ensayo. A menos que se tenga la certeza de la inexistencia de dichos cationes en el agua potable, se deberá usar agua destilada o desmineralizada en las operaciones de inmersión y lavado. Como regla general, no se permite el empleo de agua que contenga más de 100 mg/l. de sólidos disueltos.

- 1.1.2.2** Si el material contiene una gran cantidad de partículas retenidas en el tamiz de 425 μ m (No. 40), la operación de lavado que se describe en seguida se deberá realizar en incrementos, lavando una cantidad no mayor de 500 g (1 lb) en cada ocasión. Se coloca el tamiz de 425 μ m (No. 40) en el fondo de un recipiente limpio y se vierte la mezcla de suelo- agua sobre el tamiz, cuidando que no se produzca ninguna pérdida. Si hay presentes partículas de grava o arena, ellas se deberán enjuagar, tantas veces como sea posible, con pequeñas cantidades de agua tomadas de una botella de lavado, descartándolas con posterioridad. Un medio alternativo consiste en encajar el tamiz de 2.0 mm (No. 10) sobre el de 425 μ m (No. 40) y verter la mezcla de suelo-agua sobre aquél, enjuagando el material y retirando las partículas mayores de 2 mm. Luego de lavar y remover tanto material grueso como resulte posible, se agrega agua al recipiente en cantidad suficiente para que cubra la superficie de la malla

del tamiz de 425 μm (No. 40) al menos 13 mm ($\frac{1}{2}$ "). Se agita la mezcla revolviéndola con los dedos y formando remolinos mientras el tamiz se mueve hacia arriba y hacia abajo, para separar todo material fino de las partículas gruesas. Los terrones que no se hayan desleído se deberán disgregar, frotándolos con suavidad sobre el tamiz con las yemas de los dedos. La operación de lavado se completa levantando el tamiz por encima de la superficie del agua y enjuagando el material retenido con una pequeña cantidad de agua limpia. El material que quede retenido en el tamiz de 425 μm (No. 40) se deberá descartar.

1.1.1.1 Se reduce la humedad del material que pasa el tamiz de 425 μm (No. 40) hasta que se acerque al límite líquido. Esta reducción se puede llevar a cabo por alguno de los métodos que se describen a continuación o por una combinación de ellos: (a) exponiéndolo a corrientes de aire a temperatura ambiente, (b) exponiéndolo a corrientes de aire tibio por medio de un secador de pelo, (c) decantando el agua clara de la superficie de la suspensión, (d) filtrándolo en un embudo Büchner o usando filtros de vela, o (e) drenándolo en un colador o en un plato de yeso de Paris forrado con un papel filtro resistente a la humedad. Si se emplea el plato, se deberá tener la precaución de que nunca se sature tanto como para que no logre absorber agua en su superficie. El plato se deberá secar completamente entre usos sucesivos. Durante la evaporación y el enfriamiento, el material se deberá agitar a menudo para evitar el sobresecado de los bordes y picos de las partículas de suelo en la superficie de la mezcla. Para materiales que contengan sales solubles, se usarán los métodos (a) o (b), con el fin de evitar la eliminación de las sales del espécimen de prueba.

1.1.1.2 Cuando corresponda, se remueve el material retenido sobre el papel de filtro. Se mezcla completamente el material en el recipiente de mezcla, usando una espátula. El contenido de agua de la mezcla se deberá ajustar, de ser necesario, añadiendo pequeños incrementos de agua destilada o desmineralizada o permitiendo que se seque a temperatura ambiente mientras se agita. Si se va a usar el método A, el material deberá encontrarse con un contenido de agua tal, que requiera entre 25 y 35 golpes de la cazuela para cerrar la

ranura. Si se va a emplear el método B, la humedad deberá corresponder a un número de golpes comprendido entre 20 y 30. De ser necesario, se coloca el material mezclado en el recipiente de almacenamiento, cubriéndolo para evitar pérdidas de humedad y dejándolo en reposo por un período no menor de 16 horas, luego del cual el suelo se deberá remezclar antes de proceder al ensayo.

1.1 *Método de preparación por vía seca:*

1.1.1 El espécimen, obtenido según se describe en el numeral 7.2, se seca a temperatura ambiente o en un horno a una temperatura que no exceda de 60° C (140° F), hasta que los terrones de suelo se puedan disgregar con facilidad y su apariencia sea completamente seca.

1.1.2 Se pulveriza el material en un mortero empleando una maja forrada en caucho u otro procedimiento que no cause rotura de las partículas individuales del suelo. Cuando las partículas gruesas halladas durante el proceso correspondan a concreciones, conchillas u otros materiales frágiles, ellas no se deben triturar para obligarlas a pasar por el tamiz de 425 μm (No. 40), sino que se deben remover manualmente o mediante otro medio como, por ejemplo, el lavado. Si se emplea este último, se procederá como se indica en los numerales 9.1.2.1 a 9.1.2.4.

1.1.3 Se separa el material a través del tamiz de 425 μm (No. 40), sacudiendo el tamiz manualmente para asegurar la separación de la fracción fina. El material que quede retenido en el tamiz se vuelve a procesar en el mortero y se tamiza nuevamente. El proceso se detiene cuando la mayor parte del material fino se ha desagregado y el retenido en el tamiz de 425 μm (No. 40) está compuesto únicamente por partículas individuales.

1.1.4 El material retenido en el tamiz de 425 μm (No. 40) se coloca en un recipiente y se sumerge en una pequeña cantidad de agua. La mezcla formada se pasa por el tamiz de 425 μm (No. 40), capturando en un recipiente de lavado el agua y los finos suspendidos que contenga. Se vierte esta suspensión en el recipiente que contiene el suelo seco que previamente se pasó por el tamiz de 425 μm (No. 40). Se descarta todo material que haya quedado retenido en este tamiz.

1.1.5 A continuación, se procede como se indica en los numerales 9.1.2.3 y 9.1.2.4.

MÉTODO A – DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO CON VARIOS PUNTOS DE ENSAYO

1 PROCEDIMIENTO

- 1.1 Se remezcla completamente el espécimen, ajustando su contenido de agua para que adquiera la consistencia requerida para que sean necesarios entre 25 y 35 golpes de la cazuela para cerrar la ranura que se forma en el suelo. Se coloca una cantidad adecuada de suelo en la cazuela encima del punto donde ésta descansa en la base y se comprime y extiende con la espátula para nivelarla y, a la vez, dejarla con una profundidad de 10 mm en el punto de su máximo espesor (Figura 125 - 6). Se debe usar el menor número posible de pasadas con la espátula, evitando atrapar burbujas de aire en la masa de suelo. El suelo excedente se debe devolver al recipiente mezclador, el cual se debe tapar con el fin de retener la humedad de la muestra.

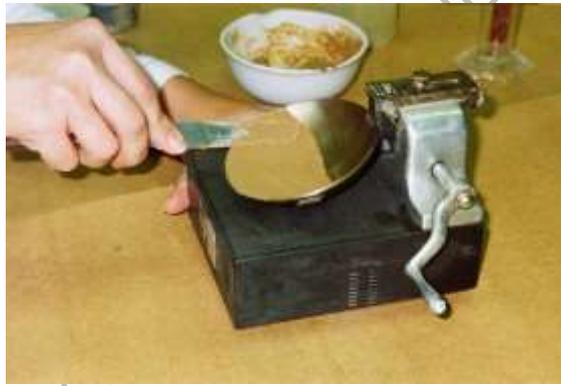


Figura 125 - 6. Colocación del suelo dentro de la cazuela

- 1.2 El suelo colocado sobre la cazuela de bronce se divide con una pasada firme del ranurador, hundiendo el lado biselado de éste hacia adelante en una línea que va desde el punto más alto hasta el más bajo del borde de la cazuela. Al hacer la ranura, se sostiene el ranurador contra la superficie de la cazuela y se forma un arco, manteniendo el ranurador perpendicular a la superficie de la cazuela durante su movimiento (Ver Figura 125 - 7). En suelos en los que no se pueda hacer la ranura en una sola pasada sin desgarrarlos, la ranura se corta con varias pasadas del ranurador. También, se puede hacer una ranura ligeramente menor usando una espátula y usando luego el ranurador hasta completar la dimensión deseada. Se debe tener un cuidado extremo, con el fin de evitar que la pasta de suelo se deslice sobre la superficie de la cazuela.

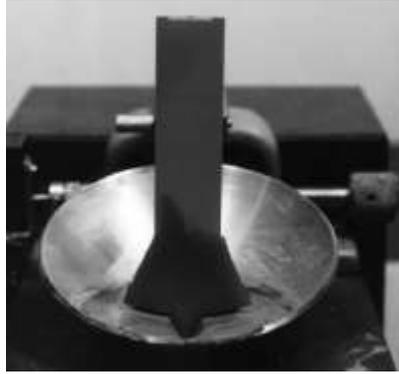


Figura 125 - 7. Ubicación correcta del ranurador para la formación de la ranura

- 1.1** Se verifica que no haya restos de suelo ni en la base ni en la parte inferior de la cazuela. Entonces, se levanta y golpea la cazuela girando la manija a una velocidad de 1.9 a 2.1 revoluciones por segundo, hasta que las dos mitades de la pasta de suelo se pongan en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de cerca de 13 mm ($\frac{1}{2}$ ") (ver Figuras 125 - 8.a y 125 - 8.b). Por ningún motivo se deberá sostener la base del equipo con una mano mientras se gira la manivela.

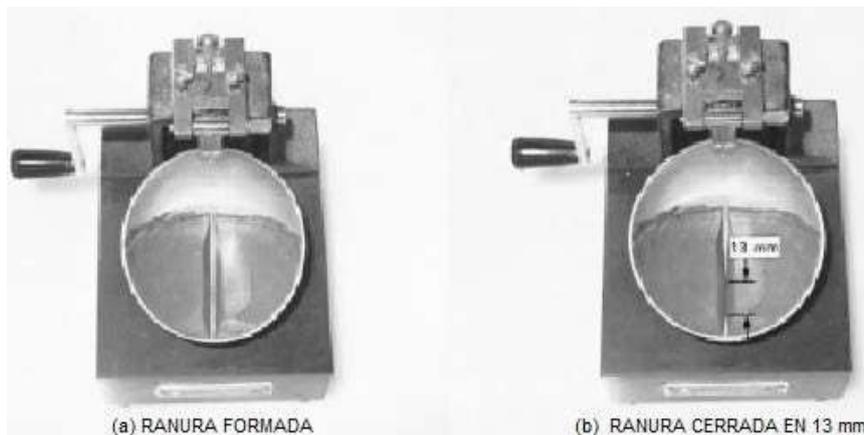


Figura 125 - 8. Ranura antes y después de cerrarse

- 1.2** Se debe verificar que la ranura no se haya cerrado de manera prematura a causa de una burbuja de aire atrapada en el suelo. Ello se hace observando que ambos lados de la ranura hayan fluido de manera similar. Si no fue así, se deberá re conformar el suelo en la cazuela, añadiendo una pequeña cantidad de éste para reponer la porción perdida durante el ranurado y se repiten los pasos 10.1 a 10.3. Si el suelo se desliza sobre la superficie de la cazuela, se deberán repetir los pasos 10.1 a 10.3 empleando una humedad mayor. Si

luego de varios ensayos con contenidos de agua sucesivamente mayores, la pasta de suelo se continúa deslizando en la cazuela o si el número requerido de golpes para cerrar la ranura es siempre menor de 25, se informa que no es posible determinar el límite líquido y que el suelo es no plástico (NP), sin que sea necesario realizar el ensayo de límite plástico.

- 1.1** Se registra el número de golpes, N, requerido para cerrar la ranura en la longitud indicada en el numeral 10.3. Se saca una tajada de suelo, aproximadamente del ancho de la espátula, tomando parte de uno y otro lado y en ángulo recto con la ranura, incluyendo la porción de ésta en la cual se hizo contacto y se coloca en un recipiente de masa conocida y se tapa.
- 1.2** Se transfiere a la vasija de mezclado el suelo que sobró en la cazuela de bronce. La cazuela y el ranurador se deben lavar y secar, para tenerlas listas para el tanteo siguiente.
- 1.3** Se remezcla el suelo restante en la vasija, agregándole agua suficiente para ponerlo en un estado de mayor fluidez y se repiten los pasos 10.1 a 10.6. La finalidad de este procedimiento es obtener muestras con consistencias tales, que al menos una de las determinaciones del número de golpes requeridos para cerrar la ranura del suelo se halle en cada uno de los siguientes intervalos: 25–35; 20–30 y 15–25.
- 1.4** Se toma el recipiente con la porción de suelo (Ver numeral 10.5), se pesa y se anota el valor obtenido. Se coloca en seguida dentro del horno a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) hasta obtener una masa constante y se vuelve a pesar tan pronto como se haya enfriado y antes de que pueda haber absorbido humedad higroscópica. Se anota esta masa, así como la pérdida de masa debida al secado. La determinación de la masa inicial (recipiente más porción de suelo húmedo) se deberá realizar inmediatamente se termine el ensayo. Si éste se interrumpe por más de 15 minutos, la masa se deberá determinar en el momento de la interrupción.

2 CÁLCULOS

- 2.1** Se calcula el contenido de agua de cada porción del suelo, expresándolo como porcentaje de la masa del suelo secado en el horno, como sigue:

$$\text{Contenido de agua} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} \times 100 \quad [125.1]$$

- 1.1** *Preparación de la curva de fluidez* – La "curva de fluidez", que representa la relación entre el contenido de humedad y el correspondiente número de golpes de la cazuela de bronce, se dibuja en un gráfico semi-logarítmico, con el contenido de agua como ordenada en la escala aritmética y el número de golpes como abscisa en la escala logarítmica. La curva de fluidez es una línea recta promedio que pasa tan cerca, como sea posible, de los tres o más puntos dibujados.
- 1.2** *Límite líquido* – El contenido de agua correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes se toma como Límite Líquido del suelo y se redondea al número entero más cercano.

Nota 6: Se pueden usar métodos de cómputo sustitutivos del método gráfico, para ajustar los datos a una línea recta y determinar el límite líquido.

MÉTODO B – DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO A PARTIR DE UN SOLO PUNTO DE ENSAYO

2 PROCEDIMIENTO

- 2.1** Se procede como se ha indicado en los numerales 10.1 a 10.5, excepto que la humedad del suelo deberá corresponder a un número de golpes entre 20 y 30 para cerrar la ranura de suelo en la cazuela. Si al hacer la prueba se obtienen más de 30 golpes o menos de 20, se deberá ajustar la humedad del suelo y repetir el ensayo.
- 2.2** Inmediatamente después de recoger la muestra para determinar la humedad (como se describió en el numeral 10.5), se recupera la forma del suelo en la cazuela añadiendo una pequeña cantidad de él para recuperar la cantidad perdida a causa del ranurado y de la toma de la porción para hallar la humedad, y se repiten los pasos 10.2 a 10.5.
- 2.3** Si el cierre de la segunda ranura requiere el mismo número de golpes que la primera o no hay más de dos golpes de diferencia, se toma una porción del suelo para verificar su humedad. Si la diferencia es de más de dos golpes, el suelo se deberá remezclar en su totalidad y se repetirá el procedimiento, comenzando por el paso 12.1, hasta que el número de golpes requerido para el cierre de la ranura entre una y otra prueba no difiera en más de dos.

1 CÁLCULOS

- 1.1** Se calcula el contenido de humedad de cada porción del suelo, de la misma manera descrita para las muestras del método A.
- 1.2** Se calcula el límite líquido de cada porción con alguna de las dos fórmulas siguientes:

$$LL_N = w_N \times \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad [125.2]$$

O:

$$LL_N = K \times w_N \quad [125.3]$$

- Donde: LL_N : Límite líquido a partir de un punto, para un tanteo, %;
- N := Número de golpes para que se cierre la ranura en un tanteo;
- w_N : Contenido de agua para un tanteo;
- K : Factor de corrección (Tabla 125 - 1).

Tabla 125 - 1. Factores de corrección para obtener el límite líquido a partir de la humedad y del número de golpes que causan el cierre de la ranura

NÚMERO DE GOLPES N	FACTOR PARA LÍMITE LÍQUIDO K
20	0.973
21	0.979
22	0.985
23	0.990
24	0.995
25	1.000
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

- 1.3** Se tomará como límite líquido del suelo el promedio de los valores obtenidos en los dos tanteos, valor que se deberá aproximar al entero más cercano. Si la diferencia entre los dos valores redondeados es mayor de uno (1), se repetirán

el procedimiento descrito en la Sección 12 y los cálculos descritos en los numerales 13.1 y 13.2.

1 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 4318 – 10

ANEXO A (Aplicación obligatoria)

PRUEBA DE RESILIENCIA DE LA BASE DEL EQUIPO DE LÍMITE LÍQUIDO

A.1 El aparato para medir la resiliencia de la base del equipo de límite líquido se enseña en la Figura 125A - 1. El aparato consiste en un tubo y su tapa de acrílico transparente, una bola pulida de acero de 8 mm de diámetro y una barra pequeña imantada. El cilindro debe estar fijado permanentemente a la tapa o atornillado a ésta como se ve en el dibujo. La barra pequeña imantada se sostiene por dentro de la tapa y la bola de acero se fija a la barra dentro del hueco de la tapa. Se coloca entonces el cilindro encima de la base que se va a probar. Sosteniendo el tubo hasta tocar ligeramente la base del equipo del límite líquido con una mano, se suelta la bola retirando el imán fuera de la tapa. Se deben usar las marcas de la escala que están en la parte exterior del cilindro para determinar el punto más alto alcanzado por la parte inferior de la bola al rebotar. Se repite la caída de la bola por lo menos 3 veces, colocando el probador en diferente posición para cada caída. El promedio del rebote de la bola de acero, expresado como porcentaje del total de la caída, es igual a la resiliencia de la base del equipo. Las pruebas de resiliencia de la base se deben realizar a temperatura ambiente.

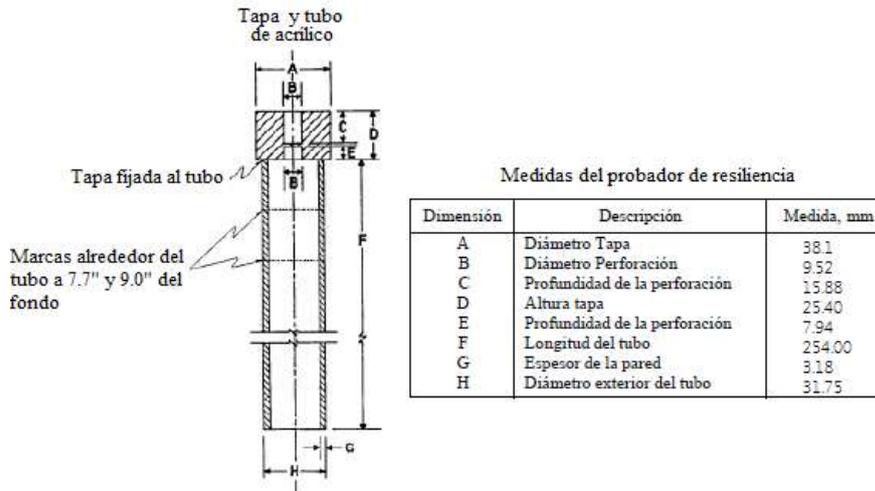


Figura 125A - 1. Probador de resiliencia

ANEXO M
DETERMINACIÓN LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS
SUELOS
INV E 126-13

LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS

INV E – 126 – 13

1 OBJETO

- 1.1 Esta norma de ensayo se refiere a la determinación del límite plástico y del índice de plasticidad de los suelos, los cuales se definen en la Sección 2.
- 1.2 El método descrito en esta norma se debe aplicar únicamente sobre la porción de suelo que pasa el tamiz de 425 μm (No. 40). Por lo tanto, se deberá considerar la contribución relativa de esta fracción de suelo en las propiedades de la muestra como conjunto, cuando se usen los valores de límite plástico e índice de plasticidad para evaluar las propiedades de un suelo.
- 1.3 El ensayo del límite plástico se realiza sobre el mismo material preparado para la determinación del límite líquido.
- 1.4 El secado previo del material en horno, estufa o al aire, puede cambiar (generalmente disminuir) el límite plástico de un suelo con material orgánico, aunque este cambio puede ser poco importante.
- 1.5 A los fines de comparar valores medidos o calculados con límites especificados, el valor medido o calculado se deberá redondear al dígito significativo más próximo al del límite especificado.
- 1.6 Esta norma reemplaza la norma INV E–126–07.

2 DEFINICIONES

- 2.1 Las definiciones específicas aplicables a esta norma, son las siguientes:

2.1.1 *Límites de Atterberg* – Originalmente, Albert Atterberg definió seis “límites de consistencia” para los suelos finos: el límite superior del flujo viscoso, el límite líquido, el límite de pegajosidad, el límite de cohesión, el límite plástico y el límite de contracción. En el uso actual de la ingeniería el término se aplica solamente a los límites líquido y plástico y, en algunas referencias, también al límite de contracción. Estos límites representan las fronteras entre diversos estados de consistencia de los suelos plásticos.

- 1.1.1** *Consistencia* – Facilidad relativa con la cual se puede deformar un suelo.
- 1.1.2** *Límite plástico (LP, w_p)* – Contenido de agua del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido.
- 1.1.3** *Índice de plasticidad (IP)* – Rango de contenidos de agua, dentro del cual un suelo se comporta plásticamente. Numéricamente, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

2 RESUMEN DEL MÉTODO

- 2.1** El límite plástico se determina presionando de manera repetida una pequeña porción de suelo húmedo, de manera de formar rollos de 3.2 mm (1/8") de diámetro, hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el cual se produce el agrietamiento y/o desmoronamiento de los rollos. El límite plástico es la humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de este diámetro, sin que ellos se agrieten o desmoronen.
- 2.2** El índice de plasticidad se calcula sustrayendo el límite plástico del límite líquido.

3 IMPORTANCIA Y USO

- 3.1** La determinación del límite plástico interviene en varios sistemas de clasificación de suelos, dado que contribuye en la caracterización de la fracción fina de ellos. El límite plástico, solo o en conjunto con el límite líquido y el índice de plasticidad, se usa con otras propiedades del suelo para establecer correlaciones sobre su comportamiento ingenieril, tales como la compresibilidad, la permeabilidad, la compactabilidad, los procesos de expansión y contracción y la resistencia al corte.
- 3.2** Los límites líquido y plástico de un suelo, junto con su contenido de agua, se usan para expresar su consistencia relativa o índice de liquidez. Además, el índice de plasticidad, junto con el porcentaje de partículas menores de 2 μm , permite estimar la actividad de la fracción fina de un suelo.

1 EQUIPO Y MATERIALES

- 1.1 *Placa de vidrio esmerilado* – De tamaño suficiente para formar cilindros de suelo (rollos) en el ensayo.
- 1.2 *Aparato de enrollamiento para determinar el límite plástico (opcional)* – Un aparato hecho de acrílico, de las características y dimensiones que se muestran en las Figuras 126 - 1 y 126 - 2.
- 1.3 *Papel para el aparato de enrollamiento* – Papel mate que impida la adhesión de materias extrañas al suelo (fibras, fragmentos de papel, etc.) durante el proceso de enrollado. Este papel deberá adherirse firmemente a las placas superior e inferior del aparato descrito en el numeral 5.2.
- 1.4 *Espátula* – De hoja flexible, de unos 10 a 13 cm (4 a 5") de longitud y 2 cm (¾") de ancho.
- 1.5 *Cápsula para evaporación* – De porcelana, o similar, de 115 mm (4½") de diámetro, para mezcla y almacenamiento de las muestras de suelo.
- 1.6 *Balanza* – De 100 g de capacidad, con legibilidad a 0.01 g.
- 1.7 *Cápsulas para la determinación de humedad.*
- 1.8 *Botella plástica* – Con un dispositivo adaptado en su boca para aplicar agua en forma de rocío.
- 1.9 *Horno* –Termostáticamente controlado, regulable a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).
- 1.10 *Tamiz* – De 425 μm (No. 40).
- 1.11 *Agua* – Se puede emplear agua destilada o desmineralizada.



Figura 126 - 1. Aparato de enrollamiento para determinar el límite plástico

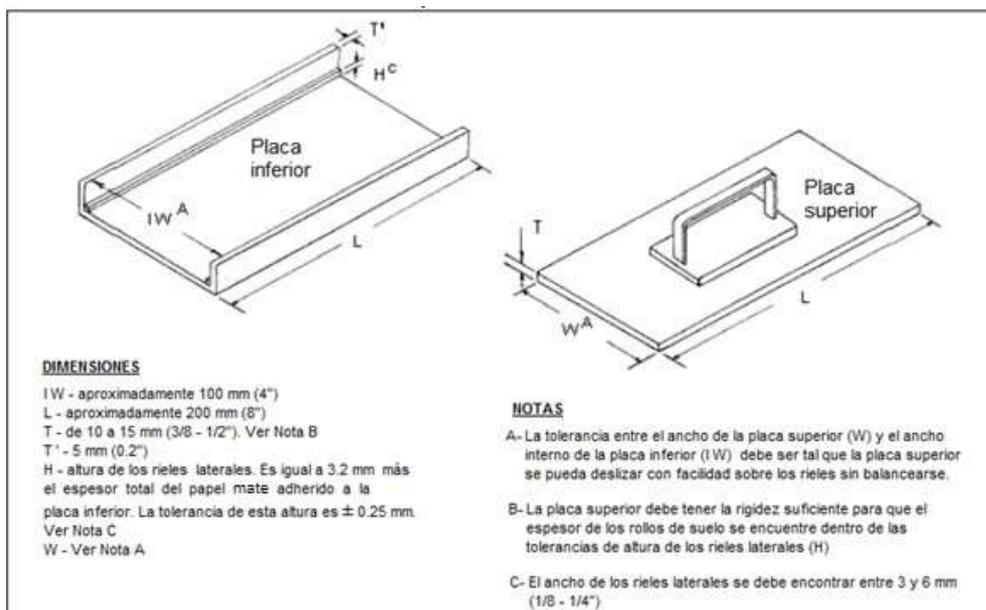


Figura 126 - 2. Dimensiones del aparato de enrollamiento para determinar el límite plástico

1 MUESTREO Y ELABORACIÓN DEL ESPÉCIMEN DE ENSAYO

- 1.1 El muestreo y la elaboración de los especímenes de ensayo para la determinación del límite plástico se harán de acuerdo con lo que resulte aplicable de los procedimientos descritos en la Sección 7 de la norma INV E-125.

1 PREPARACIÓN DEL ESPÉCIMEN DE ENSAYO

- 1.1** Se toma una porción de 20 g, o un poco más, del suelo preparado para el ensayo del límite líquido, ya sea luego del segundo mezclado antes del ensayo o del suelo que sobre al terminar la prueba del límite líquido (norma INV E- 125). Se reduce el contenido de agua de esta porción de suelo hasta que alcance una consistencia que permita enrollarlo sin que se pegue a las manos, extendiéndolo o mezclándolo continuamente sobre la placa de vidrio o en el recipiente de mezcla y almacenamiento. El proceso de secado se puede acelerar, exponiendo el suelo a la corriente de aire de un ventilador eléctrico o aplicándole un papel secante que no añada fibras al suelo.

2 PROCEDIMIENTO

- 2.1** Del espécimen de ensayo, se selecciona una porción de 1.5 a 2.0 g con la cual se forma una masa elipsoidal.
- 2.2** Se forman rollos con la masa de suelo, siguiendo alguno de los dos procedimientos que se mencionan a continuación.
- 2.2.1** *Mediante el método manual (Figura 126 - 3) – Se hace rodar la masa de suelo entre la palma de la mano o los dedos y la placa de vidrio, con la presión estrictamente necesaria para formar un rollo de diámetro uniforme en toda su longitud (nota 1). El rollo se debe adelgazar más con cada rotación, hasta que su diámetro alcance 3.2 mm (1/8"), tomándose para ello no más de dos minutos (nota 2). La presión requerida de la mano o de los dedos varía dependiendo del tipo de suelo, debiendo incrementarse a medida que la plasticidad del suelo es mayor. Los suelos frágiles de baja plasticidad se enrollan mejor bajo el borde exterior de la palma de la mano o bajo la base del dedo pulgar.*

Nota 1: Una velocidad normal de enrollado para la mayoría de los suelos es de 80 a 90 recorridos por minuto, entendiéndose por recorrido un movimiento completo de la mano hacia adelante y hacia atrás, regresando a la posición inicial. Esta velocidad de enrollado puede ser disminuida cuando se realice el ensayo sobre suelos muy frágiles.

Nota 2: Una varilla o tubo de 3.2 mm (1/8") de diámetro resulta de utilidad, como medio para verificar el momento en que el rollo de suelo alcanza el diámetro apropiado.



Figura 126 - 3. Método manual para formar rollos de suelo

- 1.1.1** *Empleando el aparato de enrollamiento* – Se adhieren hojas de papel mate liso a las placas superior e inferior del aparato plástico de enrollamiento. Se coloca la masa de suelo sobre la placa inferior, en el punto medio entre los rieles de deslizamiento. Se coloca la placa superior en contacto con la masa (o masas, ver nota 3) de suelo. Simultáneamente, se aplica una ligera presión hacia abajo y se da a la placa superior un movimiento de vaivén, de manera que entre en contacto con los rieles laterales antes de que pasen dos minutos (notas 1 y 3). No se debe permitir que el suelo toque los rieles laterales durante el proceso de enrollamiento. Si esto ocurre, se debe enrollar una masa de suelo más pequeña (aun si ella resulta menor que la mencionada en el numeral 8.1).

Nota 3: En la mayoría de los casos, se pueden enrollar simultáneamente dos masas de suelo en el aparato.

- 1.2** Cuando el diámetro del rollo llegue a 3.2 mm, éste se divide en varios trozos. Se juntan los trozos y se comprimen entre los pulgares y los demás dedos de ambas manos formando una masa uniforme de forma elipsoidal y se enrolla de nuevo. Se repite este procedimiento, partiendo, juntando, amasando y enrollando, hasta que el rollo de 3.2 mm de diámetro se desmorone bajo la presión requerida para el enrollamiento y el suelo no pueda ser enrollado más en cilindros de 3.2 mm de diámetro. No es importante si el rollo se parte en rollos de longitud muy corta. Cada uno de estos rollos cortos se deberá enrollar hasta alcanzar un diámetro de 3.2 mm. Lo único que se requiere para continuar el ensayo, es que al juntar estos rollos se pueda volver a formar una masa elipsoidal y luego crear nuevos rollos. En ningún momento el operador deberá intentar producir la rotura a un diámetro exacto de 3.2 mm formando un rollo de este tamaño y tratando de producir entonces la desintegración, mediante una disminución de la velocidad de enrollamiento y/o de la presión

manual, y continuando el enrollamiento sin más deformación hasta que el rollo se desbarate. Está permitido, sin embargo, reducir la cantidad total de deformación de un suelo débilmente plástico, haciendo que el diámetro inicial de la masa elipsoidal sea próximo al diámetro final requerido de 3.2 mm. Es posible que el desmoronamiento de un rollo ocurra cuando éste tenga un diámetro mayor de 3.2 mm. Este podrá ser considerado un punto final satisfactorio, siempre y cuando el suelo haya podido ser enrollado previamente en un cilindro de 3.2 mm de diámetro. El desmoronamiento se manifiesta de maneras diferentes en distintos tipos de suelos. Algunos suelos se desintegran en numerosas partículas pequeñas y otros pueden formar una capa exterior tubular que comienza a separarse desde ambos extremos; la separación progresa hacia el centro y, finalmente, el rollo se desintegra. Los suelos de arcilla pesada requieren mucha presión para deformar el rollo, especialmente cuando se aproximan al límite plástico, partiéndose finalmente en una serie de segmentos en forma de barril, de 3.2 a 9.5 mm (1/8 a 3/8") de longitud aproximada.

- 11 Se recogen las porciones de suelo desmoronado y se colocan en un recipiente adecuado de masa conocida. Si el recipiente con el suelo no se pesa en ese momento, se deberá tapar inmediatamente.
- 12 Se seleccionan otras porciones de 1.5 a 2 g del espécimen del límite plástico y se repiten las operaciones descritas en los numerales 8.2 a 8.4 hasta que el recipiente tenga, cuando menos, 6 g de suelo.
- 13 Las operaciones descritas en los numerales 8.1 a 8.5 se deberán repetir para obtener otro recipiente que contenga al menos 6 g de suelo.
- 14 Se determinan los contenidos de agua de los suelos contenidos en los dos recipientes, de acuerdo con la norma INV E-122 y se anotan los resultados.

2 CÁLCULOS

- 21 Se calcula el promedio de los dos contenidos de agua (tanteos del límite plástico) y el valor obtenido se redondea al entero más cercano. Este valor es el límite plástico (LP). El ensayo se deberá repetir, si la diferencia entre los límites plásticos de los dos tanteos supera el rango de aceptabilidad para los resultados de dos ensayos, efectuados por un solo operador; es decir, 1.4 puntos porcentuales (2.8×0.5). Ver Tabla 126 - 1.
- 22 Se calcula el índice de plasticidad (IP), como sigue:

$$IP = LL - LP$$

[126.1]

Donde: LL: Límite líquido (número entero);

LP: Límite plástico (número entero).

- 1.1** Tanto el LL como el LP son números enteros. Si el límite líquido o el plástico no se pueden determinar, o si el límite plástico es igual o mayor que el límite líquido, se informará que el suelo es no plástico, NP.

2 INFORME

- 2.1** El informe deberá incluir, al menos, lo siguiente:

2.1.1 Identificación del proyecto.

2.1.2 Procedencia y descripción de la muestra.

2.1.3 Procedimiento de ensayo utilizado (manual o con el aparato de enrollamiento).

2.1.4 Valores del límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad, (IP).

2.1.5 Cualquier información adicional respecto al ensayo o al suelo en estudio.

2.1.6 La referencia a este método de ensayo.

3 PRECISIÓN Y SESGO

- 3.1** *Precisión* – Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados obtenidos por este método de ensayo sobre un amplio rango de suelos, se muestran en las Tablas 126 - 1 y 126 - 2. El método de preparación de las muestras fue el de vía húmeda mencionado en la norma INV E-125.

- 3.2** *Sesgo* – No existe un valor de referencia aceptable para este método de ensayo, ni para el del límite líquido; por lo tanto, no es posible determinar el sesgo.

Tabla 126 - 1. Resumen de resultados de ensayos de laboratorio sobre límites de Atterberg

(1)	(2)			(3)			(4)			(5)		
TIPO DE SUELO	NÚMERO DE LABORATORIOS QUE HICIERON ENSAYOS POR TRIPLICADO			VALOR PROMEDIO ^A (PORCENTAJE DE PUNTOS)			DESVIACIÓN ESTÁNDAR ^B (PORCENTAJE DE PUNTOS)			RANGO ACEPTABLE ENTRE 2 RESULTADOS ^C (PORCENTAJE DE PUNTOS)		
Tipo de ensayo												
	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
Resultados de un solo operador (repetibilidad en el mismo laboratorio)												
CH	13	13	13	59.8	20.6	39.2	0.7	0.5	0.8	2	1	2
CL	14	13	13	33.4	19.9	13.6	0.3	0.4	0.5	1	1	1
ML	12	11	11	27.4	23.4 ^D	4.1 ^D	0.5	0.3	0.6	2	1	2
Resultados multi-laboratorio (reproducibilidad entre laboratorios)												
CH	13	13	13	59.8	20.6	39.2	1.3	2.0	2.5	4	6	7
CL	14	13	13	33.4	19.9	13.6	1.0	1.2	1.7	3	3	5
ML	12	11	11	27.4	23.4 ^D	4.1 ^D	1.3	0.9	1.9	4	3	5

^A El número de dígitos significativos y de cifras decimales que se presentan, representan los datos de entrada.

^B La desviación estándar se refiere al límite 1s.

^C El rango aceptable entre dos resultados se refiere al límite d2s. Este valor se calcula mediante el producto $1.960 \times \sqrt{2} \times 1s$ como se define en la práctica ASTM E 177. La diferencia entre los resultados de dos ensayos adecuadamente realizados no debe superar este límite.

^D Para el suelo ML, dos de los laboratorios reportaron el suelo como NP

Tabla 126 - 2. Resumen de resultados de ensayos de cada laboratorio

(1)	(2)	(3)			(4)			(5)		
TIPO DE SUELO	NÚMERO DE LABORATORIOS	VALOR PROMEDIO (PORCENTAJE DE PUNTOS)			DESVIACIÓN ESTÁNDAR (PORCENTAJE DE PUNTOS)			RANGO ACEPTABLE ENTRE 2 RESULTADOS (PORCENTAJE DE PUNTOS)		
Tipo de ensayo										
		LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
CH	24	59.9	20.4	39.5	2.1	2.7	3.1	6	7	9
CL	24	33.3	19.9	13.4	0.8	1.3	1.6	2	4	4
ML	18	27.1	23.2 ^A	3.9 ^A	1.3	1.2	1.8	4	3	5

^A Para el suelo ML, 6 de 24 laboratorios reportaron el suelo como NP

1 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 4318 – 10

**ANEXO
(Informativo)**

MODELO DE FORMATO PARA PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

INVIAS	DETERMINACIÓN LIMITE LIQUIDO Y LIMITE PLASTICO	INV E - 125 INV E - 126
		Fecha:

CERTIFICADO DE ENSAYO No.

Identificación de la obra

Identificación de la muestra

Calicata / sondeo Horizonte Fecha muestreo

	LIMITE PLASTICO			LIMITE LIQUIDO				
	1	2	3	1	2	3	4	5
ENSAYO N°								
CAPSULA N°								
NÚMERO DE GOLPES								
1 PESO CÁPSULA + SUELO HUM (g)								
2 PESO CÁPSULA + SUELO SECO (g)								
3 PESO DE LA CÁPSULA (g)								
4 PESO DEL AGUA (1-2) (g)								
5 PESO DEL SUELO SECO (2-3) (g)								
6 HUMEDAD (4-5)*100 (%)								
7 PROMEDIO LIMITE PLÁSTICO (%)								

CURVA DE FLUJES

Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Índice de plasticidad (IP) = LL-LP
---------------------	----------------------	------------------------------------

ANEXO N
RELACIONES HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS
(ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)
INV E 142-13

RELACIONES HUMEDAD – PESO UNITARIO SECO EN LOS SUELOS (ENSAYO MODIFICADO DE COMPACTACIÓN)

INV E – 142 – 13

1 OBJETO

- 11** Los siguientes métodos de ensayo se emplean para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 101.6 o 152.4 mm (4 o 6") de diámetro, con un martillo de 44.48 N (10 lbf) que cae libremente desde una altura de 457.2 mm (18"), produciendo una energía de compactación aproximada de 2700 kN–m/m³ (56 000 lbf–pie/pie³).
- 12** Estos métodos aplican solamente a suelos con 30% o menos de su masa con tamaño mayor a 19.0 mm y que no hayan sido compactados previamente; es decir, no se acepta la reutilización de un suelo compactado.
- 1.2.1** Para establecer relaciones entre pesos unitarios y humedades de moldeo de suelos con 30% o menos de su masa con tamaño mayor a 19.0 mm y pesos unitarios y humedades de la fracción que pasa el tamiz de 19.0 mm (3/4"), se deberá aplicar la corrección a la cual hace referencia la norma INV E–143.
- 13** Esta norma presenta tres alternativas para la ejecución del ensayo (Tabla 142 - 1). El método por utilizar deberá ser el indicado en la especificación para el material por ensayar. Si la especificación no indica un método, la elección se deberá realizar en función de la granulometría del material.

Tabla 142 - 1. Métodos para realizar el ensayo modificado de compactación

MÉTODO	A	B	C
DIÁMETRO DEL MOLDE	101.6 mm (4")	101.6 mm (4")	152.4 mm (6")
MATERIAL	Pasa tamiz de 4.75 mm (No. 4)	Pasa tamiz de 9.5 mm (3/8")	Pasa tamiz de 19.0 mm (3/4")
CAPAS	5	5	5

MÉTODO	A	B	C
GOLPES/CAPA	25	25	56
USO	Si 25 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre 5 y 25 % de la masa, se puede usar el Método A, pero se requerirá la corrección por sobretamaños (Ver numeral 1.4) y, en este caso, el uso del Método A no reportará ninguna ventaja	Si 25 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8"). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre 5 y 25 % de la masa, se puede usar el Método B, pero se requerirá la corrección por sobretamaños (Ver numeral 1.4). En este caso, la única ventaja de usar el Método B en lugar del Método C, es que se necesita menos cantidad de muestra y el molde pequeño es más fácil de usar	Si 30 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Ver numeral 1.4)
OTRO USO	Si este requisito de granulometría no se puede cumplir, se deben usar los Métodos B o C	Si este requisito de granulometría no se puede cumplir, se debe usar el Método C	

1.3.1 El molde de 152.4 mm (6") de diámetro no se debe usar con los métodos A o B.

Nota 1: Se ha encontrado que los resultados varían ligeramente cuando el material se compacta con la misma energía en moldes de diferente tamaño, obteniéndose los mayores valores cuando se emplea el molde pequeño.

- 11** Si la muestra de ensayo contiene más de 5 %, en masa, de sobretamaños (fracción gruesa) y este material no se va a incluir en el ensayo, se deberán corregir el peso unitario y el contenido de agua de moldeo de la muestra de laboratorio o el peso unitario del espécimen del ensayo de densidad en el terreno, empleando la norma INV E-143.
- 12** Este método produce una curva de compactación con un peso unitario seco máximo bien definido, cuando se ensayan suelos que no presentan drenaje libre. Si el suelo presenta drenaje libre, el peso unitario seco máximo no se puede definir con precisión.

11 Esta norma reemplaza la norma INV E-142-07.

2 DEFINICIONES

- 21** *Humedad de moldeo* – Contenido de agua con el cual se prepara una muestra para someterla a compactación.
- 22** *Energía del ensayo modificado de compactación* – 2700 kN-m/m³ (56 000 lbf-pie/pie³), aplicada con el equipo y procedimiento descritos en esta norma.
- 23** *Peso unitario seco máximo del ensayo modificado de compactación ($\gamma_{d, \text{máx}}$)* – El máximo valor definido en la curva de compactación obtenida como resultado del ensayo realizado con la energía indicada en el numeral 2.2.
- 24** *Humedad óptima del ensayo modificado de compactación (w_{opt})* – La humedad de moldeo con la cual el suelo alcanza el peso unitario seco máximo usando la energía normalizada.
- 25** *Sobretamaños (fracción gruesa) (P_{FG})* – Porción de la muestra total que no se utiliza en la prueba de compactación. Es la retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) cuando se utiliza el Método A; la retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8") cuando se emplea el Método B, o la retenida en el tamiz de 19.0 mm (3/4") cuando se emplea el Método C.
- 26** *Fracción de ensayo (fracción fina) (P_{FE})* – La porción de la muestra total que se emplea en el ensayo de compactación. Corresponde al material que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) cuando se utiliza el Método A; al pasante por el tamiz de 9.5 mm (3/8") cuando se emplea el Método B, o al pasante por el tamiz de 19.0 mm (3/4") cuando se emplea el Método C.

3 RESUMEN DEL MÉTODO

- 3.1** Una muestra de suelo con una humedad de moldeo seleccionada, se coloca en cinco capas dentro de un molde, sometiendo cada capa a 25 o 56 golpes de un martillo de 44.48 N (10 lbf) que cae desde una altura de 457.2 mm (18"), produciendo una energía de compactación aproximada de 2700 kN-m/m³ (56 000 lbf-pie/pie³). Se determina el peso unitario seco resultante. El procedimiento se repite con un número suficiente de humedades de moldeo, para establecer una curva que relacione a éstas con los respectivos pesos

unitarios secos obtenidos. Esta curva se llama curva de compactación y su vértice determina la humedad óptima y el peso unitario seco máximo, para el ensayo normal de compactación.

1 IMPORTANCIA Y USO

- 1.1** Los suelos y mezclas de suelo-agregado usados como relleno en obras de ingeniería se compactan a cierto nivel, con el fin de lograr un comportamiento satisfactorio en términos de su resistencia al corte, su compresibilidad o su permeabilidad. Así mismo, los suelos de fundación se compactan a menudo para mejorar sus propiedades de ingeniería. Los ensayos de compactación en el laboratorio suministran la base para determinar el porcentaje de compactación y la humedad de moldeo necesaria para que el suelo alcance el comportamiento requerido.

Nota 2: Las especificaciones de construcción de carreteras suelen exigir un grado de compactación del suelo en el terreno, expresado como un porcentaje del peso unitario seco máximo obtenido en el ensayo modificado de compactación, realizado de acuerdo con esta norma. Si en algún caso el porcentaje de compactación exigido es muy bajo, posiblemente resulte más conveniente especificarlo en relación con el peso unitario seco máximo obtenido en el ensayo normal de compactación. El ensayo modificado da lugar a un suelo compactado con mayor peso unitario seco, con menor humedad óptima, mayor resistencia al corte, mayor rigidez, menor permeabilidad y menor compresibilidad que el ensayo normal de compactación. Sin embargo, si un suelo fino se compacta con una energía muy alta, puede sufrir expansiones importantes cuando absorbe agua, perdiendo su resistencia e incrementando su compresibilidad, con lo que se reducen los beneficios del incremento de la energía de compactación durante la etapa constructiva. El empleo de la norma INV E-141 como referencia, permite una menor energía de compactación y da lugar a humedades óptimas mayores. De esta manera, el suelo puede ser menos friable, más flexible, más permeable y menos propenso a la expansión y la contracción.

- 1.2** Durante el diseño de una obra de ingeniería, algunos ensayos requieren la preparación de muestras de prueba con determinada humedad y con un peso unitario establecido. Constituye una práctica común determinar primero la humedad óptima y el peso unitario seco máximo a través de un ensayo de compactación. Posteriormente, se elaboran los especímenes de ensayo para el diseño específico, empleando humedades por encima o por debajo de la óptima y pesos unitarios secos expresados como un porcentaje del máximo. La selección de estas humedades y estos pesos unitarios se debe basar en la experiencia del profesional o, de lo contrario, conviene hacer una investigación dentro de unos rangos de valores, para establecer el porcentaje de compactación apropiado.

La experiencia indica que los procedimientos descritos en el numeral 4.2 o los controles de construcción mencionados en el numeral 4.1 son muy difíciles de implementar o producen resultados erróneos cuando se trata con determinados suelos. Los numerales 4.3.1 a 4.3.3 describen algunos casos problemáticos típicos.

1.1.1 *Presencia de partículas mayores de ¾"* - Los suelos que contienen más de 30 % de partículas superiores a 19 mm (¾") constituyen un problema. Para tales suelos no existe norma de ensayo INV para determinar sus condiciones de compactación en el laboratorio. La antigua práctica de reemplazar la fracción de tamaño mayor por otra más fina ha demostrado ser inapropiada para determinar el peso unitario seco máximo y la humedad óptima de suelos que contengan estas partículas de mayor tamaño.

1.1.1.1 Un método para diseñar y controlar la compactación de estos suelos consiste en el uso de un relleno de prueba para determinar el grado requerido de compactación y el método para obtenerla, seguido por el establecimiento de una especificación de método para controlar la compactación. Una especificación de método contiene, típicamente, el tipo y tamaño del equipo de compactación por usar, el espesor de la capa, el rango aceptable en el contenido de agua y el número de pasadas. El éxito en la aplicación de una especificación de este tipo depende, en gran medida, de la calificación y la experiencia del constructor y del interventor.

1.1.1.2 Otro método consiste en aplicar los factores de corrección desarrollados por el USDI Bureau of Reclamation (Ver notas 2 y 3 de la norma INV E-141) y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de USA (Ver nota 4 de la norma INV E-141). Estos factores de corrección se pueden aplicar a suelos con una proporción de sobretamaños hasta de 50 y 70 %. Cada agencia aplica un término diferente para estos factores de corrección de densidad. El USDI Bureau of Reclamation usa un valor D, mientras el Cuerpo de Ingenieros usa un coeficiente de interferencia de densidad (Ic).

1.1.2 *Degradación* – Los suelos que contiene partículas que se degradan durante la compactación constituyen un problema, en especial en el caso frecuente de que la degradación sea mayor en el laboratorio que en el terreno. Es típica la ocurrencia de la degradación cuando se compacta un material granular residual. La degradación hace que el peso unitario seco máximo de laboratorio se incremente, lo que hace que el valor obtenido en el laboratorio no sea representativo de las condiciones de campo. En estos casos, es muy frecuente que resulte imposible alcanzar en el terreno el máximo peso unitario seco.

- 1.1.1** *Gradación discontinua* – Los suelos que contienen bastantes partículas grandes y pocas pequeñas son un problema, por cuanto el suelo compactado contendrá más vacíos de lo usual. Para manejar estos elevados volúmenes de vacíos, los métodos tradicionales de laboratorio y de campo han venido siendo modificados aplicando el juicio ingenieril.

2 EQUIPO

- 21** *Moldes* – Los moldes deberán ser cilíndricos, de paredes sólidas, fabricados con metal, y con las dimensiones y capacidades mostradas más adelante. Deberán tener collares ajustables de aproximadamente 60 mm (2.373") de altura, que permitan la preparación de muestras compactadas de mezclas de suelo con agua con la altura y el volumen deseados. El conjunto de molde y collar deberá estar construido de tal manera que se pueda encajar firmemente en una placa de base hecha del mismo material.
- 2.1.1** *Molde de 101.6 mm (4")* – Con una capacidad de $943 \pm 14 \text{ cm}^3$ ($1/30 \pm 0.0005 \text{ pie}^3$), con un diámetro interior de $101.6 \pm 0.4 \text{ mm}$ (4.000 ± 0.016 ") y una altura de $116.4 \pm 0.5 \text{ mm}$ (4.584 ± 0.018 ") (ver Figura 142 - 1).
- 2.1.2** *Molde de 152.4 mm (6")* – Con una capacidad de $2124 \pm 25 \text{ cm}^3$ (equivalente a $1/13.33 \pm 0.0009 \text{ pie}^3$), con un diámetro interior de $152.4 \pm 0.7 \text{ mm}$ (6 ± 0.026 ") y una altura de $116.4 \pm 0.5 \text{ mm}$ (4.584 ± 0.018 ") (ver Figura 142 - 2).
- 22** *Martillo metálico* – Puede ser de operación manual (numeral 5.2.1) o mecánica (numeral 5.2.2), con una masa de $4.5364 \pm 0.009 \text{ kg}$ ($10 \pm 0.02 \text{ lb}$), que tenga una cara plana circular (excepto lo anotado en el numeral 5.2.2.1), de diámetro de $50.80 \pm 0.13 \text{ mm}$ (2.000 ± 0.005 "). El diámetro real de servicio no podrá ser menor de 50.42 mm (1.985 "). El martillo deberá estar provisto de una camisa guía apropiada que controle la altura de la caída del golpe desde una altura libre de $457.2 \pm 1.3 \text{ mm}$ (18.00 ± 0.05 ") por encima de la altura del suelo. El martillo se deberá reemplazar si la cara de golpeo se desgasta o se acampana de manera que su diámetro se salga del rango $50.80 \pm 0.25 \text{ mm}$ (2.000 ± 0.01 ").
- 2.2.1** *Martillo de operación manual* – Deberá estar provisto de una camisa guía apropiada, que brinde una luz suficiente para que la caída del

martillo y la cabeza no tengan restricciones. La camisa guía deberá tener, al menos, 4 agujeros de ventilación en cada extremo (8 en total), ubicados a 19 ± 2 mm ($3/4 \pm 3/16$ ") del extremo, espaciados aproximadamente a 90° (1.57 rad). El diámetro mínimo de los orificios de ventilación debe ser de 9.5 mm ($3/8$ "). De ser necesario, se pueden incorporar agujeros adicionales o ranuras en la camisa del martillo.

1.1.1 *Martillo con cara circular, de operación mecánica* – Debe operar de manera que proporcione a la muestra un cubrimiento uniforme y completo. Deberá quedar una luz libre de 2.5 ± 0.8 mm (0.10 ± 0.03 ") entre el martillo y la superficie interior del molde de ensayo de menor dimensión. El martillo disponer de algún medio mecánico que lo soporte mientras no está en operación.

1.1.1.1 *Martillo de cara de sector circular, de operación mecánica* – Se puede usar con el molde de 152.4 mm (6") de diámetro en lugar del martillo de cara circular. Su cara de compactación debe tener la forma de un sector de círculo de radio igual a 73.7 ± 0.5 mm (2.90 ± 0.02 ") y un área aproximadamente igual a la del de cara circular (Ver numeral 5.2). El martillo debe operar de manera que el vértice del sector circular quede posicionado en el centro de la muestra de ensayo.

12 *Extractor de muestras (opcional)* – Un gato con marco u otro dispositivo adecuado para extraer las muestras compactadas de los moldes.

13 *Balanzas* – Una de 11.5 kg de capacidad y aproximación de lectura de 1 g, cuando se use para pesar moldes de 152.4 mm (6") con suelos húmedos compactados; cuando se emplee el molde de 101.6 mm (4"), se puede usar una balanza de menor capacidad, si su aproximación de lectura es de 1 g. También, se requiere otra balanza de 1 kg de capacidad con legibilidad de 0.1 g para las determinaciones de humedad.

14 *Horno* – Termostáticamente controlado, capaz de mantener una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C ($230 + 9^\circ$ F), para el secado de las muestras.

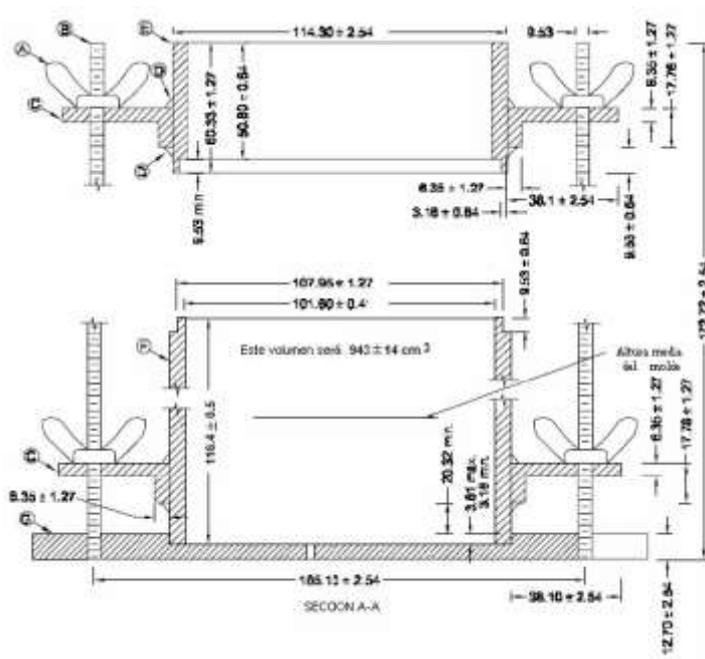
15 *Regla metálica* – De acero endurecido, de borde recto, al menos de 250 mm (10") de largo. El borde de corte y enrasado deberá ser biselado, si tiene más de 3 mm ($1/8$ ") de espesor. La regla no deberá ser tan flexible que cuando se enrase el suelo con el borde cortante, proporcione una superficie cóncava en la superficie de la muestra.

Tamices – De 19.0, 9.5 y 4.75 mm (3/4", 3/8" y No. 4).

- 5.8** *Herramientas misceláneas* – Tales como cazuelas para mezclado, espátulas, etc., o un dispositivo mecánico adecuado para mezclar las muestras de suelo con diversas cantidades de agua.
- 5.9** *Recipientes* – Para determinar la humedad de las muestras, elaborados en metal u otro material adecuado, con cierres que ajusten herméticamente para evitar la pérdida de humedad durante el pesaje.

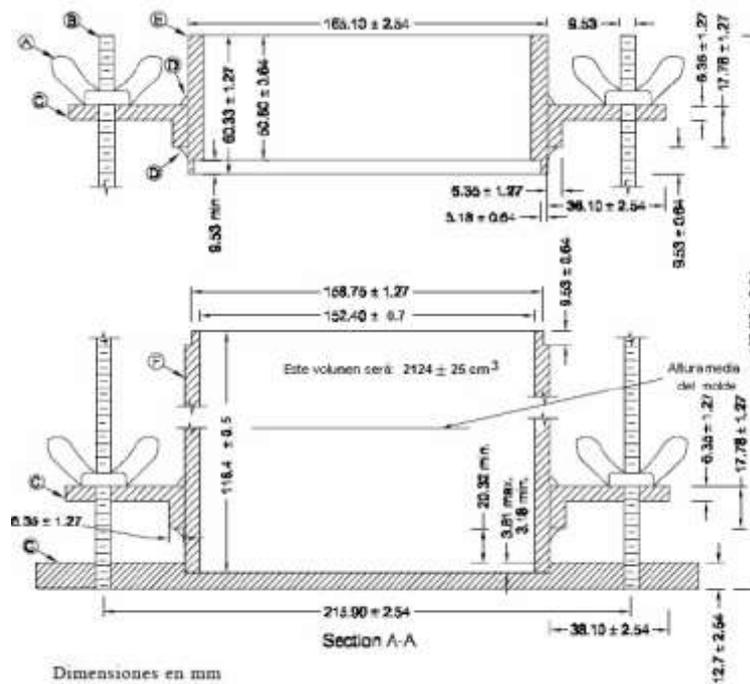
6 MUESTRA DE ENSAYO

- 6.1** La cantidad mínima de muestra para un ensayo completo empleando los Métodos A o B es de unos 16 kg, y para el Método C de 29 kg. Por lo tanto, la muestra de campo debería tener una masa húmeda de, al menos, 23 kg y 45 kg, respectivamente. Se pueden requerir masas mayores si la muestra contiene sobretamaños o si es necesario elaborar puntos de compactación adicionales.
- 6.2** Si no se dispone de los datos de granulometría de la muestra, se estiman las proporciones de material retenido en el tamiz de 4.75 mm (No. 4) cuando se utiliza el Método A; en el tamiz de 9.5 mm (3/8") cuando se emplea el Método B, o en el tamiz de 19.0 mm (3/4") cuando se emplea el Método C. Si se considera que el porcentaje retenido está muy cerca del límite admitido por el método de compactación que se va a utilizar, entonces se escoge alguna de las siguientes tres opciones:
- 6.2.1** Se elige un método que permita un mayor porcentaje retenido (por ejemplo, el B o el C, si inicialmente se pretende utilizar el A).
- 6.2.2** Usando el método de interés, se procesa la muestra como se indica en los numerales 7.2 o 7.3, con lo que se determina al porcentaje retenido para dicho método. Si resulta aceptable, se procede; en caso contrario, se va al método siguiente (B o C).
- 6.2.3** Se determinan los valores de los porcentajes retenidos usando una porción representativa de la muestra y empleando la norma de ensayo INV E-213. Solamente se necesita determinar los porcentajes retenidos en el tamiz o tamices deseados.



Dimensiones en mm

Figura 142 - 1. Molde cilíndrico de 101.6 mm (4.0") para ensayos de suelos



Dimensiones en mm

Figura 142 - 2. Molde cilíndrico de 152.4 mm (6.0") para ensayos de suelos

6 PROCEDIMIENTO

6.1 Suelos:

6.1.1 No se pueden utilizar muestras de suelo previamente compactadas en el laboratorio. Ello daría como resultado valores mayores de peso unitario seco máximo.

6.1.2 Cuando se use este método con suelos que contengan haloisita hidratada, o en los cuales la experiencia indica que los resultados se pueden ver afectados por el secado al aire de las muestras, se deberá emplear el método de preparación por vía húmeda (Ver numeral 7.2). En ensayos de referencia, cada laboratorio debe utilizar el mismo método de preparación, sea por vía húmeda (el preferido), sea por vía seca.

6.1.3 Se preparan las muestras para ensayo de acuerdo con el numeral 7.2 (preferido) o con el numeral 7.3.

6.2 *Preparación por vía húmeda (preferida)* – Sin secado previo de la muestra, se procesa ésta sobre un tamiz de 4.75 mm (No. 4), de 9.5 mm (3/8") o de 19.0 mm (¾"), dependiendo del Método (A, B o C) a ser usado o requerido, de acuerdo con lo citado en el numeral 6.2. Se determinan y registran las masas de los materiales pasante y retenido en ese tamiz (fracción de ensayo y fracción gruesa, respectivamente). Se seca en el horno la fracción gruesa y se determina y registra su masa con aproximación a 1 g. Si resulta que más del 0.5 % de la masa seca total de la muestra está adherida a la fracción gruesa, se deberá lavar esta fracción. Luego, se determina y registra su masa seca, con aproximación a 1 g. Se determina y registra la humedad de la fracción de ensayo (fracción fina). Usando esta humedad, se determina y anota la masa seca al horno de esta fracción, con aproximación a 1 g. Con base en estas masas secas, se determina el porcentaje de la fracción con sobretamaños, P_{FG} , y el porcentaje de la fracción de ensayo, P_{FE} , a menos que se haya realizado previamente el ensayo de granulometría completo (Ver Sección 8 para los cálculos).

6.2.1 Se seleccionan y preparan al menos cuatro (preferiblemente cinco) sub-muestras de la fracción de ensayo, con humedades que abarquen la humedad óptima estimada. En primer lugar, se prepara una sub-muestra con una humedad cercana a la que se cree que es la óptima (nota 3). Luego se eligen las humedades para las otras sub-muestras, con variaciones de 2 % y buscando que dos de ellas sean superiores a

la óptima y dos inferiores a ella. Ser requieren al menos dos humedades a cada lado de la óptima, para definir correctamente la curva de compactación (Ver numeral 7.5). Algunos suelos cuya humedad óptima es muy elevada o cuya curva de compactación es muy plana, requieren incrementos mayores en el contenido de agua para preparar las sub-muestras. En todo caso, ellos no deben exceder de 4 %.

Nota 3: Con práctica, es posible juzgar visualmente un punto de humedad cercano al óptimo. Típicamente, cuando los suelos cohesivos tienen la humedad óptima se pueden apretar formando un terrón que no se separa cuando se libera la presión de la mano, pero que se rompe limpiamente en dos secciones cuando se dobla. Estos suelos tienden a desmenuzarse cuando su humedad está por debajo de la óptima, mientras que tienden a mantenerse en una masa pegajosa cuando su humedad es mayor que la óptima. Su contenido óptimo de agua es, típicamente, algo menor que el límite plástico. Por el contrario, el contenido óptimo de los suelos sin cohesión es cercano a cero o al punto donde aflora el agua a la superficie del terrón.

- 6.1.1** Se mezcla completamente la fracción de ensayo (fracción fina), y luego se selecciona con una cuchara una porción representativa para constituir cada sub-muestra (punto de compactación). Se deben seleccionar por sub-muestra más o menos 2.3 kg cuando se usen los Métodos A o B, o unos 5.9 kg para el Método C. Para obtener las humedades de moldeo mencionadas en el numeral 8.2.1 se debe añadir o remover agua de la siguiente manera: (1) para añadir agua, se la atomiza durante la operación de mezclado y (2) para remover, se permite que el suelo se seque a la temperatura ambiente o en un aparato que no lleve la temperatura más allá de 60° C (140° F). Mezclar frecuentemente el suelo durante el secado facilita que el agua se distribuya de manera uniforme. Una vez que cada sub-muestra tenga la humedad apropiada, se coloca dentro de un recipiente con tapa, para someterla a un período de curado previo a la compactación, de acuerdo con la Tabla 142 - 2.

Tabla 142 - 2. Tiempo requerido de curado para las sub-muestras húmedas

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	TIEMPO DE CURADO (h)
GW, GP, SW, SP	No requiere
SW, SP	3
Todos los demás suelos	16

- 6.2** *Preparación por vía seca* – Si la muestra se encuentra muy húmeda para ser desmenuzada, se reduce su contenido de agua secándola al aire hasta volverla

friable. El secado también se puede realizar en un aparato que no lleve la temperatura más allá de 60° C (140° F). Se desintegran totalmente las agregaciones, sin romper partículas individuales. Se procesa el material sobre el tamiz apropiado, de acuerdo con el método de ensayo elegido. Cuando se prepare material pasante por el tamiz de 19.0 mm (¾") para compactarlo en el molde de 15.4 mm (6"), las agregaciones se deben romper lo suficiente para que pasen el tamiz de 9.5 mm (3/8"), con el fin de facilitar la distribución completa del agua durante el mezclado posterior. Se determina y anota el contenido de agua de la fracción de ensayo, así como todas las masas citadas en el numeral 8.2, para determinar el porcentaje de la fracción con sobretamaños, P_{FG} , y el porcentaje de la fracción de ensayo, P_{FE} .

6.1.1 Se seleccionan y preparan al menos cuatro (preferiblemente cinco) sub-muestras de la fracción de ensayo, de la manera descrita en los numerales 7.2.1 y 7.2.2, con la diferencia de que se debe usar un cuarteador mecánico o se cuartea manualmente para obtener las sub-muestras. Típicamente, siempre se requerirá añadir agua para preparar las sub-muestras para la compactación.

6.2 *Compactación* – Luego del período de curado, si éste se requiere, cada sub-muestra (punto de compactación) se debe compactar como se indica en seguida.

6.2.1 Se determina y registra la masa del molde o del molde más la placa de base (Ver numeral 7.4.7).

6.2.2 Se ensambla y asegura el collar de extensión al molde y el conjunto a la placa de base. Se verifican las alineaciones de las paredes interiores del molde y del collar y se hacen los ajustes que sean necesarios. El molde se deberá apoyar, sin bamboleo alguno, sobre una fundación firme y rígida, como la que puede brindar un cubo de concreto con una masa no menor de 91 kg (200 lbf). Se asegura la placa de base del molde a la fundación rígida. El método de aseguramiento deberá permitir que, luego de la compactación, el molde (con el collar y la base) se pueda retirar con facilidad.

7.4.2.1 Durante la compactación es ventajoso, aunque no indispensable, determinar la humedad de cada sub-muestra. Esto brinda una verificación sobre la humedad de moldeo determinada previamente para cada punto de compactación y sobre la magnitud del afloramiento de agua (Ver numeral 7.4.9). Si se decide hacer esto, será necesario que la sub-

muestra tenga una masa mayor que la citada con anterioridad.

- 6.1.1** El suelo se debe compactar en cinco capas más o menos iguales. Antes de la compactación, se coloca aproximadamente una quinta parte de la sub-muestra en estado suelto dentro del molde y se reparte para que dé lugar a una capa uniforme. En seguida, se oprime suavemente su superficie hasta que el suelo no presente un estado esponjoso o suelto, usando el martillo de operación manual o un cilindro de unos 50 mm (2") de diámetro. Tras la compactación de las cuatro primeras capas, cualquier porción de suelo que no haya quedado compactada debe ser escarificada con un cuchillo u otro elemento adecuado. El suelo escarificado se deberá descartar. La cantidad total de suelo usada deberá ser tal, que la quinta capa compactada sobrepase el borde del molde, quedando dentro del collar de extensión, pero en una longitud que no exceda de 6 mm ($\frac{1}{4}$ "). Si se excede este límite, se deberá descartar el punto de compactación. Adicionalmente, el punto de compactación se deberá descartar cuando el último golpe del martillo para la quinta capa tiene como resultado que el fondo del martillo llega más abajo del borde superior del molde de compactación; a menos que el suelo sea suficientemente manejable, de manera que esta superficie pueda ser forzada más arriba del borde del molde de compactación durante el enrasado (nota 4).
- 6.1.2** Cada capa se compacta con 25 golpes cuando está en el molde de 101.6 mm (4") y con 56 golpes cuando está en el molde de 152.4 mm (6"). Siempre que se realicen pruebas de referencia, se usará el martillo de operación manual.
- 6.1.3** Al operar el martillo manual, se debe tener cuidado para evitar levantar la camisa guía durante la carrera ascendente del martillo. La camisa se debe mantener verticalmente con firmeza, con una tolerancia de 5°. Los golpes se deben aplicar con una velocidad uniforme de 25 por minuto y cubriendo toda la superficie de la capa. Cuando se use el molde de 101.6 mm (4") con el martillo manual, se debe seguir el patrón de impactos mostrado en las Figuras 142 - 3a y 142 - 3b; mientras que si se usa el martillo de operación mecánica solo se seguirá el patrón de la Figura 142 - 4, empleando el martillo de cara circular. Cuando se use el molde de 152.4 mm (6") con el martillo manual, se deberá seguir el patrón de la Figura 142 - 4 hasta aplicar el noveno golpe y luego sistemáticamente alrededor del molde (Figura 142 - 3.b) y en el medio. Si se va a usar el martillo mecánico con este

molde, se deberá usar el martillo con cara de sector circular, empleando el patrón de la Figura 142 - 3b; si la superficie del suelo compactado es muy irregular (Ver nota 4), el patrón se deberá cambiar por el de la Figura 142 - 3a o el de la Figura 142 - 4. Probablemente, esto invalide el uso del martillo mecánico en esos puntos de compactación.

Nota 4: Cuando se compactan muestras con humedad por encima de la óptima, se pueden presentar superficies compactadas desniveladas y se requiere el juicio del operador para definir la altura de la muestra y patrón de golpeo con el martillo.

- 6.1.1** Terminada la compactación de la última capa, se remueven el collar y la placa de base del molde (excepto en el caso mencionado en el numeral 7.4.7). Se puede usar un cuchillo para desbastar el suelo adyacente al collar y ayudar a aflojarlo antes de removerlo, con el fin de evitar que la probeta compactada se rompa por debajo del borde superior del molde. Adicionalmente, para prevenir o reducir la adherencia del suelo al collar o a la placa de base, éstos se deben rotar cuidadosamente durante su remoción.

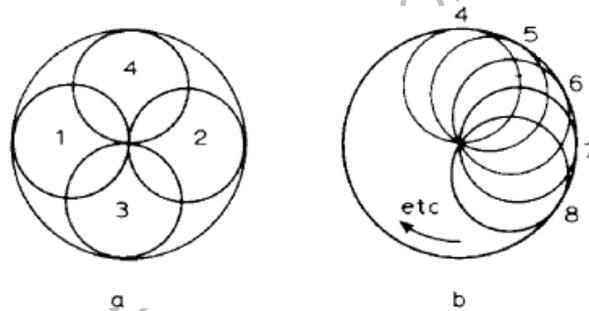


Figura 142 - 3. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 101.6 mm (4")

- 6.1.2** Se enrasa cuidadosamente la probeta compactada con el borde superior del molde, empleando la regla metálica dispuesta para tal fin. Al comienzo, se puede emplear el cuchillo para remover el exceso de suelo en parte superior de la probeta, para evitar que la regla la desgarre por debajo del borde superior del molde. Los pequeños orificios que queden en la superficie de la probeta se deberán rellenar con suelo no usado o desbastado de la muestra, presionándolo con los dedos y pasando nuevamente la regla a ras con el borde del molde. Si se encuentran partículas del tamaño de la grava, se debe escarificar alrededor de ellas o removerlas directamente, lo que resulte más cómodo y reduzca la alteración del suelo compactado, rellenando los

vacíos como se acaba de indicar. De las operaciones recién descritas se repiten las que sean necesarias en la parte inferior de la probeta, cuando el volumen del molde se haya determinado sin que la placa de base estuviera colocada. Para suelos muy secos o muy húmedos, se puede perder suelo o agua, respectivamente, al remover la placa de base. Para estas situaciones, se debe dejar la placa de base atornillada al molde. Cuando la placa de base se deja adjunta al molde, el volumen de éste se debe calibrar con ella puesta, en lugar de emplear una placa de vidrio o plástico, como se describe en el numeral A.1.4 del Anexo A.

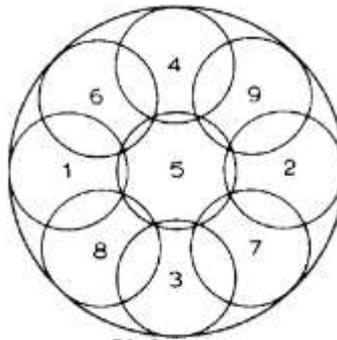


Figura 142 - 4. Patrón de impactos para la compactación en el molde de 152.4 mm (6")

6.1.1 Se determina y anota la masa del molde con la probeta compactada, con aproximación de 1 g. Cuando la placa de base se deja puesta con el molde, se debe determinar su masa junto con la del molde y la de la probeta compactada.

6.1.2 Se extrae del molde la probeta compactada. Se obtiene una muestra de ella para determinar la humedad, sea tomando el total de la muestra (método preferido) o una porción de ella. Cuando se utilice el total de la muestra, ésta se deberá desmenuzar para facilitar el secado. En el otro caso, se obtiene una porción representativa de las tres capas, removiendo suficiente material de la probeta para reportar el contenido de agua al 0.1 %. La masa de la porción representativa de suelo deberá estar de acuerdo con los requisitos indicados en la Tabla 122 - 1, método B de la norma INV E-122. El contenido de agua de moldeo de la probeta se deberá determinar con la misma norma.

6.2 Luego de la compactación de la última probeta, se comparan los pesos unitarios húmedos de todas, para asegurar que hay datos a ambos lados de la humedad óptima, que permitan la elaboración de la curva de compactación.

Dibujando los puntos que representan el peso unitario húmedo de cada probeta con su respectiva humedad de moldeo, se puede realizar esta evaluación. Si no se encuentra la tendencia esperada, será necesario compactar una o más probetas adicionales con otros contenidos de agua. Para personas con experiencia en el dibujo de curvas de compactación, un punto de compactación del lado húmedo (humedad mayor que la óptima) es suficiente para definir el máximo peso unitario húmedo.

6 CÁLCULOS

6.1 *Porcentajes de las fracciones* – Si no se dispone de los datos de granulometría de la muestra, la masa seca de la fracción de ensayo, y las fracciones gruesa y de ensayo (fracción fina) se determinan como se muestra a continuación, a partir de los datos de los numerales 7.2 o 7.3:

6.1.1 *Masa seca de la fracción de ensayo (M_{SFE}):*

$$M_{SFE} = \frac{M_{HFE}}{1 + \frac{w_{FE}}{100}} \quad [142.1]$$

Donde: M_{HFE} : Masa húmeda de la fracción de ensayo, aproximada a 1 g;

w_{FE} : Humedad de la fracción de ensayo, aproximada a 0.1%.

6.1.2 *Porcentaje de la fracción gruesa (P_{FG}):*

$$P_{FG} = \frac{M_{SFC}}{M_{SFC} + M_{SFE}} \times 100 \quad [142.2]$$

Donde: M_{SFC} : Masa seca de la fracción gruesa, aproximada a 1 g;

6.1.3 *Porcentaje de la fracción de ensayo (P_{FE}):*

$$P_{FE} = 100 - P_{FG} \quad [142.3]$$

6.2 *Humedades, densidades y pesos unitarios de las probetas compactadas (submuestras):*

6.1.1 *Humedad de moldeo de cada probeta* – Se calcula cada humedad (w), aproximada a 0.1 %, de acuerdo con la norma INV E-122.

6.1.2 *Densidad húmeda de cada sub-muestra (ρ_H):*

$$\rho_H = K \times \frac{M_T - M_{MD}}{V} \quad [142.4]$$

Donde: ρ_H : Densidad húmeda de la sub-muestra compactada (punto de compactación), con 4 dígitos significativos, g/cm³ o kg/m³;

M_T : Masa del suelo húmedo dentro del molde, aproximada a 1 g;

M_{MD} : Masa del molde compactación, aproximada a 1 g;

V: Volumen del molde, cm³ o m³ (Ver Anexo A);

K: Constante de conversión que depende de las unidades de densidad y de volumen:

Usar 1, para g/cm³ y volumen en cm³

Usar 1000 para g/cm³ y volumen en m³

Usar 0.001 para kg/cm³ y volumen en m³

Usar 1000 para kg/m³ y volumen en cm³

6.1.3 *Densidad seca de cada sub-muestra (ρ_d):*

$$\rho_d = \frac{\rho_H}{1 + \frac{w}{100}} \quad [142.5]$$

6.1.4 *Peso unitario seco de cada sub-muestra (γ_d):*

$$\gamma_d = K_1 \times \rho_d \quad \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad [142.6]$$

$$\gamma_d = K_2 \times \rho_d \quad \frac{\text{lbf}}{\text{pie}^3} \quad [142.7]$$

- γ_d : Peso unitario seco, aproximado a 0.01 kN/m³ (0.1 lbf/pie³);
- K_1 : Constante de conversión (9.8066 para densidad en g/cm³; 0.0098066 para densidad en kg/m³);
- K_2 : Constante de conversión (62.428 para densidad en g/cm³; 0.062428 para densidad en kg/m³).

6.1 Curva de compactación:

6.1.1 Con los valores de la humedad de moldeo (numeral 8.2.1) y de peso unitario seco (numeral 8.2.4) de cada sub-muestra, se dibuja la curva de compactación (curva inferior de la Figura 142 - 5). El contenido de humedad que corresponda al punto más alto de la curva, se llamará "humedad óptima" (aproximada a 0.1 %), mientras que el peso unitario seco correspondiente al contenido óptimo de humedad, se denomina "peso unitario seco máximo" (aproximado a 0.02 kN/m³ o 0.1 lbf/pie³).

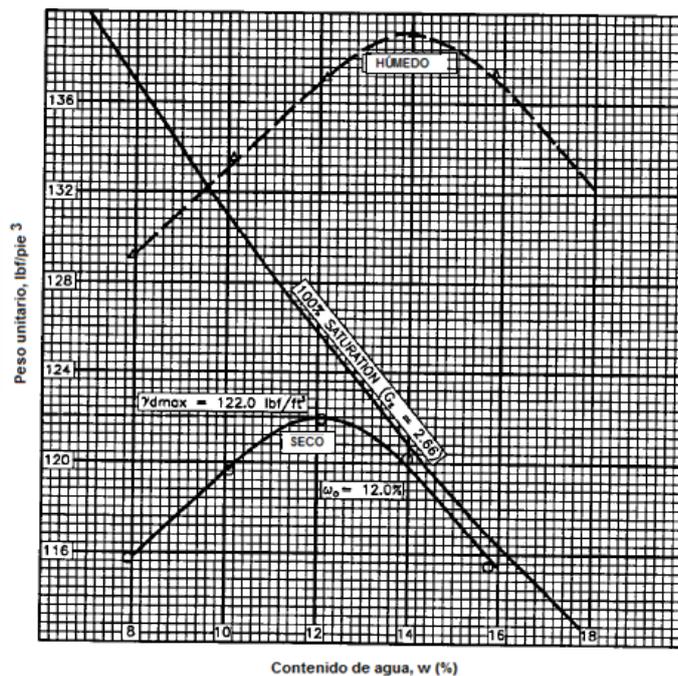


Figura 142 - 5. Ejemplo de dibujo de curva de compactación

Nota 5: Con fines únicamente de comparación, en la parte superior de la Figura 142 - 5 se incluye la relación entre las humedades de moldeo (numeral 8.2.1) y los pesos unitarios húmedos. Estos últimos se obtienen multiplicando cada densidad húmeda (numeral 8.2.2) por las constantes K_1 o K_2 , dependiendo del sistema de unidades que se esté utilizando.

6.1.1 Si se removió más de 5 % de la muestra de ensayo a causa de la existencia de sobretamaños (fracción gruesa), los valores de humedad óptima y peso unitario seco máximo se deberán corregir de acuerdo con la norma INV E-143.

6.1.2 Al dibujar la curva de compactación, las escalas se deben escoger de manera que su sensibilidad permanezca constante; es decir, que el cambio en humedad de moldeo o en peso unitario seco por división sea constante entre dibujos. Típicamente, el cambio de peso unitario seco por división es el doble que el de humedad de moldeo (2 lbf/pie³ por 1 % de agua, por cada división mayor). De esta manera, cualquier cambio en la forma de la curva de compactación es el resultado del ensayo de un material diferente y no de la escala escogida para el dibujo. Sin embargo, se debe usar una escala 1:1 cuando la curva de compactación es relativamente plana (Ver numeral 7.2.1), tal el caso de los suelos muy plásticos o muy permeables.

8.3.3.1 En su rama húmeda (humedad de moldeo mayor que la humedad óptima), la curva de compactación sigue la forma de la curva de saturación (Ver numeral 8.4).

6.2 *Curva de saturación* – Se dibuja la curva de saturación (0 % de vacíos con aire), a partir de la gravedad específica medida (normas INV E-128, INV E-222 o INV E-223; o todas ellas de ser necesario) o estimada. Los puntos para dibujar esta curva se obtienen eligiendo valores del peso unitario seco y calculando la respectiva humedad de saturación, con la expresión:

$$w_{sat} = \frac{\gamma_w (G_s) - \gamma_d}{\gamma_d} \times 100 \quad [142.8]$$

Donde: γ_w : Peso unitario del agua a 20° C (9.789 kN/m³ o 62.32 lbf/pie³);

γ_d : Peso unitario seco del suelo con tres dígitos significativos, kN/m³ o lbf/pie³;

G_s : Gravedad específica del suelo, aproximada a 0.01

Nota 6: La curva de saturación ayuda al dibujo de la curva de compactación. Para suelos que contienen más de 10% de finos y que se moldean con una humedad por encima de la óptima, la curva de compactación es más o menos paralela a la de saturación entre el 92 y el 95 % de saturación. Teóricamente, la curva de compactación no puede cortar la de saturación. Si lo hace, existe un error en la gravedad específica, en las medidas, en los cálculos, en el dibujo o en el ensayo mismo.

6 INFORME

6.1 El informe debe incluir:

- 6.1.1 El método empleado para la compactación (A, B o C).
- 6.1.2 El método de preparación de la muestra (vía seca o vía húmeda).
- 6.1.3 El valor de la gravedad específica, aproximado a 0.01.
- 6.1.4 El dibujo de las curvas de compactación y de saturación.
- 6.1.5 La humedad óptima, como porcentaje, aproximada a 0.1 %.
- 6.1.6 El peso unitario seco máximo, con aproximación a 0.01 kN/m³ o 0.1 lbf/pie³.
- 6.1.7 Los porcentajes de la fracción gruesa (P_{FG}) y de la fracción de ensayo (P_{FE}), con aproximación a 1%.
- 6.1.8 El tipo de martillo utilizado para la compactación.

7 PRECISIÓN Y SESGO

- 7.1 *Precisión* – Los criterios para juzgar la aceptabilidad de los resultados obtenidos con estos métodos de ensayo sobre los tres tipos de suelos, se presentan en las Tabla 142 - 3.

Tabla 142 - 3. Estimaciones de precisión

CONDICIONES EL ENSAYO Y PROPIEDAD MEDIDA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR (1s)	RANGO ACEPTABLE ENTRE DOS RESULTADOS (d2s)
Precisión de un solo operario: Peso unitario máximo (lbf/pie ³) Humedad óptima (%)	0.6 0.4	1.8 1.0
Precisión entre laboratorios: Peso unitario máximo (lbf/pie ³) Humedad óptima (%)	1.6 0.7	4.4 2.1

- 6.1 *Sesgo* – No hay valores de referencia aceptados para este método de ensayo y, por lo tanto, no se puede determinar el sesgo.

7 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 1557 – 09

ANEXO A (Aplicación obligatoria)

DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DEL MOLDE DE COMPACTACIÓN

A.1 *Objeto:*

- A.1.1** Este anexo describe el procedimiento para determinar el volumen del molde compactación.
- A.1.2** El volumen se puede determinar de dos maneras: llenándolo con agua o mediante un método de medida lineal
- A.1.3** El método que emplea el agua para el molde de 101.6 mm (4”), cuando se usa una balanza que da lecturas con aproximación a 1g, no suministra cuatro dígitos significativos para su volumen, sino solamente tres. Esto limita las determinaciones de densidad y peso unitario a solo tres dígitos significativos. Para prevenir esta limitación, se

ha ajustado el método de llenado con agua, respecto del presentado en versiones anteriores de la norma.

A.1 *Equipo:*

A.1.1 Además del mencionado en la Sección 6 de esta norma, se requieren los siguientes elementos:

A.1.1.1 *Calibrador* – De dial o vernier, cuyo rango de lectura se encuentre al menos entre 0 y 150 mm (0 – 6”) y con posibilidad de lectura de 0.02 mm (0.001”).

A.1.1.2 *Micrómetro para medidas interiores (opcional)* – Con rango de medida de 50 a 300 mm (2 a 12”) y con lectura a 0.02 mm (0.01”) o mejor.

A.1.1.3 *Micrómetro para medidas de profundidad (opcional)* – Con rango de medida de 0 a 150 mm (0 a 6”) y con lectura a 0.02 mm (0.01”) o mejor.

A.1.1.4 *Placas plásticas o de vidrio* – Dos placas cuadradas de unos 200 mm de lado y 6 mm de espesor (8×8×1/4”).

A.1.1.5 *Termómetro* – U otro dispositivo para medir temperaturas a 0.1° C.

A.1.1.6 *Grasa de plomería* – O un sellante similar.

A.1.1.7 *Elementos misceláneos* – Jeringa de bulbo, toalla, etc.

A.2 *Precauciones:*

A.2.1 El procedimiento descrito en este Anexo se debe adelantar en un área aislada de corrientes de aire o de fluctuaciones extremas de temperatura.

A.3 *Procedimiento:*

A.3.1 Método de llenado con agua:

A.3.1.1 Se engrasa levemente el fondo del molde de compactación y se coloca éste sobre una de las placas de plástico o vidrio. Se

engrasa también su borde superior. Se debe tener cuidado para no engrasar la parte interior del molde. Si es necesario el uso de la placa metálica del molde, se coloca el molde engrasado sobre placa y se asegura a ésta con los tornillos de mariposa.

- A.1.11** Se determina la masa del molde engrasado y las dos placas de vidrio o plástico, con aproximación a 1 g y se anota el valor (M_{MP}). Si se está usando la placa metálica de base atornillada al molde, se determina el peso del molde con la base metálica y una de las placas de vidrio o plástico y se determina la masa del conjunto, con aproximación a 1 g.
- A.1.12** Se coloca el molde sobre una de las placas de vidrio o plástico (excepto si el molde tiene la base metálica) sobre un soporte firme y nivelada. A continuación, se llena con agua hasta su borde superior.
- A.1.13** Se desliza la otra placa de vidrio o plástico sobre la superficie del molde, de manera que éste permanezca completamente lleno de agua y no haya burbujas de aire atrapadas. Se añade o remueve agua según sea necesario, empleando la jeringa de bulbo.
- A.1.14** Se seca cualquier resto de agua que haya en el exterior del molde o en las placas.
- A.1.15** Se determina la masa del molde más placas y agua, con aproximación a 1 g, y se anota el valor obtenido ($M_{MP,W}$).
- A.1.16** Se determina la temperatura del agua que está dentro del molde, con aproximación a 0.1° C. A continuación, se determina la densidad del agua a esa temperatura, con ayuda de la tabla incluida en la norma INV E-128.
- A.1.17** Se calcula la masa de agua dentro del molde, sustrayendo el valor M_{MP} del valor $M_{MP,W}$.
- A.1.18** Se calcula y anota el volumen de agua, (con aproximación a 0.1 cm³ si se ha usado el molde de 101.6 mm (4") o con aproximación a 1 cm³ para el molde de 152.4 mm (6")), dividiendo la masa de agua (numeral A.4.1.8) por la densidad

del agua (numeral A.4.1.7). Si se desea obtener el volumen en m^3 , el valor obtenido en cm^3 se debe multiplicar por 10^{-6} .

A.1.1 Método de medida lineal:

A111 Usando el calibrador vernier o el micrómetro para medidas interiores, se mide el diámetro interno del molde (DI) 6 veces en la parte superior y 6 veces en la parte inferior, tomando las medidas de manera equidistante alrededor de la circunferencia. Cada lectura se debe tomar con aproximación a 0.02 mm (0.001"). Se determina el diámetro promedio, con la misma aproximación (d_p). Se verifica que este valor se encuentre dentro de las tolerancias de diámetro y si no se encuentra, se deberá descartar el molde.

A112 Usando el calibrador vernier o el micrómetro para medidas de profundidad (preferible), se mide la altura del molde con la placa de base atornillada a su parte inferior. Se deben realizar tres medidas distribuidas de manera equidistante alrededor de la circunferencia del molde. Cada lectura se debe tomar con aproximación a 0.02 mm (0.001"). Se determina la altura promedio del molde con la misma aproximación (h_p). Se verifica que este valor se encuentre dentro de las tolerancias de altura y si no se encuentra, se deberá descartar el molde.

A113 Se calcula el volumen del molde por el método de medida lineal (V_L), en cm^3 , con cuatro dígitos significativos, con la expresión:

$$V_L = K_3 \frac{\pi \times h_p \times (d_p)^2}{4} \quad [142.9]$$

Donde: K_3 : Constante para convertir a cm^3 las medidas hechas en mm o en pulgadas:

Usar 10^{-6} , si las medidas se tomaron en mm,

Usar 16.387, si las medidas se tomaron en pulgadas;

A1.1.1 Si se desea obtener el volumen en m^3 , el valor obtenido en cm^3 se debe multiplicar por 10^{-6} .

A.5 *Comparación de resultados y volumen normalizado del molde:*

- A5.1** El volumen, calculado por cualquiera de los dos métodos, debe cumplir las tolerancias mencionadas en el numeral 6.1. Para convertir cm^3 a pie^3 , los primeros se deben dividir por 28317 y el valor obtenido se debe aproximar al 0.0001 pie^3 más próximo.
- A5.2** La diferencia entre los volúmenes determinados por los dos métodos no debe ser mayor de 0.5 % del valor nominal del molde.
- A5.3** Si el valor de alguno de los valores calculados resulta sospechoso (o ambos), se deberán repetir las determinaciones.
- A5.4** Si no se logra la concordancia aun después de realizar varios intentos, se puede concluir que el molde está deformado y se debe descartar.
- A5.5** El volumen determinado por el método de llenado con agua o el promedio de los volúmenes hallados por los dos métodos, es el que se debe utilizar para calcular la densidad húmeda. Este valor debe tener cuatro dígitos significativos.

ANEXO O
CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS
INV E 151-13

CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE SUELOS

INV E – 151 – 13

1 OBJETO

1.1 Esta norma describe el procedimiento para determinar la magnitud y la velocidad de consolidación de muestras de suelos mediante una prueba de laboratorio en la cual se permite el drenaje axial de especímenes confinados lateralmente, mientras se someten a incrementos de carga con esfuerzo controlado. Para la ejecución del ensayo se puede seguir uno de los siguientes métodos:

1.1.1 *Método A* – Este método se desarrolla aplicando de manera constante cada incremento de carga durante veinticuatro (24) horas o múltiplos de este tiempo. Las lecturas tiempo-deformación se deben realizar, como mínimo, durante dos incrementos de carga. Este método proporciona solamente la curva de compresión de la muestra y los resultados combinan las deformaciones debidas a consolidación primaria y a consolidación secundaria.

1.1.2 *Método B* – Por este método, las lecturas de tiempo-deformación se hacen para todos los incrementos de carga. Los incrementos de carga se aplican: (a) después de alcanzado el 100 % de la consolidación primaria, o (b) a incrementos constantes de tiempo, como se describe en el método A. Como resultados, se obtienen la curva de compresión con datos explícitos para definir los datos correspondientes a la consolidación secundaria, el coeficiente de consolidación para materiales saturados y la velocidad de la compresión secundaria.

Nota 1: El método para la determinación de la velocidad y magnitud de la consolidación del suelo cuando es sometido a ensayos de carga bajo deformación unitaria controlada se puede consultar en la norma ASTM D4186.

1.2 Generalmente, estos ensayos se efectúan sobre muestras de suelos finos saturadas e inalteradas, naturalmente sedimentados en agua; sin embargo, el procedimiento básico también es aplicable a muestras de suelos compactados y a muestras inalteradas de suelos formados por procesos diferentes, tales como alteración química y meteorización. Las técnicas de evaluación especificadas en estos métodos de ensayo asumen que los poros del suelo están completamente saturados y, por tanto, son aplicables a suelos sedimentados naturalmente en agua. La ejecución de estos ensayos puede

requerir técnicas especiales de evaluación, cuando se trata de suelos no saturados tales como los suelos residuales (por meteorización y alteración química) y los compactados. En particular, la interpretación de las curvas de tiempo para encontrar la velocidad de consolidación, sólo se aplica para suelos saturados.

- 1.1** Es responsabilidad del cliente especificar la magnitud y la secuencia de cada incremento de carga, incluyendo la ubicación del ciclo de rebote, si se requiere; se deben definir, también, en caso de emplear el método A, los incrementos de carga para los cuales se harán las lecturas tiempo- deformación. El nivel de esfuerzo máximo requerido depende del propósito del ensayo y se debe definir con el cliente. En ausencia de instrucciones específicas, se deben aplicar los incrementos y la duración de cargas descritos en la Sección 10.

Nota 2: Las lecturas tiempo-deformación se emplean para determinar el tiempo que tomará la consolidación primaria y para evaluar el coeficiente de consolidación c_v . Puesto que c_v varía con el nivel de esfuerzos y el tipo de carga (en carga o descarga), los intervalos durante los cuales se desean realizar las lecturas tiempo-deformación se deben seleccionar con referencia al proyecto específico en el método A. Alternativamente, el cliente puede solicitar el método B, donde las lecturas tiempo-deformación se toman para todos los incrementos de carga.

- 1.2** Estos métodos de ensayo no se refieren al uso del sistema de contrapresión para saturar la muestra. Existen otros equipos aptos para realizar el ensayo de consolidación con saturación por contrapresión. La saturación por contrapresión no constituye una inconformidad con estos métodos de ensayo.
- 1.3** La precisión y la exactitud con la cual sean empleados los resultados de estos ensayos en procesos de diseño u otros usos, no forman parte del alcance de esta norma.
- 1.4** Esta norma reemplaza la norma INV E-151-07.

2 DEFINICIONES

- 2.1** *Deformación axial* – Cambio en la dimensión axial de la muestra que se puede expresar en términos de longitud, altura del espécimen, deformación unitaria o relación de vacíos.
- 2.2** *Presión o esfuerzo estimado de pre-consolidación* – Valor del esfuerzo de pre-consolidación determinado por la técnica descrita en esta norma, con el fin de ayudar a la ejecución del ensayo en el laboratorio. No se debe considerar que

esta estimación es equivalente a una interpretación profesional de las medidas efectuadas durante el ensayo.

- 1.1** *Carga* – En el contexto de los ensayos de suelos, el acto de aplicar fuerza o deformación a la muestra. En el ensayo de consolidación unidimensional, la carga vertical se aplica usando pesas colocadas sobre un gancho.
- 1.2** *Incremento de carga* – Etapa del ensayo en la cual la muestra está bajo un esfuerzo axial total constante.
- 1.3** *Duración del incremento de carga* – Lapso durante el cual la muestra está bajo un esfuerzo total constante.
- 1.4** *Relación de incremento de carga, RIC* – Aumento o disminución del esfuerzo axial total que se va a aplicar a la muestra en el siguiente paso, dividido por el esfuerzo axial total actual.
 - 1.4.1** *Aclaración* – La relación de incremento de carga refleja el hecho de que el ensayo se desarrolla adicionando gradualmente pesos para aplicar el esfuerzo axial total a la muestra.
- 1.5** *Esfuerzo axial total* – La fuerza que actúa sobre la muestra, dividida por el área de ésta. Una vez se ha completado la consolidación, se considera que el esfuerzo axial efectivo es igual al esfuerzo axial total.
- 1.6** *Incremento de esfuerzo axial total* – El cambio (incremento o disminución) en el esfuerzo axial total aplicado en una etapa.

2 RESUMEN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO

- 2.1** En estas pruebas de laboratorio, se toma una muestra de suelo, se confina lateralmente y se carga en dirección axial con incrementos de esfuerzo total. Cada incremento de carga se mantiene constante hasta cuando el exceso de presión de poros se haya disipado. Esta situación se identifica por medio de la interpretación del comportamiento tiempo-deformación bajo esfuerzo total constante y se basa en la premisa de que el suelo está 100 % saturado. Durante el ensayo se mide el cambio de altura de la muestra y se determina la relación entre el esfuerzo axial efectivo y la relación de vacíos o la deformación unitaria. Cuando se toman las lecturas de tiempo-deformación durante la aplicación de un incremento de carga, se puede calcular la velocidad de consolidación con el coeficiente de consolidación.

1 IMPORTANCIA Y USO

- 1.1 Los datos del ensayo de consolidación se emplean para estimar la magnitud y velocidad de los asentamientos diferenciales y totales de una estructura o de un terraplén. Estos datos son esenciales para diseñar las estructuras civiles y evaluar su comportamiento.
- 1.2 Los resultados obtenidos se ven afectados considerablemente por la alteración de las muestras. Por lo tanto, es muy importante seguir un proceso cuidadoso de selección y preparación de la muestra, con el objeto de minimizar las alteraciones.
- 1.3 Los resultados de los ensayos de consolidación dependen de la magnitud de los incrementos de carga. Tradicionalmente, el esfuerzo axial aplicado en un intervalo es el doble del correspondiente al intervalo anterior, lo que resulta en una relación de incremento de carga de 1.0. En muestras inalteradas, este procedimiento permite estimar el esfuerzo de pre-consolidación usando técnicas de interpretación establecidas. El ensayo se puede usar para modelar situaciones particulares de campo o encontrar parámetros especiales; se puede variar, por ejemplo, el esquema o programa tradicional de incrementos de carga de acuerdo con los requerimientos del proyecto. También, se puede inundar y cargar la muestra de acuerdo con los patrones de carga o de humedad esperados en terreno para evaluar mejor la respuesta del suelo. Las relaciones de incremento de carga menores que la unidad son aconsejables cuando el suelo es altamente sensitivo o su respuesta es altamente dependiente de la velocidad de deformación.
- 1.4 El método para encontrar la presión de pre-consolidación en estas pruebas permite verificar si se tomó un juego de lecturas de tiempo - deformación con posterioridad al esfuerzo de pre-consolidación y si el espécimen fue sometido a un nivel de esfuerzo suficientemente alto. Se pueden emplear técnicas alternativas para estimar el esfuerzo de pre-consolidación previo acuerdo con el laboratorio, pero siempre de conformidad con estos métodos de ensayo.
- 1.5 Los resultados de los ensayos de consolidación dependen de la duración de cada incremento de carga. Tradicionalmente, la duración de la carga es la misma para cada incremento e igual a 24 horas. Para algunos suelos, la velocidad de consolidación es tal, que la consolidación completa (disipación del exceso de presión de poros) requiere más tiempo. El aparato no posee mecanismos para verificar la disipación de la presión de poros. Es necesario emplear una técnica de interpretación que determine indirectamente si la consolidación se ha completado. Esta norma especifica procedimientos para

dos técnicas (Métodos A y B); no obstante, se pueden emplear técnicas diferentes previo acuerdo con el laboratorio y de conformidad con estos métodos de ensayo.

- 1.1** Los aparatos empleados para este ensayo no cuentan con dispositivos para verificar el grado de saturación de la muestra. La mayoría de las muestras inalteradas que se toman bajo el nivel freático están saturadas. Sin embargo, la velocidad de deformación durante el tiempo es muy sensible al grado de saturación y se debe tener precaución con las estimaciones sobre el tiempo de asentamiento en suelos en los que prevalece la condición de saturación parcial. La inundación de la muestra no cambia significativamente su grado de saturación, sino que suministra agua para eliminar presiones de poros negativas asociadas con el muestreo y previene la evaporación durante la prueba. La magnitud del efecto de la saturación parcial sobre los resultados del ensayo puede formar parte de la evaluación del mismo y puede incluir la aplicación de modelos teóricos diferentes de los de la teoría de consolidación convencional. Es posible, por otra parte, realizar el ensayo usando un aparato equipado para saturar el espécimen.
- 1.2** Estos métodos de ensayo usan la teoría convencional de la consolidación basada en la ecuación de consolidación de Terzaghi para calcular el coeficiente de consolidación, c_v . El análisis se basa en los siguientes supuestos:
 - 1.2.1** El suelo está saturado y tiene propiedades homogéneas.
 - 1.2.2** El flujo del agua de los poros se produce en dirección vertical.
 - 1.2.3** La compresibilidad de las partículas de suelo y del agua de poros es despreciable frente a la compresibilidad del esqueleto del suelo.
 - 1.2.4** La relación esfuerzo-deformación es lineal bajo el incremento de carga.
 - 1.2.5** La relación permeabilidad-compresibilidad del suelo es constante bajo el incremento de carga.
 - 1.2.6** Aplica la ley de Darcy para flujo a través de medios porosos.

2 EQUIPO

- 2.1** *Dispositivo de carga* – Un dispositivo adecuado para aplicar cargas axiales o esfuerzos totales a la muestra. El dispositivo debe ser capaz de mantener las

cargas especificadas durante períodos prolongados de tiempo con una precisión de $\pm 0.5\%$ de la carga aplicada y debe permitir la aplicación rápida de un incremento de carga dado sin generar ningún impacto significativo. La aplicación de la carga se debe completar en un tiempo correspondiente a 0.01 veces t_{100} o menos.

Nota 3: Como un ejemplo, para suelos en los cuales la consolidación primaria se completa en 3 minutos, la carga aplicada deberá estar estable en menos de 2 segundos.

1.1 *Consolidómetro* – Un dispositivo para mantener la muestra dentro de un anillo que puede estar fijo a una base o puede ser flotante (sostenido por fricción en la periferia de la muestra), con piedras porosas en cada cara del espécimen. El diámetro interno del anillo debe tener una tolerancia de mínimo 0.1 % del mismo. El consolidómetro debe proporcionar, también, un medio para sumergir la muestra en agua, para transmitir la carga concéntrica axial a los discos porosos y para medir la deformación axial del espécimen.

1.1.1 *Diámetro mínimo de la muestra* – El diámetro mínimo de la muestra o el diámetro interno del anillo, debe ser de 50 mm (2.0").

1.1.2 *Altura mínima de la muestra* – Su altura mínima inicial debe ser 12 mm (0.5"), pero no menor que 10 veces el diámetro máximo de partícula del suelo ensayado.

1.1.3 *Relación mínima diámetro–altura* – La relación mínima debe ser 2.5.

Nota 4: Se recomienda el uso de relaciones mayores. Para minimizar los efectos de fricción entre la muestra y el interior del anillo, es conveniente emplear una relación mayor que 4.

1.1.4 *Rigidez del anillo* – El anillo deberá ser suficientemente rígido para prevenir deformaciones laterales significativas durante el ensayo. La rigidez debe ser tal, que bajo condiciones de presión hidrostática en la muestra, el cambio de su diámetro no exceda 0.04 % bajo la mayor carga que se aplique.

Nota 5: Por ejemplo, un anillo metálico de 3.2 mm (1/8") de espesor es adecuado para esfuerzos hasta de 6000 kPa (900 lbf/plg²), para muestras de 63.5 mm (2.5") de diámetro.

1.1.5 *Material del anillo* – El anillo se debe elaborar con un material que no sea corrosivo en relación con el suelo o el fluido de poros. La superficie interior deberá ser altamente pulida o se deberá recubrir con un material de baja fricción, como grasa de silicona o bisulfuro de molibdeno. Para suelos no arenosos se puede usar politetrafluoroetileno.

- 1.1 Discos porosos** – Los discos porosos (piedras porosas) podrán ser de carburo de silicio, de óxido de aluminio o de otro material de rigidez similar, que no se corra ante el suelo o los fluidos de poros. Los discos deben ser lo suficientemente finos para evitar la penetración del suelo dentro de sus poros pero no el flujo del agua proveniente de la muestra. Aun cuando no se cuenta con un criterio exacto, el factor de impedancia generado por el espesor del disco y su conductividad hidráulica (permeabilidad) debe ser de al menos 100.

Nota 6: El factor de impedancia se define como el cociente entre el producto de la conductividad hidráulica del disco por el espesor de drenaje del suelo y el producto de la conductividad hidráulica del suelo por el espesor de la piedra.

- 1.1.1 Diámetro** – El diámetro del disco superior debe ser de 0.2 a 0.5 mm (0.01 a 0.02") menor que el diámetro interior del anillo. Cuando se emplea un anillo flotante, el disco del fondo deberá tener el mismo diámetro que el de la parte superior.

Nota 7: El uso de discos tronco-cónicos o ahusados es recomendable para evitar la adhesión del disco a la pared del anillo. El diámetro mayor debe quedar en contacto con el suelo o la pantalla filtrante.

- 1.1.2 Espesor** – El espesor del disco debe ser suficiente para evitar su rotura. El disco superior se carga a través de una platina resistente a la corrosión, suficientemente rígida para evitar la rotura de éste.

- 1.1.3 Mantenimiento** – Se recomienda limpiar los discos porosos después de cada uso. Los discos nuevos se deben hervir durante un mínimo de 10 minutos y dejar en agua hasta que se enfríen a temperatura ambiente antes de ser empleados. Inmediatamente después de cada uso, los discos se limpian con un cepillo no abrasivo y se hierven o se someten a ultrasonido para remover las partículas más finas que pueden reducir su permeabilidad.

Nota 8: Se recomienda almacenar los discos porosos en un recipiente con agua de ensayo limpia entre uno y otro ensayo (ver numeral 5.12). Cada ciclo de secado atrae partículas que pueden causar la reducción de la conductividad hidráulica. Cuando se efectúan ensayos que requieren discos secos durante el procedimiento de montaje, ellos se pueden secar con papel absorbente justo antes de la prueba.

Pantalla filtrante – Se coloca entre el disco poroso y el espécimen, con el objeto de evitar la intrusión de suelo dentro de aquél. Su presencia se debe tener en cuenta cuando se calcula el factor de impedancia. Puede ser de nylon-monofilamento o un papel de filtro grado 54, endurecido, de bajo contenido de ceniza.

Nota 9: Los filtros deben tener aproximadamente la misma sección transversal que la muestra. Cuando se sigue el proceso de montaje húmedo, se debe sumergir el papel de filtro, si se usa, en un recipiente con agua para permitir que se equilibre antes del ensayo.

- 1.1** *Cizalla o cortador cilíndrico* – Una plataforma giratoria de corte o un anillo cilíndrico empleado para tallar la muestra hasta conseguir el diámetro interior del anillo del consolidómetro, con una alteración mínima. Un dispositivo de corte que tenga el mismo diámetro interno (o 0.05 mm mayor) que el anillo para la muestra, se deberá instalar o ser integral con el anillo. El elemento de corte debe tener un borde afilado, una superficie altamente pulida y estar recubierto con un material de baja fricción. También, se puede usar un torno de corte. La herramienta de corte debe estar apropiadamente alineada para entregar una probeta del mismo diámetro del anillo.
- 1.2** *Deformímetro* – Para medir el cambio de espesor de la muestra con una resolución de 0.0025 mm (0.0001") o mayor.
- 1.3** *Placa espaciadora (disco espaciador)* – Una placa, usualmente acrílica, con una superficie circular plana y sobresaliente, que se encaja dentro del anillo y se usa para deprimir la superficie de la muestra dentro de éste unos 2 mm (0.08"). Cuando se use un anillo flotante, esta depresión debe ser el doble, razón por la cual se emplea una placa que genere mayor espacio. Estas placas no se necesitan cuando el consolidómetro cuenta con un mecanismo para centrar los discos porosos.
- 1.4** *Balanza* – Empleada para determinar la masa de la muestra más el anillo, etc., con al menos cuatro dígitos significativos.
- 1.5** *Horno* – Termostáticamente controlado, de ventilación forzada, que pueda mantener una temperatura a de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).
- 1.6** *Recipientes para determinar la humedad* – De acuerdo con la norma INV E- 122.
- 1.7** *Ambiente* – A menos que el cliente especifique otra, la temperatura para el ensayo debe estar en el rango de $22 \pm 5^\circ \text{C}$. Adicionalmente, la temperatura del consolidómetro, la muestra y el depósito de inmersión no debe variar en más de $\pm 2^\circ \text{C}$ durante el ensayo. Para tal efecto, el ensayo se desarrolla normalmente en un cuarto con una temperatura relativamente constante. Si un cuarto de estas características no está disponible, el aparato se debe colocar en una cámara aislada u otro dispositivo que mantenga la temperatura dentro de la tolerancia citada anteriormente. El aparato no debe quedar expuesto directamente a los rayos del sol.

- 1.1** *Agua para el ensayo* – Se necesita agua para saturar los discos porosos y para llenar el depósito de inmersión. Idealmente, el agua debe tener una composición similar a la del fluido de los poros del suelo. Se puede extraer directamente agua de los poros del suelo en el terreno o emplear agua potable, agua desmineralizada o agua salina. El cliente debe especificar el tipo de agua que prefiere. De lo contrario, se usa agua potable del grifo.
- 1.2** *Equipo misceláneo* – Incluye espátulas, navajas y sierras de alambre para preparar la probeta.

2 TOMA DE MUESTRAS

- 2.1** *Recolección* – Las normas INV E–105 e INV E–109 describen los procedimientos y equipos que se usan para obtener muestras inalteradas para ensayo. Las muestras se pueden recortar de muestras inalteradas en bloque tomadas en campo (norma INV E-104). Las probetas remodeladas se pueden preparar a partir de muestras masivas, con condiciones de humedad y densidad estipuladas por el cliente.
- 2.2** *Transporte* – Las muestras inalteradas se deben conservar, manipular y transportar de acuerdo con las normas dadas para grupos C y D en la norma INV E–103. Las muestras en bloque (masivas) están cubiertas por el grupo B.
- 2.3** *Almacenamiento* – Las muestras selladas se deben almacenar de tal manera que no haya pérdida de humedad, es decir, que no haya evidencias de secamiento parcial en los bordes de las muestras o de agrietamiento. El tiempo de almacenamiento debe ser mínimo, sobre todo cuando el suelo o sus fluidos puedan reaccionar con el tubo que los contiene.
- 2.4** *Alteración* – La calidad del ensayo de consolidación disminuye enormemente con la alteración de la muestra. Ningún procedimiento garantiza la obtención de muestras absolutamente inalteradas. De ahí la importancia de seleccionar adecuadamente las muestras para ensayo.

Nota 10: El examen para verificar la alteración de las muestras se facilita enormemente con radiografías de rayos X (Ver norma ASTM D 4452)

1 CALIBRACIÓN

- 1.1 Aparatos de deformación** – Las deformaciones verticales medidas se deben corregir por el efecto de la compresibilidad del aparato, siempre que la deformación del equipo exceda el 0.1 % de la altura inicial de la muestra o cuando se usen discos de papel de filtro. Si se garantiza la corrección en cualquier punto durante el ensayo, entonces es necesario aplicar una corrección a todas las mediciones durante el ensayo, empleando los datos de calibración.
- 1.1.1** Para su calibración, el consolidómetro se arma tomando en lugar de la muestra un disco de cobre, de aluminio o de acero templado, de aproximadamente la misma altura que una probeta de ensayo y con un diámetro entre 1 mm (0.04") y 5 mm menor que el diámetro del anillo. Se humedecen los discos porosos. Si se van a usar discos de papel de filtro (ver numeral 5.3), se deben humedecer y se debe dejar el suficiente tiempo (mínimo 2 minutos) para permitir que pierdan el contenido de humedad durante cada incremento del proceso de calibración.
- 1.1.2** Se carga y descarga el consolidómetro como si se tratara del ensayo y se mide la deformación para cada carga aplicada. Cuando se usan pantallas de papel de filtro es necesario que la calibración se desarrolle siguiendo exactamente el programa de carga y descarga que se va a usar durante el ensayo real, debido al comportamiento inelástico de este material. La calibración se debe hacer anualmente o después de cualquier ajuste a los componentes del equipo.
- 1.1.3** Para cada aplicación de carga, se dibujan o tabulan las deformaciones del aparato (correcciones) que serán aplicadas a las deformaciones leídas durante el ensayo con muestra. El disco metálico también se deformará; sin embargo, esta deformación es despreciable siempre y cuando los niveles de esfuerzo no sean extremadamente grandes, caso en el cual también debe ser tomada en cuenta para añadirla a las correcciones.
- 1.1.4** Cuando se usan filtros de nylon, es posible representar las correcciones con una ecuación matemática.
- 1.2 Elementos de carga misceláneos** – Se debe determinar la masa conjunta (con una precisión de 0.001 kg) del disco poroso superior más el de cualquier otro

dispositivo que descansa sobre la muestra y no sea contrarrestado por el bastidor, M_a .

1.1 *Constantes del equipo* – Se deben medir los siguientes parámetros anualmente o después de cualquier ajuste del equipo:

1.1.1 Altura del anillo, H_r , y diámetro del anillo, D_r , con precisión de 0.01 mm (0.0005"); masa del anillo, M_r , con precisión de 0.01 g.

1.1.2 Espesor de la pantalla de filtro, H_{fs} , con precisión de 0.01 mm (0.0005").

1.1.3 Espesor del resalto de la placa espaciadora, H_{rs} , con precisión de 0.01 mm (0.0005").

2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

2.1 Se deben reducir las posibilidades de alteración del suelo tanto como sea posible: cambios de humedad, de densidad, etc., así como evitar vibración, distorsión y compresión.

2.2 Las muestras de ensayo se deben preparar en un lugar donde se minimicen los cambios de humedad.

Nota 11: Para este propósito, se recomienda el uso de ambientes con alta humedad.

2.3 Se recorta la muestra (tallar o labrar) y se inserta en el anillo de consolidación. El suelo debe quedar ajustado dentro del anillo, sin vacíos en su perímetro. Cuando las muestras inalteradas provienen de tubos muestreadores, el diámetro interno del tubo debe ser, como mínimo, 5 mm (0.25") mayor que el diámetro interno del anillo de consolidación, excepto en los casos citados en los numerales 8.4 y 8.5. Se pueden usar plataformas giratorias cortantes o anillos cilíndricos cortantes para tallar la muestra de suelo hasta el diámetro adecuado. Cuando se use una plataforma giratoria se debe hacer un corte perimetral completo para reducir el diámetro de la muestra al diámetro interior del anillo de consolidación. Se inserta cuidadosamente la probeta dentro de éste, sin ejercer fuerza, hasta que sobresalga por la base del anillo. Cuando se use un anillo cortante cilíndrico, se debe recortar el suelo hasta una conicidad suave que se encuentra delante del borde de corte. En seguida, se avanza el cortador una distancia pequeña hasta alcanzar el diámetro final. Se repite el proceso hasta que la muestra sobresalga del anillo.

- 1.1 En suelos fibrosos como la turba y en aquellos que se dañan fácilmente al ser recortados, la muestra se puede transferir directamente desde el tubo que la contiene hasta el anillo, siempre que el diámetro de este último sea el mismo o ligeramente menor.
- 1.2 Las muestras que se obtienen empleando un tomamuestras revestido de anillos, se pueden usar directamente sin recorte previo, cuando han sido extraídas de acuerdo con la norma INV E-109 y cumplen con los requerimientos de rigidez del punto 5.2.4.
- 1.3 Se recorta la muestra a ras con los extremos planos del anillo. En suelos blandos o de consistencia media, se usa una sierra de alambre para minimizar el desmoronamiento. Se puede usar una regla con borde cortante afilado para hacer el labrado final, una vez removido el suelo excedente con la sierra de alambre. En suelos duros, el recorte de las partes superior e inferior se puede hacer solamente con la regla. Si se encuentra alguna partícula pequeña en la superficie que se está cortando, se debe retirar y rellenar el vacío con suelo de los recortes.

Nota 12: Si se encuentran partículas grandes en el material cuando se está recortando, o en la muestra después del ensayo, se debe anotar en el informe esta observación visual o los resultados del ensayo de granulometría de acuerdo con la norma INV E-123 (excepto que el requisito sobre tamaño mínimo de la muestra debe ser ignorado).

- 1.3.1 A menos que el consolidómetro cuente con un medio para centrar los discos porosos, la muestra debe ser deprimida levemente bajo la parte superior del anillo, y también en el fondo cuando se usa anillo flotante. Esto facilita la ubicación de las piedras porosas en el centro. Después de recortar su extremo superior a ras con el anillo, se cubre la muestra con el filtro y se usa el disco espaciador para extrudir parcialmente la muestra desde el fondo del anillo. Se recorta la superficie inferior de la muestra a ras con el anillo. Cuando se emplea anillo flotante, se cubre la superficie con el segundo filtro y se usa el disco espaciador de menor dimensión para empujar la probeta de regreso al anillo.

Nota 13: Si en cualquier etapa del ensayo, la muestra se expande más allá de su altura inicial, el requerimiento sobre restricción lateral del suelo impone el uso de un espécimen deprimido o de un anillo equipado con un collar de extensión del mismo diámetro interior del anillo. En ningún momento se debe permitir que la muestra sobresalga del anillo o del collar de extensión.

Se determina la masa húmeda inicial de la muestra, M_{T0} , con precisión de 0.01 g, midiendo primero la masa del conjunto muestra-anillo y restando la masa del anillo, M_r .

- 1.1 Se determina la altura inicial de la muestra (H_0) con una precisión de 0.01 mm (0.001"), usando una de las siguientes técnicas:
 - 1.1.1 Se toma el promedio de, al menos, cuatro alturas medidas en diferentes puntos mediante el uso de un calibrador. Descontar el espesor del filtro si es del caso.
 - 1.1.2 Se calcula la altura como el espesor del anillo, H_r , menos el espesor de la placa espaciadora, H_{rs} , menos el espesor del filtro, H_{fs} .
- 1.2 Se calcula el volumen inicial de la muestra, V_0 , con una precisión de 0.01 cm³ (0.01 plg³), a partir del diámetro del anillo y de la altura inicial de la muestra.
- 1.3 Si se dispone de suficiente material, se recomienda obtener al menos dos contenidos de humedad natural de acuerdo con el método INV E-122, a partir del material que quedó como residuo del corte o labrado de la muestra.
- 1.4 El material sobrante producto del labrado se puede guardar en un recipiente sellado y se puede emplear para determinar las propiedades índice del suelo, como se describe en la Sección 9.

2 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÍNDICE DEL SUELO

- 2.1 La determinación de estas propiedades no forma parte de los requerimientos de este ensayo. Cuando se requieren, los ensayos pertinentes se deben hacer sobre el material más representativo posible. En materiales uniformes, todas las pruebas índice se pueden efectuar sobre los residuos de corte adyacentes, recogidos como se indica en el numeral 8.11. Cuando el suelo es heterogéneo o el material es escaso, las pruebas índice se pueden realizar sobre el suelo del espécimen de ensayo, obtenido como se indica en el numeral 10.6, más los residuos representativos recogidos según se describe en el numeral 8.11.
- 2.2 *Gravedad específica* – Se debe determinar de acuerdo con la norma INV E-128 sobre material de la muestra indicada en el numeral 9.1. Para efectos de cálculo (sección 11.2.4) se permite usar la gravedad específica determinada sobre otra muestra de suelo que se juzgue similar a la ensayada, siempre que no se requiera una relación de vacíos exacta.
- 2.3 *Límites de Atterberg* – El límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad se determinan de acuerdo con las normas INV E-125 e INV E-126, usando material de la muestra como se especifica en el numeral 9.1. Estos

datos permiten clasificar el suelo, pero no son un prerrequisito para la realización de este ensayo.

- 1.1 *Granulometría* – La determinación de la distribución de los tamaños de las partículas se realiza aplicando la norma INV E-123 (excepto que se debe obviar el requisito sobre el tamaño mínimo de la muestra), sobre una porción de la muestra ensayada (numeral 10.6). Un análisis del tamaño de las partículas resulta útil cuando la inspección visual indica que el suelo contiene una fracción sustancial de material granular grueso. Sin embargo, este ensayo tampoco es prerrequisito para el de consolidación.

2 PROCEDIMIENTO

- 2.1 La preparación de los discos porosos y de otros elementos, depende del tipo de material que se va a ensayar. El consolidómetro se debe ensamblar de manera que se evite un cambio en el contenido de humedad o la expansión de la muestra. Se deben usar discos porosos secos y filtros para ensayar suelos secos altamente expansivos, así como para la generalidad de los suelos. Para ensayar suelos parcialmente saturados, se recomienda usar los discos humedecidos. Los discos saturados se usan solamente cuando el espécimen está saturado y presenta una baja afinidad por el agua. Los discos se preparan usando el agua de ensayo. Se ensamblan en el consolidómetro el anillo con la muestra, los discos porosos y los filtros (cuando son necesarios). Si no se va a inundar la probeta después de la aplicación de la carga de asentamiento (Ver numeral 10.2), el consolidómetro se debe encerrar en una membrana de caucho o plástica suelta, para prevenir el cambio de volumen debido a la evaporación.

Nota 14: Para realizar un ensayo exitoso, no se debe permitir que la muestra se expanda en exceso de su altura inicial antes de que haya sido cargada más allá de su esfuerzo de pre-consolidación. En la norma ASTM D 4546 se presentan procedimientos para la determinación del potencial de expansión o asentamiento unidimensional de suelos cohesivos.

- 2.2 Se coloca el consolidómetro en el aparato de carga y se aplica una carga de asiento que genere un esfuerzo axial total de alrededor de 5 kPa (100 lbf/pie²). Inmediatamente después de la aplicación de esta carga, se ajusta el deformímetro y se registra la deformación inicial, d_0 . De ser necesario, se incrementa la carga de asiento para evitar la expansión. Por el contrario, si 5 kPa son suficientes para generar una consolidación significativa de la muestra, se deberá disminuir la carga de asiento para producir un esfuerzo axial total de 3 kPa (50 lbf/pie²) o menos. Si resulta necesario, se debe esperar a que la temperatura del consolidómetro se encuentre en el rango permitido, $\pm 2^\circ\text{C}$.

- 1.1** Si el ensayo se efectúa sobre una muestra inalterada que fue saturada bajo condiciones de campo u obtenida bajo el nivel freático, se debe inundar con agua inmediatamente después de la aplicación de la carga de asiento e incrementar la carga rápidamente para evitar su expansión. Se registran la carga aplicada que se necesita para evitar el hinchamiento y la lectura de deformación resultante. Si la inundación de la muestra se hace para simular condiciones especiales, ésta se debe hacer con un esfuerzo axial total suficientemente alto para prevenir la expansión. En tales casos, se aplica la carga requerida y se inunda el espécimen. Se toman lecturas de deformación durante el período de inundación, de acuerdo con el procedimiento descrito en el numeral 10.5. En tales casos, se anota el esfuerzo total axial con inundación y la deformación axial resultante.

Nota 15: El propósito de la inundación de la muestra es el de eliminar la interfaz aire-agua en la periferia del suelo, la cual puede causar presiones de poros negativas. La inundación no genera incremento del grado de saturación de la muestra y no se debe usar para decir que la muestra está completamente saturada.

- 1.2** La muestra se somete a incrementos de esfuerzo axial total constante. La duración de cada incremento estará de acuerdo con las guías del numeral 10.5. El programa de carga depende del objetivo del ensayo, pero debe cumplir las siguientes pautas:

1.2.1 El programa estándar debe incluir una relación de incremento de carga (RIC) de 1.0, lo que logra duplicando el esfuerzo axial total aplicado sobre el suelo, para obtener valores alrededor de 12, 25, 50, 100, 200, etc., kPa (250, 500, 1000, 2000, etc. lbf/pie²).

1.2.2 Cuando se requieran determinar la pendiente y la forma de la curva de compresión virgen o el valor del esfuerzo de pre-consolidación, el esfuerzo axial máximo total debe ser lo suficientemente alto para brindar, ya sea: (a) tres puntos que definan una línea recta cuando se dibujen los esfuerzos en una escala logarítmica (b) tres puntos que definan una curva cóncava cuando se dibujen los esfuerzos en una escala logarítmica, o (c) un nivel de esfuerzos que sea 8 veces el esfuerzo estimado de pre-consolidación. En caso de ser otros los objetivos del ensayo, el esfuerzo axial total máximo se fija de común acuerdo con el cliente.

El programa de descarga o rebote se debe elegir de manera que se divida aproximadamente por dos el esfuerzo anterior aplicado a la muestra (usar el mismo nivel de esfuerzos del numeral 10.4.1, pero en orden inverso). Sin embargo, también se pueden aplicar cargas que

representen una cuarta parte de la anterior, omitiendo otros niveles de esfuerzo.

1.1.1 Cuando se trata de arcillas sobreconsolidadas, se puede obtener una mejor evaluación de los parámetros de recompresión aplicando un ciclo de carga–descarga una vez se ha sobrepasado el esfuerzo de pre-consolidación. El cliente puede definir la magnitud del ciclo de carga y descarga como una especificación del ensayo, teniendo en cuenta que para la descarga se necesitan, al menos, dos decrementos de esfuerzo.

1.1.2 Se puede emplear un programa alternativo de carga, descarga o recarga, que reproduzca cambios de esfuerzo o permita una mejor definición de alguna parte de la curva esfuerzo deformación unitaria axial (curva de compresión), o ayude en la interpretación del comportamiento del suelo in-situ o, sencillamente, sea especificada por el cliente.

Nota 16: Se recomienda emplear pequeños incrementos sobre suelos altamente compresibles, así como para la determinación del esfuerzo de pre-consolidación con mayor precisión. No obstante, se debe tener en cuenta que el empleo de relaciones de incremento de carga menores que 0.7 e incrementos de carga muy cerca al esfuerzo de pre-consolidación pueden impedir la evaluación del coeficiente de consolidación, c_v , y el final de la consolidación primaria, como se explica en la Sección 11.

1.2 Antes de aplicar cada incremento de carga, se registra la altura o el cambio de la misma en la muestra, d_f . Existen dos procedimientos que especifican la secuencia en tiempo de las lecturas durante el incremento de carga y la duración mínima de éste. Frecuentemente, se requieren aplicaciones de carga más prolongadas durante determinados incrementos, con el fin de definir la pendiente de la línea recta característica de la compresión secundaria, a partir de la gráfica de deformación unitaria axial versus logaritmo del tiempo. Para tales incrementos, se deben tomar suficientes lecturas próximas a la finalización cada incremento. No es necesario aumentar la duración de otros incrementos de carga durante el ensayo.

1.2.1 *Método A* – El tiempo estándar de aplicación de cada incremento de carga es de 24 horas. Durante al menos dos incrementos de carga, incluyendo al menos uno después de exceder el esfuerzo de pre-consolidación, se debe anotar la deformación axial, d , a intervalos de tiempo de aproximadamente 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y 1, 2, 4, 8 y 24 horas (o 0.09, 0.25, 0.49, 1, 4, 9 minutos, etc., si se usa el procedimiento del numeral 11.5.2 para presentar la información de tiempo versus deformación), una vez se ha aplicado la carga. Se toman suficientes lecturas cuando el final de la duración del incremento está

cercano, para verificar que se ha terminado la consolidación primaria. En algunos suelos (ver numerales 11.5.1.1 y 11.5.2.3) es necesario emplear un período de carga mayor que 24 horas para completar la consolidación primaria. Para estos casos, la duración del incremento se toma como algún múltiplo de 24 horas y debe ser tomada como la duración estándar para todos los incrementos del ensayo. La decisión para usar un tiempo mayor se basa en la experiencia con determinados tipos de suelo. Si existe alguna duda sobre si 24 h es un período adecuado, se debe realizar un registro de deformación axial contra tiempo para los incrementos de carga iniciales, con fin de verificar la idoneidad del período de 24 h. Para incrementos de carga en los cuales no se necesite tomar datos de tiempo versus deformación, de todas maneras se deja la carga el mismo tiempo que cuando sí se necesita tomarlos.

- 1.1.1 Método B** – Para cada incremento, se anota la deformación axial, d , a intervalos de tiempo de aproximadamente 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15 y 30 minutos y 1, 2, 4, 8 y 24 horas (o 0.09, 0.25, 0.49, 1, 4, 9 minutos, etc., si se usa el procedimiento del numeral 11.5.2 para presentar la información de tiempo versus deformación), a partir del momento de aplicación de cada incremento de carga. La duración de cada incremento debe ser superior al tiempo requerido para completar la consolidación primaria, tal como se establece en los numerales 11.5.1.1, 11.5.2.3, o a criterio del cliente. Para cualquier incremento de carga en el cual sea imposible verificar el fin de la consolidación primaria (debido por ejemplo a baja relación de incremento de carga, alta sobreconsolidación durante los incrementos de recompresión o consolidación rápida), la duración del incremento de carga debe ser constante y debe exceder el tiempo requerido para conseguir la consolidación primaria de un incremento aplicado después del esfuerzo de pre-consolidación y a lo largo de la curva de compresión virgen. Cuando se necesite evaluar la compresión secundaria, se aumenta la duración del incremento de carga tanto como para definir su velocidad.

Nota 17: Los intervalos de tiempo sugeridos para registrar la deformación axial, corresponden a suelos e incrementos de carga típicos. Muchas veces es necesario cambiar la frecuencia de las lecturas para mejorar la interpretación de los datos. Una consolidación más rápida requiere un mayor número de lecturas. Para la mayoría de los suelos, la consolidación primaria durante los primeros decrementos de carga se completará en menor tiempo (típicamente un décimo) que el requerido para un incremento de carga a lo largo de la curva de compresión virgen. Sin embargo, a muy bajos esfuerzos el tiempo de rebote puede ser mayor.

- 1.1 Para minimizar el hinchamiento durante el desmonte, se lleva la muestra nuevamente hasta la carga de asiento (alrededor de 5 kPa de esfuerzo total axial). Cuando el cambio en la deformación axial se ha reducido a menos de 0.2 % por hora (usualmente durante la noche), se registra la deformación axial final del ensayo, d_{et} , se libera la carga final de asiento y se remueve rápidamente el consolidómetro del marco de carga. Se remueven del consolidómetro la muestra y el anillo y se seca cualquier agua presente en ellos.
- 1.2 Se mide la altura del espécimen, H_{et} , con una aproximación de 0.01 mm (0.001") tomando el promedio de al menos 4 medidas hechas con comparador de dial u otro aparato apropiado en diferentes puntos uniformemente espaciados en las superficies superior e inferior.
- 1.3 Se determina la masa total de la probeta, M_T , con aproximación de 0.01 g, midiendo primero el conjunto anillo-muestra y restando después la masa del anillo.
- 1.4 La manera más precisa de determinar la masa seca del espécimen y el contenido de agua es secando la muestra total al final del ensayo, de acuerdo con el procedimiento de la norma INV E-122. Si la muestra es homogénea y se dispone de material adicional suficiente producto del recorte o labrado de la muestra para realizar las pruebas de propiedades índice, entonces el contenido final de agua, w_f , y la masa de los sólidos, M_d , se determinan usando el espécimen completo. Si el suelo es heterogéneo o no sobra suficiente material para determinar dichas propiedades, entonces se toma una pequeña cuña de la muestra para determinar el contenido final de agua, w_f , y el resto se emplea para determinar las propiedades índice.

2 CÁLCULOS

- 2.1 Los cálculos mostrados emplean el sistema internacional de medidas. Se pueden emplear otras unidades si se utilizan los factores adecuados de conversión y se mantiene la consistencia a través de todos los cálculos.
 - 2.1.1 En cada ecuación se emplea la unidad más conveniente para cada variable (por ejemplo, porcentaje o decimal, segundos o minutos, kilogramos o gramos).
 - 2.1.2 Cuando se trabaja en diferentes unidades, es necesario calcular valores comparables para alcanzar el mismo número de dígitos significativos.

11.2 Propiedades físicas de la muestra:

11.2.1 Se obtiene la masa seca de la muestra con la expresión:

$$M_d = \frac{M_{T_f}}{1 + w_{fp}} \quad [151.1]$$

Donde: M_d : Masa seca del espécimen total, g (aproximada a 0.01);

M_{T_f} : Masa total del espécimen después del ensayo, g (aproximada a 0.01);

w_{fp} : Contenido de agua de la cuña de espécimen tomada después del ensayo, en forma decimal (aproximación de 0.0001).

11.2.2 Se calculan los contenidos de agua (humedad) inicial y final del espécimen, en porcentaje, como sigue:

$$\text{Humedad inicial: } w_0 = \frac{M_{T_0} - M_d}{M_d} \times 100 \quad [151.2]$$

$$\text{Humedad final: } w_f = \frac{M_{T_f} - M_d}{M_d} \times 100 \quad [151.3]$$

Donde: w_0 : Humedad o contenido inicial de agua, % (aproximación de 0.01);

w_f : Humedad o contenido inicial de agua, % (aproximación de 0.01);

M_d : Masa seca del espécimen, g;

M_{T_0} : Masa total del espécimen antes del ensayo, g.

11.2.3 Se calcula la densidad seca inicial del espécimen:

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_0} \quad [151.4]$$

Donde: ρ_d : Densidad seca del espécimen, g/cm³ (aproximada a 0.001);

V_0 : Volumen inicial del espécimen, cm³ (aproximación 0.01).

11.2.1 Se calcula el volumen de sólidos:

$$V_s = \frac{M_d}{G\rho_w} \quad [151.5]$$

Donde: V_s : Volumen de sólidos, cm³ (aproximado a 0.01);

G: Gravedad específica de sólidos (aproximada a 0.001);

ρ_w : Densidad del agua de poros (aproximada a 0.0001), g/cm³.

Nota 18: La densidad del agua depende de la concentración de sal y de la temperatura. Los valores apropiados se deben extraer de tablas estándar.

11.2.2 Debido a que la sección transversal de la muestra es constante a través del ensayo, es conveniente introducir el término "altura equivalente de sólidos", definido así:

$$H_s = \frac{V_s}{A} \quad [151.6]$$

Donde: H_s : Altura de sólidos, cm (aproximada a 0.001);

A: Área del espécimen, cm².

11.2.3 Se calculan la relación de vacíos inicial y la relación de vacíos final, como sigue:

$$\text{Relación de vacíos inicial: } e_0 = \frac{H_0 - H_s}{H_s} \quad [151.7]$$

$$\text{Relación de vacíos final: } e_f = \frac{H_f - H_s}{H_s} \quad [151.8]$$

Donde: e_0 : Relación de vacíos inicial (aproximada a 0.01);

e_f : Relación de vacíos final (aproximada a 0.01);

H_0 : Altura inicial del espécimen, cm;

H_f : Altura final del espécimen, cm.

11.2.1 Se calculan el grado inicial y el grado final de saturación, en porcentaje, así:

$$\text{Grado de saturación inicial: } S_0 = \frac{M_{T_n} - M_d}{A n_w (H_0 - H_s)} \times 100 \quad [151.9]$$

$$\text{Grado de saturación final: } S_f = \frac{M_{T_f} - M_d}{A n_w (H_f - H_s)} \times 100 \quad [151.10]$$

Donde: S_0 : Grado inicial de saturación, % (aproximación 0.1);

S_f : Grado final de saturación, % (aproximación 0.1).

11.3 Cálculo de deformaciones:

11.3.1 Para cada lectura de deformación, se calcula el cambio de altura del espécimen, en cm, como sigue:

$$\Delta H = d - d_0 - d_a \quad [151.11]$$

Donde: ΔH : Cambio en la altura del espécimen, cm (aproximado a 0.00025);

d: Lectura de deformación a varios tiempos en el ensayo, cm (aproximada a 0.00025);

d₀: Lectura de deformación inicial, cm (aproximada a 0.00025);

da: Corrección por la deformación del aparato, cm (aproximada a 0.00025).

Nota 19: Remitirse a 7.1 para la corrección por compresibilidad del aparato.

11.2.1 Se representa cada medida de deformación en, al menos, una de las siguientes maneras:

11.2.1.1 El cambio de altura del espécimen, calculado de acuerdo con 11.3.1.

11.2.1.2 Se calcula la altura del espécimen, en cm, así:

$$H = H_0 - \Delta H \quad [151.12]$$

11.2.1.3 Se calcula la relación de vacíos como sigue:

$$e = \frac{H - H_s}{H_s} \quad [151.13]$$

11.2.1.4 Se calcula la deformación unitaria axial, en porcentaje, así:

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100 \quad [151.14]$$

11.2.1.5 Se calcula el diferencial final de altura con la expresión:

$$H_d = H_f - H_{et} \quad [151.15]$$

Donde: H_d: Diferencial final de altura, cm (aproximada a 0.001);

H_f: Altura final calculada usando d_{et}, cm (aproximada a 0.001);

H_{et}: Altura final medida, cm (aproximada a 0.001).

11.4 Se calcula el esfuerzo axial total, kPa:

$$\sigma_a = \frac{P + M_a g}{A} \times 10 \quad [151.16]$$

Donde: σ_a : Esfuerzo axial total, kPa (aproximado a la unidad);

P: Fuerza aplicada, N (aproximada a la unidad);

M_a: Masa del aparato que descansa sobre el espécimen, kg (aproximada a 0.01);

A: Área del espécimen, cm² (aproximada a 0.01);

g: Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

11.5 *Propiedades tiempo-deformación* – A partir de aquellos incrementos de carga en los cuales se hizo lectura de tiempo-deformación, se generan dos alternativas (Ver numerales 11.5.1 y 11.5.2) para presentar los datos, determinar el final de la consolidación primaria y calcular la velocidad de consolidación. Se pueden usar otras técnicas de común acuerdo con el cliente y con estos métodos de ensayo. Las lecturas de deformación se pueden presentar como deformación medida, altura del espécimen, o deformación unitaria axial (Ver numeral 11.6). El siguiente texto y las siguientes figuras se presentan en términos de la deformación unitaria axial. Las letras en negrilla y entre paréntesis están asociadas a las gráficas.

11.5.1 *Procedimiento 1 de interpretación* – Se dibuja la deformación unitaria axial, ϵ , contra el logaritmo del tiempo, usualmente en minutos, para cada incremento de carga aplicado (ver Figura 151 - 1).

11.5.1.1 Se traza una línea recta a través de los puntos que representan las últimas lecturas de tiempo y cuya tendencia es de línea recta y pendiente constante (**C**). Se dibuja una segunda línea recta, tangente a la parte más inclinada de la

curva logaritmo del tiempo versus deformación unitaria axial (**D**). La intersección de estas dos líneas representa la deformación unitaria axial (**E**), ϵ_{100} , y el tiempo (**F**), t_{100} , correspondientes al 100 % de la consolidación primaria. El exceso de compresión por encima del 100 % de la consolidación primaria se conoce como compresión secundaria.

11.4.1.1 Se encuentra la deformación unitaria axial que representa 0 % de la consolidación primaria (**K**), seleccionando cualesquier dos puntos que tengan una relación de tiempos de 1 a 4 (**puntos G y H en este ejemplo**). El incremento de deformación unitaria axial para el mayor de los tiempos estará entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$ del total del incremento de deformación unitaria axial total para el incremento de carga en cuestión. La deformación unitaria axial correspondiente a 0 % de consolidación primaria es igual a la deformación unitaria axial correspondiente al tiempo menor, menos la diferencia en deformación unitaria axial (**I=J**) entre los dos puntos seleccionados.

11.4.1.2 La deformación unitaria axial (**L**), ϵ_{50} , correspondiente al 50 % de la consolidación primaria, es igual al promedio de las deformaciones axiales unitarias correspondientes al 0 y al 100 %. El tiempo (**M**), t_{50} , requerido para el 50 % de la consolidación, se puede hallar gráficamente a partir de la curva logaritmo del tiempo - deformación, observando el tiempo al cual corresponde el 50 % de la consolidación primaria sobre ella.

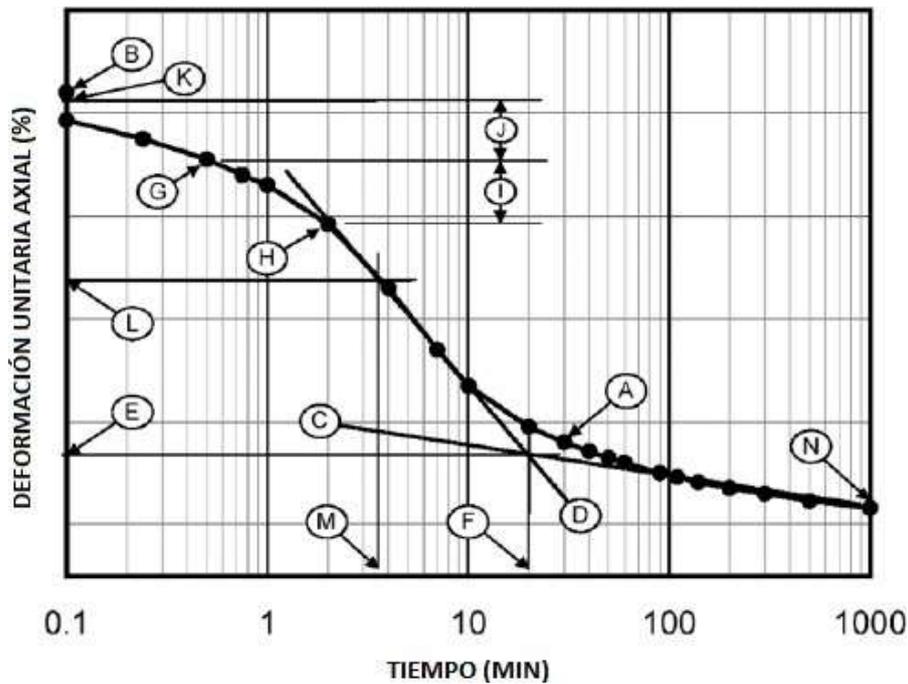
11.4.2 Procedimiento 2 de interpretación – Se dibuja la curva deformación unitaria axial, ϵ , contra la raíz cuadrada del tiempo, típicamente en minutos, para cada intervalo aplicable de carga (Ver Figura 151 - 2).

11.4.2.1 Se dibuja una línea recta a través de los puntos que representan las lecturas iniciales de tiempo y que exhiben una tendencia de línea recta (**A**). Se extrapola la línea hacia $t = 0$ y se obtiene la deformación unitaria axial que representa el 0 % de la consolidación primaria (**B**).

11.4.2.2 Se traza una segunda línea recta a través de la ordenada 0 %, de tal manera que la abscisa correspondiente (**C**) sea 1.15

veces la abscisa de la primera línea recta para todos los datos; es decir, se construye una línea recta que parta de (B) y que tenga una pendiente de 1.15 veces la pendiente de la línea A. La intersección de esta segunda línea con la curva (Ver numeral 11.5.2) define la deformación unitaria axial, ϵ_{90} , (D), y el tiempo t_{90} , (E), correspondientes al 90 % de la consolidación primaria.

11.4.1.1 La deformación unitaria axial al 100 % de la consolidación (F) es $1/9$ mayor que la diferencia en deformación unitaria axial entre 0 y 90 % de consolidación. El tiempo de consolidación primaria (G), t_{100} , se puede tomar en la intersección de la curva deformación unitaria axial-raíz cuadrada del tiempo y esta ordenada de deformación axial. La deformación unitaria axial (H), ϵ_{50} , correspondiente al 50 % de consolidación, es igual a la deformación unitaria axial a los $5/9$ de la diferencia entre 0 y 90 % de consolidación. El tiempo para el 50% de consolidación (I), t_{50} , corresponde a la intersección de curva deformación unitaria axial-raíz cuadrada del tiempo con la ordenada de deformación 50 %.



- A - CURVA ESFUERZO -DEFORMACIÓN UNITARIA TRAZADA SOBRE LOS PUNTOS DEL ENSAYO
- B - DEFORMACIÓN A TIEMPO = 0 MINUTOS
- C - AJUSTE LINEAL DE LA PORCIÓN FINAL DE LA CURVA
- D - AJUSTE LINEAL DE LA PORCIÓN MÁS INCLINADA DE LA CURVA
- E - LECTURA DE DEFORMACIÓN UNITARIA EN LA INTERSECCIÓN DE LAS LÍNEAS C Y D, CORRESPONDIENTE AL 100 % DE CONSOLIDACIÓN
- F - LECTURA DE TIEMPO EN LA INTERSECCIÓN DE LAS LÍNEAS C Y D, CORRESPONDIENTE AL 100 % DE CONSOLIDACIÓN
- G - PRIMER PUNTO SELECCIONADO PARA LA INTERPRETACIÓN DEL 0 % DE LA CONSOLIDACIÓN
- H - SEGUNDO PUNTO PARA LA INTERPRETACIÓN, CORRESPONDIENTE A UN TIEMPO CUATRO VECES MÁS QUE EL DEL PUNTO G
- I - INCREMENTO DE LA DEFORMACIÓN UNITARIA ENTRE LOS PUNTOS H Y G
- J - INCREMENTO DE DEFORMACIÓN UNITARIA IGUAL A I
- K - DEFORMACIÓN DEDUCIDA PARA EL COMIENZO DE LA CONSOLIDACIÓN
- L - DEFORMACIÓN AL 50 % DE LA CONSOLIDACIÓN, IGUAL A LA MEDIA ENTRE K Y E
- M - TIEMPO CORRESPONDIENTE AL 50 % DE LA CONSOLIDACIÓN
- N - DEFORMACIÓN UNITARIA Y TIEMPO PARA LA ÚLTIMA LECTURA DEL INCREMENTO

Nota: Esquema sin escala

Figura 151 - 1. Curva tiempo-deformación usando el método del logaritmo del tiempo

11.4.1 Se calcula el coeficiente de consolidación para cada incremento de carga, usando la siguiente ecuación y los valores apropiados de acuerdo con el método de interpretación escogido:

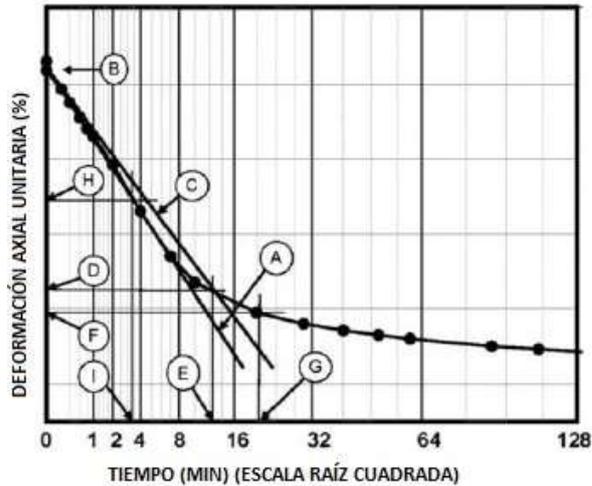
$$c_v = \frac{T H_{D50}^2}{t} \quad [151.17]$$

Donde: c_v : Coeficiente de consolidación, cm^2/s (3 dígitos significativos);

T: Un factor adimensional de tiempo: para el procedimiento descrito en el numeral 11.5.1, se usa 50 % de consolidación, con $T = T_{50} = 0.197$; para el procedimiento descrito en el numeral 11.5.2, se usa 90 % de consolidación con $T = T_{90} = 0.848$;

t: Tiempo correspondiente al grado específico de consolidación, s; para el procedimiento descrito en el numeral 11.5.1, se usa $t = t_{50}$; para el procedimiento descrito en el numeral 11.5.2 se usa $t = t_{90}$;

H_{D50} : Longitud de la trayectoria de drenaje al 50 % de consolidación, cm; para drenaje por las dos caras, H_{D50} es la mitad de la altura del espécimen al incremento apropiado; para drenaje por una sola cara, H_{D50} es la altura completa.



- A – AJUSTE LINEAL DE LOS PRIMEROS DATOS TOMADOS
- B - EXTENSIÓN DE LA LÍNEA "A" AL TIEMPO = 0 MINUTOS
- C - LÍNEA CONSTRUIDA CON UNA PENDIENTE DE 1.15 VECES LA DE LA LÍNEA A
- D - DEFORMACIÓN LEÍDA EN LA INTERSECCIÓN DE LA LÍNEA C CON LA CURVA TRAZADA SOBRE LOS DATOS
- E - TIEMPO LEÍDO EN LA INTERSECCIÓN DE LA LÍNEA C CON LA CURVA TRAZADA SOBRE LOS DATOS
- F - DEFORMACIÓN CORRESPONDIENTE AL 100 % DE CONSOLIDACIÓN
- G - TIEMPO CORRESPONDIENTE AL 100 % DE CONSOLIDACIÓN
- H - DEFORMACIÓN UNITARIA CORRESPONDIENTE AL 50% DE CONSOLIDACIÓN
- I - TIEMPO CORRESPONDIENTE AL 50 % DE CONSOLIDACIÓN

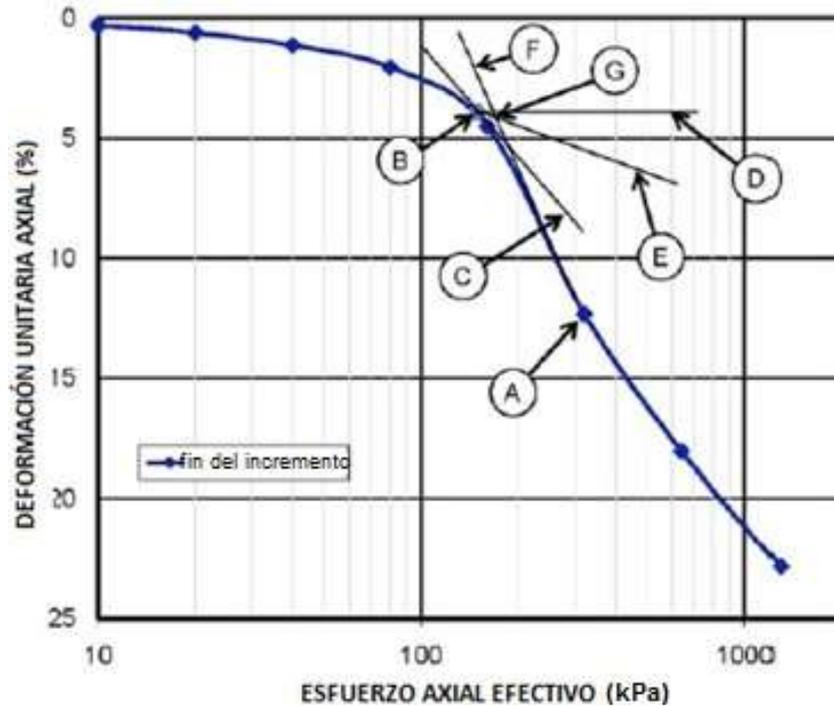
Nota: Esquema sin escala

Figura 151 - 2. Curva tiempo–deformación usando el método de la raíz cuadrada del tiempo

11.4 Propiedades carga–deformación:

- 11.4.1 Se tabulan las lecturas de deformación o de cambio de deformación, d_f , correspondientes al final de cada incremento y, si está usando el método de ensayo B, los correspondientes al final de la consolidación primaria, d_{100} .
- 11.4.2 Se dibujan los resultados de deformación correspondientes al final de cada incremento (en la Figura 151 - 3 están en términos de deformación unitaria axial) y, si está usando el método B, los correspondientes al final de la consolidación primaria versus el esfuerzo en escala logarítmica.

Nota 20: En algunos casos, es preferible presentar la curva carga-deformación en escala aritmética.



- A - DEFORMACIÓN TRAZADA SOBRE LOS PUNTOS TOMADOS
- B - PUNTO DE MÁXIMA CURVATURA
- C - LÍNEA TANGENTE A LA CURVA EN EL PUNTO B
- D - LÍNEA HORIZONTAL A TRAVÉS DEL PUNTO B
- E - LÍNEA BISECTRIZ DEL ÁNGULO FORMADO POR C Y D
- F - LÍNEA TANGENTE A LA PORCIÓN MÁS INCLINADA DE LA CURVA
- G - ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN, LEÍDO EN LA INTERSECCIÓN DE LAS LÍNEAS E Y F

Figura 151 - 3. Evaluación del esfuerzo de pre-consolidación por el método de Casagrande

11.4.1 Con referencia a la Figura 151 - 3, se determina el valor del esfuerzo de pre-consolidación usando el procedimiento que se describe a continuación:

Nota 21: Se puede emplear otro método reconocido para estimar el esfuerzo de pre-consolidación, pero identificándolo claramente en el informe.

11.4.1.1 Se traza una curva suave a través de los puntos.

11.4.1.2 Se estima el punto de máxima curvatura sobre la curva de compresión (**B**).

11.4.1.3 Se dibuja la tangente a la curva de compresión en este punto (**C**), y se traza una línea horizontal (**D**) partiendo también del

punto **(B)**. Se prolongan las líneas **C** y **D** hacia la derecha (en el sentido creciente de las abscisas).

11.4.1.1 Se traza una línea **(E)**, que bisecte el ángulo formado entre las dos líneas **C** y **D**.

11.4.1.2 Se dibuja una línea recta tangente a la porción lineal más inclinada de la curva de compresión (brazo de compresión virgen) **(F)**, y se prolonga hacia arriba hasta que se corte con la línea bisectriz **(E)**. El punto de corte se llamará **(G)**. La abscisa correspondiente a este punto de intersección será el esfuerzo estimado de pre-consolidación.

11.4.2 La evaluación completa incluye, a menudo, la consideración de información que no está al alcance del laboratorio que realiza el ensayo de consolidación. Por esta razón, cualquier evaluación adicional que se presente solo tiene carácter informativo.

12 INFORME

12.1 Debe incluir, cuando menos, la siguiente información:

12.1.1 Nombre del proyecto, localización, número de la perforación, número de la muestra y profundidad.

12.1.2 Número del ensayo, datos de inicio, aparatos y técnico encargado del ensayo.

12.1.3 Descripción y clasificación del suelo de acuerdo con las normas INV E-102 e INV E-181, cuando se dispone de los límites de Atterberg. Se deben incluir, si están disponibles, los resultados de los ensayos de gravedad específica, límites de Atterberg y distribución granulométrica de la muestra, así como la fuente de esta información si es otra diferente de la obtenida sobre el espécimen de ensayo. Se debe anotar, también, el tamaño de las partículas aisladas de gran tamaño halladas en el espécimen.

12.1.4 *Condición del suelo:*

12.1.4.1 Contenido de humedad promedio de los recortes producto del tallado de la muestra, si está disponible.

12.1.1.1 Contenidos de humedad inicial y final del espécimen.

12.1.1.2 Densidad seca inicial del espécimen.

12.1.1.3 Relaciones de vacíos inicial y final del espécimen.

12.1.1.4 Grados de saturación inicial y final del espécimen.

12.1.1.5 Diferencia final de altura.

12.1.1.6 Esfuerzo estimado de pre-consolidación.

12.1.2 *Procedimiento de ensayo:*

12.1.2.1 Procedimiento de labrado para la preparación del espécimen; especificar si la probeta fue recortada con una plataforma giratoria, usando una zapata de corte o ensayado directamente en un anillo a partir del anillo del tomamuestras.

12.1.2.2 Condición del ensayo (a humedad natural o inundado, esfuerzo medido en la inundación, agua de ensayo).

12.1.2.3 Método de ensayo (A o B).

12.1.2.4 Procedimiento de interpretación (1 o 2, o ambos) empleado para encontrar el coeficiente de consolidación.

12.1.2.5 Lista de los incrementos de carga y su duración, si fue diferente de 24 horas; resultados de deformación final para cada incremento y, para el método B, resultados de la deformación primaria final y coeficiente de consolidación (Ver Tabla 151 - 1).

12.1.2.6 Todas las desviaciones con respecto al procedimiento establecido, incluyendo las secuencias de carga especiales.

12.1.3 *Representaciones gráficas:*

12.1.3.1 Gráficas de deformación unitaria axial contra el logaritmo del tiempo (Figura 151 - 1) o raíz cuadrada del tiempo (Figura 151

- 2), para aquellos incrementos de carga en los que se tomaron lecturas.

12.1.1.1 Curva de “relación de vacíos versus esfuerzo axial” (en escala logarítmica) o curva de “porcentaje de compresión versus esfuerzo axial” (en escala logarítmica). Ver Figura 151 - 3.

12.1.1.2 En los casos en los cuales se toman lecturas de la tasa de deformación en el tiempo para varios incrementos de carga, se debe preparar una gráfica de logaritmo de coeficiente de consolidación versus la relación de vacíos promedio o el porcentaje promedio de compresión para los respectivos incrementos de carga (Figura 151 - 4). Se puede anexar, de manera alternativa, una gráfica del coeficiente de consolidación o de su logaritmo versus el logaritmo del esfuerzo promedio axial. Si las lecturas de tiempo se obtuvieron solo para dos incrementos, simplemente se tabula el valor de c_v contra el esfuerzo promedio axial para el incremento.

Nota 22: Se escoge el esfuerzo promedio entre dos incrementos de carga, por cuanto representa una coordenada conveniente para dibujar el resultado. A menos que se mida la velocidad de disipación de la presión de poros, no es posible determinar el esfuerzo efectivo real al momento del 50 % de la consolidación. Además, se puede generar ambigüedad en los casos en los cuales el ensayo ha incluido uno o más ciclos intermedios de rebote.

13 PRECISIÓN Y SESGO

13.1 *Precisión* – Debido a la naturaleza de los materiales de suelo empleados para este ensayo, no es factible, o resulta demasiado costoso, producir simultáneamente múltiples especímenes con propiedades físicas uniformes. Cualquier variación que se observe en los datos se puede deber a variación del espécimen o en los procedimientos del operario o del laboratorio.

13.2 *Sesgo* – No hay valores de referencia aceptables para este método de ensayo, de allí que no se puede determinar el sesgo.

14 NORMAS DE REFERENCIA

ASTM D 2435M – 11.

Tabla 151 - 1. Ejemplo de un resumen del ensayo de consolidación

Incremento de carga Asiento	Esfuerzo axial σ_a (kPa)	Deformación corregida ΔH (mm)	Altura de la muestra H (mm)	Deformación unitaria axial $e_{a,so}$ (%)	Relación de vacíos ϕ	Deformación corregida ΔH (mm)	Altura de la muestra H_{so} (mm)	Deformación unitaria axial $e_{a,so}$ (%)	Relación de vacíos ϕ_{so}	Tiempo t_{50} (seg)	Coeficiente de consolidación C_v (mm ² /seg)	Tiempo t_{50} (seg)	Coeficiente de consolidación C_v (mm ² /seg)
1	5	0.0000	19.0500	0.00	1.231	0.0000	19.0500	0.00	1.231				
2	5	0.0288	19.0212	0.15	1.228	0.0288	19.0212	0.15	1.228				
3	20	0.1152	18.9487	0.59	1.215	0.1152	18.9487	0.59	1.215				
4	40	0.2139	18.8261	1.12	1.206	0.2696	18.7504	1.42	1.200	52	3.94E-01	10	3.94E-01
5	80	0.3687	18.6533	2.03	1.186	0.5355	18.5145	2.81	1.169	144	1.17E-01	30	1.17E-01
6	160	0.5560	18.1040	4.49	1.131	1.5439	17.5061	8.10	1.050	516	2.03E-02	102	2.03E-02
7	320	2.2496	16.7004	12.33	0.956	2.8317	16.2163	14.86	0.900	282	4.59E-02	53	4.59E-02
8	640	3.4392	15.6108	18.05	0.828	3.8223	15.2277	20.06	0.784	156	7.32E-02	31	7.32E-02
9	1280	4.2440	14.7060	22.80	0.722								
10	320	4.2553	14.7047	22.34	0.733								
11	80	3.9300	15.1200	20.63	0.771								
12	20	3.5131	15.5269	18.44	0.820								
13	5	3.0981	15.9519	16.26	0.868								

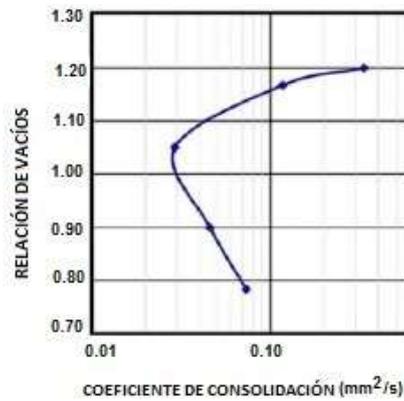
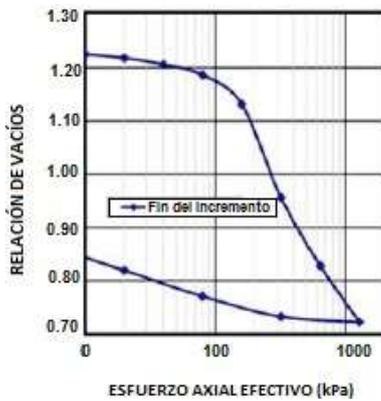


Figura 151 - 4. Ejemplo de gráficas realizadas a partir del ensayo de consolidación