



**INCIDENCIA DEL TIPO DE ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN EN EL CÁLCULO
DE ASENTAMIENTOS EN SUELOS RESIDUALES DE ANFIBOLITA, CASO
VALLE DE SAN NICOLÁS**

Trabajo de pregrado - Exploratorio

SANTIAGO ALBERTO BELTRÁN FRANCO

DIRECTOR

INGENIERO CIVIL MANUEL BUILES BRAND M. EN INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA

INGENIERÍA CIVIL

ENVIGADO

MAYO DE 2015

INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO			
Título del proyecto	Incidencia del tipo de ensayo de consolidación en el cálculo de asentamientos en suelos residuales de anfibolita, caso Valle de San Nicolás.		
Instituciones participantes	Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA)		
Grupo de investigación con el que esté vinculado	NA		
Esfera de actuación a la que corresponde	Geotecnia		
Duración del proyecto (Meses)	8 meses		
Costo Total del proyecto	\$ 11.991.600		
Entidad(es) que financian	Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA)		
Persona responsable del proyecto (director del trabajo de grado)			
Nombre	Manuel Builes Brand		
Empresa / Institución	EIA		
Nivel de formación más alto	Maestría en ingeniería		
Correo electrónico	pfmabuiles@eia.edu.co	Teléfono	3549090 ext. 270

Evaluación del anteproyecto (para ser diligenciado por la EIA)					
Fecha de evaluación (dd/mm/aaaa)					
Resultado					
<input type="checkbox"/>	Aprobado con modificaciones	<input type="checkbox"/>	Pendiente	<input type="checkbox"/>	Rechazado
Observaciones					
FIRMA					

Compromiso del Director de Trabajo de Grado

Yo, Manuel Builes Brand, he revisado y estoy de acuerdo con el anteproyecto Incidencia en el cálculo de asentamientos de los parámetros obtenidos en el ensayo de consolidación con anillo flotante y anillo fijo en suelos residuales que presenta el alumno Santiago Alberto Beltrán Franco.

Estoy dispuesto a ser el director de este trabajo de grado en caso de que sea aprobado por el Consejo Académico.

Acepto las responsabilidades de ser director de trabajo de grado, que son las siguientes:

- a) Realizar la dirección temática y metodológica del trabajo de grado. En cada reunión con los estudiantes deberá diligenciar el formulario de seguimiento diseñado para tal fin, y que está disponible en el FTP institucional.
- b) Brindar asesoría relacionada con el proyecto específico, ayudando a identificar el problema, a preparar la propuesta y a plantear y orientar el desarrollo de la metodología adecuada para cumplir los objetivos del trabajo.
- c) Controlar el desarrollo del cronograma de trabajo.
- d) Informar al Comité de Trabajos de Grado o al director de Programa académico sobre todos los aspectos del proyecto y su desarrollo, cuando este lo considere necesario o se le solicite.
- e) Presentar, al director de Programa, los informes parciales del avance del proyecto e informar oportunamente al director del programa sobre la necesidad de prórroga, la cancelación o reprobación de la asignatura por parte de los estudiantes.
- f) Verificar el cumplimiento de los objetivos aprobados, teniendo la autoridad para recomendar la reprobación del proyecto si a su juicio los estudiantes no cumplen lo propuesto en el anteproyecto.
- g) Enviar al director del programa la evaluación del informe final del trabajo.
- h) Asistir a la sustentación pública y evaluarla.
- i) Participar de las reuniones de seguimiento programadas por la EIA.

Firma del Director de Trabajo de Grado _____

TABLA DE CONTENIDO

1	Preliminares.....	11
	1.1 Planteamiento del problema.....	11
	1.2 Objetivos del proyecto.....	12
	1.2.1 Objetivo general.....	12
	1.2.2 Objetivos específicos.....	12
	1.3 Marco teórico.....	13
	1.3.1 Teoría de formación del suelo.....	13
	1.3.2 Toma de muestras inalteradas de suelo.....	14
	1.3.3 Teoría de consolidación unidimensional de suelos.....	15
	1.3.5 Ensayo de corte directo.....	40
	1.3.6 Capacidad portante del suelo.....	42
	1.3.7 Cálculo de Asentamientos.....	44
	1.3.8 Geología de la zona.....	45
	1.4 Antecedentes.....	48
	1.5 Justificación.....	49
	2. Metodología.....	50
	3. Desarrollo del proyecto.....	52
	3.1 Toma de muestras y ensayos de laboratorio.....	52
	3.2 Estimación de cargas y análisis de un elemento estructural.....	59
	4. Discusión de resultados.....	62
	5. Conclusiones.....	92
6	Bibliografía.....	94
	7. ANEXOS.....	98

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Proceso de formación del suelo. (Wesley, 2010)	14
Ilustración 2: Relaciones de fase del suelo. (Lambe, 1991)	16
Ilustración 3: Modelo Kelvin Voigt. (Fuente propia)	18
Ilustración 4: Capa de suelo sometida a compresión. (Holtz and Kovacs, 1981)..	20
Ilustración 5: Consolidación en cualquier punto y factor tiempo para una capa drenada en dos direcciones. (Holtz and Kovacs, 1981)	25
Ilustración 6: Esquema ensayo de consolidación (Sjursen, 2000)	28
Ilustración 7: Diagrama de fuerzas Ensayo de Anillo fijo y Anillo flotante. (Fuente propia)	29
Ilustración 8: Celdas de consolidación Anillo fijo y Anillo flotante (HUMBOLDT, 2010)	30
Ilustración 9: Elementos que componen los equipos (HUMBOLDT, 2010)	30
Ilustración 10: Equipo de consolidación de anillo fijo y anillo flotante EIA. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la EIA).....	31
Ilustración 11: Curva de consolidación escala aritmética y escala semilogarítmica. (Fuente propia).....	32
Ilustración 12: Tramo recto Curva de Compresibilidad. (Universidad Nacional de Rosario, 2004).....	33
Ilustración 13: Gráfica de esfuerzo deformación unitaria. (Universidad Nacional de Rosario, 2004).....	34
Ilustración 14: Curva de compresibilidad escala logarítmica. (Das, 1997)	34
Ilustración 15: Gráfica de relación entre el porcentaje de consolidación U_z y Tiempo de consolidación T_v . (Das, 1997)	35
Ilustración 16: Curva teórica de consolidación en escala logarítmica. (Universidad Nacional de Rosario, 2004).....	36
Ilustración 17: Paso 1 Método de Casagrande. (Universidad Nacional de Rosario, 2004)	37

Ilustración 18: Paso 2 Método de Casagrande. (Universidad Nacional de Rosario, 2004)	37
Ilustración 19: Paso 3 Método de Casagrande. (Universidad Nacional de Rosario, 2004)	38
Ilustración 20: Método gráfico para determinar tn. (Universidad Nacional de Rosario, 2004).....	38
Ilustración 21: Método grafico para determinar el esfuerzo de pre consolidación. (Universidad Nacional de Rosario, 2004).....	40
Ilustración 22: Caja de Corte Directo. (Foto tomada del laboratorio de suelos de la EIA)	41
Ilustración 23: Ubicación Valle de San Nicolás. (Concesión Aburrá-Oriente S.A, 2013)	46
Ilustración 24: Perfil típico Valle de San Nicolás. (Albeiro de Jesús Rendón Rivera, 2011)	47
Ilustración 25: Perfil del suelo Zona de muestreo 1, Vereda Sajonia, municipio de Rionegro, Antioquia. (Foto tomada en el lugar de muestreo).....	48
Ilustración 26: Diseño experimental (Fuente propia)	51
Ilustración 27: Sitio de muestreo 1, Vereda Sajonia, municipio de Rionegro. (Foto tomada en la vereda Sajonia del municipio de Rionegro	52
Ilustración 28: Toma de muestras en bloque.....	53
Ilustración 29: Sitio 2 de muestreo Parcelación alto de las Palmas.	53
Ilustración 30: Sitio 3 de muestreo Campus EIA Palmas	54
Ilustración 31: Ensayo de consolidación anillo fijo.....	54
Ilustración 32: Ensayo de gravedad específica con picnómetro. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)	55
Ilustración 33: Ensayo de límite plástico. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A).....	56
Ilustración 34: Ensayo de límite líquido, copa de Casagrande. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)	57

Ilustración 35: Muestras en anillo de corte. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)	57
Ilustración 36: Muestra fallada ensayo de corte directo. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)	58
Ilustración 37: Plano de falla muestras ensayo de corte. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)	58
Ilustración 38: Información general muestra 1.....	62
Ilustración 39: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 1	63
Ilustración 40: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 1	63
Ilustración 41: Información general muestra 2.....	64
Ilustración 42: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 2	65
Ilustración 43: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 2	65
Ilustración 44: Información general muestra 3.....	66
Ilustración 45: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 3	67
Ilustración 46: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 3	67
Ilustración 47: Información general muestra 4.....	68
Ilustración 48: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 4	69
Ilustración 49: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 4	69
Ilustración 50: Información general muestra 5.....	70
Ilustración 51: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 5	71

Ilustración 52: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 5	71
Ilustración 53: Información general muestra 6.....	72
Ilustración 54: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 6	73
Ilustración 55: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 6	73
Ilustración 56: Información general muestra 7.....	74
Ilustración 57: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 7	75
Ilustración 58: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 7	75
Ilustración 59: Información general muestra 8.....	76
Ilustración 60: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica muestra 8	77
Ilustración 61: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 8	77
Ilustración 62: Información general muestra 9.....	78
Ilustración 63: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 9	79
Ilustración 64: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 9	79
Ilustración 65: Condiciones para cálculo de asentamientos.....	81
Ilustración 66: Asentamientos elásticos Vereda Sajonia	82
Ilustración 67: Asentamientos elásticos Parcelación Alto de las Palmas	83
Ilustración 68: Asentamientos elásticos Campus EIA de las Palmas	83
Ilustración 69: Asentamientos por consolidación Sitio 1.....	84
Ilustración 70: Asentamientos por consolidación Sitio 2.....	85
Ilustración 71: Asentamientos por consolidación Sitio 3.....	85

Ilustración 72: Cálculo de asentamientos programa de cómputo. (Tomada de Settle 3d).....	86
Ilustración 73: Asentamientos Sitio 1, $E_s = 9106$ kPa	87
Ilustración 74: Asentamientos Sitio 1, $E_s = 2492$ kPa	87
Ilustración 75: Asentamientos Sitio 1, $E_s = 2434$ kPa	88
Ilustración 76: Asentamientos Sitio 2, $E_s = 17384$ kPa	88
Ilustración 77: Asentamientos Sitio 2, $E_s = 1783$ kPa	89
Ilustración 78: Asentamientos Sitio 2, $E_s = 1622$ kPa	89
Ilustración 79: Asentamientos Sitio 3, $E_s = 7466$ kPa	90
Ilustración 80: Asentamientos Sitio 3, $E_s = 3372$ kPa	90
Ilustración 81: Asentamientos Sitio 3, $E_s = 2357$ kPa	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Resultados asentamientos elásticos	49
Tabla 2: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante, muestra 1	63
Tabla 3: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 2.....	64
Tabla 4: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 3.....	66
Tabla 5: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 4.....	68
Tabla 6: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 5.....	70
Tabla 7: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 6.....	72
Tabla 8: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 7.....	74
Tabla 9: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 8.....	76
Tabla 10: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante.....	78
Tabla 11: Valor del módulo de elasticidad (E_s), por sitio y por ensayo	80
Tabla 12: Asentamientos elásticos por teoría y módulo de elasticidad (E_s).....	81
Tabla 13: Asentamientos por consolidación anillo fijo y anillo flotante	84

RESUMEN

Cada que se concibe y diseña una estructura se debe estudiar su respuesta y comportamiento con el material que finalmente será el receptor de todas las cargas, en este caso el suelo, la mayor evidencia de esta interacción pre y post construcción de una obra civil, son los asentamientos que experimentará la estructura una vez sus cargas cambian la estructura interna del suelo. Para analizar los asentamientos que experimentarán una estructura y su evolución en el tiempo, se realizan diversas pruebas de laboratorio con muestras del suelo, una de ellas es el ensayo de consolidación.

El ensayo de consolidación, también conocido como prueba de odómetro, del inglés *odometer test*. Existen dos tipos de ensayo de consolidación, consolidación con anillo fijo y consolidación con anillo flotante.

Este trabajo de grado tuvo como propósito determinar la incidencia del tipo de ensayo en el cálculo de asentamientos, para lo cual se planteó una casa de dos niveles y con un sistema estructural de pórticos apoyados sobre zapatas cuadradas de 1m x 1m, y se escogieron 3 sitios para realizar muestreo y obtener las muestras para realizar los ensayos.

Con los resultados finales se pudo establecer que en un 78% los asentamientos por consolidación calculados con los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación de anillo flotante son mayores que los calculados con los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación de anillo fijo. Y que en un 100% los asentamientos elásticos calculados con los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación de anillo flotante son mayores que los calculados con los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación de anillo fijo.

ABSTRACT

Every time that an structure is conceived and designed, we must study the interaction between the structure and the material that will ultimately be the recipient of all the loads of the structure, in this case the soil. The most evident evidence are the settlements that happened even when the structure is build. The soil structure will experience many changes in its internal structure. To analyze the settlements will experience a structure and its evolution over time, many laboratory tests are conducted with soil samples, one of which is the consolidation test.

The consolidation test, also known as odometer test has two types of consolidation test, consolidation fixed ring and floating ring.

This major work was to determine the incidence of the type of test in calculating settlements, in a simple case with a 2 levels house in cols and beams, supported on square foundation 1m x 1m, and chose three sites for sampling and obtain samples for testing.

With the final results it was established that 78% consolidation settlements calculated with the parameters obtained from consolidation test floating ring are higher than those calculated with the parameters obtained from testing fixed ring consolidation. And 100% elastic calculated settlement assay parameters obtained consolidation floating ring are greater than those obtained with the parameters obtained from testing fixed ring consolidation.

1 Preliminares

1.1 Planteamiento del problema.

Cuando se diseña una estructura y se analiza cómo será su interacción con diversos factores y elementos de la naturaleza una vez construida, se deben tener en cuenta, entre otras, la respuesta del suelo una vez dicha estructura es apoyada sobre este elemento, que será el que recibirá todas las cargas asociadas al peso propio de la estructura y cargas de servicio. Para tal análisis se requiere un estudio pertinente y profundo del suelo en el que se apoyará la estructura ya que el suelo generará una respuesta ante la imposición de cargas externas a las que naturalmente soporta. La mayor evidencia de que hay una interacción entre suelo – estructura son los asentamientos, los asentamientos son producto del aumento en el estado de esfuerzos del suelo, estos esfuerzos generan una reducción gradual en su volumen debido a la expulsión del agua presente en sus vacíos, lo que hace que sus partículas estén más juntas.

La imposición de cargas estáticas comprimen el suelo, esto hace que el suelo se deforme verticalmente y pierda volumen gradualmente, debido a la disminución de los vacíos presentes en él, este fenómeno se denomina consolidación unidimensional de suelos, ya que sólo se genera en el plano vertical del suelo. (Juarez Badillo, 1977)

Esta pérdida de volumen del suelo, se manifiesta con los asentamientos que sufren las estructuras cuando el suelo se consolida, los asentamientos son los desplazamientos verticales respecto a un punto fijo que experimenta una masa de suelo o una estructura en un tiempo determinado, de tal manera que pueden ser medibles y analizados en el tiempo. En la mayoría de los casos, cuando se impone una carga estática al suelo, se genera un estado de compresión, cuando los esfuerzos son positivos, sin embargo pueden existir esfuerzos internos negativos que generan por el contrario expansión del suelo.

Los asentamientos se pueden presentar en el corto, mediano y largo plazo, es decir, dependen de un factor determinante para su cálculo, el tiempo. Una vez se trasmite la carga de parte de la estructura al suelo, comienza la consolidación. Para estudiar los asentamientos y su evolución en el tiempo, se debe hacer un estudio detallado preferiblemente mediante ensayos de laboratorio con muestras del suelo, que permitan conocer en este caso los parámetros de consolidación. Es por esto que el ensayo más acertado para estudiar la compresibilidad del suelo, es sin lugar a dudas el ensayo de consolidación o ensayo de compresión confinada.

El ensayo de consolidación puede realizarse en dos modalidades, uno es el ensayo de consolidación con anillo fijo y el otro es el ensayo de consolidación con anillo flotante. El ensayo de consolidación también se conoce como prueba de odómetro. El ensayo consiste básicamente en simular el estado de esfuerzo natural que experimenta el suelo en su estado y ubicación *in situ*, pero en una pequeña muestra inalterada del mismo y en un laboratorio. En la prueba la muestra es sometida a una serie de incrementos de carga, que se traducen en incrementos en su estado de esfuerzo, según la metodología y la norma empleada estos incrementos pueden variar. Para este trabajo de grado la norma aplicada es la del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) I.N.V.E – 151 – 07. Se emplea esta

norma en el presente trabajo debido a que a nivel nacional, en Colombia una de las entidades que más ha avanzado e investigado en el área de ensayos de suelos, de materiales y en general en cuanto a especificaciones técnicas para la construcción de obras civiles y de infraestructura ha sido el Instituto Nacional de Vías INVIAS.

El ensayo de consolidación permite determinar varios parámetros del suelo como:

av: Coeficiente de compresibilidad.

mv: Coeficiente de compresibilidad volumétrica.

Cc: Índice de compresión.

Cs: Índice de expansión.

Cv: Coeficiente de consolidación.

opc: esfuerzo de pre consolidación.

El presente trabajo pretende determinar la incidencia en los resultados de cálculo de asentamientos que tienen los parámetros obtenidos en uno u otro ensayo, anillo fijo y anillo flotante, en suelos residuales de anfibolita, caso Valle de San Nicolás.

Realizando un número considerable de ensayos en ambos equipos y con diferentes muestras inalteradas de la zona del Valle de San Nicolás en el oriente de la ciudad de Medellín, se pretende determinar la incidencia en el cálculo de asentamientos de una estructura de dos pisos y de uso residencial que tienen los parámetros, obtenidos en los dos tipos de ensayo de consolidación. De esta manera y para una muestra de suelo entonces, se obtendrán 2 valores de todos los parámetros de consolidación, uno obtenido del ensayo de anillo fijo y el otro del de anillo flotante, con estos parámetros se calcularán los asentamientos que tendría una estructura y así poder determinar las posibles variaciones entre un ensayo y otro.

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 Objetivo general

Determinar la incidencia en el cálculo de asentamientos de una estructura convencional que tienen los parámetros obtenidos en el ensayo de consolidación con anillo fijo y ensayo de consolidación con anillo flotante en un suelo residual.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar las diferencias en la obtención, preparación y montaje de la muestra para la ejecución de cada ensayo.
- Comparar los tiempos de ejecución y demás variables que inciden durante la prueba, así como los resultados obtenidos durante el ensayo para una misma muestra de suelo.
- Analizar la incidencia del grado de alteración de las muestras en los resultados del ensayo de consolidación.

- Calcular los asentamientos para varias condiciones de carga y del elemento de cimentación con los parámetros obtenidos en ambas pruebas y compararlos con los asentamientos admisibles de la Norma Colombiana Sismo Resistente.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Teoría de formación del suelo

Suelo es todo material que ha sido formado naturalmente y que no es roca, ésta formación puede presentarse de dos formas; meteorización física y meteorización química. Aquí la palabra meteorización hace referencia a todos los cambios y transformaciones que sufre la roca para convertirse en suelo.

La meteorización es un proceso que ocurre en la corteza terrestre debido a los cambios en la temperatura y en las presiones, estos cambios producen deterioro y daño en el manto de la corteza, lo que da origen a la formación del suelo.

La meteorización física está asociada a procesos de desintegración y de erosión de las partículas, la desintegración se presenta cuando hay cambios de humedad (secado del suelo), congelación y descongelación, mientras que la erosión ocurre por la acción directa de los glaciares, el agua y el viento. Estos procesos producen partículas muy variables y que aún conservan rastro de la roca parental. Están asociados a la meteorización física solo cambios en el tamaño de las partículas del suelo y no la formación de nuevos materiales. (Wesley, 2010).

La meteorización química por el contrario, es un proceso más complejo, ya que internamente se producen cambios en el contenido de minerales de la roca parental, lo que hace más difícil la conservación de rastro alguno de esta. Los principales agentes en la meteorización química son el oxígeno, el dióxido de carbono y las filtraciones de agua, que modifican la composición química de las partículas de suelo mediante enlaces químicos. A diferencia de la meteorización física, la meteorización química está asociada con la formación de nuevos materiales. (Wesley, 2010).

Sin embargo, la clasificación del suelo no se realiza por el tipo de meteorización que se haya dado para su formación, los suelos se clasifican en dos grupos, suelos residuales y suelos sedimentarios.

Esta clasificación se hace de acuerdo al tipo de proceso que sufre el suelo durante su formación. Un suelo residual es aquel que es producto directo de la meteorización de la roca parental y que conserva rastro de sus características. (Wesley, 2010).

Por el contrario, un suelo sedimentario o transportado es un suelo casi sin características o rastro de la roca parental, debido a todos los procesos y transformaciones que sufre,

asociados al desgaste por transporte y deposición de materiales durante su formación. (Wesley, 2010).

Factores como el clima y la topografía son determinantes en la formación del suelo, debido a que el proceso de meteorización ocurre en la corteza terrestre, por ejemplo, zonas montañosas donde la filtración del agua ocurre hacia abajo, es decir el suelo es bien drenado y en las que los productos de la meteorización no son transportados como sedimentos, sino que se acumulan en el sitio es común encontrar suelos residuales, también asociados a condiciones tropicales húmedas y de meteorización química intensa.

En la ilustración 1 se representa el proceso de formación de cada tipo de suelo residual y sedimentario.

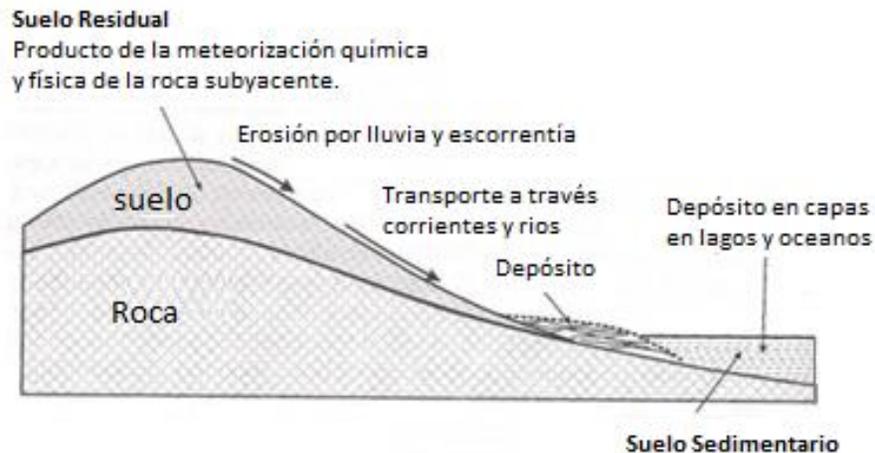


Ilustración 1: Proceso de formación del suelo. (Wesley, 2010)

1.3.2 Toma de muestras inalteradas de suelo

Toda muestra obtenida del suelo tiene cierto grado de alteración una vez es extraída del material que la compone, por tal motivo se denomina a las muestras obtenidas por una u otra metodología como muestras relativamente inalteradas, y su grado de alteración dependerá de la metodología empleada a la hora de rescatar los especímenes de suelo. La metodología tradicional para la toma de muestras relativamente inalteradas de suelo ha sido aquella en la que se emplean tubos metálicos de pared delgada o tubos *shellby*.

Los tubos de pared delgada comúnmente empleados tienen diámetros exteriores entre 2" y 5", dichos tubos deben ser elaborados de un material que tenga una resistencia mecánica adecuada y con características anticorrosivas satisfactorias. Según la norma del INVIAS, I.N.V E – 105 para la obtención de muestras para probetas de ensayo mediante tubos de pared delgada, los tubos deberán tener una longitud entre 5 y 10 veces el

diámetro para la penetración en arenas y entre 5 y 15 veces el diámetro para la penetración en arcillas. Así mismo, una vez obtenidas las muestras para probetas de ensayos de laboratorio se debe tener precaución y seguir a cabalidad todas las recomendaciones en cuanto a la manipulación de la muestra, empaçado, transporte, entre otros, la norma antes mencionada sugiere que los tubos recuperados con las muestras sean sellados en ambos extremos y cubiertos con parafina para evitar la evaporación del agua presente en la masa de suelo, así mismo las muestras deben ser rotuladas con información relevante del sondeo y de la muestra como por ejemplo, localización de la perforación, el diámetro y número de la muestra, la profundidad, la penetración y la longitud recuperada, además deberá hacerse una breve descripción del material en cuanto a su composición, estructura, consistencia, color, y grado de humedad. Los tubos siempre deben permanecer a la sombra y en un lugar fresco, el transporte de las muestras se debe realizar con mucha precaución garantizando que no se vayan a presentar choques, vibraciones y alteraciones. (Instituto Nacional de Vías, INVIAS, 2006).

Igualmente, si las muestras se obtienen en bloques, debido a que se requiere un mayor volumen, se deben seguir y cumplir todas las condiciones antes mencionadas en cuanto al empaque y transporte de las muestras.

1.3.3 Teoría de consolidación unidimensional de suelos

Cuando los materiales son cargados o esforzados, estos se deforman, algunas veces como los materiales elásticos, es decir de forma instantánea, sin embargo otros materiales como la mayoría de los suelos, necesitan un tiempo considerable para que esas deformaciones tengan lugar, especialmente los suelos arcillosos y en menor medida los suelos limosos, es decir, esta respuesta mecánica del suelo ante la imposición de una carga es única de los suelos finos.

Dado que la respuesta del suelo depende del tiempo, se asume que el suelo es un material visco elástico, sin embargo, la teoría aplicada a estos materiales para el cálculo de deformaciones no permite una interpretación acertada del comportamiento y la respuesta mecánica del suelo. Esto debido a que los suelos tienen una propiedad que complica su interpretación, "memoria". (Holtz and Kovacs, 1981).

Cuando una masa de suelo se carga, por ejemplo, por una estructura o por un lleno antrópico, este se deformará, produciendo lo que se conoce como asentamiento, el asentamiento es la deformación vertical total en la superficie. (Holtz and Kovacs, 1981).

Los asentamientos dependen exclusivamente del tiempo, estudiarlos en ingeniería, se resume a predecir su magnitud y que tan rápido van a ocurrir. Los asentamientos pueden ocurrir en meses, años e incluso décadas.

Cuando el suelo es cargado, este se comprime por tres cosas:

- Los granos de suelo se deforman.
- El agua y el aire presente en los vacíos se comprime.

- El agua y el aire son expulsados.

Que tan rápido, dependerá del coeficiente de permeabilidad K del suelo, y que tanto, de la rigidez del esqueleto de suelo asociada directamente a su estructura. (Holtz and Kovacs, 1981).

De esta manera, cuando el suelo se comprime, y esta compresión es controlada por el tiempo y por la velocidad con la que el agua es expulsada de los poros, se llama consolidación.

Para abordar el fenómeno de la consolidación y que es lo que ocurre internamente en el suelo ante un incremento de esfuerzo, se deben tener claras las fases del suelo y las relaciones que se pueden establecer entre ellas. En la ilustración 2, Relaciones de fase del suelo, se puede observar que el suelo está compuesto por tres fases, aire, agua y los sólidos que contiene la masa de suelo.

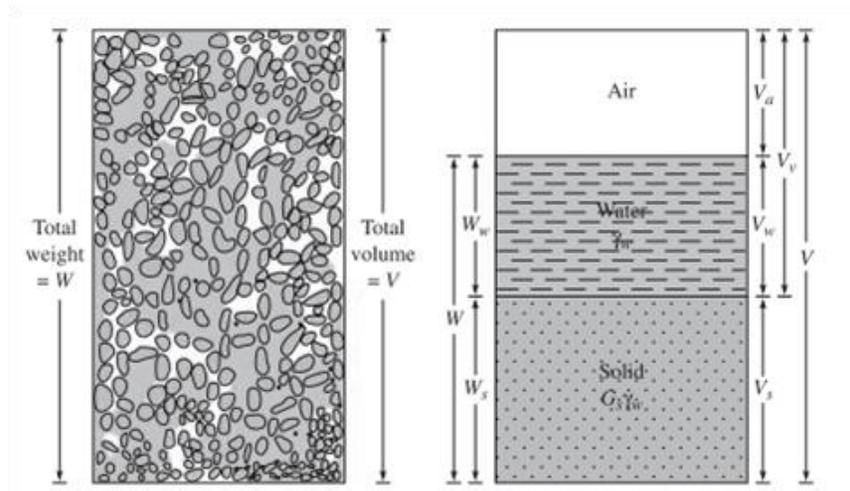


Ilustración 2: Relaciones de fase del suelo. (Lambe, 1991)

De las relaciones volumétricas, la más importante en la consolidación es la relación de vacíos o índice de poros e , definida como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de sólidos.

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

Cuando se somete un suelo cohesivo saturado a un incremento de carga se produce un asentamiento que dependerá del tiempo, cuando el suelo es permeable, como es el caso de los suelos granulares, o se tiene un suelo fino seco (o con bajo grado de saturación), el proceso de deformación por la reducción de los vacíos del suelo, tendrá lugar en un periodo de tiempo tan corto, que se puede considerar instantáneo, en este caso la deformación vertical ocurre de forma inmediata, que al no depender del tiempo no se reconoce como consolidación. (Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, 2009)

Hasta el año de 1925 se interpretaron los asentamientos como la respuesta del suelo ante la imposición de cargas estáticas, pero no se tenía claro su comportamiento, ni que era lo que ocurría internamente entre las partículas del suelo, además tampoco se había desarrollado un modelo para interpretar su respuesta mecánica que permitiera evaluar la magnitud y la velocidad de los asentamientos.

Solo hasta el año de 1925, Karl Terzaghi da origen a la teoría de la consolidación, publicando el resultado de arduas investigaciones producto de la experiencia acumulada y la ciencia aplicada, a las relaciones de los fenómenos y sus causas, que le permitieron interpretar el fenómeno de la consolidación y la compresibilidad del suelo.

Su publicación en el año de 1925 en su libro *Erdbaumechnik*, Terzaghi presentó los resultados de su investigación y análisis exclusivamente en el caso particular de arcillas sometidas a esfuerzos de compresión vertical unidimensional. (Iglesias, 1997)

Terzaghi preparó un ensayo de laboratorio en el que se reproducían las condiciones en campo de un estrato de suelo blando saturado entre estratos no deformables y en el que además se impedía el desplazamiento y las deformaciones laterales de la muestra. (Sowers, 1979)

Ese ensayo permitió el desarrollo del modelo matemático que representa el fenómeno de consolidación. La ecuación de la consolidación, como se le conoce al modelo matemático desarrollado por Karl Terzaghi está basada en tres fundamentos o tres componentes.

- Ecuaciones de equilibrio de una masa de suelo.
- Relaciones esfuerzo deformación del esqueleto mineral.
- Ecuación de continuidad del fluido intersticial.

Para generar una representación gráfica de lo que ocurre durante la consolidación e interpretar mejor los tres principios aplicados, a continuación se presenta un modelo gráfico, representado por resortes, en el cual se aplica una carga externa a un recipiente lleno de agua, el cual tiene una llave que permanece cerrada durante parte de la representación y que luego se abre, de manera que se identifican los tres instantes de la consolidación.

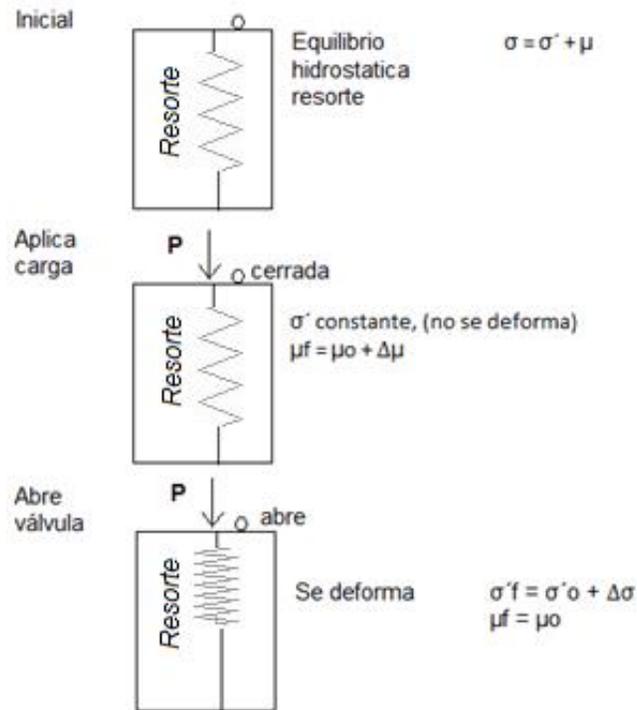


Ilustración 3: Modelo Kelvin Voigt. (Fuente propia)

El anterior modelo desarrollado por Kelvin Voigt, permite interpretar el fenómeno de la consolidación y su formulación planteada por Terzaghi, ya que relaciona en los tres instantes de representación del modelo las ecuaciones de equilibrio de una masa de suelo. Los tres instantes de la representación son; equilibrio hidrostático, en el que el resorte permanece sin deformar puesto que no se ha aplicado la carga ni se ha abierto la llave, aumento en la presión de poros, ocurre cuando se aplica la carga y la llave permanece cerrada, allí toda la carga es soportada por el agua; y la deformación del suelo, en este caso del resorte, ocurre cuando se abre la llave y el agua es expulsada del recipiente, allí la carga comienza a ser soportada por los sólidos del suelo y ya ha ocurrido una disminución en el volumen del suelo.

En este modelo son claras las relaciones que permitieron a Terzaghi desarrollar la teoría de consolidación, esfuerzo-deformación y la ecuación de continuidad del fluido intersticial.

Los esfuerzos dentro de una masa de suelo que permanece en equilibrio, es decir, sin la acción de una carga estática, están asociados únicamente a la profundidad del suelo, su peso propio y a la presión de poros o presión neutra asociada al peso del agua presente en los poros. Sin embargo, cuando se aplica una carga al suelo, se genera lo que se denomina presión efectiva, esta presión es la que produce el cambio en el volumen del suelo, asociada a la disminución en la relación de vacíos e del suelo.

Internamente lo que ocurre en la masa de suelo cuando se aplica una carga, es que la presión neutra o presión de poros, aumenta, debido a que inicialmente estas presiones se transmiten al suelo a través del agua presente en los poros, es decir, primero la carga es soportada por el fluido, en este caso el agua. (Arango, 1983)

Debido a que el agua es un fluido incompresible y que con el paso del tiempo el agua es expulsada de los poros del suelo ya que esta ésta traza líneas de flujo, que hacen que viaje de un lugar a otro, por el cambio y la diferencia de presiones que hacen que el fluido pase de un estado estacionario a un estado de filtración, los granos que forman el esqueleto del suelo establecen entre si mayor contacto y comienzan a tomar gradualmente parte de la carga, aquí, se puede afirmar que el suelo inicia una reducción de volumen igual al volumen desalojado. (Arango, 1983).

Hasta ese punto, en el que se ha producido una reducción de volumen en la masa de suelo igual al volumen desalojado, asociado únicamente a la expulsión de agua de los poros y en la que las cargas pasan de ser soportadas por el agua intersticial a serlo por el esqueleto solido del suelo, es lo que se conoce como consolidación primaria, la cual estudió Terzaghi permitiéndole desarrollar el modelo matemático y lo que se conoce como la Teoría de la Consolidación.

Cabe mencionar que la consolidación se ha clasificado en tres clases, la primera es la consolidación instantánea, en ella lo que ocurre es una reducción inicial del volumen, asociada únicamente a la expulsión del gas o aire que contiene los vacíos del suelo, la segunda es la consolidación primaria, que se mencionó en el párrafo anterior y que es el pie para todo el estudio de la consolidación como fenómeno y base para el cálculo de asentamientos, y la tercera, es la consolidación secundaria, en la cual la reducción de volumen se debe al reajuste interno de las partículas sólidas del suelo. (Marquez, 1982)

Para el desarrollo de la teoría de consolidación de la que se ocupa el presente trabajo de grado, se utilizan conceptos inclusive de mecánica de materiales que han permitido el estudio de algunos materiales de construcción como lo son los conceptos de la teoría elástica. En mecánica de suelos solo emplean con un carácter aproximado los valores y lo que representan el módulo de elasticidad **E_s** y el coeficiente de Poisson **ν** .

La ecuación de continuidad del fluido intersticial como concepto, hace referencia a que el agua presente en los poros traza líneas de flujo, que hacen que el fluido viaje de un lugar a otro por la diferencia de presiones que hace que exista un gradiente hidráulico.

Teoría de consolidación unidireccional de Terzaghi.

El desarrollo de la teoría unidireccional de consolidación necesita asumir varios supuestos:

1. El suelo es homogéneo y 100% saturado.

2. El drenaje ocurre tanto hacia arriba como hacia debajo de la capa que se está comprimiendo.
3. Es aplicable la ley de Darcy.
4. Los granos de suelo y el agua son incompresibles.
5. La compresión y el flujo de agua ocurre solo en dirección vertical.
6. La permeabilidad y el valor de a_v permanecen constantes.
7. El cambio de volumen del suelo corresponde al cambio en la relación de vacíos.

De la ley de Darcy se sabe que el flujo de agua de un lugar a otro depende del gradiente hidráulico y de la permeabilidad del suelo. El gradiente hidráulico es el causante de que el agua fluya está asociado al exceso de presión de poro en el suelo. (Holtz and Kovacs, 1981).

Derivación y solución matemática a la teoría unidimensional de Terzaghi.

Tomando un pequeño elemento de la siguiente ilustración a una profundidad z medida desde la superficie de suelo que se está comprimiendo, de espesor dz y de área $dx dy$, el cambio de volumen en el elemento es la diferencia entre el volumen de agua que entra y que sale.

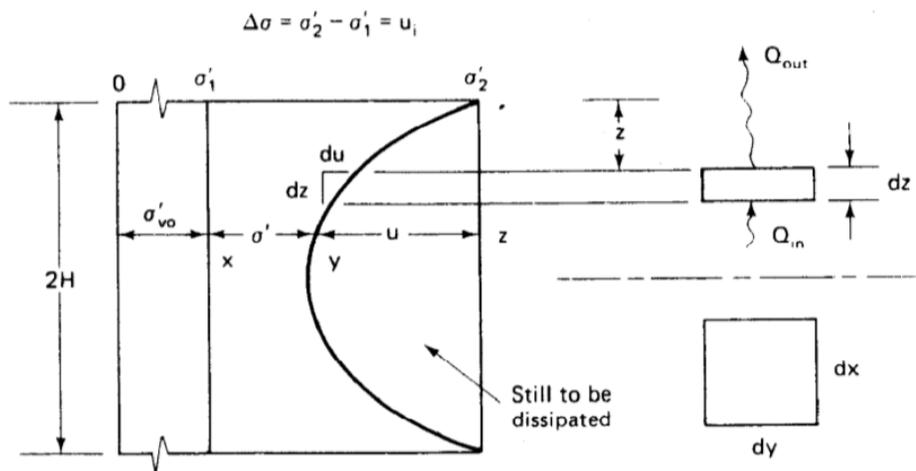


Ilustración 4: Capa de suelo sometida a compresión. (Holtz and Kovacs, 1981)

Dado que la consolidación depende de la expulsión del agua presente en los vacíos del suelo, se desarrolla la siguiente ecuación para el gradiente hidráulico en la parte superior del elemento diferencial, considerando la continuidad de flujo dentro del elemento que se tomó.

$$i_z = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u}{\rho_w g} \right) = \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

El gradiente hidráulico en la parte inferior del elemento diferencial está dado por:

$$i_{z+dz} = \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

De la ley de Darcy se tiene que:

$$dQ = kiadt \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

Así que se puede calcular la cantidad de flujo en determinado tiempo que es expulsada por la parte superior y por la parte inferior del elemento diferencial.

$$dQ_{\text{out}} = k \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial u}{\partial z} dz dx dy dt$$

$$dQ_{\text{in}} = k \frac{1}{\rho_w g} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) dz dx dy dt \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

También se puede determinar el cambio de volumen a partir de las diferentes tasas de flujo.

$$Q_{\text{out}} - Q_{\text{in}}$$

$$\text{volume change} = dQ_{\text{out}} - dQ_{\text{in}} = - \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz dt \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

El cambio de volumen se determina a partir de los resultados obtenidos del ensayo de consolidación, a partir de la curva de consolidación calculando el coeficiente de compresibilidad a_v . Y a partir de la ecuación para los asentamientos.

$$s = \Delta e H_o / (1 + e_o)$$

$$a_v = - \frac{de}{d\sigma'} = \frac{e_1 - e_2}{\sigma'_2 - \sigma'_1}$$

$$s = \Delta dz = \frac{-de}{1 + e_1} dz \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

Donde:

$$de = a_v d\sigma'$$

$$\Delta dz = \frac{a_v d\sigma'}{1 + e_1} dz \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

Ahora, se sabe que la presión de poros se disipa y que el esfuerzo efectivo en el esqueleto de suelo aumenta, entonces se puede escribir que:

$$\Delta\sigma' = -\Delta u$$

Porque cualquier cambio en el esfuerzo efectivo es igual numéricamente al cambio en la presión de poros, así que se obtiene:

$$\Delta dz = -\frac{a_v du}{1 + e_1} dz$$

Donde:

$$du = (\partial u / \partial t) dt$$

Se obtiene entonces:

$$\Delta dz = \frac{-a_v}{1 + e_1} \frac{\partial u}{\partial t} dt dz$$

Igualando ambas ecuaciones de cambio de volumen se tiene:

$$-\frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz dt = -\frac{a_v}{1 + e_1} \frac{\partial u}{\partial t} dt dz \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

En términos del coeficiente de consolidación C_v ,

$$c_v = \frac{k}{\rho_w g} \frac{1 + e_1}{a_v}$$

Finalmente se obtiene:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

La ecuación anterior es la ecuación de la consolidación unidimensional planteada por Terzaghi, en la que C_v es una constante que depende del tiempo y la posición y el otro término corresponde a una ecuación diferencial de segundo orden con coeficientes constantes.

Existen varias soluciones a la ecuación de Terzaghi, por ejemplo, Harr (1966) presentó una solución basada en métodos finitos de aproximación, Taylor (1948) siguiendo a Terzaghi planteó una solución basada en la expansión de la serie de Fourier. (Holtz and Kovacs, 1981).

Solución matemática a la ecuación de Terzaghi.

Las condiciones de borde para el caso de consolidación unidireccional se presentan a continuación:

El suelo es completamente drenado hacia la parte superior e inferior del estrato y el exceso en la presión de poros inicial es igual al incremento de esfuerzo en la superficie.

$$\begin{aligned} \text{when } z = 0 \text{ and when } z = 2H, u &= 0 \\ \text{when } t = 0, u &= u_i = \Delta\sigma = (\sigma'_2 - \sigma'_1) \end{aligned}$$

La solución general a la ecuación de Terzaghi cuando el exceso en la presión de poros depende de la profundidad será:

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{1}{H} \int_{z=0}^{z=2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right) \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(\frac{-c_v t n^2 \pi^2}{4H^2}\right)$$

Como la presión de poros u_i es una constante y varía linealmente con la profundidad, la solución queda:

$$u = (\sigma'_2 - \sigma'_1) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{z}{H}\right) \times \exp - \left[\frac{(2n+1)^2}{4} \pi^2 \underbrace{\frac{k(1+e_1)}{a_v \rho_w g}}_{c_v} \frac{t}{H^2} \right]$$

(Holtz and Kovacs, 1981)

Donde:

σ'_1 : Esfuerzo efectivo inicial

$$\sigma'_2 = \sigma'_1 + \Delta\sigma$$

$$n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

La solución permite obtener el valor de la presión de poros en cualquier instante del tiempo y en un punto de la masa de suelo así:

$$u = (\sigma'_2 - \sigma'_1) \sum_{n=0}^{\infty} f_1(Z) f_2(T)$$

Retomando el valor de T:

$$T = c_v \frac{t}{H_{dr}^2} = \frac{k(1 + e_o)}{a_o \rho_w g} \frac{t}{H_{dr}^2}$$

Y de U_z :

$$U_z = \frac{\text{volume change at depth } z \text{ and time } t}{\text{ultimate volume change at depth } z} \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

El cambio de volumen se traduce en el cambio en la relación de vacíos, que a su vez está relacionada con el incremento del esfuerzo a través del coeficiente compresibilidad a_v .

$$U_z = \frac{e_1 - e}{e_1 - e_2}$$

$$U_z = \frac{\sigma' - \sigma'_1}{\sigma'_2 - \sigma'_1} = \frac{\sigma' - \sigma'_1}{\Delta\sigma'} = \frac{u_i - u}{u_i} = 1 - \frac{u}{u_i} \quad (\text{Holtz and Kovacs, 1981})$$

Ahora se puede escribir la solución así:

$$U_z = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} f_1(Z) f_2(T)$$

Esta ecuación está representada gráficamente por la siguiente ilustración:

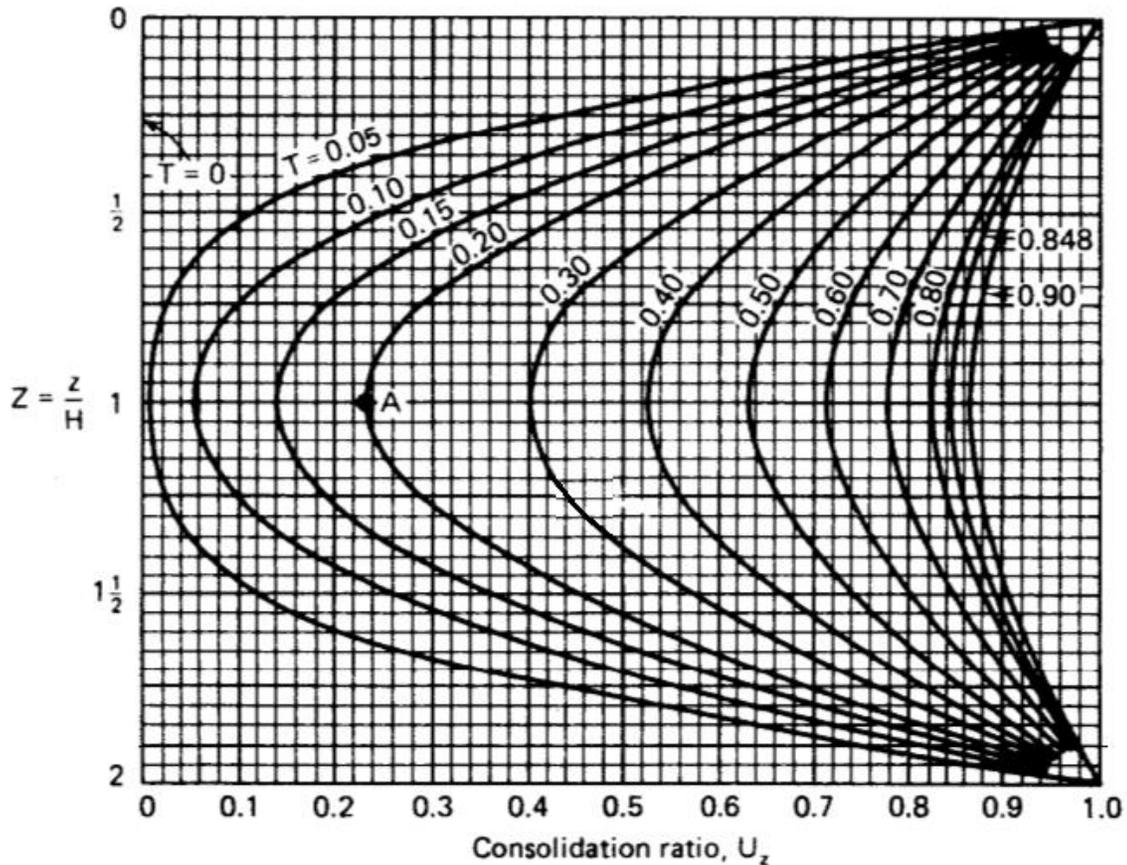


Ilustración 5: Consolidación en cualquier punto y factor tiempo para una capa drenada en dos direcciones. (Holtz and Kovacs, 1981)

Para obtener el valor del porcentaje de consolidación $U(\%)$, se debe encontrar el área bajo la curva que corresponde al factor tiempo deseado, matemáticamente de la siguiente manera:

$$U(\%) = \frac{\sum U_z dz}{2H} = \frac{1}{2H} \int_0^{2H} U_z dz$$

$$U(\%) = \frac{\int_0^{2H} xy}{\int_0^{2H} xz} = \frac{\int_0^{2H} [(\sigma'_2 - \sigma'_1) - u] dz}{(\sigma'_2 - \sigma'_1)2H} \times 100$$

(Holtz and Kovacs, 1981)

Reescribiendo:

$$U(\%) = \frac{100}{2H(\sigma'_2 - \sigma'_1)} \int_0^{2H} [(\sigma'_2 - \sigma'_1) - u] dz$$

Reemplazando e integrando se obtiene:

$$\begin{aligned}
 U(\%) = & \frac{100}{2H(\sigma'_2 - \sigma'_1)} \left[(\sigma'_2 - \sigma'_1)2H - (\sigma'_2 - \sigma'_1) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \right. \\
 & \times (-1) \cos \frac{(2n+1)\pi}{2H} z \left(\frac{2H}{(2n+1)\pi} \right) \\
 & \left. \times \exp - \left(\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} T \right) \right]_0^{2H}
 \end{aligned}$$

(Holtz and Kovacs, 1981)

Para las condiciones de límite queda:

$$\begin{aligned}
 U(\%) = & 100 \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)^2 \pi^2} (-1)(-1-1) \right. \\
 & \left. \times \exp - \left[\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} T \right] \right\}
 \end{aligned}$$

or

$$U(\%) = 100 \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp - \left[\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4} T \right] \right\}$$

(Holtz and Kovacs, 1981)

Esta solución corresponde para cualquier valor de U en el caso especial en el que la presión de poros varía de forma constante y lineal. (Holtz and Kovacs, 1981)

A partir de este planteamiento matemático se pudo interpretar el fenómeno de la consolidación y estudiarlo a profundidad, de manera que se pudieran predecir los asentamientos en magnitud y su evolución en el tiempo, determinando los parámetros que rigen la consolidación.

Los parámetros que rigen la consolidación se pueden determinar a partir de correlaciones y fórmulas que se han desarrollado gracias a la experiencia acumulada en mecánica de suelos. Sin embargo la mejor forma de obtener estos parámetros, es a partir del ensayo de consolidación con muestras sin perturbar o inalteradas obtenidas directamente del suelo.

Los parámetros que se obtienen a partir del ensayo de consolidación son:

- C_v : Coeficiente de consolidación: Velocidad de consolidación, unidades $\left[\frac{l^2}{t}\right]$ longitud al cuadrado sobre tiempo.
- C_c : Índice de compresibilidad: Magnitud de los asentamientos, [adimensional].

- a_v : Coeficiente de compresibilidad: unidades $\left[\frac{l^2}{F}\right]$ longitud al cuadrado sobre fuerza.
- m_v : Coeficiente de compresibilidad volumétrica: unidades $\left[\frac{l^2}{F}\right]$ longitud al cuadrado sobre fuerza.

Más adelante se presentará la forma de determinar cada uno de estos parámetros, a partir de los datos, que permiten graficar los resultados del ensayo de consolidación.

El ensayo de consolidación

También recibe el nombre de prueba de edómetro, ya que el equipo en el que se lleva a cabo el ensayo como tal, ha recibido los dos nombres, edómetro que significa medidor de hinchamiento y consolidómetro.

El objetivo del ensayo es determinar la disminución de volumen y la velocidad con que esta se produce en una muestra de suelo confinada lateralmente y sujeta a una carga axial, es decir los parámetros C_c y C_v . (Arango, 1983)

La prueba consiste en aplicar a una muestra de suelo confinada lateralmente una carga, de tal manera que por las condiciones de confinamiento se deforme en una sola dirección.

El fenómeno de consolidación ocurre únicamente en suelos finos y saturados, por lo que el ensayo solo se realiza en limos y arcillas.

El primer edómetro fue construido por Frontard en 1910 y de ahí en adelante ha tenido una evolución en cuanto a la presentación del equipo. (Iglesias, 1997)

Luego Arthur Casagrande rediseñó el edómetro o consolidómetro hasta llegar al que se conoce hoy en día.

El aparato consta de un anillo rígido dentro del cual se coloca la muestra, piedras porosas que protegen la muestra en ambas caras y que además permitan la salida del agua de la muestra, este conjunto se coloca dentro de un cilindro en el que se puede poner agua con el fin de mantener la muestra saturada, la carga se trasmite a la muestra mediante un sistema de placa, marco y colgador de pesas. Las deformaciones se registran en un micrómetro y el tiempo que transcurre para alcanzar la deformación producida por un incremento de carga en un cronómetro. (Crespo, 2004)

Diversas metodologías se han propuesto para los incrementos de carga una vez se está ejecutando el ensayo, Leonards, 1962 propuso que los incrementos de carga se hicieran doblando las cargas y cada 24 horas, ya que así se pueden obtener mejores resultados. (Bowles, 1982)

Los resultados del ensayo se presentan gráficamente indicando en escala natural la relación de vacíos e en el eje vertical y la presión o esfuerzo σ en el eje horizontal. Esta gráfica se conoce como curva e vs σ . También es común en la práctica dibujar la curva tomando e en escala natural y σ en escala logarítmica.

A continuación se presenta el esquema del ensayo de consolidación.

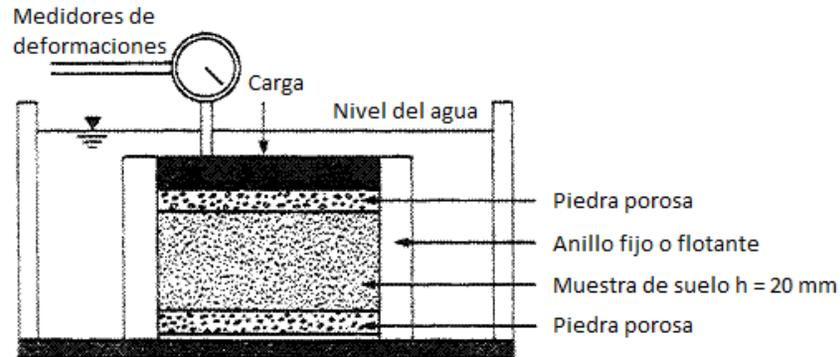


Ilustración 6: Esquema ensayo de consolidación (Sjursen, 2000)

De esta manera con cada incremento de carga, se obtiene el valor de la variación de la relación de vacíos Δe para cada valor del esfuerzo con el que posteriormente se calculan los parámetros de consolidación y se construye la curva de consolidación σ vs e .

Tipos de ensayo de consolidación:

Existen dos tipos de ensayo de consolidación según la clase del anillo, ensayo de consolidación de anillo fijo y ensayo de consolidación de anillo flotante.

Ensayo de consolidación de anillo fijo: Durante el ensayo todo el movimiento de la muestra con respecto al anillo es hacia abajo.

Ensayo de consolidación de anillo flotante: Durante el ensayo el movimiento de la muestra con respecto al anillo va de la parte superior del anillo hacia su parte media y de su parte inferior hacia su parte media. El ensayo de anillo fijo tiene ventaja sobre el de anillo fijo ya que la fricción entre el suelo y la pared del anillo es menor. (Arango, 1983).

En el ensayo de consolidación parte de la carga aplicada a la muestra se transmite a la pared del anillo debido a la fricción entre la muestra y la pared. En el ensayo de anillo fijo toda la fuerza de fricción empuja el suelo hacia arriba, debido a que el suelo se mueve siempre hacia abajo con respecto al anillo.

A continuación se presenta la principal diferencia entre un ensayo y otro.

Sea F la fuerza de fricción por unidad de altura, P la carga aplicada sobre la muestra y $2H$ la altura de la muestra. La carga en la base será $P-2H$ para el anillo fijo, mientras que para el anillo flotante será P . Esto debido a que la mitad de la fuerza friccional es hacia arriba y la otra mitad es hacia abajo por la dirección en la que se mueve la muestra durante el ensayo. Lo anterior está representado gráficamente en la siguiente ilustración.

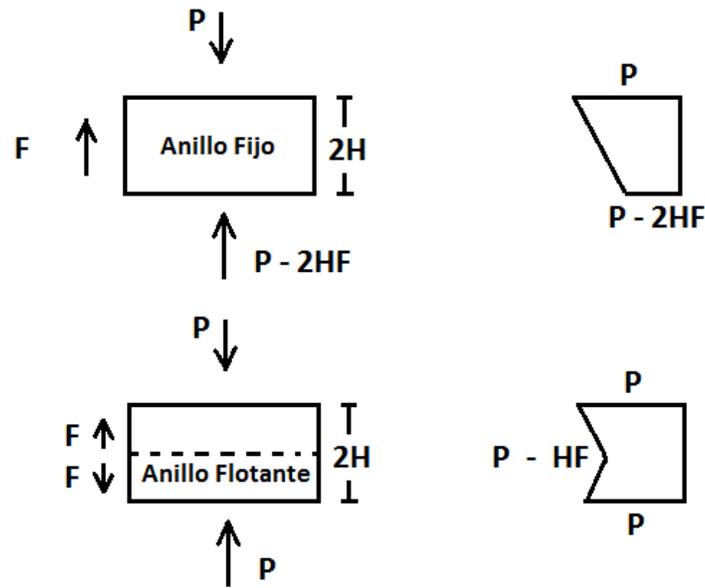


Ilustración 7: Diagrama de fuerzas Ensayo de Anillo fijo y Anillo flotante. (Fuente propia)

De lo anterior se puede deducir que en el ensayo de anillo fijo las fuerzas de fricción reducen los efectos de la carga aplicada por el equilibrio de fuerzas en la base de la muestra.

“Como la fricción hace que la carga efectiva sea menor que la aplicada, la consideración de la fricción hace que en la curva de relación de vacíos contra esfuerzo, se den esfuerzos diferentes a los que actúan realmente” (Taylor, 1942)

No obstante, Taylor encontró que la fricción lateral no afectaba apreciablemente el coeficiente de consolidación C_v y tampoco el coeficiente de compresibilidad a_v . (Arango, 1983). Lo anterior debido a que la fricción lateral usualmente se desprecia en los ensayos de consolidación por dos motivos, sus efectos no son importantes y es difícil determinar su magnitud.

A continuación se presentan las diferencias entre los dos ensayos desde el punto de vista mecánico y del funcionamiento de cada uno de los consolidómetros.

Las diferencias entre ambos equipos radica en que en el equipo de anillo flotante, la piedra porosa que está en la parte inferior está dentro del anillo cortador lo que le permite moverse verticalmente dentro de él, además el anillo de la muestra también es libre de moverse verticalmente dentro de él, a diferencia del equipo de anillo fijo en el que el anillo está fijo sobre la base de la celda y encerrada por un cilindro en acrílico. De allí que ambos equipos se conozcan como anillo fijo y anillo flotante. (HUMBOLDT, 2010)

En la ilustración 4 se pueden observar ambas celdas de consolidación.

Celda de consolidación de **ANILLO FIJO**



Celda de consolidación de **ANILLO FLOTANTE**



Ilustración 8: Celdas de consolidación Anillo fijo y Anillo flotante (HUMBOLDT, 2010)

A continuación se presenta un despiece de ambos dispositivos en la ilustración 5 se pueden identificar las diferencias entre ambos montajes respecto a los elementos que componen ambos equipos.

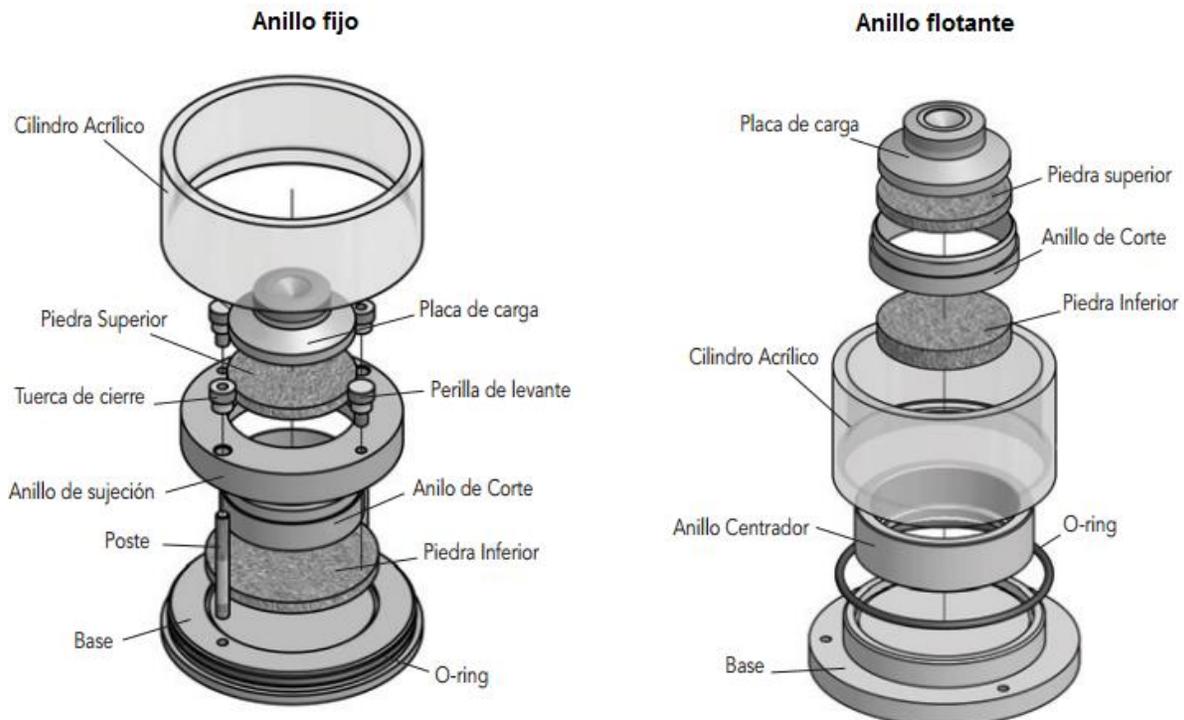


Ilustración 9: Elementos que componen los equipos (HUMBOLDT, 2010)

Las especificaciones de los equipos se presentan a continuación:

La celda de anillo fijo completa está hecha de acero inoxidable y tiene un anillo cortador, el cual está ubicado en el interior del anillo de sujeción y sobre la piedra porosa la que es más grande que la muestra. La parte superior de la piedra porosa y la base de carga van sobre la muestra. El montaje está fijo sobre la base de la celda y encerrado por un cilindro de acrílico abierto a la atmósfera que permite la saturación de la muestra. La celda de anillo flotante completa está hecha de acero inoxidable y tiene un anillo cortador. Similar en construcción a la de anillo fijo, excepto que la piedra porosa inferior está dentro del

anillo cortador y puede moverse verticalmente dentro de él. El anillo de la muestra también es libre de moverse verticalmente. (HUMBOLDT, 2010)

El equipo tiene un dispositivo de carga que transmite cargas verticales a la muestra de suelo, la cual se encuentra confinada lateralmente por un anillo metálico de área y altura conocidos, lo que se traduce una vez inicia el ensayo, en transmisión de esfuerzos y reducción gradual de volumen en la muestra de suelo. Las cargas verticales son conocidas y estas hacen parte del sistema de carga del odómetro, cada que se hace un incremento de carga se hace lectura en el deformímetro para determinar la compresión vertical en intervalos de tiempo. (Wesley, 2010). En la ilustración 8 se pueden observar ambos equipos para realizar el ensayo de consolidación anillo fijo y anillo flotante.



Ilustración 10: Equipo de consolidación de anillo fijo y anillo flotante EIA. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la EIA)

El presente trabajo de grado se basa en la teoría desarrollada por Terzaghi en el año de 1925 y que se ocupa única y exclusivamente de la consolidación unidimensional.

Las suposiciones de Terzaghi se resumen en:

- El suelo está totalmente saturado.
- Tanto el agua como las partículas de suelo son incompresibles.
- Se puede aplicar la Ley de Darcy para el flujo de agua.
- La variación de volumen es unidimensional y ocurre en la dirección del esfuerzo aplicado.
- El coeficiente de permeabilidad en la dirección del esfuerzo permanece constante.
- La variación de volumen corresponde al cambio en la relación de vacíos.

De la representación gráfica de la curva de compresibilidad en escala logarítmica se pueden identificar 3 zonas. Marcadas como A, B y C.

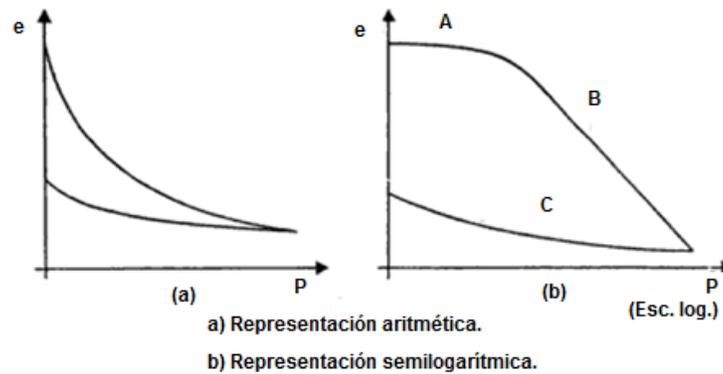


Ilustración 11: Curva de consolidación escala aritmética y escala semilogarítmica. (Fuente propia)

El tramo A, llamado consolidación inicial, es la representación gráfica de la reducción instantánea en el volumen de la muestra de suelo una vez se aplica la primera carga, esta es la respuesta elástica que genera el suelo ante la imposición de una primera carga, durante el tramo A, el suelo puede recobrar su forma y dimensiones originales cuando cesa la fuerza de deformación.

En el tramo B, llamado curva virgen, se evidencia la consolidación primaria, es aquí donde se producen las deformaciones más importantes, asociadas a la reducción en el volumen de la masa de suelo, debido a la expulsión del agua de los vacíos, acompañada por la transferencia de carga del agua a las partículas sólidas del suelo que además hacen que este se rigidice conforme aumentan las cargas, lo que finalmente se traduce en un asentamiento mayor en la muestra. En el tramo virgen el suelo presenta un comportamiento lineal elástico, ya que como se puede observar en la curva en escala logarítmica, los tramos son más rectos durante el periodo de carga.

Los tramos A y B representan el 90% del fenómeno de consolidación, lo que se denomina como consolidación primaria.

Finalmente el tramo C representa el estado de descarga, donde las cargas impuestas a la masa de suelo son retiradas, generándose un reacomodamiento en la estructura interna del suelo, debido a que este comienza a absorber aire y agua tratando de recuperar la relación de vacíos que tenía inicialmente, el tramo C, se conoce como curva de expansión, la pendiente media de este tramo corresponde al índice de expansión C_s .

Durante el ensayo se realizan lecturas de deformación, tiempo y carga aplicada, a partir de estos datos se obtienen una serie de gráficas que permiten analizar la relación que existe entre estos durante el ensayo y los parámetros de consolidación con los que finalmente se calcularán los asentamientos tanto elásticos como por consolidación para un caso específico. (Karl Terzaghi, 1958)

Como se mencionó anteriormente, una vez construida la curva de compresibilidad y graficada en escala logarítmica, se pueden obtener varios parámetros asociados a las propiedades mecánicas del suelo, del tramo lineal de la gráfica (Tramo B), se puede obtener el coeficiente de compresibilidad a_v , el cual corresponde a la pendiente de este

tramo recto de la gráfica y que permite determinar qué tan compresible puede ser un suelo, así, mientras mayor sea el valor de la pendiente del tramo recto, significará un suelo más compresible.

El valor de a_v está definido por la siguiente ecuación:

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma}$$

Donde,

a_v : Coeficiente de compresibilidad.

Δe : Cambio de la relación de vacíos.

$\Delta \sigma$: Cambio de esfuerzo aplicado.

a_v gráficamente representa la pendiente del tramo recto de la curva de compresibilidad, en la ilustración Tramo recto curva de compresibilidad, se puede ver como el valor del coeficiente de compresibilidad corresponde a la pendiente de la recta de $\Delta \sigma$ vs Δe .

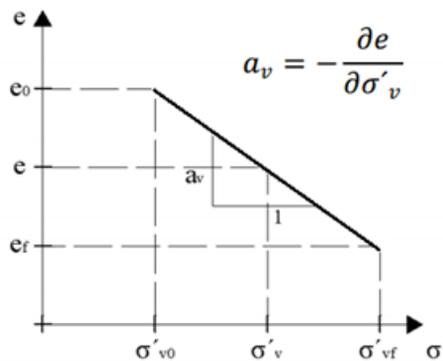


Ilustración 12: Tramo recto Curva de Compresibilidad. (Universidad Nacional de Rosario, 2004)

Una vez calculado el coeficiente de compresibilidad a_v , se pueden calcular otros parámetros como el coeficiente de compresibilidad volumétrica m_v , el cual se calcula con la relación de vacíos inicial e_0 y el a_v empleando la siguiente fórmula:

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0}$$

Donde,

m_v : Coeficiente de compresibilidad volumétrica

a_v : Coeficiente de compresibilidad.

e_0 : Relación de vacíos inicial.

El coeficiente de compresibilidad volumétrica corresponde a la pendiente de la curva deformación unitaria ϵ vs esfuerzo aplicado σ . Lo anterior se representa gráficamente en la ilustración Gráfica de esfuerzo deformación unitaria.

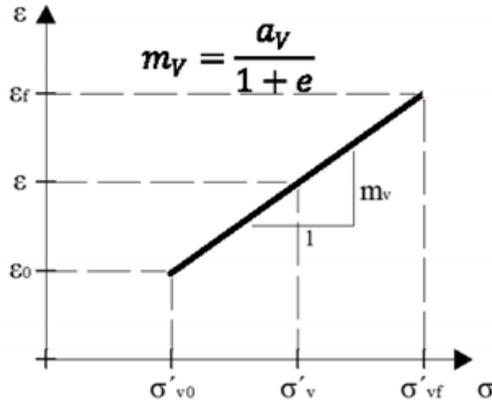


Ilustración 13: Gráfica de esfuerzo deformación unitaria. (Universidad Nacional de Rosario, 2004)

Por último y graficando la curva de compresibilidad en escala semilogarítmica en el eje de las abscisas, se calcula el índice de compresión del suelo c_c de la siguiente manera:

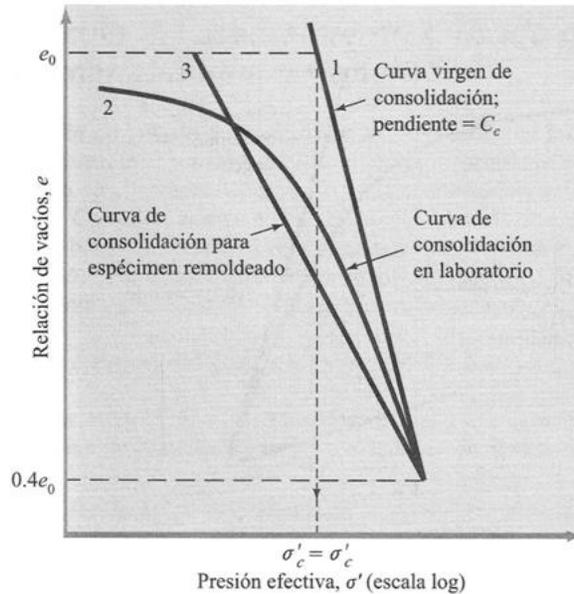


Ilustración 14: Curva de compresibilidad escala logarítmica. (Das, 1997)

$$c_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}$$

Donde,

c_c : Índice de compresión del suelo.

e_i : Relación de vacíos.

σ_i : Esfuerzo en la muestra.

Valores altos de todos los parámetros antes mencionados permiten afirmar que el suelo es altamente compresible, lo que quiere decir que ante la imposición de una carga, se producirá una mayor reducción en la relación de vacíos y por ende mayor deformaciones. (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005)

Valores típicos del Índice de compresibilidad C_c en suelos altamente compresibles están por encima de 0,25 m²/kN. (González Caballero, 2010)

Sin duda alguna y como se mencionó anteriormente una de las principales variables durante la consolidación, es el ritmo o tiempo de consolidación. Gracias a Terzaghi se pueden relacionar parámetros como el tiempo de consolidación (T_v), el grado de consolidación ($U\%$), el tipo de drenaje y el espesor del estrato, para calcular la evolución en el tiempo que tendrán los asentamientos del terreno cuando se analiza un suelo en particular. A continuación se muestra la gráfica de la cual se obtienen las relaciones de estos coeficientes y con los cuales posteriormente se calcula el coeficiente de consolidación C_v .

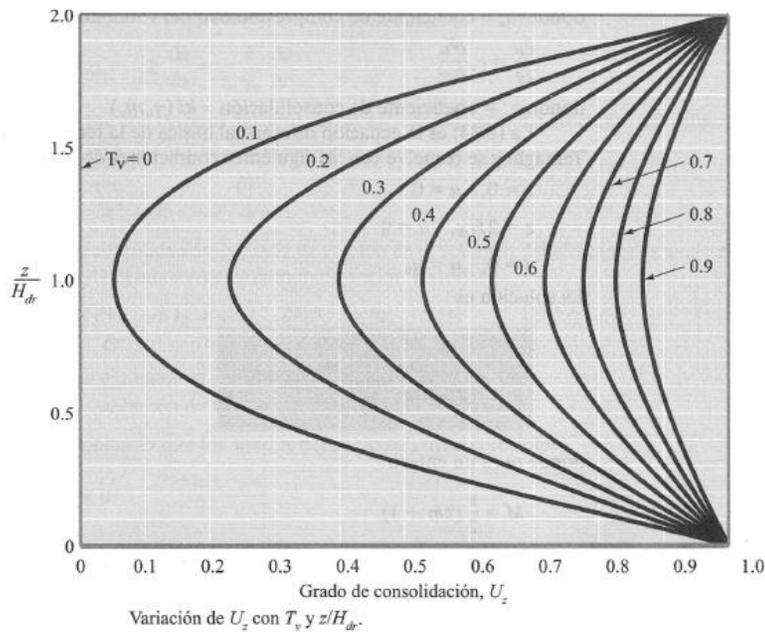


Ilustración 15: Gráfica de relación entre el porcentaje de consolidación U_z y Tiempo de consolidación T_v . (Das, 1997)

La expresión con la que se calcula el coeficiente de consolidación C_v , es la que se presenta a continuación.

$$C_v = \frac{T_{vu} H^2}{t_u}$$

Donde,

Tvu: Es el factor tiempo para el grado de consolidación U(%)

H: Recorrido máximo que debe hacer el agua para ser drenada (espesor de la muestra)

tu: Tiempo (generalmente en minutos) para alcanzar el grado de consolidación U(%)

El valor del C_v es el único elemento de la solución de la ecuación de consolidación que depende de las propiedades del suelo, específicamente al ritmo de consolidación.

El C_v se determina obteniendo gráficamente los valores de T_{50} y t_{50} por el método desarrollado por Casagrande a partir de los resultados del ensayo de consolidación graficados en escala logarítmica, o a partir de los valores de T_{90} y t_{90} según lo propuso Taylor a partir de la gráfica de raíz de t.

Método de Casagrande para calcular el C_v .

El método consiste en que a partir de la construcción de la curva de consolidación en escala logarítmica, se debe determinar el tiempo en el que se ha presentado el 50% de la consolidación, es decir el t_{50} .

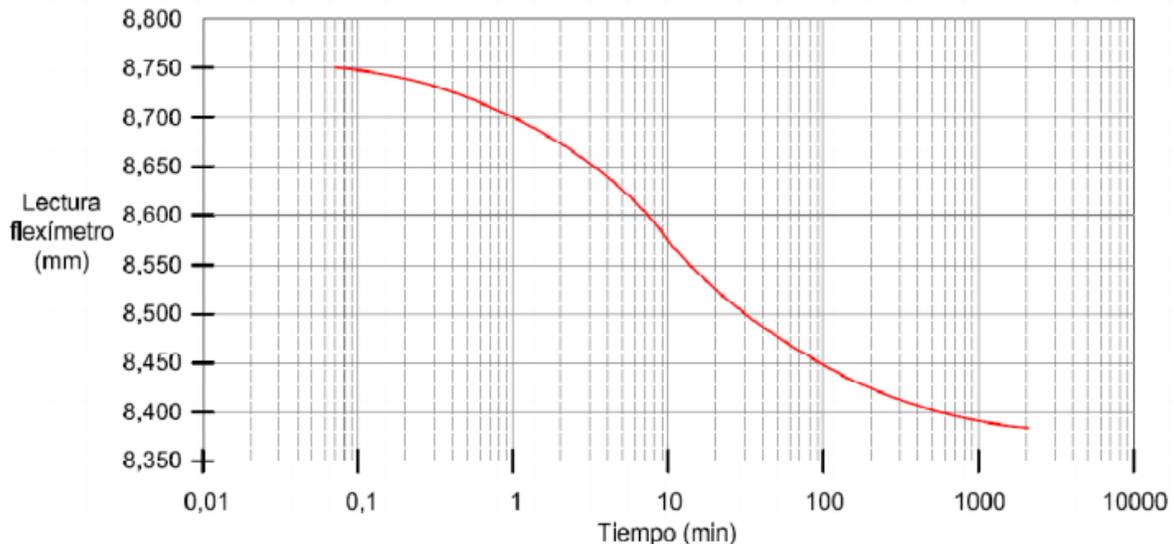


Ilustración 16: Curva teórica de consolidación en escala logarítmica. (Universidad Nacional de Rosario, 2004)

Primero se ubica la deformación teórica correspondiente al 0% de la consolidación en este caso marcada como punto A y que corresponde a t_1 en las abscisas. Luego se ubica el punto correspondiente de la curva para un tiempo $t_2 = 4t_1$. Entre ambos puntos se determina la diferencia de ordenadas Δ . Como la curva en esencia corresponde a una parábola, para una relación de 4 en las abscisas se tendrá una relación de 2 en las ordenadas, lo cual hace corregir el punto A desplazándolo hacia arriba ubicando realmente la deformación correspondiente al 0% de la consolidación.

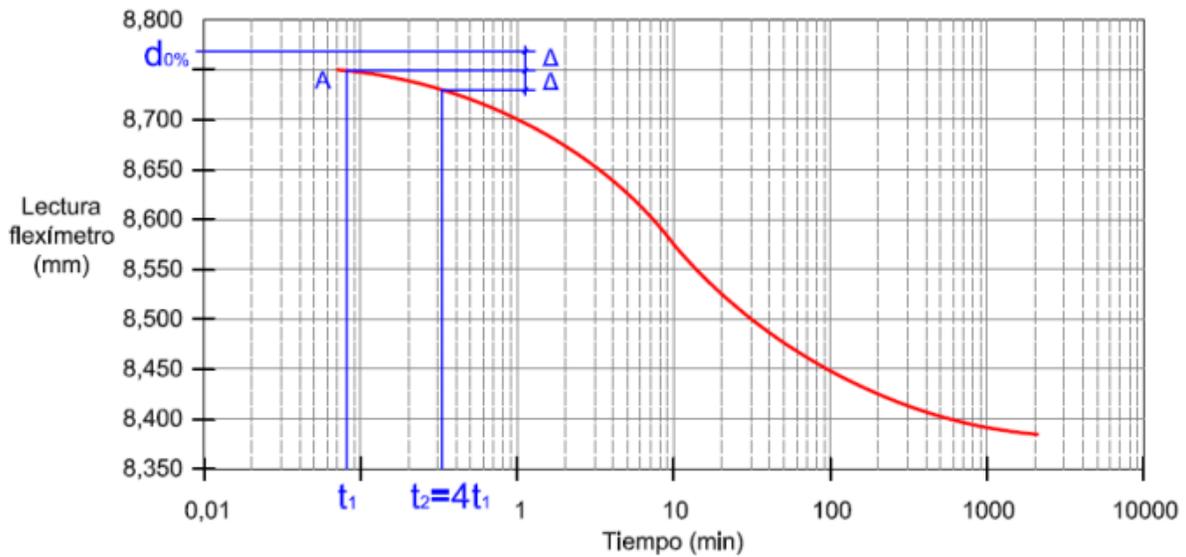


Ilustración 17: Paso 1 Método de Casagrande. (Universidad Nacional de Rosario, 2004)

Luego de ubicar la deformación para 0% de consolidación, se determina la deformación correspondiente al 100% de la consolidación, para ello se extiende la recta tangente a la curva en el punto de inflexión y la recta tangente a los últimos puntos de la curva de consolidación. La intersección de ambas rectas corresponde al punto B, cuya ordenada es la deformación para el 100% de la consolidación.

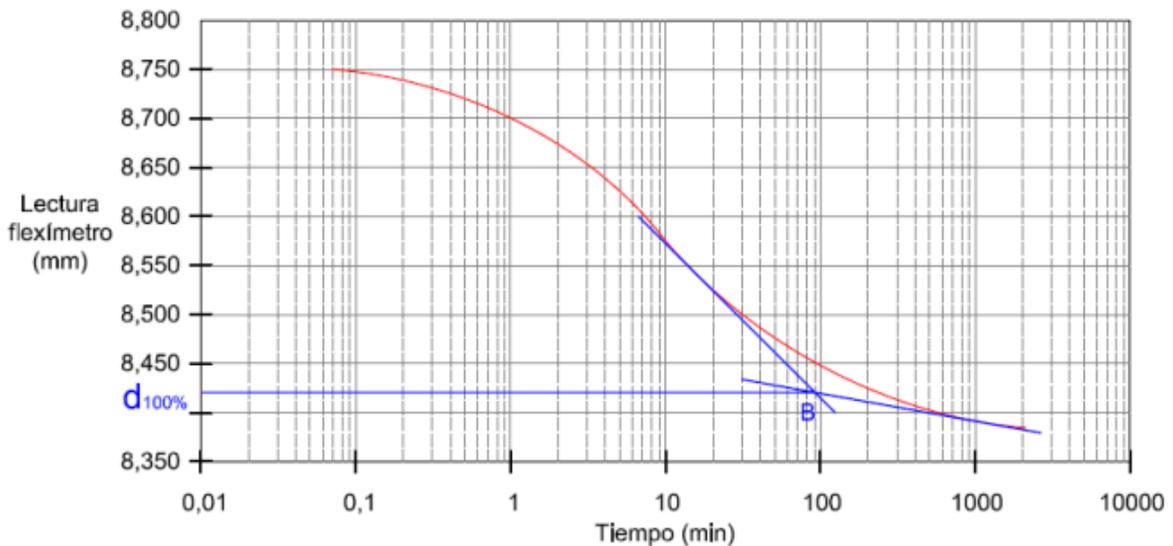


Ilustración 18: Paso 2 Método de Casagrande. (Universidad Nacional de Rosario, 2004)

Determinando la deformación para el 0% y 100% de la consolidación se ubica la mitad de dicha distancia que es la deformación correspondiente al 50% de la consolidación, teniendo este valor se ubica el punto C perteneciente a la curva y se lee el t_{50} .

Del gráfico deformación vs raíz cuadrada del tiempo:

Trazar una línea recta de tendencia de los primeros puntos del gráfico, que corte el eje de las abscisas.

- La intersección entre la recta definida en el anterior paso con el eje de las abscisas, define una distancia A.
- Se define en el eje de las abscisas el punto A a una distancia del origen en $1,15 \cdot A$
- Se une el punto $0'$ y A.
- La intersección de esta recta con la curva define el valor t_{90} en el eje de las abscisas.
- Con este valor de t_{90} calcular el coeficiente de consolidación con la fórmula:

$$C_v = \frac{T_v(U = 90\%) \cdot H^2}{t_{90}}$$

Donde:

T_v (factor tiempo) para $(U = 90\%) = 0.848$

H = recorrido del agua a drenar. (Universidad de Chile, 2007)

Una vez obtenidos los valores anteriores se puede encontrar la permeabilidad (k) del suelo consolidado a través de la ecuación:

$$K = C_v \cdot \gamma_w \cdot m_v$$

Donde,

K: Permeabilidad del suelo (Generalmente en mm/año)

C_v : Coeficiente de consolidación ($\text{mm}^2/\text{minuto}$)

γ_w : Peso específico del agua ($9,8 \text{ kN/m}^3$)

m_v : Coeficiente de compresibilidad volumétrica (m^2/kN)

Además de los parámetros antes mencionados, la curva de compresibilidad en escala logarítmica, permite calcular mediante un método gráfico desarrollado por el Ingeniero civil Austríaco Arthur Casagrande el esfuerzo o carga de preconsolidación σ_{pc} , parámetro con el que posteriormente se determina la relación de sobreconsolidación OCR y que permite determinar el grado de consolidación del suelo, cuando este ha sido preconsolidado o normalmente consolidado.

En la ilustración Método gráfico para determinar σ_{pc} , se muestra como gráficamente se determina el esfuerzo de preconsolidación σ_{pc} .

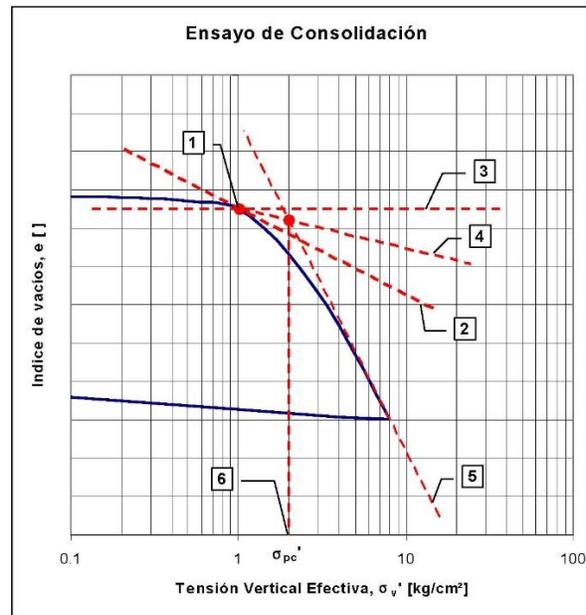


Ilustración 21: Método gráfico para determinar el esfuerzo de pre consolidación. (Universidad Nacional de Rosario, 2004)

Donde:

1. Ubicar punto 1, punto de máxima curvatura
2. Trazar la recta 2, tangente por el punto 1
3. Trazar la recta 3, horizontal por el punto 1
4. Trazar la bisectriz de la recta tangente 2 y la horizontal 3
5. Prolongar recta de la curva virgen o curva normalmente consolidada
6. La intersección de las rectas 4 y 5 determina en abscisas el valor de σ_{pc}' .

1.3.5 Ensayo de corte directo.

En el presente trabajo se realizaron 3 ensayos de corte directo, uno por sitio, para determinar los parámetros de resistencia del suelo con los que se determina la capacidad portante y posteriormente se dimensionan los elementos de cimentación, en este caso una zapata y así poder calcular los asentamientos con los parámetros obtenidos en los ensayos de consolidación.

El ensayo de corte es el método más antiguo en la investigación de la resistencia de un suelo, el ensayo se realiza en una caja de acero conocida como caja de corte, la caja está compuesta de un marco inferior y uno superior entre los cuales se encuentra un plano de falla perpendicular a la muestra, el cual permite desplazamientos horizontales cuando se aplica una fuerza en este sentido. (Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2007)



Ilustración 22: Caja de Corte Directo. (Foto tomada del laboratorio de suelos de la EIA)

El ensayo consiste en aplicar un esfuerzo normal a través de una carga vertical constante, y a su vez un esfuerzo tangencial o cortante mediante incrementos a velocidad constante de cargas paralelas al plano de falla definido por la caja de corte.

El ensayo de corte tiene 3 modalidades, no consolidado no drenado (UU), consolidado no drenado (CU) y consolidado drenado (CD).

El ensayo de corte no consolidado no drenado (UU), es un ensayo rápido, donde la falla de la muestra ocurre antes de que esta se consolide y en la cual no se permite el drenaje. El ensayo de corte consolidado no drenado (CU), permite que la muestra se consolide durante la aplicación de la carga vertical de modo que en el momento de aplicar el esfuerzo de corte la presión de poros (μ) sea nula, pero no durante la aplicación del esfuerzo cortante. El ensayo de corte consolidado drenado (CD) es un ensayo lento, ya que se permite el drenaje de la muestra durante todo el ensayo haciendo que la presión de poros sea nula durante la aplicación del esfuerzo cortante. (Escuela de Ingeniería en Construcción, 2009)

Un ensayo completo, según la metodología de la norma INVIAS INV E-154-07, consiste en fallar tres muestras idénticas del mismo suelo aplicando tres cargas verticales distintas (N1, N2 y N3) aumentando gradualmente su magnitud. Según la metodología planteada por la norma INV E-154-07, los incrementos de carga son duplicando las cargas.

El ensayo permite determinar los parámetros de resistencia del suelo una vez las lecturas de deformación y esfuerzo se grafican y obtienen los valores de τ vs σ , con los que posteriormente se calculan la cohesión c y el ángulo de fricción interna ϕ .

El ángulo de fricción interno (ϕ), o ángulo de frotamiento, es un valor que depende de varios factores, todos asociados a las propiedades físicas de las partículas que componen la muestra de suelo, el tamaño, la forma, la densidad, entre otros. Y no es más que la fricción que existe entre las superficies de las partículas de suelo que están en contacto directo unas con otras y que se oponen al movimiento ante un incremento de esfuerzos.

Para determinar el ángulo de fricción interna ϕ , se utiliza la ecuación de Mohr Coloumb con los resultados obtenidos del ensayo de corte, así:

$$\tau = \sigma \times \tan (\phi) + C, \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde

τ : Esfuerzo cortante en el suelo (kPa)

σ : Esfuerzo normal aplicado a una masa de suelo (kPa)

ϕ : Ángulo de fricción interna del suelo (grados)

C: Cohesión (kPa)

Para el presente trabajo se realizaron ensayos de corte UU no consolidado no drenado debido a los tiempos de ejecución y a que ya se tenían los parámetros de consolidación del suelo.

La cohesión C, es el parámetro que representa la resistencia máxima a la tensión de una muestra de suelo, la cohesión está relacionada con la adherencia que existe entre las partículas del suelo, y depende directamente de la tensión capilar entre las partículas que contienen agua, las condiciones de drenaje y los esfuerzos del suelo.

La cohesión es una propiedad exclusiva de los suelos finos, más fuerte en los suelos arcillosos y no tanto en limos, mientras que en los suelos granulares, como las arenas y gravas, esta propiedad es prácticamente nula, de tal manera que la resistencia de los suelos granulares, está gobernada únicamente por el ángulo de fricción interna \emptyset .

1.3.6 Capacidad portante del suelo

La capacidad portante del suelo está asociada directamente con la capacidad de carga de una cimentación, de tal manera que no se puede afirmar que un suelo tiene determinada capacidad portante, si a ésta no la acompaña un elemento diseñado para transmitir las cargas de una estructura al suelo. Es común encontrar definiciones en las que se define la capacidad portante como la capacidad del terreno de soportar las cargas aplicadas sobre él. Técnicamente la capacidad portante es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno en la que aún no se producen fallas por cortante en el suelo y asentamientos excesivos.

Karl Von Terzaghi en 1943 propuso una fórmula sencilla para determinar la capacidad portante máxima que podría tener una cimentación superficial de tipo zapata o una cimentación continua como una viga de fundación. Karl Von Terzaghi definió entonces la siguiente fórmula para calcular la capacidad portante de una cimentación superficial del tipo zapata rectangular.

Ecuación 2: Ecuación de Terzaghi para capacidad portante

$$q_u = c * N_c * S_c + q_s * N_q + \frac{1}{2} * \gamma * B * N_\gamma * S_\gamma$$

Donde:

El primer término es la contribución a la capacidad portante de la cohesión, el segundo término es la contribución del suelo de empotramiento o donde se desplanta la

cimentación, y el tercero es la contribución del suelo de apoyo asociado a la geometría del elemento que transmite la carga.

S_c y S_y , son factores adimensionales de forma que dependen de la geometría de la cimentación, es decir, si es continua, cuadrada o circular.

c : cohesión del suelo y debe estar en unidades de esfuerzo [Ton/m²] para obtener la capacidad portante en las mismas unidades.

N_c , N_q y N_γ : Son factores de capacidad de carga adimensionales y que se encuentran tabulados para distintos valores de ϕ .

q_s : es $\gamma \cdot D_f$, donde γ es el peso específico del suelo en unidades de [esfuerzo/volumen] preferiblemente en [Ton/m³] y D_f es la profundidad de desplante en unidades de longitud, preferiblemente en [m].

B : es el ancho de la fundación en [m]

Las tablas de las que se obtienen los factores de forma y de capacidad de carga hacen parte de los anexos del presente trabajo de grado.

Otros autores desarrollaron con los estudios realizados hasta la fecha por Terzaghi (1943), otras fórmulas para el cálculo de la capacidad portante del suelo, entre ellos se destacan los estudios de Meyerhof (1951) y Hansen (1970).

Ecuación de Meyerhof para el cálculo de la capacidad portante de una cimentación:

Ecuación 3: Ecuación de Meyerhof para capacidad portante

$$qu = c * Nc * Sc * dc + qs * Sq * dq * Nq + \frac{1}{2} * \gamma * B * N\gamma * S\gamma * d\gamma$$

Donde:

Todos los términos iguales a Terzaghi siguen siendo lo mismo, excepto los factores adimensionales de capacidad de carga Nc , Nq y $N\gamma$ que se determinan en una tabla específica para el cálculo por Meyerhof.

Sc , Sq y $S\gamma$: son factores adimensionales de forma.

dc , dq y $d\gamma$: Son factores adimensionales de profundidad asociados al valor de \emptyset .

Ecuación de Hansen para el cálculo de la capacidad portante de una cimentación:

Ecuación 4: Ecuación de Hansen para capacidad portante

$$qu = c * Nc * Sc * dc * ic * gc * bc + qs * Sq * dq * Nq * iq * gq * bq + \frac{1}{2} * \gamma * B * N\gamma * S\gamma * d\gamma * iy * gy * by$$

Donde:

Todos los términos iguales a Terzaghi siguen siendo lo mismo, excepto los factores adimensionales de capacidad de carga Nc , Nq y $N\gamma$ que se determinan en una tabla específica para el cálculo por Meyerhof.

Sc , Sq y $S\gamma$: son factores adimensionales de forma.

dc , dq y $d\gamma$: Son factores adimensionales de profundidad asociados al valor de \emptyset .

ic , iq , iy , gc , gq , gy , bc , bq y by : Son factores adimensionales asociados al grado de inclinación de la carga.

1.3.7 Cálculo de Asentamientos

Una vez se aplica una carga al suelo a través de un elemento de cimentación, este se deforma y comprime, por lo tanto la estructura que está transmitiendo dichas cargas y generando esfuerzos adicionales al suelo se asentará, los asentamientos son los desplazamientos verticales que se producen en un elemento respecto al punto inicial o punto de origen, es decir la variación en la profundidad de un punto fijo de tal elemento.

Los asentamientos totales St son la suma entre los asentamientos elásticos Si y los asentamientos por consolidación Sc . Los asentamientos elásticos están asociados a la respuesta elástica del suelo que se produce de forma inmediata una vez es transmitida la carga al suelo, y se determinan mediante la ecuación de cálculo de deformaciones en elementos elásticos, los asentamientos por consolidación están asociados a una respuesta en el rango plástico del suelo y dependen del tiempo, la permeabilidad y la velocidad con que será expulsada el agua de los poros. (Holtz and Kovacs, 1981).

$$St = Si + Sc \qquad Si = \frac{Pl}{AE}$$

Los asentamientos elásticos se basan en la teoría elástica, la cual asume que el suelo es un material elástico, uniforme y de profundidad infinita. Diversos autores han propuesto ecuaciones y fórmulas para calcular los asentamientos elásticos de una estructura, para dichos cálculos es necesario conocer dos propiedades del suelo, el módulo de Young o módulo de elasticidad (E_s) y la relación de poisson del suelo (ν). Entre otras consideraciones, la teoría elástica para el cálculo de asentamientos asume que la deformación lateral es cero.

Los asentamientos por consolidación están asociados como se mencionó anteriormente a una respuesta inelástica o en el rango plástico del suelo, lo que hace que el suelo se rigidice al aumentar los esfuerzos, algunos autores como Laurence D. Wesley han afirmado que los asentamientos por teoría elástica pueden ser hasta un 20% mayores en cuanto a magnitud que los calculados por consolidación.

1.3.8 Geología de la zona

En el Valle de San Nicolás, ubicado en el oriente cercano a la ciudad de Medellín en el departamento de Antioquia, se encuentra predominantemente suelo residual de anfíbolita, producto de la descomposición de la roca parental, en este caso anfíbolita, la anfíbolita es una roca metamórfica con una edad aproximada de 4.200 y 4.300 millones de años, su origen está asociado a un proceso de metamorfismo regional de grado moderado a alto. (Haymarí, 2013).

En la siguiente ilustración, se marcaron con rojo los tres puntos dentro del Valle de San Nicolás donde se obtuvieron las muestras para el presente trabajo de grado.



Ilustración 23: Ubicación Valle de San Nicolás. (Concesión Aburrá-Oriente S.A, 2013)

La zona estudiada se caracteriza por presentar un área importante cubierta de depósitos aluviales recientes asociados a la cuenca del río Negro y sus principales afluentes, al igual que depósitos de vertiente encontrados en los bordes perimetrales de las diferentes superficies de erosión y los escarpes regionales. Los depósitos aluviales presentan hasta ocho niveles de terrazas. (Albeiro de Jesús Rendón Rivera, 2011). En la anterior ilustración, ilustración 18, se marcan en amarillo los tres puntos del muestreo del presente trabajo.

Las formaciones superficiales en la zona de estudio están compuestas de dos tipos de materiales;: saprolitos producto de la descomposición de rocas ígneas y metamórficas con espesores variables y diferentes clases de depósitos detríticos, dentro de los cuales se tienen depósitos de vertiente asociados a los escarpes regionales y al altiplano de Santa Elena; depósitos lacustres conocidos como Las Sedimentitas de La Fe; depósitos aluviales y varios niveles de terrazas localizados en las diferentes superficies de erosión, principalmente a lo largo del Valle del Río Negro. Igualmente se encuentran horizontes continuos que siguen la paleotopografía como la línea de piedra y los depósitos de ceniza volcánica que recubren las unidades superficiales anteriormente descritas. (Albeiro de Jesús Rendón Rivera, 2011).

En la ilustración siguiente ilustración se muestra un perfil tipo del suelo en estudio.

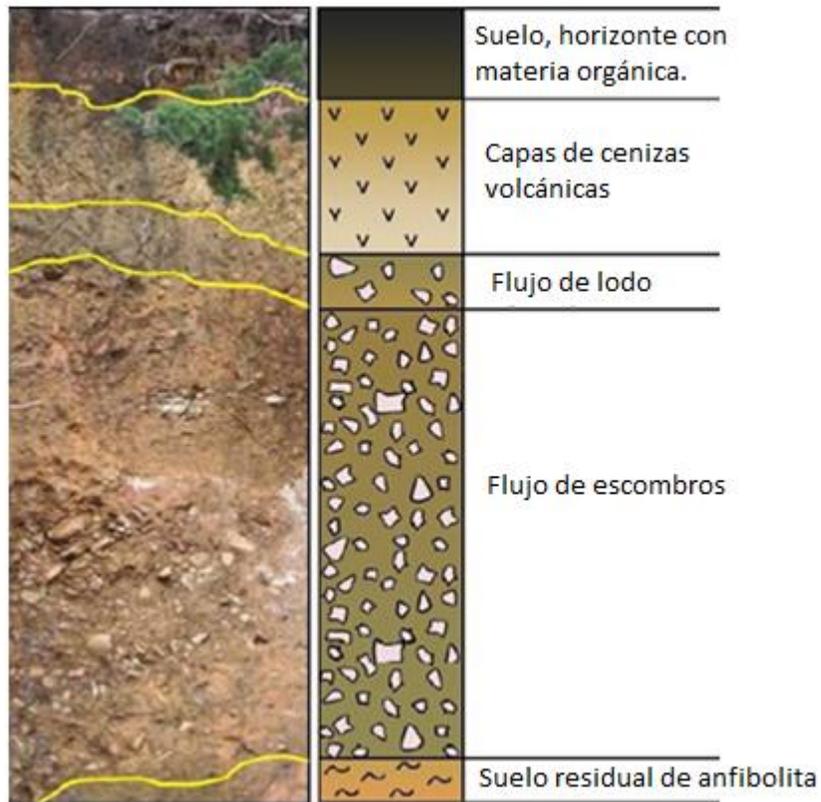


Ilustración 24: Perfil típico Valle de San Nicolás. (Albeiro de Jesús Rendón Rivera, 2011)

En el Valle de San Nicolás es común encontrar este tipo de perfiles, donde se pueden diferenciar claramente los horizontes del suelo, más aun cuando se han realizado cortes al terreno por las diversas actividades del hombre. La siguiente ilustración permite identificar los horizontes antes mencionados, esta ilustración corresponde a una foto tomada en uno de los sitios de muestreo y en la que debido a la actividad de la construcción se tiene expuesto el talud.



Ilustración 25: Perfil del suelo Zona de muestreo 1, Vereda Sajonia, municipio de Rionegro, Antioquia. (Foto tomada en el lugar de muestreo)

1.4 Antecedentes

En la práctica es común que cuando se calculan asentamientos de estructuras nuevas, se tengan que realizar diversos ensayos de laboratorio que permitan determinar los parámetros tanto de resistencia del suelo como de consolidación, esto con el fin de obtener la velocidad y magnitud de los asentamientos que experimentará una estructura durante su ciclo de vida, pre construcción, durante la construcción y post construcción. Los parámetros para cálculo de asentamientos por consolidación únicamente son obtenidos a partir del ensayo de consolidación, como se viene mencionando dicho ensayo tiene dos formas de realizarse, ensayo de consolidación de anillo fijo y ensayo de consolidación de anillo flotante.

En ambos ensayos se obtienen los parámetros para el cálculo de asentamientos por consolidación. El ensayo de consolidación en el laboratorio se hace sobre una muestra que tiene entre 20 y 40 mm de espesor colocada en un anillo de metal confinante de diámetro entre 45 y 113 mm. Más comúnmente se utilizan diámetros de 63 y 113 mm. En el caso del anillo fijo el diámetro del anillo es de 63,5 mm, mientras que el diámetro del anillo en el ensayo de anillo flotante es de 71 mm.

En algunas referencias se pueden encontrar diferencias únicamente en cuanto al montaje entre uno y otro y a las posibles ventajas que pueda tener el uno respecto al otro. Entre las cuales cabe mencionar:

El anillo fijo puede utilizarse para medir el coeficiente de permeabilidad de la muestra que se hace el ensayo de consolidación. (*Universidad Autonoma de Baja California, 2003*)

La ventaja del anillo fijo consiste en que reduce la pérdida por fricción a lo largo de las paredes de la muestra entre el suelo y el anillo y la velocidad del ensayo es casi cuatro veces mayor. (*Universidad Autónoma de Baja California, 2003*)

La norma del INVIAS, para el ensayo de consolidación unidimensional de suelos, I.N.V. E – 151 – 07 hace una única mención de las diferencias entre una montaje y el otro, pero nada orientada en cuanto a los resultados en un equipo u otro, la única mención que esta norma se hace es la siguiente:

“El diámetro de la piedra superior podrá ser entre 0.2 y 0.5 mm (0.01 a 0.02”) menor que el diámetro interior del anillo. Cuando se emplee un anillo flotante, la piedra del fondo deberá tener el mismo diámetro que la piedra de la parte superior. Se recomienda el uso de piedras ahusadas con el diámetro mayor en contacto con el suelo” (*Instituto Nacional de Vías INVIAS, 2007*)

En el trabajo realizado por los estudiantes de Ingeniería Civil Sebastián Giraldo Hoyos y David Escobar Zarrabe, “Análisis de las propiedades mecánicas del suelo a partir de la mezcla con residuos de la construcción”, se calcularon asentamientos elásticos a partir de los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación con anillo fijo y anillo flotante. Este trabajo se realizó en el año 2013 en la ciudad de Medellín con muestras de suelo sedimentario cercanas a las llanuras del río Medellín. En este trabajo se obtuvieron varias muestras de un mismo sitio, con el fin de remodelarlas con desechos arcillosos de construcción dosificados a las muestras de suelo en diferentes porcentajes, una vez remodeladas las muestras, se realizaron varios ensayos de laboratorio, específicamente el ensayo de consolidación en sus dos versiones y con muestras idénticas, es decir, para una muestra remodelada con cierto porcentaje de residuos, se realizaron los dos ensayos de consolidación anillo fijo y anillo flotante, de los cuales se obtuvieron los parámetros con los que finalmente se calcularon asentamientos.

Los resultados obtenidos se resumen así:

Tabla 1: Resultados asentamientos elásticos

% de ladrillo mezclado con el suelo	Asentamientos Anillo fijo (cm)	Asentamientos Anillo flotante (cm)
0%	▲ 9,95	▼ 4,23
4%	▲ 7,22	▼ 4,26
8%	▼ 4,66	▲ 9,64
12%	▼ 5,79	▲ 6,65

Los asentamientos elásticos obtenidos a partir de ambos ensayos, muestran como en un 50% de los ensayos realizados, los asentamientos calculados fueron mayores con los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación de anillo flotante.

1.5 Justificación

Conocer la incidencia de los parámetros con los que se calculan los asentamientos totales, es decir, los asentamientos elásticos y por consolidación obtenidos en el ensayo

de consolidación de anillo fijo y anillo flotante, puede servir como punto de partida a la hora de diseñar una cimentación y posteriormente a la hora de calcular los asentamientos de una estructura.

Si se tiene la información de los resultados de ambos ensayos, se pueden contemplar todas las posibles variaciones en los resultados, reduciendo los porcentajes de error cada que se realiza un ensayo.

Lo anterior puede brindar información suficiente para diseñar una cimentación basada en los asentamientos, permitiendo desarrollar criterios para la toma de decisiones.

El presente trabajo pretende determinar esa incidencia en el cálculo de asentamientos que pueden tener los parámetros obtenidos en una u otra prueba en suelos iguales.

Existe en Colombia el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10) el cual tiene un capítulo para el chequeo de asentamientos, título H, es decir, la norma colombiana tiene en este aparte un numeral dedicado al cálculo de asentamientos permisibles para estructuras según su uso, altura, irregularidad en planta, irregularidad en altura, etc., donde se chequean los asentamientos que a futuro tendrá una estructura, allí deben ser comparados los asentamientos obtenidos mediante los cálculos tradicionales de asentamientos y los asentamientos admisibles, sin embargo, realizar estos cálculos con los parámetros obtenidos de un tipo de ensayo u otro pueden hacer que los asentamientos estén dentro de los admisibles o no, es decir, que para algunos casos los asentamientos calculados con los parámetros obtenidos en el ensayo de anillo flotante pueden estar dentro de los asentamientos admisibles según la norma y para otros casos los calculados con los parámetros obtenidos del ensayo con anillo fijo para exactamente el mismo caso (carga, tipo de suelo, dimensiones del elemento, profundidad, etc.).

2. Metodología

Inicialmente se realizó un estudio completo de los fundamentos de formación del suelo, y su clasificación de acuerdo a su origen. Posterior a esto, se estudió a profundidad la teoría de consolidación y todo el desarrollo basado en estudios experimentales que ha tenido a lo largo de la historia.

Con la teoría de formación del suelo y de consolidación clara, se consultó en las normas que rigen en Colombia referentes a la toma de muestras para ensayos del tipo ya mencionados, elaboración de ensayos básicos como contenido de humedad, gravedad específica, límites de Atterberg y peso específico, del Instituto Nacional de Inviás INVIAS, además de las atenciones y cuidados que se deben tener al momento de realizar un ensayo de consolidación.

Luego, con base en lo planteado en el objetivo general y en los objetivos específicos, se definieron 3 puntos en la zona delimitada como área de estudio (Valle de San Nicolás). Uno en la Vereda Sajonia del municipio de Rionegro, Antioquia, (glorieta a Santa Elena, Aeropuerto, Medellín), otro en el campus de Las Palmas de la E.I.A, y el último en una parcelación en construcción en el km 1 + 200 vía al aeropuerto José María Córdoba. De estos tres sitios se extrajeron según la programación de ensayos dispuesta las muestras de suelo para los ensayos planteados.

El diseño experimental realizado se basa en el principio de bloqueo, ya que no se toman muestras de forma aleatoria y se ensayan indiscriminadamente en ambos equipos, sino que por el contrario, se toman muestras idénticas de 3 sitios definidos y se ensayan en ambos equipos, a continuación se presenta un esquema del diseño experimental realizado en la siguiente ilustración.

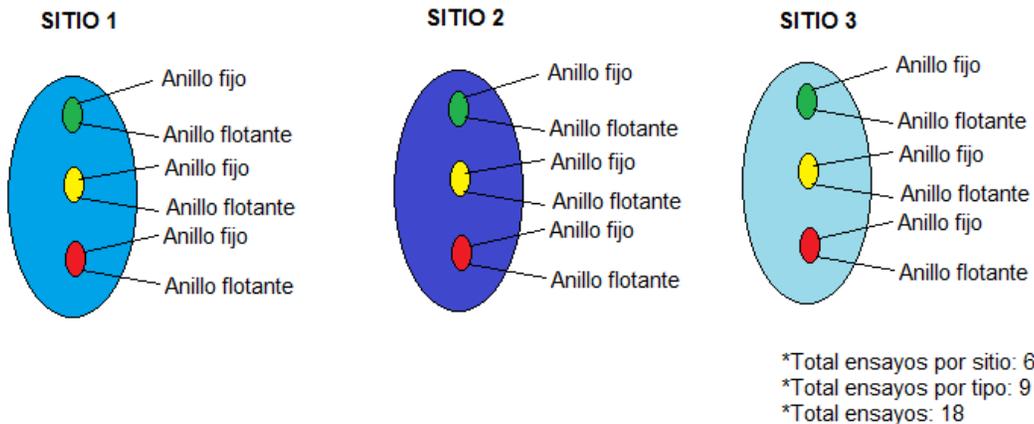


Ilustración 26: Diseño experimental (Fuente propia)

Por sitio se extrajeron 3 muestras a profundidades distintas, en cada muestreo se extraían en promedio 15 kg de suelo en bloque, el cual se transportaba directamente al laboratorio para iniciar inmediatamente ambos ensayos de consolidación, además se separaba muestra suficiente para realizar otros ensayos complementarios como los de humedad, gravedad específica y límites.

Así, una vez obtenidos todos los resultados de los 9 ensayos de consolidación de anillo fijo y los 9 ensayos de consolidación de anillo flotante en muestras idénticas uno a uno, se tabularon y graficaron para analizar y comparar dichos resultados, inicialmente con un análisis vertical y que permitiera identificar las variaciones de un tipo de ensayo a otro.

Posterior a esto y con el fin de poder calcular asentamientos, fue necesario tomar nuevamente muestras de los tres sitios y en una profundidad media a la que se habían obtenido las muestra iniciales para consolidación, esta vez para realizar ensayos de corte de los tres sitios y poder obtener los parámetros de resistencia al corte. Los ensayos de corte se realizaron con el fin de poder calcular los asentamientos elásticos y diseñar un elemento de cimentación, en este caso una zapata y calcular todos los asentamientos con los 18 resultados de los ensayos de consolidación obtenidos, 9 de anillo fijo y 9 de anillo flotante.

Luego de tener todos los cálculos de asentamientos, se compararon los resultados obtenidos en muestras idénticas con los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación de anillo fijo y con los obtenidos del ensayo de consolidación de anillo flotante, y así determinar la incidencia de los mismos en los cálculos.

3. Desarrollo del proyecto

3.1 Toma de muestras y ensayos de laboratorio.

Definidos los tres puntos para el muestreo, se procedió a la recuperación de las muestras. Los tres sitios se definieron con base en la accesibilidad y disponibilidad para acceder y recuperar las muestras.

El primer sitio del que se obtuvieron muestras corresponde a las coordenadas que a continuación se presentan: 61035.2 Norte – 752654.1 Este. Y corresponde al sitio de muestreo antes mencionado en la vereda Sajonia en el municipio de Rionegro.

En la siguiente ilustración se puede observar el sitio 1 de muestreo. Esta ilustración exhibe claramente los horizontes del suelo y la meteorización de la roca en diferentes grados.



Ilustración 27: Sitio de muestreo 1, Vereda Sajonia, municipio de Rionegro. (Foto tomada en la vereda Sajonia del municipio de Rionegro)

Las muestras se obtuvieron de los cortes realizados en este sitio por el particular y dueño del predio una vez autorizadas las mismas. Como se mencionó anteriormente, en promedio se recuperaron muestras de 15 kg, la única forma de obtener muestras de este

peso y volumen es mediante cortes en bloque. En la siguiente ilustración se puede observar la toma de una de las muestras.



Ilustración 28: Toma de muestras en bloque

El segundo sitio definido para la toma de muestras corresponde a una parcelación en construcción en el alto de las Palmas en el km 1 + 200 en la vía al aeropuerto José María Córdoba. Las coordenadas de este sitio son: 61603.7 Norte – 755245.08 Este. En la siguiente ilustración se puede observar el sitio 2 de donde se obtuvieron las muestras.



Ilustración 29: Sitio 2 de muestreo Parcelación alto de las Palmas.

El sitio 3 para realizar el muestreo corresponde a una excavación en el campus de las Palmas de la Escuela de Ingeniería de Antioquia EIA, en el km 2 + 200 en la vía al aeropuerto José María Córdoba, las coordenadas del sitio son: 61156.2 Norte – 755147.6 Este. En la siguiente ilustración se observa el sitio de muestreo 3.



Ilustración 30: Sitio 3 de muestreo Campus EIA Palmas

Una vez obtenida cada muestra es cubierta con papel chicle de manera que no pierda humedad para ser transportada a la sombra y en un lugar donde no se exponga a choques ni impactos generados durante el traslado al laboratorio. Una vez en el laboratorio para poder iniciar con los ensayos de consolidación, es necesario determinar la densidad y peso específico de la muestra, este procedimiento se realiza tomando una porción del suelo, la cual es puesta en un volumen conocido, en este caso uno de los anillos del cual se conoce su peso solo, luego de poner la muestra de suelo en el anillo se pesa y determina el peso del suelo restando el peso del anillo solo. Así con el volumen conocido que ocupa la muestra de suelo y el peso del mismo, se calcula la densidad o peso específico en unidades de $[\text{masa}] / [\text{volumen}]$, este procedimiento se realiza con el fin de determinar el esfuerzo vertical del suelo en condiciones naturales y la primera carga que se pondrá en el dispositivo de carga en el ensayo de consolidación.

Aparte de la muestra que se separa para los ensayos de consolidación, se deja muestra suficiente para ensayos de humedad, gravedad específica y límites. La siguiente ilustración corresponde a uno de los ensayos de consolidación de anillo fijo realizados.



Ilustración 31: Ensayo de consolidación anillo fijo

Como se mencionó anteriormente con cada muestra de suelo, se realizan otros ensayos complementarios al ensayo de consolidación.

Uno de estos ensayos es la prueba en la que se determina la gravedad específica del suelo, la gravedad específica se determina por medio de un picnómetro y es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas, a la misma temperatura. (INVIAS, 2007).

En la siguiente ilustración se puede observar uno de los ensayos de gravedad específica realizados durante el presente trabajo. Para realizar este ensayo se debe secar suficiente masa de suelo, la cual una vez secada al horno es molida y tamizada, con el fin de separar las partículas finas, para todos los casos en estudio, es decir las 9 muestras donde el suelo es predominantemente fino, se realizó la prueba con 2 picnómetros diferentes, y el resultado final es el promedio entre ambas pruebas, de esta manera se obtuvo la gravedad específica para cada una de las 9 muestras en estudio.

La masa de suelo con la que se realiza la prueba de gravedad específica corresponde a la fracción de suelo que pasa el tamiz No. 4, la prueba se realiza utilizando uno de los principios básicos de la física, el principio de Arquímedes en el que todo volumen sumergido, desplaza el mismo volumen de agua.



Ilustración 32: Ensayo de gravedad específica con picnómetro. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)

Para las 9 muestras de suelo se realizó el procedimiento antes descrito, y los valores de gravedad específica se presentan en el aparte Discusión de resultados. Con los valores de gravedad específica G_s , se calculó la relación de vacíos inicial e_0 para cada una de las 9 muestras mediante la ecuación:

$$S * e = w * G_s \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

S: Grado de saturación

e: Relación de vacíos

w: Humedad

G_s : Gravedad específica

Aparte de determinar la humedad natural y la gravedad específica, parámetros necesarios para calcular las condiciones iniciales de la muestra en cuanto a la relación de vacíos, es necesario hallar los límites de Atterberg, a partir de los cuales es posible clasificar y caracterizar cada una de las muestras de suelo.

Los límites de Atterberg son los conocidos límite líquido y límite plástico, el límite líquido se realizó en la copa de Casagrande. Estos ensayos se realizaron con la fracción del suelo fina, posterior al secado de la misma, y su objetivo es clasificar las muestras de suelo ya que son los límites de Atterberg los que dividen y separan las arcillas de los limos.

En la siguiente ilustración se muestra uno de los ensayos de límite plástico realizado a una de las muestras, este ensayo consiste en determinar el contenido de humedad con el cual se puede formar un hilo de 3 mm de diámetro con el suelo. Una vez se puede formar el rollo de aproximadamente 3 mm de diámetro, se determina su contenido de humedad.



Ilustración 33: Ensayo de límite plástico. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)

Con el límite líquido y el límite plástico se puede clasificar el suelo, ya que los suelos en estudio son predominantemente finos. El límite líquido se puede definir como el contenido de humedad en el cual el suelo comienza a comportarse como un líquido, este ensayo se realiza en el equipo o copa de Casagrande, en la siguiente ilustración se puede observar uno de los ensayos realizados.



Ilustración 34: Ensayo de límite líquido, copa de Casagrande. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)

Los resultados de los límites de Atterberg de las 9 muestras, así como la clasificación de las mismas se presentan a continuación en Discusión de resultados.

Paralelo a la realización de las pruebas y ensayos antes mencionados, se realizaban simultáneamente los ensayos de consolidación de anillo fijo y anillo flotante con cada una de las 9 muestras de suelo seleccionadas para el presente trabajo.

Una vez determinadas la humedad, la gravedad específica, la relación de vacíos y la densidad aparente o peso específico de cada una de las muestras de suelo, así como los resultados de los ensayos de consolidación de anillo fijo y anillo flotante de las 9 muestras, se procedió a realizar un ensayo de Corte directo por cada sitio de muestreo con los fines antes mencionados. En la siguiente ilustración, se puede observar la preparación de la muestra en los anillos de corte para durante uno de los ensayos.



Ilustración 35: Muestras en anillo de corte. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)

Una vez termina el ensayo de corte se puede observar como la muestra ha fallado en un plano paralelo al de la aplicación de la carga, en las siguientes ilustraciones 30 Y 31 se puede observar el plano de falla de una de las muestras durante el ensayo de corte.



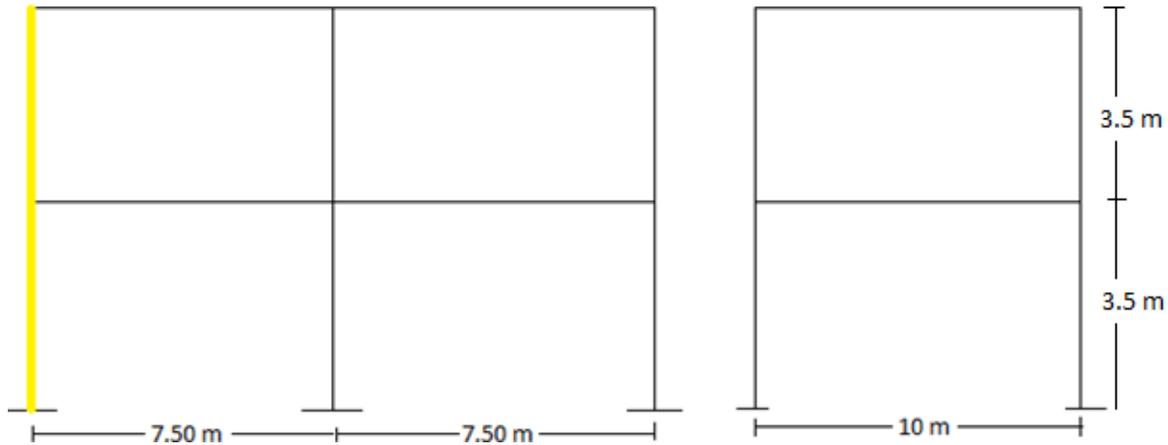
Ilustración 36: Muestra fallada ensayo de corte directo. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)



Ilustración 37: Plano de falla muestras ensayo de corte. (Foto tomada en el laboratorio de suelos de la E.I.A)

Luego de realizar todos los ensayos de laboratorio, se procedió con el cálculo de cargas de una estructura de dos niveles en pórticos y con un sistema de cimentación en zapatas cuadradas, esto con el fin de calcular tanto asentamientos elásticos como asentamientos por consolidación.

3.2 Estimación de cargas y análisis de un elemento estructural

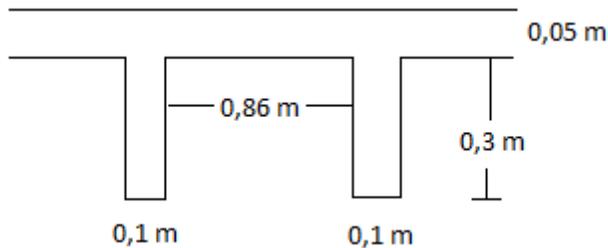


Para el presente ejercicio práctico se tiene una edificación de uso residencial, de dos niveles y con pórticos según la geometría del dibujo. El elemento analizado corresponde a la columna resaltada en amarillo.

Especificaciones de la edificación:

- Sistema estructural de pórticos (vigas y columnas según geometría)
- Losa entre pisos según geometría en concreto reforzado
- Cielos en tablero de yeso de 10 mm
- Cubierta corrugada de asbesto cemento
- Pisos y acabados (en baldosa de cerámica para los pisos y muros revocados y estucados).
- Particiones de mampostería

Sección de losa:



Peso concreto reforzado 24 kN/m^3 NSR-10 tabla B.3.2-1

Losa x 1 m^2 : $(0,05 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}) \times 24 \text{ kN/m}^3 = 1,2 \text{ kN/m}^2$

Nervios x 1 m^2 : $0,3 \text{ m} \times (0,1 \text{ m} \times 1 \text{ m} + 0,1 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}) \times 24 \text{ kN/m}^3 = 1,368 \text{ kN/m}^2$

Cubierta corrugada de asbesto cemento = $0,2 \text{ kN/m}^2$

Pisos y acabados; Baldosa de cerámica de 20mm sobre 12 mm de mortero = $0,8 \text{ kN/m}^2$
NSR-10 tabla B.3.4.1-3.

Cielo raso en yeso de 10 mm; Tableros de yeso 0,0080x10 mm = 0,08 kN/m² NSR-10 tabla B.3.4.1-1.

Particiones de mampostería (Residencial) = 3 kN/m² NSR-10 tabla B.3.4.3-1.

Total carga muerta = 1,2 + 1,3368 + 0,2 + 0,8 + 0,08 + 3 = 6,68 kN/m²

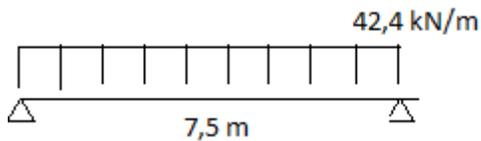
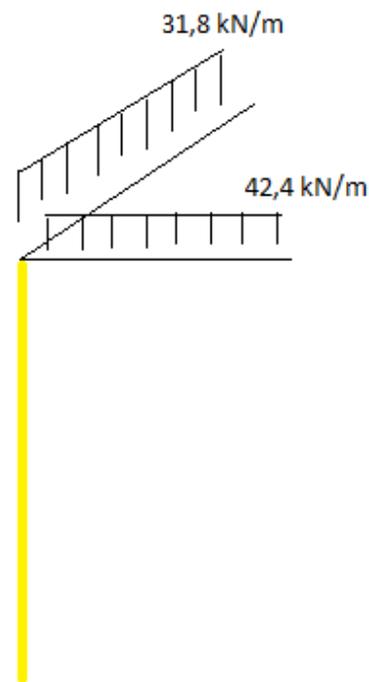
Total carga viva = Residencia, cuartos privados y sus corredores = 1,8 kN/m² NSR-10 tabla B.4.2.1-1.

$$q = (6,68) + (1,8) = 8,48 \text{ kN/m}^2$$

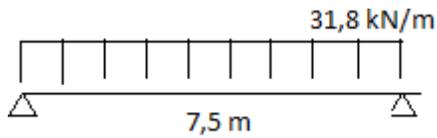
Análisis de un elemento estructural:

Por ancho aferente:

- 8,48 kN/m² x 5 m = 42,4 kN/m
- 8,48 kN/m² x 3,75 m = 31,8 kN/m



$$A_y = 42,4 \text{ kN/m} \times 7,5 \text{ m} / 2 = 159 \text{ kN}$$



$$A_y = 31,8 \text{ kN/m} \times 10 \text{ m} / 2 = 159 \text{ kN}$$

Total fuerza sobre el elemento:
(Tomando las mismas cargas para el nivel 1 y 2)



$$A_y = 318 \text{ kN, aproximadamente, } 31,8 \text{ ton.}$$

Todos los cálculos de asentamientos elásticos y por consolidación se realizaron con una carga de 31,8 ton transmitidos al suelo mediante una zapata cuadrada de 1 m x 1 m. Los resultados de esos asentamientos y de todos los parámetros se presentan a continuación en la Discusión de resultados.

4. Discusión de resultados

A continuación se presenta un consolidado de resultados de las pruebas realizadas a las 9 muestras del presente trabajo.

Muestra #:	1
Imagen:	
Localización	Vereda Sajonia, municipio de Rionegro Antioquia
Profundidad (m):	1,1
Humedad (%):	36%
WP (%):	39%
WL (%):	56%
Clasificación según (USCS):	MH: Limo de alta compresibilidad
Gs:	2,93
Eo:	1,05

Ilustración 38: Información general muestra 1.

La muestra 1 corresponde a un limo de alta compresibilidad según la clasificación USCS, dada su clasificación, se puede asumir que es un suelo altamente deformable y el cual tendrá asentamientos mayores en orden de magnitud que otros tipos de suelos.

Se definió extraer la primera muestra a una profundidad de 1,10 m dada la facilidad para acceder a la misma, además, este sitio de muestreo permitía gran variabilidad en la profundidad de las muestras seleccionadas, la humedad, los límites de Atterberg, la gravedad específica y la relación de vacíos se estimaron y calcularon como se describió anteriormente, las memorias de dichos ensayos se anexan al presente trabajo y no se exponen en este numeral ya que son complementos al procedimiento para alcanzar el objetivo general planteado.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los parámetros obtenidos en el ensayo de consolidación de anillo fijo y anillo flotante para la muestra 1. Y la diferencia porcentual entre cada uno de los parámetros, los parámetros corresponden a:

- P´c: Esfuerzo de preconsolidación.
- av: Coeficiente de compresibilidad.
- mv: Coeficiente de compresibilidad volumétrica
- Cc: Índice de compresión.
- Cs: Índice de expansión.

Tabla 2: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante, muestra 1

	P' c (kPa)	av (m ² /kN)	mv (m ² /kN)	Cc (m ² /kN)	Cs (m ² /kN)	Cv (m ² /año)	K (m/año)
Anillo Fijo	140	0,00080	0,00039	0,338	0,014	18,357	0,0705
Anillo Flotante	130	0,00029	0,00014	0,121	0,019	8,201	0,0113
Diferencia porcentual (%)	7%	64%	64%	64%	-29%	55%	84%

En la siguiente ilustración, 39 se puede observar como ante la aplicación de los mismos esfuerzos y en muestras idénticas, la curva de consolidación en escala logarítmica que se obtiene de los resultados de anillo fijo en el tramo de la curva virgen tiene una mayor pendiente a la obtenida en el ensayo de consolidación de anillo flotante, lo cual quiere decir que durante el ensayo de consolidación de anillo fijo se presentan mayores deformaciones en la muestra de suelo, lo cual podría estar asociado al efecto de confinamiento que le genera la presencia del anillo fijo a la muestra.

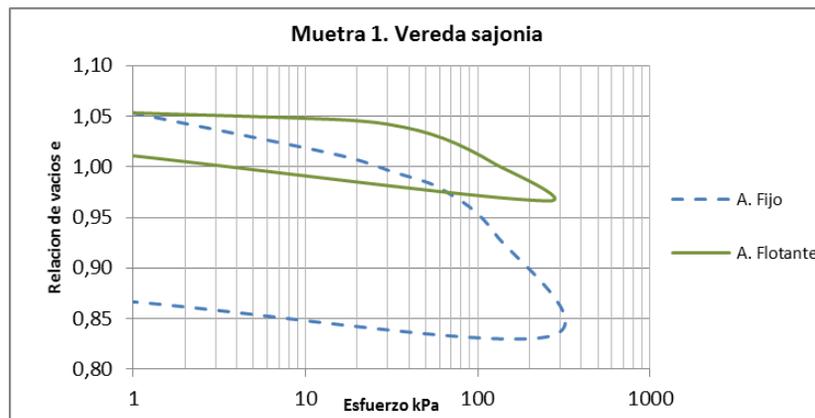


Ilustración 39: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 1

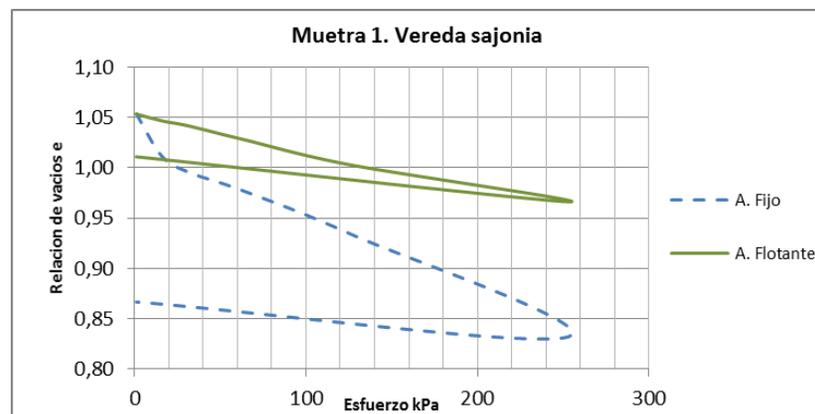


Ilustración 40: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 1

De la ilustración 39 se puede deducir que ante esfuerzos similares, y en muestras idénticas, la muestra ensayada en el equipo de consolidación de anillo fijo se deforma mucho más que la muestra ensayada en el equipo de anillo flotante.

En la ilustración 41 se presenta la información general de la muestra 2, la clasificación según la USCS, los valores de los límites líquido y plástico, el contenido de humedad, la relación de vacíos y el valor de gravedad específica.

Muestra #:	2
Imagen:	
Localización	Vereda Sajonia, municipio de Rionegro Antioquia
Profundidad (m):	5,2
Humedad (%)	38%
WP (%):	59%
WL (%):	68%
	MH: Limo de alta
Clasificación según (USCS):	compresibilidad
Gs:	2,31
eo:	0,87

Ilustración 41: Información general muestra 2

En la tabla 3 se muestran los parámetros obtenidos en ambos ensayos de consolidación para la muestra 2.

Tabla 3: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 2

	P'c (kPa)	av (m²/kN)	mv (m²/kN)	Cc (m²/kN)	Cs (m²/kN)	Cv (m²/año)	K (m/año)
Anillo Fijo	155	0,00054	0,00029	0,454	0,022	46,195	0,1310
Anillo Flotante	113	0,00055	0,00030	0,372	0,023	17,234	0,0501
Diferencia porcentual (%)	27%	-2%	-2%	18%	-6%	63%	62%

En la ilustración 42 se muestran las dos curvas de consolidación obtenidas en el ensayo de consolidación de anillo fijo y de anillo flotante para la muestra 2.

En esta ilustración se puede observar como a diferencia de la muestra 1, las dos curvas en el tramo virgen tiene casi la misma pendiente, lo que se refleja en una menor diferencia porcentual entre los valores del coeficiente de compresibilidad y el coeficiente de compresibilidad volumétrica, apenas del 2%.

La poca diferencia porcentual entre los parámetros de consolidación antes mencionados, se puede evidenciar adelante en que existirá una menor diferencia entre los asentamientos calculados con los parámetros obtenidos en las dos pruebas.

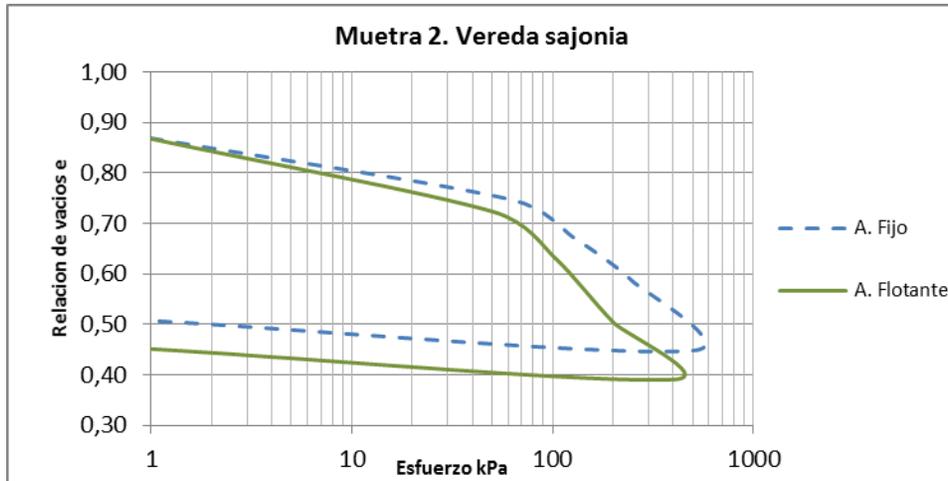


Ilustración 42: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 2

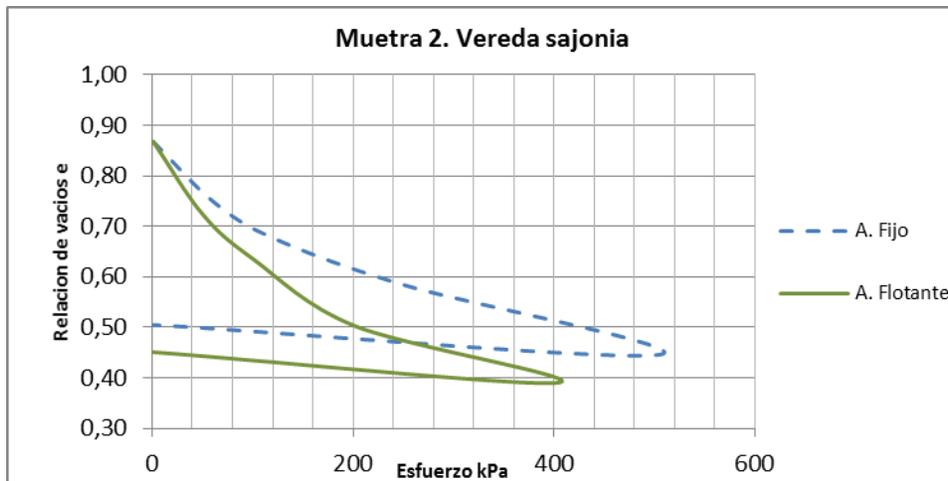


Ilustración 43: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 2

En la ilustración 44 se presenta la información general de la muestra 3, la clasificación según la USCS, los valores de los límites líquido y plástico, el contenido de humedad, la relación de vacíos y el valor de gravedad específica.

Muestra #:	3
Imagen:	
Localización	Vereda Sajonia, municipio de Rionegro Antioquia
Profundidad (m):	9,1
Humedad (%)	45%
WP (%):	60%
WL (%):	61%
	MH: Limo de alta
Clasificación según (USCS):	compresibilidad
Gs:	1,93
eo:	0,86

Ilustración 44: Información general muestra 3

En la tabla 4 se muestran los parámetros obtenidos en ambos ensayos de consolidación para la muestra 3.

Tabla 4: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 3

	P' c (kPa)	av (m ² /kN)	mv (m ² /kN)	Cc (m ² /kN)	Cs (m ² /kN)	Cv (m ² /año)	K (m/año)
Anillo Fijo	252	0,000376	0,000202	0,631	0,032	25,870	0,0513
Anillo Flotante	190	0,000365	0,000196	0,490	0,037	12,380	0,0238
Diferencia porcentual (%)	25%	3%	3%	22%	-17%	52%	54%

Una menor diferencia porcentual entre los parámetros de consolidación obtenidos en ambos ensayos indican que las curvas de consolidación son prácticamente curvas espejo, no obstante, la poca diferencia que existe tiene incidencia en el cálculo de asentamientos.

En la ilustración 45 se muestran las dos curvas de consolidación obtenidas en el ensayo de consolidación de anillo fijo y de anillo flotante para la muestra 3.

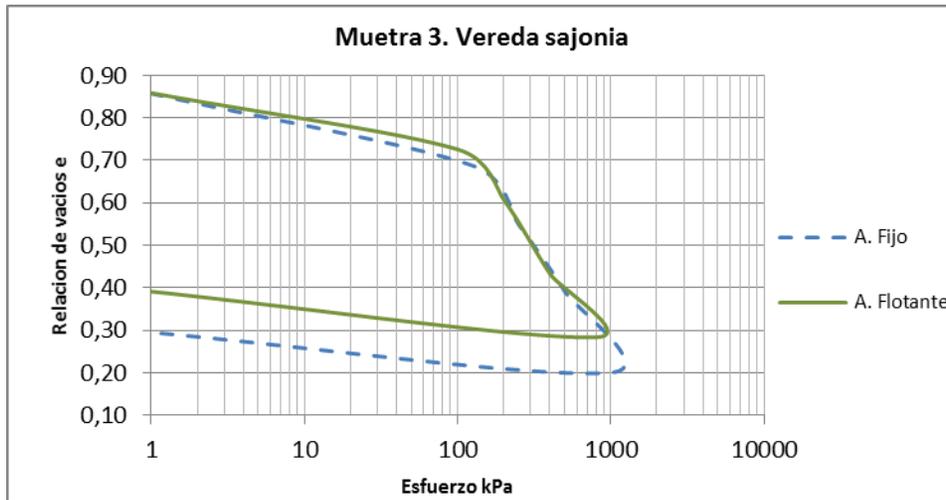


Ilustración 45: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 3

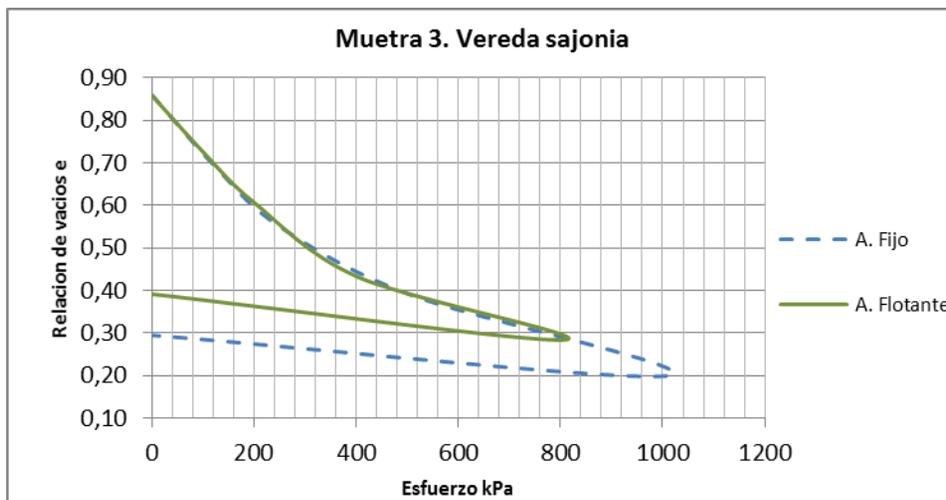


Ilustración 46: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 3

A continuación se presentan los resultados de las muestras 4, 5 y 6, las cuales corresponden al sitio de muestreo 2, en una parcelación en construcción del alto de las Palmas.

En la ilustración 47 se presenta la información general de la muestra 4, la clasificación según la USCS, los valores de los límites líquido y plástico, el contenido de humedad, la relación de vacíos y el valor de gravedad específica.

Muestra #:	4
Imagen:	
Localización	Parcelacion via las Palmas
Profundidad (m):	2,1
Humedad (%):	43%
WP (%):	42%
WL (%):	66%
	MH: Limo de alta
Clasificación según (USCS):	compresibilidad
Gs:	2,83
eo:	1,22

Ilustración 47: Información general muestra 4

En la tabla 5 se muestran los parámetros obtenidos en ambos ensayos de consolidación para la muestra 4.

Tabla 5: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 4

	P'c (kPa)	av (m ² /kN)	mv (m ² /kN)	Cc (m ² /kN)	Cs (m ² /kN)	Cv (m ² /año)	K (m/año)
Anillo Fijo	145	0,000689	0,000311	0,405	0,031	30,874	0,0940
Anillo Flotante	150	0,000547	0,000247	0,257	0,024	20,321	0,0491
Diferencia porcentual (%)	-3%	21%	21%	36%	21%	34%	48%

Como se puede observar en la tabla 5, los parámetros de consolidación tales como el coeficiente de compresibilidad, el coeficiente de compresibilidad volumétrico, el índice de compresión y el índice de expansión, son mayores cuando se obtienen en el ensayo de consolidación de anillo fijo, mientras que el valor del esfuerzo de pre consolidación es casi el mismo obtenido en ambas pruebas.

En la ilustración 48 se puede observar la curva de consolidación obtenida en ambos ensayos para la muestra 4, que en este caso se denomina la muestra 1 de la Parcelación de las Palmas.

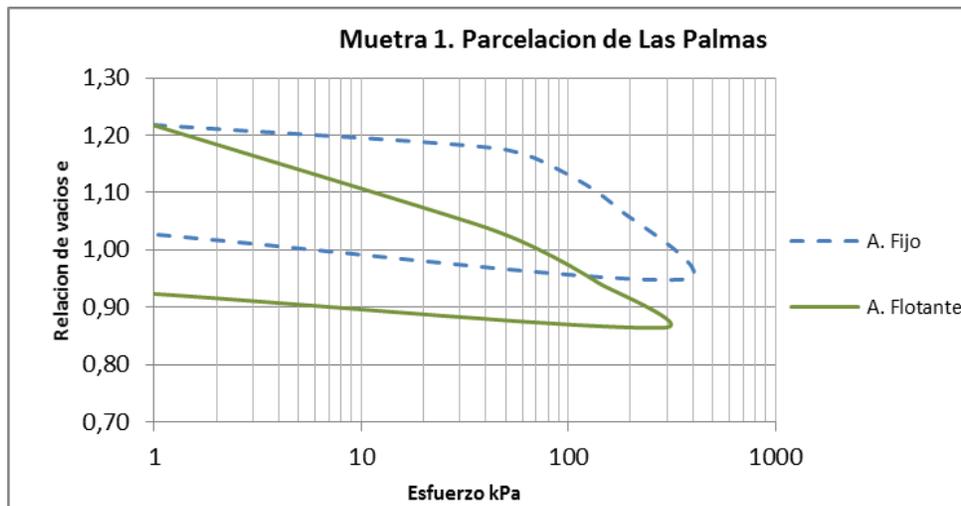


Ilustración 48: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 4

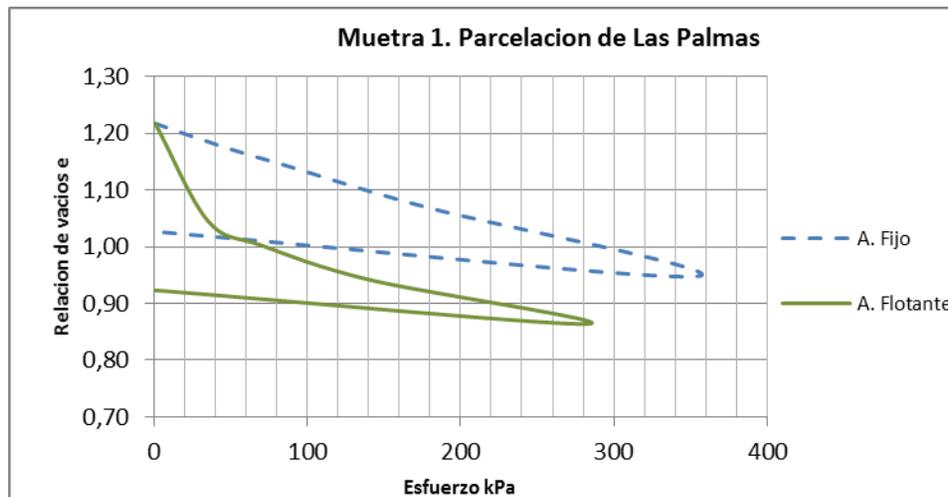


Ilustración 49: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 4

Como se puede observar en la ilustración 48, la curva de consolidación de anillo fijo, ante esfuerzos iguales a los de la curva de consolidación de anillo flotante, tiene una respuesta elástica menos inmediata, es decir, la respuesta elástica en la curva de anillo fijo no es instantánea, sino que por el contrario permite identificar el inicio de la zona virgen.

En la ilustración 50 se presenta la información general de la muestra 5, la clasificación según la USCS, los valores de los límites líquido y plástico, el contenido de humedad, la relación de vacíos y el valor de gravedad específica.

Muestra #:	5
Imagen:	
Localización	Parcelacion via las Palmas
Profundidad (m):	3,1
Humedad (%):	49%
WP (%):	38%
WL (%):	61%
	MH: Limo de alta
Clasificación según (USCS):	compresibilidad
Gs:	2,30
eo:	1,12

Ilustración 50: Información general muestra 5

En la tabla 6 se muestran los parámetros obtenidos en ambos ensayos de consolidación para la muestra 5.

Tabla 6: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 5

	P' c (kPa)	av (m²/kN)	mv (m²/kN)	Cc (m²/kN)	Cs (m²/kN)	Cv (m²/año)	K (m/año)
Anillo Fijo	163	0,00080	0,00038	0,504	0,030	12,743	0,0473
Anillo Flotante	112	0,00088	0,00042	0,443	0,050	4,298	0,0175
Diferencia porcentual (%)	31%	-10%	-10%	12%	-68%	66%	63%

En la ilustración 51 se puede observar la curva de consolidación obtenida en ambos ensayos para la muestra 5, que en este caso se denomina la muestra 2 de la Parcelación de las Palmas.

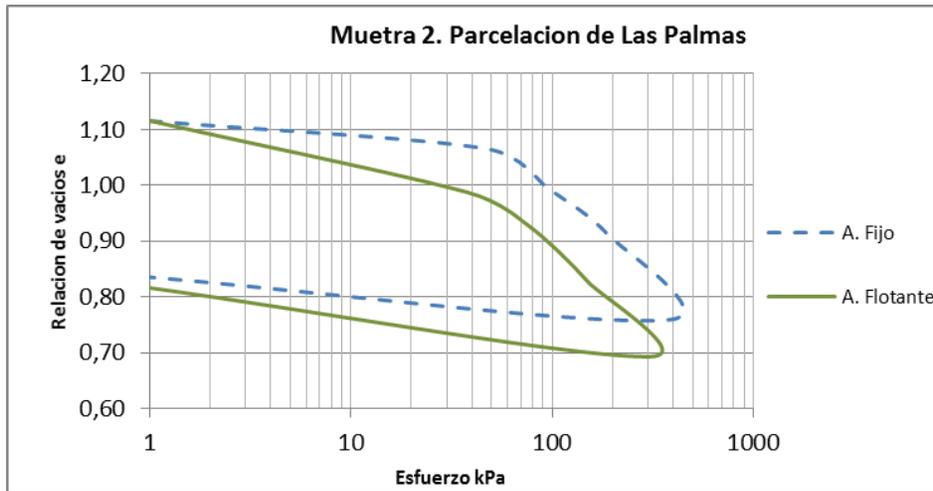


Ilustración 51: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 5

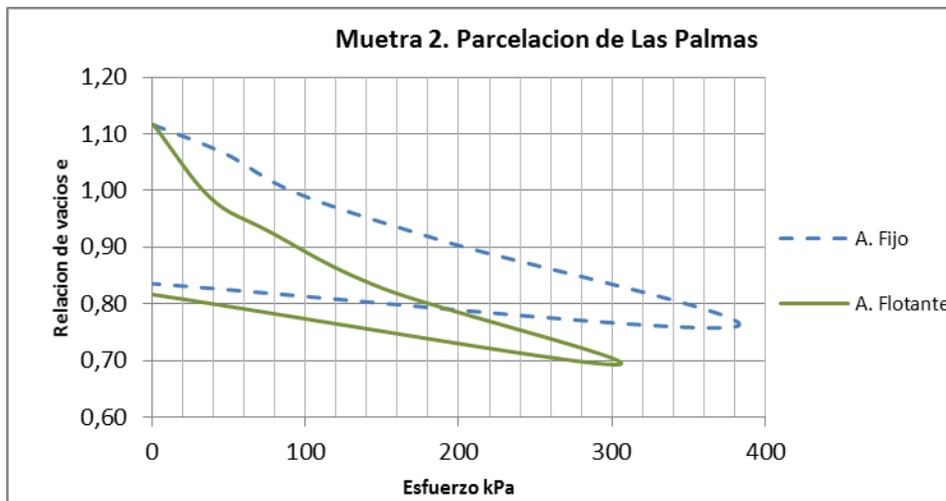


Ilustración 52: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 5

En la ilustración 51 se puede observar como en ambas curvas de consolidación la zona virgen inicia ante el mismo esfuerzo, aunque los parámetros de consolidación son distintos las curvas presentan cierta similitud como por ejemplo la antes mencionada, nuevamente y como en la muestra 4, la curva de consolidación de anillo flotante muestra un respuesta más inmediata en el tramo de deformación inicial, ya que dicho tramo de la curva tienen una mayor pendiente que en las curva de consolidación de anillo fijo.

En la ilustración 53 se presenta la información general de la muestra 6, la clasificación según la USCS, los valores de los límites líquido y plástico, el contenido de humedad, la relación de vacíos y el valor de gravedad específica.

Muestra #:	6
Imagen:	
Localización	Parcelacion via las Palmas
Profundidad (m):	4,1
Humedad (%):	52%
WP (%):	48%
WL (%):	74%
	MH: Limo de alta
Clasificación según (USCS):	compresibilidad
Gs:	1,92
eo:	1,00

Ilustración 53: Información general muestra 6

En la tabla 7 se muestran los parámetros obtenidos en ambos ensayos de consolidación para la muestra 6.

Tabla 7: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 6

	P'c (kPa)	av (m ² /kN)	mv (m ² /kN)	Cc (m ² /kN)	Cs (m ² /kN)	Cv (m ² /año)	K (m/año)
Anillo Fijo	190	0,00056	0,00028	0,470	0,017	17,843	0,0490
Anillo Flotante	160	0,00068	0,00034	0,453	0,015	9,864	0,0327
Diferencia porcentual (%)	16%	-21%	-21%	4%	16%	45%	33%

En la ilustración 54 se puede observar la curva de consolidación obtenida en ambos ensayos para la muestra 6, que en este caso se denomina la muestra 3 de la Parcelación de las Palmas.

La ilustración 54 muestra un comportamiento similar durante ambos ensayos de la muestra, aunque si bien las curvas son muy similares, se presentan diferencias en los resultados finales de cada ensayo de consolidación, es decir, en los parámetros obtenidos con anillo fijo y en los obtenidos con anillo flotante. Que aunque sea poca la diferencia se refleja en el cálculo de asentamientos.

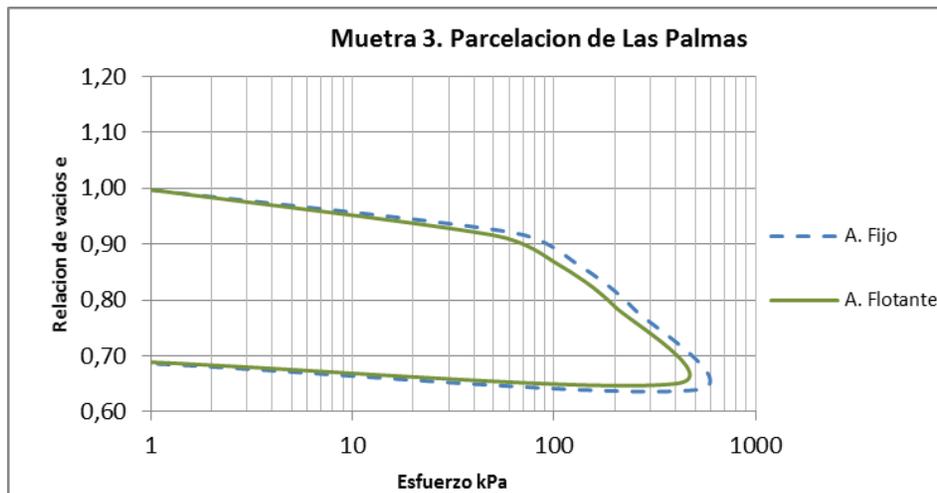


Ilustración 54: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 6

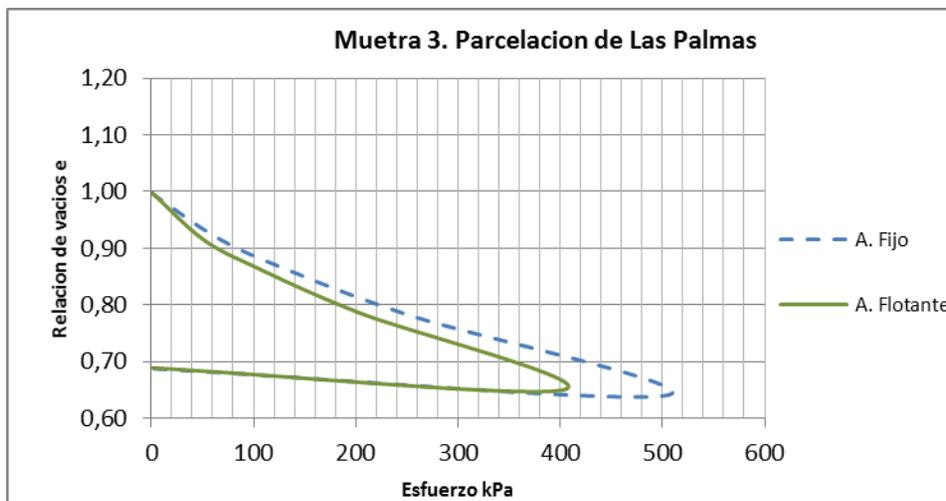


Ilustración 55: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 6

En la ilustración 56 se presenta la información general de la muestra 7, la clasificación según la USCS, los valores de los límites líquido y plástico, el contenido de humedad, la relación de vacíos y el valor de gravedad específica.

A partir de la muestra 7 corresponden las muestras del sitio 3, campus de las Palmas de la EIA.

Muestra #:	7
Imagen:	
Localización	Campus EIA - Palmas
Profundidad (m):	1,8
Humedad (%):	47%
WP (%):	33%
WL (%):	36%
	ML: Limo de baja
Clasificación según (USCS):	compresibilidad
Gs:	2,23
e_o:	1,04

Ilustración 56: Información general muestra 7

En la tabla 8 se muestran los parámetros obtenidos en ambos ensayos de consolidación para la muestra 7.

Tabla 8: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 7

	P' c (kPa)	av (m ² /kN)	mv (m ² /kN)	Cc (m ² /kN)	Cs (m ² /kN)	Cv (m ² /año)	K (m/año)
Anillo Fijo	61	0,000433	0,000212	0,182	0,020	35,870	0,0745
Anillo Flotante	75	0,000680	0,000333	0,228	0,027	31,864	0,1040
Diferencia porcentual (%)	-23%	-57%	-57%	-26%	-30%	11%	-40%

Como se puede observar en los resultados de los parámetros para la muestra 7, todos son mayores en los obtenidos mediante el ensayo de consolidación de anillo flotante y tanto el coeficiente de compresibilidad como el coeficiente de compresibilidad volumétrica son un 57% mayor a los obtenidos en el ensayo de consolidación de anillo fijo.

En la ilustración 57 se puede observar la curva de consolidación obtenida en ambos ensayos para la muestra 7, que en este caso se denomina la muestra 1 del campus EIA de las Palmas.

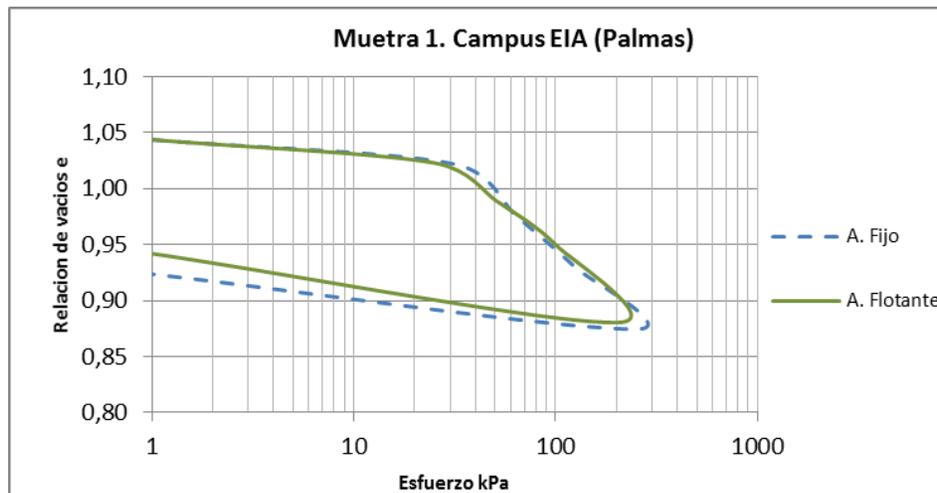


Ilustración 57: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 7

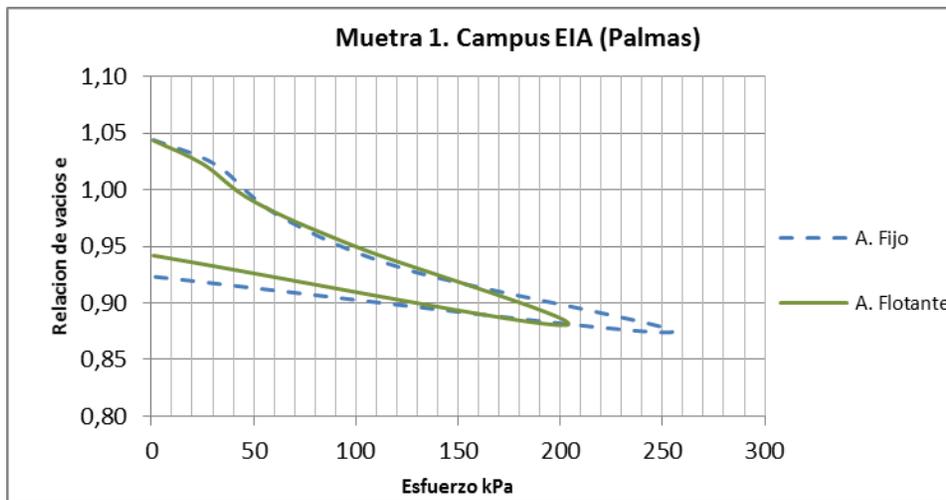


Ilustración 58: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 7

Como se puede observar en la ilustración 57, ambas curvas de consolidación muestran un comportamiento similar, particularmente en la respuesta elástica y en el tramo de curva virgen, aunque son similares, los parámetros obtenidos son diferentes.

En la ilustración 59 se presenta la información general de la muestra 8, la clasificación según la USCS, los valores de los límites líquido y plástico, el contenido de humedad, la relación de vacíos y el valor de gravedad específica.

Muestra #:	8
Imagen:	
Localización	Campus EIA - Palmas
Profundidad (m):	2,1
Humedad (%):	50%
WP (%):	33%
WL (%):	54%
	MH: Limo de alta
Clasificación según (USCS):	compresibilidad
Gs:	2,23
e_o:	1,11

Ilustración 59: Información general muestra 8

En la tabla 9 se muestran los parámetros obtenidos en ambos ensayos de consolidación para la muestra 8.

Tabla 9: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante muestra 8

	P' c (kPa)	av (m ² /kN)	mv (m ² /kN)	Cc (m ² /kN)	Cs (m ² /kN)	Cv (m ² /año)	K (m/año)
Anillo Fijo	110	0,000390	0,000185	0,164	0,020	42,100	0,0762
Anillo Flotante	60	0,000558	0,000264	0,187	0,036	24,765	0,0641
Diferencia porcentual (%)	45%	-43%	-43%	-14%	-80%	41%	16%

Como se puede observar en la tabla 9, existen grandes diferencias entre los parámetros obtenidos en un ensayo y el otro, esta diferencia se puede observar en la curva de consolidación en ambos ensayos.

En la ilustración 60 se puede observar la curva de consolidación obtenida en ambos ensayos para la muestra 8, que en este caso se denomina la muestra 2 del campus EIA de las Palmas.

Para la muestra 8 las curvas de consolidación muestran una variación tanto en la forma como en las pendientes de los tramos, variación que se refleja en los parámetros de consolidación.

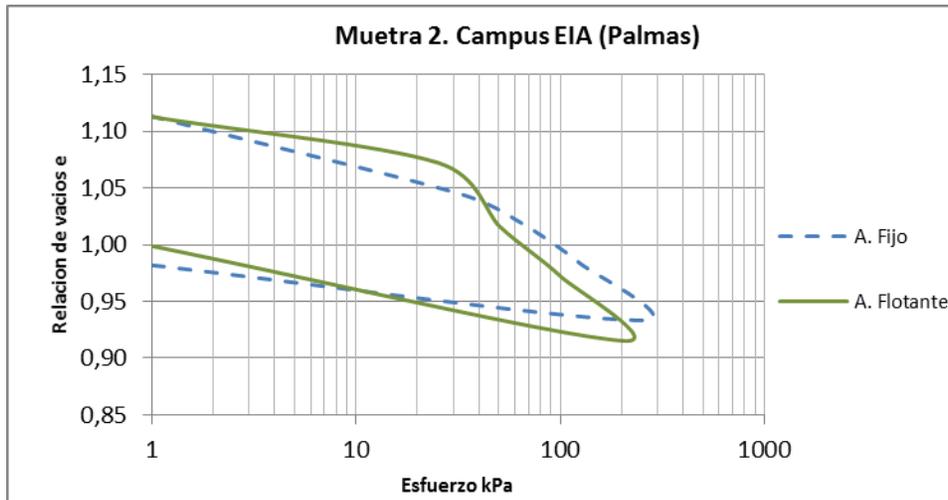


Ilustración 60: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica muestra 8

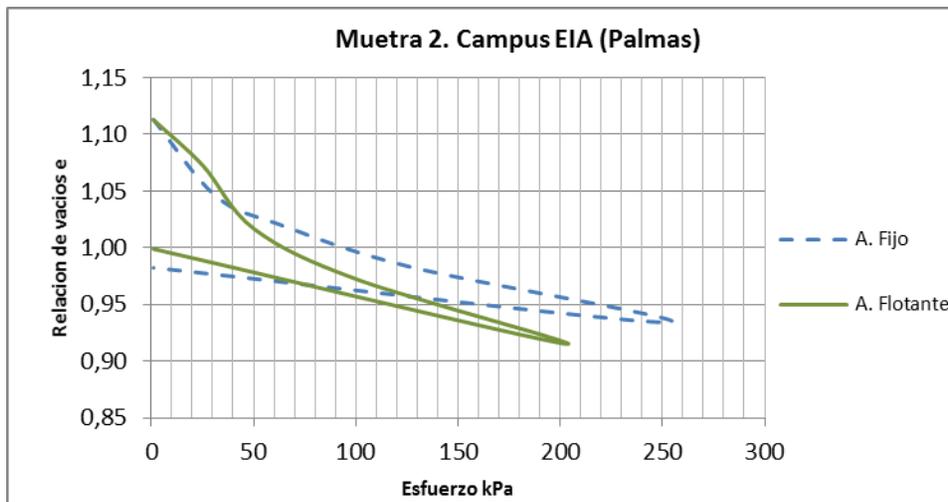


Ilustración 61: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 8

En la ilustración 62 se presenta la información general de la muestra 9, la clasificación según la USCS, los valores de los límites líquido y plástico, el contenido de humedad, la relación de vacíos y el valor de gravedad específica.

Muestra #:	9
Imagen:	
Localización	Campus EIA - Palmas
Profundidad (m):	2,4
Humedad (%)	50%
WP (%):	58%
WL (%):	63%
	MH: Limo de alta
Clasificación según (USCS):	compresibilidad
Gs:	2,26
eo:	1,13

Ilustración 62: Información general muestra 9

En la tabla 10 se muestran los parámetros obtenidos en ambos ensayos de consolidación para la muestra 9.

Tabla 10: Parámetros de consolidación anillo fijo y anillo flotante

	$P'c$ (kPa)	av (m ² /kN)	mv (m ² /kN)	Cc (m ² /kN)	Cs (m ² /kN)	Cv (m ² /año)	K (m/año)
Anillo Fijo	100	0,00050	0,00024	0,210	0,014	37,432	0,0863
Anillo Flotante	90	0,00076	0,00036	0,255	0,023	28,756	0,1005
Diferencia porcentual (%)	10%	-52%	-52%	-21%	-62%	23%	-16%

En la ilustración 63 se puede observar la curva de consolidación obtenida en ambos ensayos para la muestra 9, que en este caso se denomina la muestra 3 del campus EIA de las Palmas.

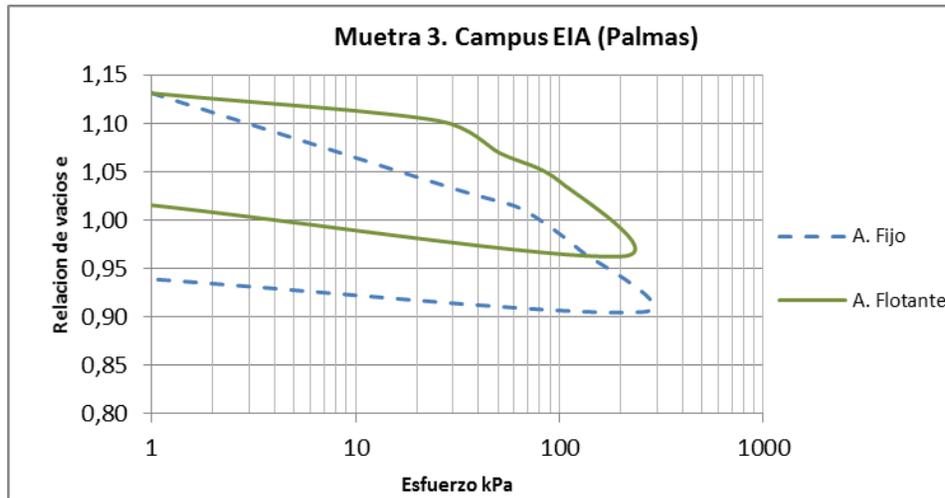


Ilustración 63: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala logarítmica, muestra 9

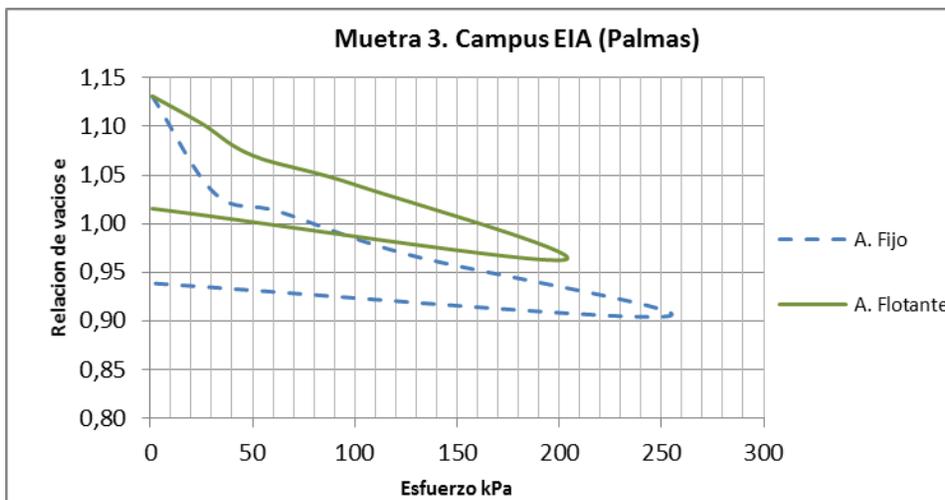


Ilustración 64: Curva de consolidación anillo fijo y anillo flotante escala aritmética, muestra 9

Como se puede observar en todas las curvas de consolidación presentadas por número de muestra, ninguna es igual, si bien son muestras idénticas los parámetros obtenidos en el ensayo de consolidación de anillo fijo difieren en algunas muestras en porcentajes mayores y en otras en porcentajes menores a los obtenidos en el ensayo de consolidación de anillo flotante.

Las diferencias en un ensayo y otro se enmarcan en los asentamientos, tanto por consolidación como en los asentamientos elásticos.

Los resultados del ensayo de corte (anexos) permitieron estimar de manera directa el módulo de elasticidad de las muestras, con el fin de calcular los asentamientos elásticos por varias teorías y formulas. Además muestran la incidencia de una prueba respecto a la otra en el cálculo de asentamientos elásticos, ya que el ensayo de consolidación también permite estimar el módulo de elasticidad de cada una de las muestras.

Para el cálculo de asentamientos elásticos se requiere el valor del módulo de elasticidad del suelo (E_s), tanto el ensayo de corte como el ensayo de consolidación permiten estimarlo directamente de los resultados de cada ensayo, para este trabajo se obtuvieron 3 módulos de elasticidad por muestra es decir un módulo de elasticidad del ensayo de Corte, otro módulo de elasticidad del ensayo de consolidación de anillo fijo y otro módulo de elasticidad del ensayo de consolidación de anillo flotante.

En la tabla 11 se muestran los resultados de los asentamientos elásticos calculados con el parámetro (E_s) obtenido de varios tipos de ensayos (Corte, Consolidación anillo fijo y Consolidación anillo flotante) con el esfuerzo y carga antes mencionado. Para realizar el cálculo de (E_s) a través de los resultados de los ensayos de corte y de consolidación fue necesario asumir un valor predeterminado para el módulo de poisson (ν) del suelo, los valores asumidos para cada sitio corresponden a los siguientes.

Valores de (ν) para limos, Sitio 1, Vereda Sajonia $\nu=0,31$

Sitio 2, Parcelación de las palmas $\nu=0,33$

Sitio 3, Campus E.I.A Palmas $\nu=0,35$

Así una vez asumido el valor del módulo de poisson para cada sitio se calculó el módulo de elasticidad (E_s) y posterior a esto los asentamientos elásticos. Los valores calculados para el módulo de elasticidad (E_s) se muestran en la tabla

Tabla 11: Valor del módulo de elasticidad (E_s), por sitio y por ensayo

Sitio	E_s (kPa) Corte	E_s (kPa) Anillo fijo	E_s (kPa) Anillo flotante
Vereda Sajonia	9106	2492	2434
Parcelación Palmas	17384	1783	1622
EIA Palmas	7466	3372	2357

Los resultados del ensayo de corte y los cálculos del módulo de elasticidad y los asentamientos elásticos por cada una de las teorías hacen parte de los anexos del presente trabajo.

Las condiciones para el cálculo de los asentamientos en cuanto a profundidad de desplante, ancho de la zapata y carga aplicada, se pueden observar en la ilustración 65.

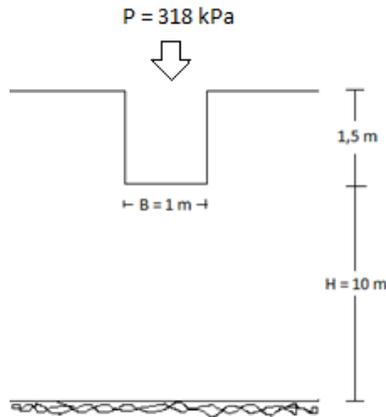


Ilustración 65: Condiciones para cálculo de asentamientos

Así, establecidas las condiciones de carga y la geometría de los elementos, se calcularon los asentamientos elásticos, en la tabla 12 se muestran los resultados para todas las muestras de suelo recuperadas. El cálculo de cada asentamiento hace parte de los anexos del presente trabajo.

Tabla 12: Asentamientos elásticos por teoría y módulo de elasticidad (Es)

Sitio	Muestra	Formula	Asentamientos (cm)		
			E. Corte	C. Anillo Fijo	C. Anillo Flotante
1	1,2,3	Teoría elástica	▼ 2,54	▲ 9,26	▲ 9,49
2	4,5,6		▼ 1,32	▲ 12,88	▲ 14,16
3	7,8,9		▼ 3,06	▲ 6,77	▲ 9,69
1	1,2,3	Harr (1966)	▼ 3,54	▲ 12,94	▲ 13,25
2	4,5,6		▼ 1,83	▲ 17,83	▲ 19,61
3	7,8,9		▼ 4,19	▲ 9,29	▲ 13,29
1	1,2,3	Stainbrenner (1934)	▼ 1,44	▲ 5,26	▲ 5,38
2	4,5,6		▼ 0,73	▲ 7,15	▲ 7,86
3	7,8,9		▼ 1,66	▲ 3,67	▲ 5,25
1	1,2,3	Jambu (1956)	▼ 2,25	▲ 8,22	▲ 8,41
2	4,5,6		▼ 1,18	▲ 11,49	▲ 12,63
3	7,8,9		▼ 2,74	▲ 6,07	▲ 8,69
1	1,2,3	Boussinesq	▼ 3,54	▲ 12,94	▲ 13,25
2	4,5,6		▼ 1,83	▲ 17,83	▲ 19,60
3	7,8,9		▼ 4,19	▲ 9,28	▲ 13,28
1	1,2,3	Juárez y Rico (1995)	▼ 0,17	▲ 0,63	▲ 0,65
2	4,5,6		▼ 0,09	▲ 0,88	▲ 0,97
3	7,8,9		▼ 0,21	▲ 0,47	▲ 0,67

Como se puede observar en la tabla 12, los asentamientos elásticos calculados a partir del módulo de elasticidad obtenido en el ensayo de consolidación de anillo flotante son en

un 100% mayores a los calculados a partir del módulo de elasticidad obtenido en el ensayo de consolidación de anillo fijo y en el ensayo de corte, esto quiere decir según los estudios realizados a la teoría elástica para el cálculo de asentamientos, que el módulo de elasticidad obtenido a partir de los resultados del ensayo de consolidación de anillo flotante, es menor al que se obtiene a partir de los resultados tanto del ensayo de consolidación de anillo fijo como del ensayo de corte.

Además como se puede observar en la tabla 12 existen varias fórmulas para el cálculo de asentamientos elásticos, dentro del alcance del presente trabajo no está analizar las diferencias en los resultados de una formula a otra.

A continuación se presentan los resultados de los asentamientos elásticos por sitio.

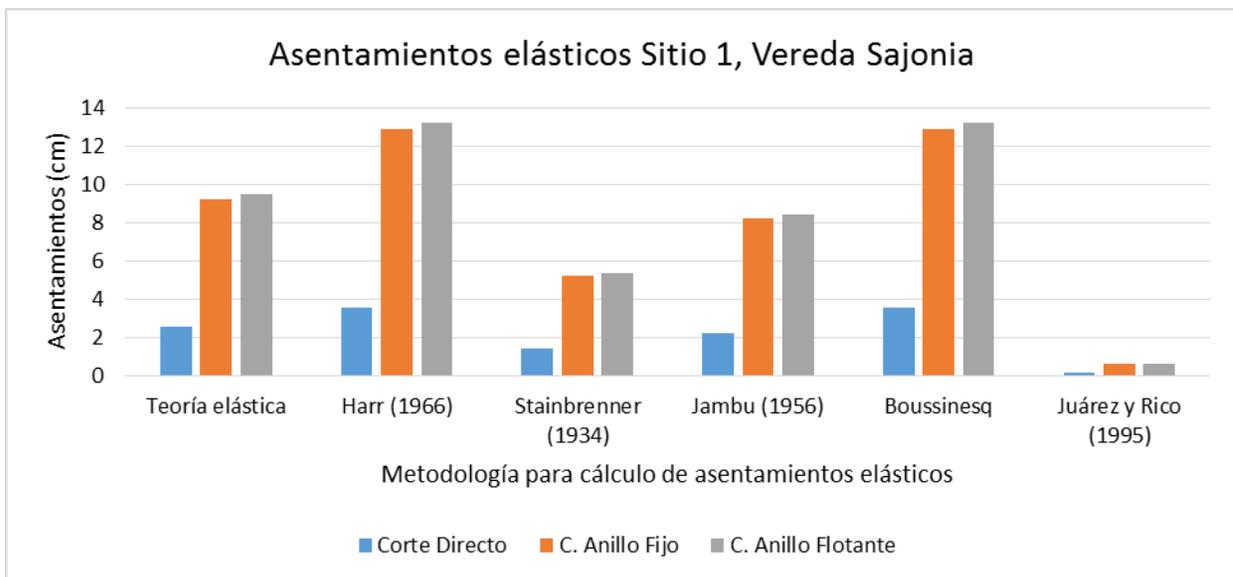


Ilustración 66: Asentamientos elásticos Vereda Sajonia

Como se mencionó anteriormente los asentamientos elásticos son mayores cuando se calculan con el módulo de elasticidad obtenido a partir del ensayo de consolidación de anillo flotante, a partir de la ilustración 66 se puede afirmar que para el sitio 1, los asentamientos elásticos son en el orden de mayor a menor así: Consolidación anillo flotante, consolidación anillo fijo y ensayo de corte.

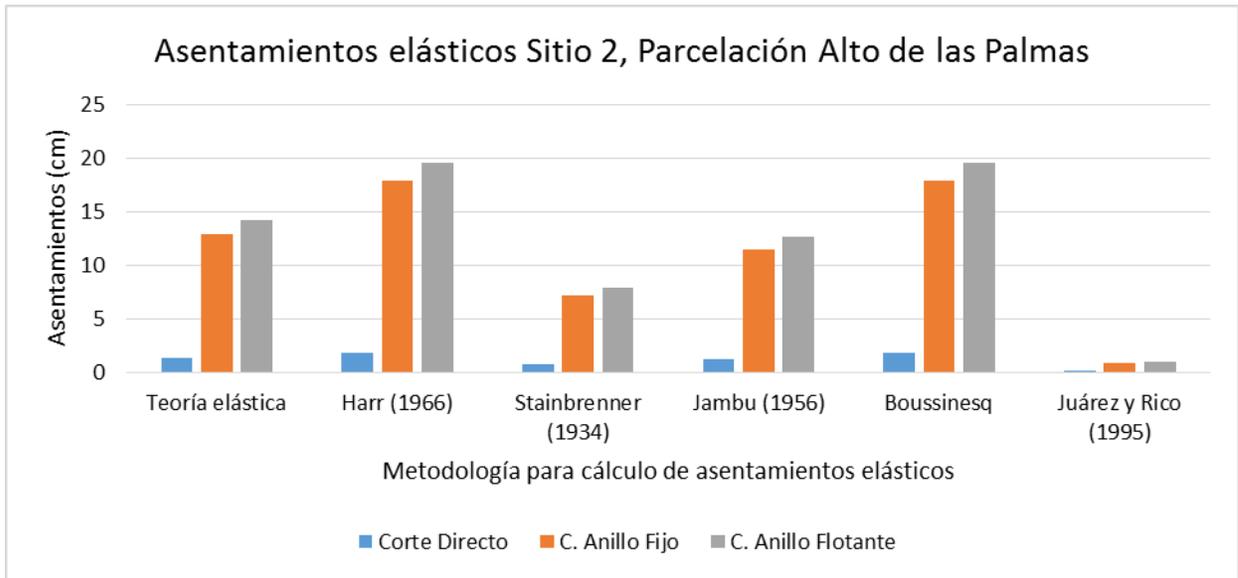


Ilustración 67: Asentamientos elásticos Parcelación Alto de las Palmas

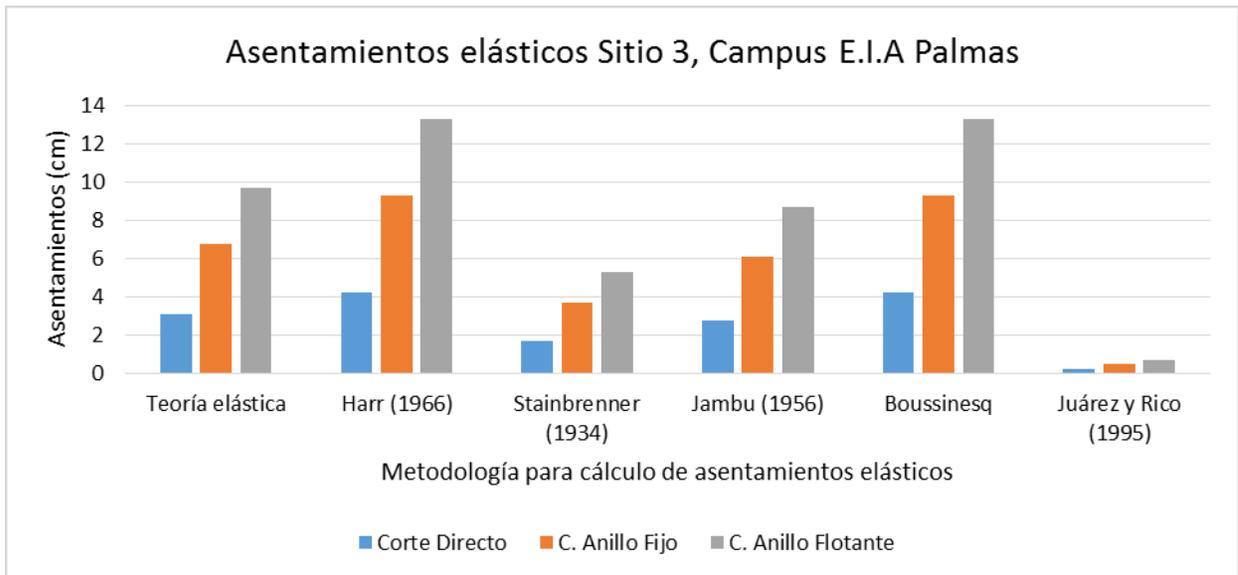


Ilustración 68: Asentamientos elásticos Campus EIA de las Palmas

Las ilustraciones 67 y 68 muestran como en la ilustración 61 un comportamiento lineal en cuanto al cálculo de asentamientos lineales calculados a partir del módulo de elasticidad obtenido en un ensayo u otro, es decir, siguen siendo para el sitio 2 Parcelación del alto de las palmas y para el sitio 3 campus EIA de las palmas mayores los asentamientos elásticos calculados a partir del ensayo de consolidación de anillo flotante, además se conserva el orden en la magnitud de los asentamientos de mayor a menor así: anillo flotante, anillo fijo y ensayo de corte, independientemente de la ecuación que se utilice.

A continuación, en la tabla 13 se muestran los resultados del cálculo de asentamientos por consolidación, con los parámetros obtenidos del ensayo de consolidación de anillo fijo y de anillo flotante, y para las mismas condiciones de la cimentación y de carga anteriormente mencionadas.

Tabla 13: Asentamientos por consolidación anillo fijo y anillo flotante

Sitio	Muestra	Asentamientos (cm)	
		Anillo Fijo	Anillo Flotante
1	1	▲ 6,7	▼ 4,0
	2	▼ 9,4	▲ 10,9
	3	▼ 4,3	▲ 9,6
2	4	▲ 8,3	▼ 5,5
	5	▼ 9,1	▲ 13,4
	6	▼ 6,4	▲ 7,6
3	7	▼ 11,1	▲ 12,3
	8	▼ 5,1	▲ 12,0
	9	▼ 5,8	▲ 10,9

Como se puede observar en la tabla 12, en un 78% los asentamientos calculados con los parámetros obtenidos del ensayo de Consolidación de Anillo Flotante son mayores que los calculados con los parámetros obtenidos del ensayo de Consolidación de Anillo Fijo.

La anterior afirmación permite inferir que existe incidencia del tipo de ensayo de consolidación en el cálculo de asentamientos tanto por consolidación como los asentamientos elásticos.

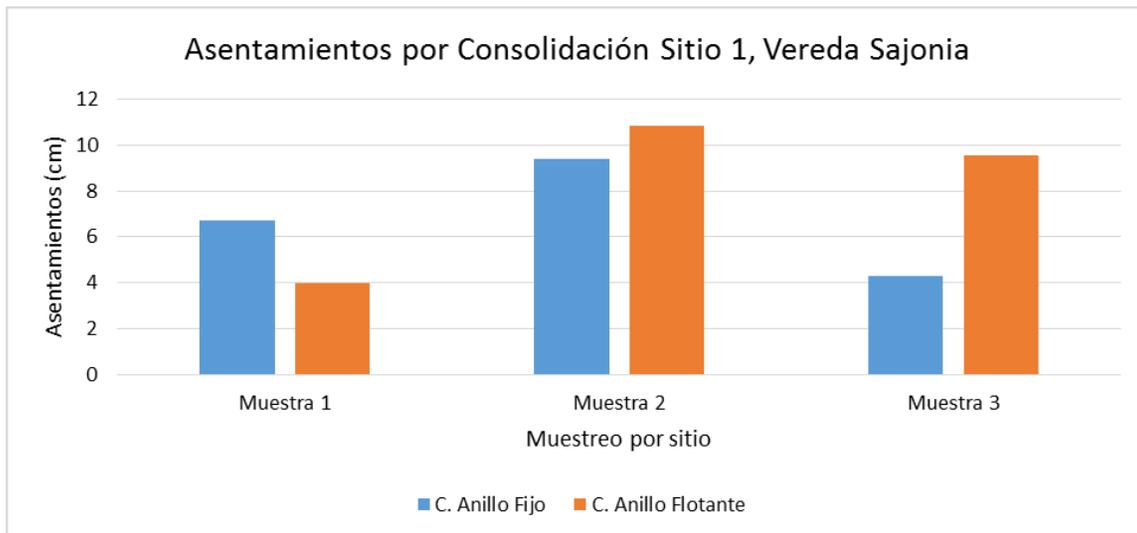


Ilustración 69: Asentamientos por consolidación Sitio 1

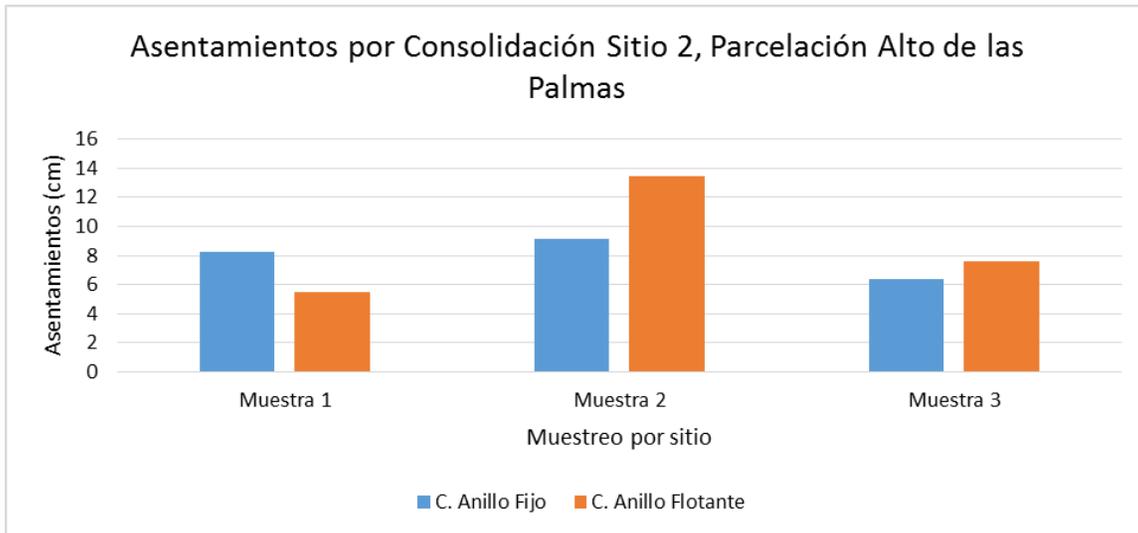


Ilustración 70: Asentamientos por consolidación Sitio 2

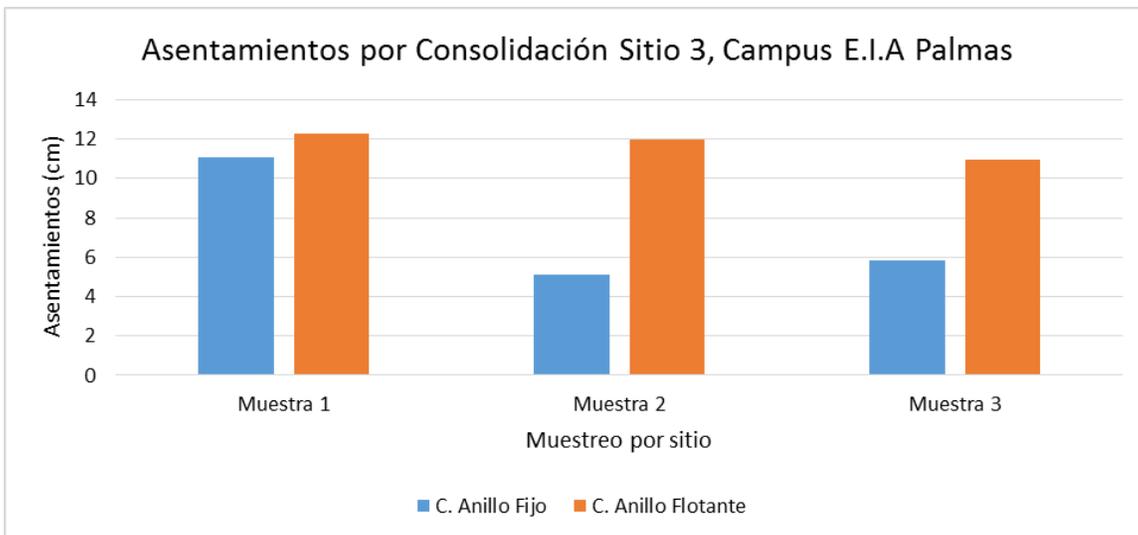


Ilustración 71: Asentamientos por consolidación Sitio 3

Como se puede observar a partir de todas ilustraciones y tablas antes presentadas, las diferencias en los parámetros obtenidos a partir de un tipo de ensayo de consolidación u otro, tienen gran incidencia no solo en el cálculo de asentamientos por consolidación sino en el cálculo de los asentamientos elásticos, esto es cierto ya que en definitiva los asentamientos totales, serán la suma de los asentamientos por consolidación y los asentamientos elásticos.

Cálculo computarizado de asentamientos.

Además del cálculo de asentamientos con base en los parámetros obtenidos a partir de los ensayos de consolidación, se calcularon asentamientos utilizando un programa de cómputo desarrollado por Rocscience inc. Empresa que desarrolla programas de cómputo para el análisis tanto en 2D como en 3D en el área de la geotecnia, desde 1996.

El programa utilizado es el Settle 3D que sirve para realizar análisis de asentamientos y de consolidación. Settle 3D es un programa para el análisis vertical en 3D de la consolidación vertical y de los asentamientos del suelo bajo fundaciones por la acción de cargas en la superficie o terraplenes. El programa combina la simplicidad del análisis unidimensional con las capacidades de potencia y visualización de programas tridimensionales más sofisticados.

El programa permite crear rápidamente perfiles complejos de suelo y las condiciones de carga, y ver los resultados en 3 -dimensiones. El modelo puede ser por etapas, y el análisis de consolidación dependiente del tiempo se puede realizar incluyendo la consolidación primaria y secundaria (creep) a intervalos de tiempo definidos por el usuario. Una variedad de tipos de materiales lineales y no lineales pueden ser modelados, la ubicación del nivel freático y las condiciones de drenaje también se pueden especificar de acuerdo al análisis que se quiera efectuar.

Se calcularon por cada sitio 3 asentamientos para los tres valores de E_s obtenidos a partir de los ensayos realizados. A continuación se presentan los resultados.



Ilustración 72: Cálculo de asentamientos programa de cómputo. (Tomada de Settle 3d)

Vereda Sajonia	Es	9106 kPa
	Mv	0.00029 m ² /kN

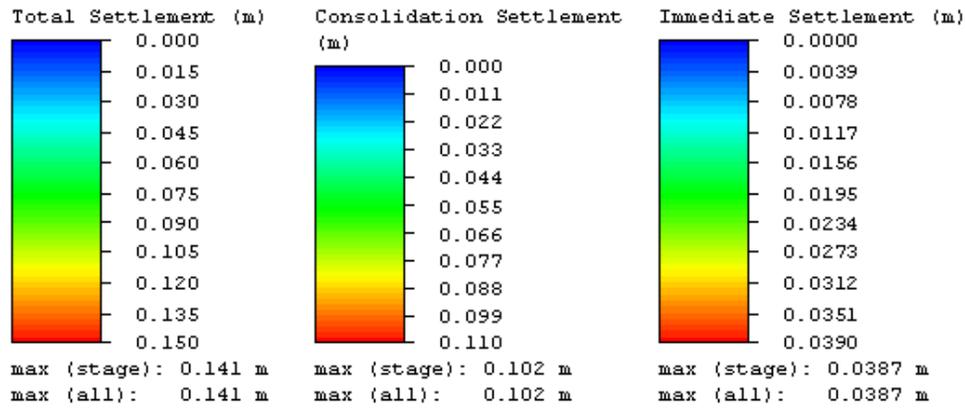


Ilustración 73: Asentamientos Sitio 1, Es = 9106 kPa

Vereda Sajonia	Es	2492 kPa
	Mv	0.00029 m ² /kN

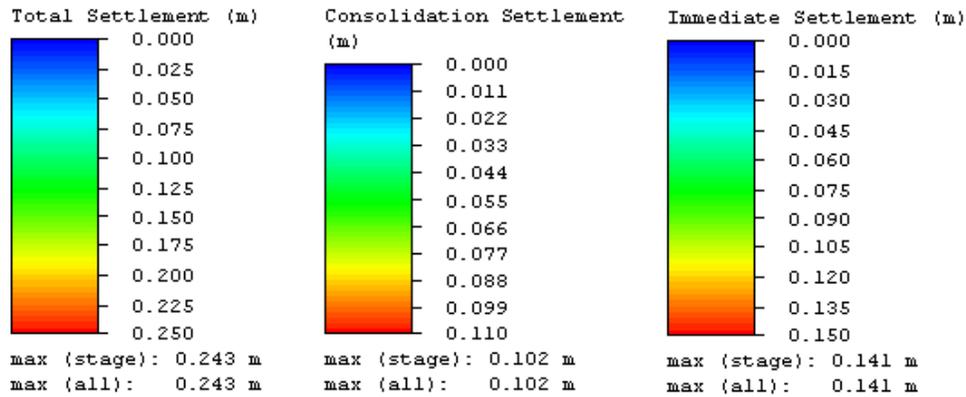


Ilustración 74: Asentamientos Sitio 1, Es = 2492 kPa

Vereda Sajonia	Es	2434	kPa
	Mv	0.00029	m ² /kN

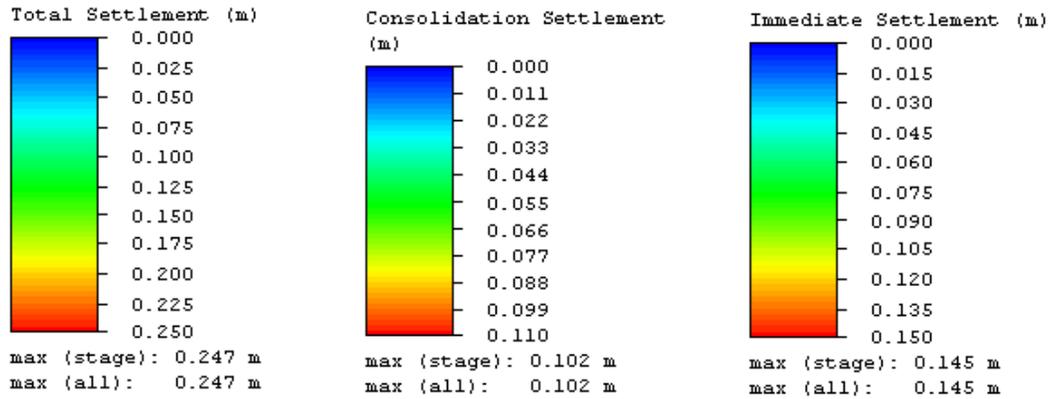


Ilustración 75: Asentamientos Sitio 1, Es = 2434 kPa

Palmas	Es	17384	kPa
	Mv	0.00032	m ² /kN

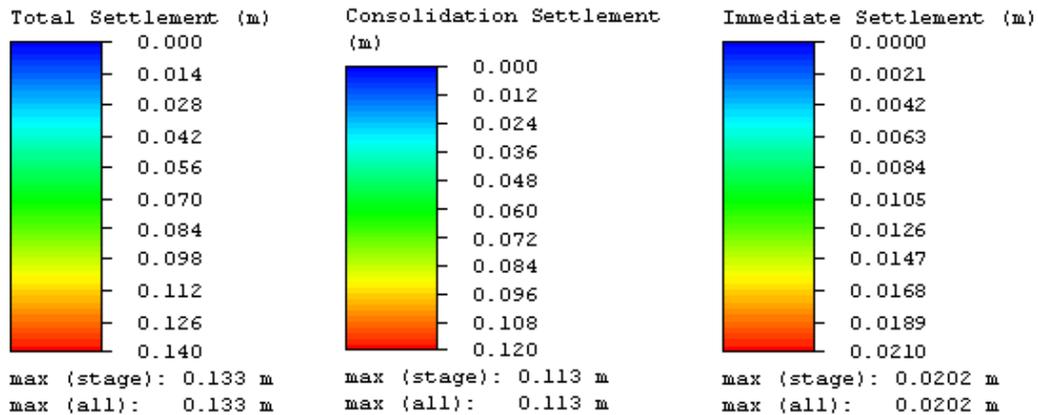


Ilustración 76: Asentamientos Sitio 2, Es = 17384 kPa

Palmas	Es	1783	kPa
	Mv	0.00032	m ² /kN

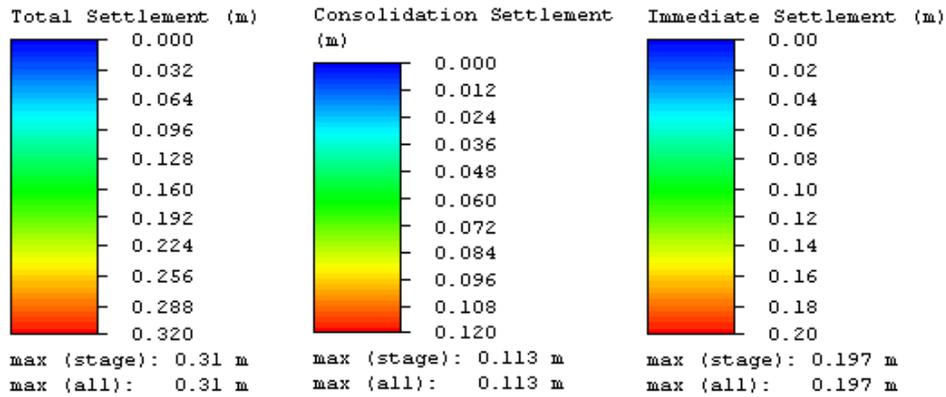


Ilustración 77: Asentamientos Sitio 2, Es = 1783 kPa

Palmas	Es	1622	kPa
	Mv	0.00032	m ² /kN

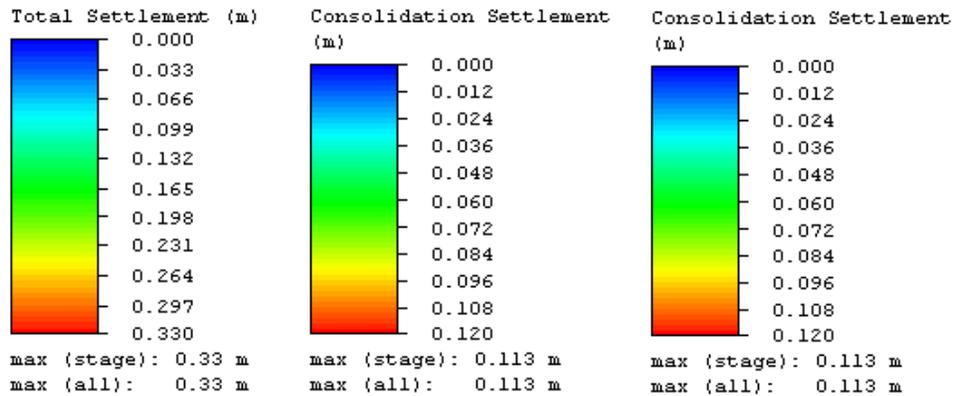


Ilustración 78: Asentamientos Sitio 2, Es = 1622 kPa

E.I.A	Es	7466	kPa
	Mv	0.00021	m ² /kN

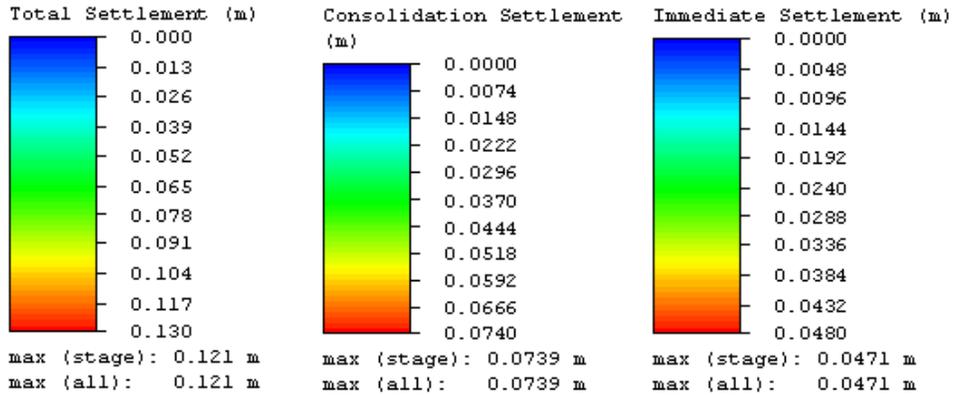


Ilustración 79: Asentamientos Sitio 3, Es = 7466 kPa

E.I.A	Es	3372	kPa
	Mv	0.00021	m ² /kN

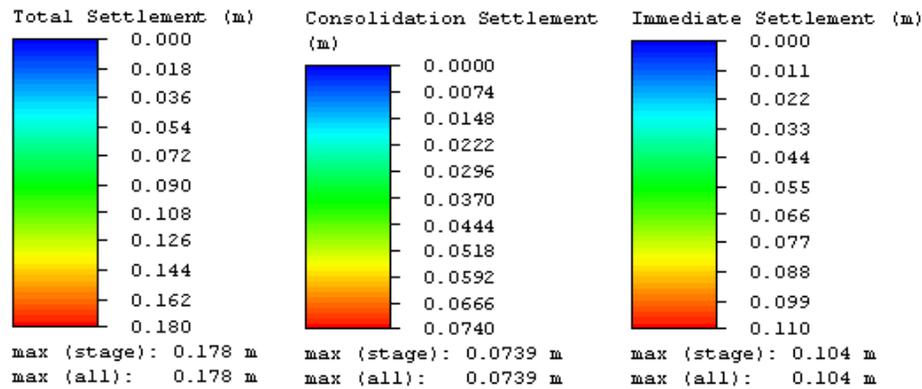


Ilustración 80: Asentamientos Sitio 3, Es = 3372 kPa

E.I.A	Es	2357	kPa
	Mv	0.00021	m ² /kN

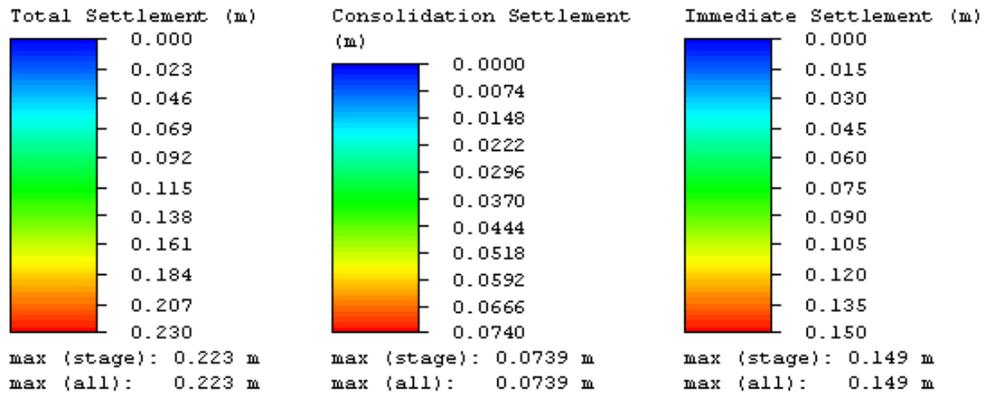


Ilustración 81: Asentamientos Sitio 3, Es = 2357 kPa

5. Conclusiones

- El tipo de ensayo de consolidación incide directamente en los parámetros de consolidación, lo que se ve reflejado en el cálculo de asentamientos, es decir, según las muestras analizadas y los sitios seleccionados, se puede afirmar que existe incidencia del tipo de ensayo de consolidación en el cálculo de asentamientos en suelos residuales de anfibolita y que los asentamientos por consolidación son mayores calculados con los parámetros del ensayo de consolidación de anillo flotante.
- El tipo de ensayo de consolidación u otro del que se pueda obtener el módulo de elasticidad del suelo incide en el cálculo los asentamientos elásticos. El módulo de elasticidad Es obtenido a partir de los resultados del ensayo de corte es mayor a los obtenidos a partir de los ensayos de consolidación. Entre los ensayos de consolidación es común obtener un mayor módulo de elasticidad a partir del ensayo de consolidación de anillo fijo en suelos residuales de anfibolita.
- Los asentamientos elásticos son inversamente proporcionales al módulo de elasticidad, es decir, a mayor módulo de elasticidad menores asentamientos elásticos en condiciones similares de carga, de allí que con base en la anterior conclusión se pueda afirmar que los asentamientos elásticos son mayores cuando se calculan a partir del módulo de elasticidad obtenido del ensayo de consolidación de anillo flotante en suelos residuales de anfibolita.
- Los resultados de los ensayos de consolidación son diferentes en muestras idénticas cuando se realizan en las dos modalidades, anillo fijo y anillo flotante. Tanto los parámetros como los cálculos que se puedan derivar del ensayo tendrán la incidencia del tipo de ensayo de consolidación.
- El módulo de elasticidad Es obtenido a partir de los ensayos de consolidación presenta valores más parecidos entre este tipo de ensayos que respecto al ensayo de corte.
- El tipo de ecuación utilizada para el cálculo de asentamientos elásticos incide en los resultados de los asentamientos totales, toda vez que estos se calculan como la suma de los asentamientos por consolidación y los asentamientos elásticos.
- Ambos tipos de ensayo de consolidación, anillo fijo y anillo flotante, tienen los mismos requerimientos en cuanto a la preparación de las muestras, la diferencia en el montaje radica en que el diámetro del anillo del equipo de anillo flotante es mayor 8 mm al de anillo fijo, lo cual incide a la hora de tomar las muestras con tubo *shelby*, esto debido a que el diámetro de los tubos por lo general es igual al diámetro del anillo del equipo de anillo fijo, esto hace entonces que la toma de las muestras para el ensayo de consolidación de anillo flotante sea en bloques, lo cual

no tiene incidencia en los resultados toda vez que las muestras para el ensayo de consolidación de anillo fijo también se tomen de esta manera.

- Los tiempos de ejecución del ensayo de consolidación no dependen del tipo de ensayo que se está realizando, además los incrementos de carga y el número de días que dura el ensayo lo rige la norma del INVIAS para la consolidación unidimensional de suelos.
- El grado de alteración de las muestras incide directamente en los resultados del ensayo de consolidación, se recomienda que las muestras estén lo menos alterada posible ya que con el tiempo pueden perder humedad lo que genera mayor dificultad a la hora del montaje y de la preparación de la muestra una vez se va a poner en el anillo, modificando las condiciones de la muestra ya que en algunos casos deben ser remodeladas para poder realizar el montaje al inicio del ensayo.
- La capacidad portante del suelo depende directamente de los parámetros de resistencia al corte del suelo y no del tipo de ecuación empleada para determinarla. El suelo del sitio 3 independientemente del tipo de ecuación empleada es el que tiene mayor capacidad portante, seguido del suelo del sitio 1 y del suelo del sitio 2, este orden se conserva independientemente de la ecuación utilizada para el cálculo de la capacidad portante.
- Determinar la humedad al final de cada ensayo de consolidación permite estimar indirectamente la condición inicial de los vacíos de la muestra, es decir la relación de vacíos inicial antes de cada ensayo.
- Según la Norma Colombiana Sismo resistente NSR-10 los límites para los asentamientos totales en estructuras aisladas a 20 años no deben ser superiores a 30 cm, siempre y cuando no se afecte la funcionalidad de la estructura, para los casos analizados, los asentamientos calculados por ambas pruebas están por debajo del límite, es decir cumplen con los admisibles.

6 Bibliografía

Albeiro de Jesús Rendón Rivera, J. H. (11 de 5 de 2011). ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO EN EL ORIENTE CERCANO A MEDELLÍN, COMO APOYO A LA BUSQUEDA DE ACTIVIDAD TECTÓNICA RECIENTE. Medellín, Antioquia, Colombia.

Arango, A. (1983). *Manual de laboratorio de Mecánica de Suelos*.

Bowles, J. E. (1982). *Propiedades geofísicas de los suelos*.

Concesión Aburrá-Oriente S.A. (5 de 3 de 2013). *Tunel Oriente*. Obtenido de Tunel Oriente: <http://tunelorientegaleon.com/productos1483949.html>

Crespo, C. V. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*.

Das, B. M. (1997). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Sacramento, California.

Escuela de Ingeniería en Construcción. (3 de 7 de 2009). *Escuela de Ingeniería en Construcción, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*. Obtenido de Escuela de Ingeniería en Construcción, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso:
http://icc.ucv.cl:8080/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/cortedirecto.pdf

Facultad de Ingeniería UNLP. (3 de 2 de 1987). *www.ing.unlp.edu.ar*. Recuperado el 2 de 10 de 2012, de www.ing.unlp.edu.ar:
<http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/Apunte%20de%20Resistencia%20al%20Corte%201.pdf>

González Caballero, M. (1 de 9 de 2010). *books.google*. Obtenido de books.google: http://books.google.com.co/books?id=0srD--d-TQMC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Haymarí, G. M. (4 de 3 de 2013). *Uciencia*. Obtenido de Uciencia:
<http://uciencia.uma.es/Banco-de-Imagenes/Ciencia/Roca-Metamorfica-Anfibolita>

Holtz and Kovacs. (1981). *An introduction to Geotechnical Engineering*. New Jersey.

HUMBOLDT. (21 de 10 de 2010). *Laboratorio de suelos-consolidación*. Obtenido de Laboratorio de suelos-consolidación:
<http://www.humboldtmg.com/digital-catalog/Spanish/catalog-pdf/Page%2056.pdf>

Iglesias, C. (1997). *Mecánica del suelo*.

INGEOMINAS. (1978). *Recursos minerales de Colombia, Publicaciones geológicas especiales*. Bogotá.

Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2007). *CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL DE LOS SUELOS*. Bogotá, Colombia.

Instituto Nacional de Vías INVIAS. (2007). *UNICAUCA*. Obtenido de UNICAUCA:
ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-154-07.pdf

Instituto Nacional de Vías, INVIAS. (21 de 10 de 2006). *OBTENCION DE MUESTRAS PARA PROBETAS DE ENSAYO MEDIANTE TUBOS DE PARED DELGADA*. Bogotá D.E, Cundinamarca, Colombia.

INVIAS. (7 de 5 de 2007). *DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS Y DEL LLENANTE MINERAL*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). Suelo. En *Mecánica de Suelos* (pág. 34). Mexico D.F.: Limusa.

Karl Terzaghi, R. B. (1958). *Mecánica de suelos de ingeniería práctica*. Buenos Aires: El Ateneo.

Lambe, W. (1991). *Mecánica de suelos*. Limusa.

Marquez, G. (1982). *Propiedades Ingenieriles de los Suelos*.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (1 de 1 de 2010). REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. BOGOTÁ, CUNDINAMARCA, COLOMBIA.

Sjursen, M. A. (23 de 8 de 2000). *Odometer test*. Recuperado el 3 de 10 de 2013, de Odometer test:
<http://www.ngi.no/no/Innholdsbokser/Referansjeprojekter-LISTER-/Beskrivelse-av-labforsok/Oedometer-test/>

Sowers, G. B. (1979). *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*.

Taylor. (1942). *Research on the consolidation of clays*.

Universidad Autonoma de Baja California. (2003).

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. (2009). *Facultad de Ingeniería Civil*. Obtenido de Facultad de Ingeniería Civil:
<http://www.fic.umich.mx/fic/documentos/Manual%20de%20Mecanica%20de%20Suelos%20II%20%288o%20Semestre%29.pdf>

Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (23 de 7 de 2009). *Universidad Nacional Abierta y a Distancia Colombia*. Recuperado el 13 de 10 de 2013, de Universidad Nacional Abierta y a Distancia Colombia:
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/30160/leccin_1_material_parental.html

Universidad Nacional de Rosario. (2 de 3 de 2004). Geología y geotecnia. Rosario, Santa Fe, Argentina.

Universidad Nacional de Rosario. (s.f). *Universidad de Rosario - Facultad de ciencias exactas Ingeniería y Agrimensura*. Obtenido de http://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Consolidacion%20unidim%20de%20suelos_2011s2.pdf

Wesley, L. D. (2010). *Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils*. New Jersey: Wiley.

Whitman, R. V. (2002). *Mecánica de suelos*.

7. ANEXOS

A continuación se presentan los resultados de todos los ensayos realizados.

Anexo 1: Resultados ensayo de consolidación.

Información general de la muestra 1

Densidad aparente	
Área anillo (cm ²)	31,66
Altura anillo (cm)	2,45
Volumen (cm ³)	77,57
Peso anillo solo (g)	109,70
Peso anillo mas suelo (g)	233,50
Peso suelo (g)	123,80
Densidad aparente (g/cm ³)	1,60
Densidad aparente (kg/m ³)	1596,04
Profundidad espécimen (m)	1,10
Esfuerzo geostático (kg/m ²)	1755,64
Carga (kg)	5,56
Carga real (kg)	0,56

Cuadro de esfuerzos anillo fijo muestra 1

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
0,5	15,79
1	31,59
2	63,17
4	126,34
8	252,68

Contenido de humedad muestra 1

Humedad natural	
Masa Tara (g)	30,50
Masa Tara + suelo (g) (húmeda)	168,30
Masa Tara + suelo (g) (seca)	131,90
w: Humedad (%)	0,36

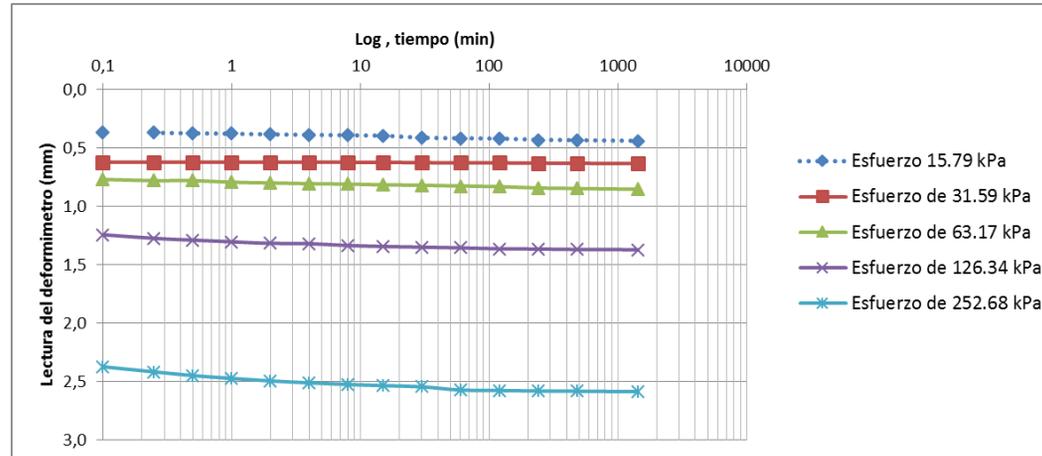
Lecturas del ensayo de consolidación anillo fijo muestra 1

Día	1	2	3	4	5
Carga	0.5 kg	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	1600				
6s	1783	1911	1985	2222	2787
15s	1785	1911	1990	2237	2809
30s	1787	1911	1990	2245	2825
1m	1789	1911	1997	2252	2837
2m	1792	1911	2000	2259	2848
4m	1794	1911	2003	2260	2856
8m	1796	1911,5	2005	2268	2863
15m	1798	1912	2008	2272	2868
30m	1807	1913	2010	2275	2873
1h	1809	1914	2013	2278	2887
2h	1811	1914	2016	2282	2889
4h	1816	1915	2021,5	2283	2891
8h	1818	1916	2024	2285	2892
24h	1821	1917	2027	2286	2894
Descarga					2687

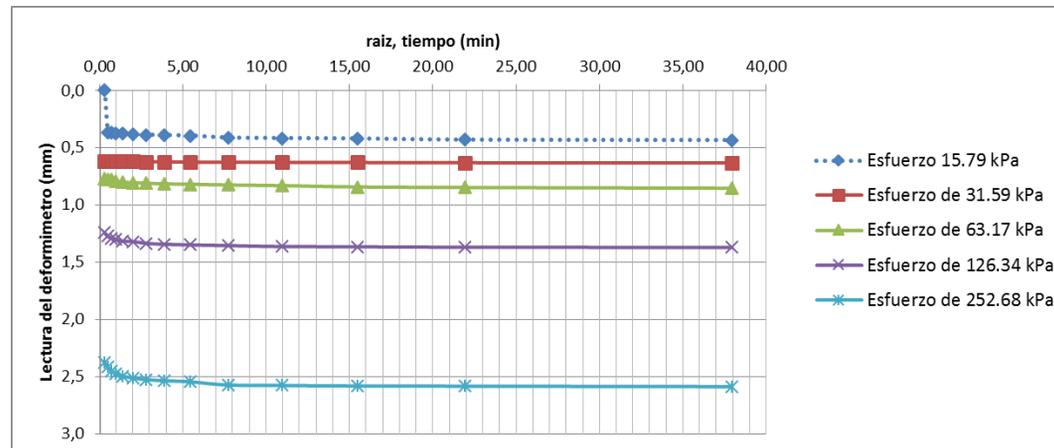
Avance real deformimetro anillo fijo muestra 1

Lectura real (Avance deformimetro)					
Carga	0.5 kg	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5
0	0				
6s	183	311	385	622	1187
15s	185	311	390	637	1209
30s	187	311	390	645	1225
1m	189	311	397	652	1237
2m	192	311	400	659	1248
4m	194	311	403	660	1256
8m	196	311,5	405	668	1263
15m	198	312	408	672	1268
30m	207	313	410	675	1273
1h	209	314	413	678	1287
2h	211	314	416	682	1289
4h	216	315	421,5	683	1291
8h	218	316	424	685	1292
24h	221	317	427	686	1294
Descarga					1087

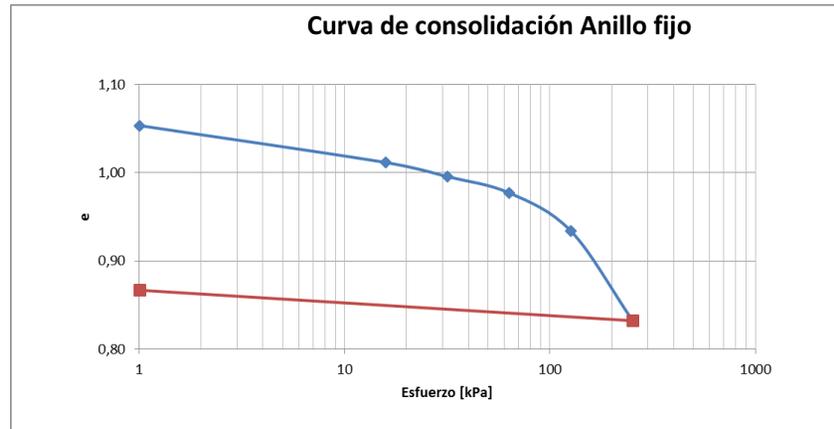
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo fijo muestra 1.



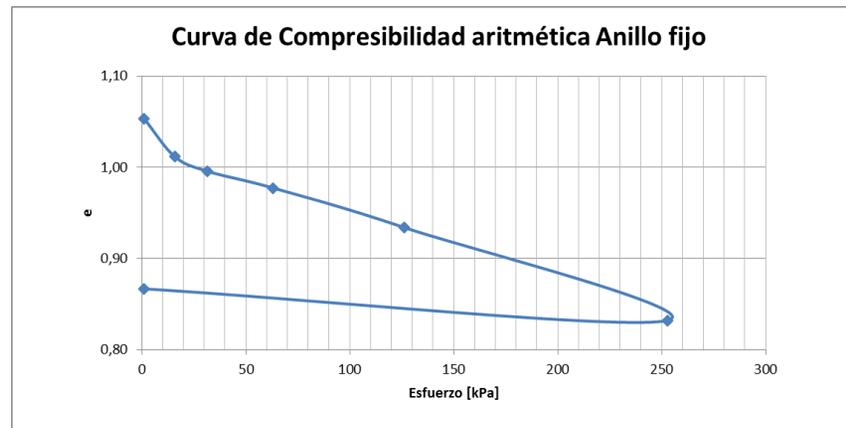
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo fijo muestra 1.



Curva de consolidación anillo fijo muestra 1.



Curva de compresibilidad aritmética anillo fijo muestra 1.



Cuadro de esfuerzos anillo flotante muestra 1

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
0,5	12,63
1	25,26
2	50,52
4	101,04
8	202,07

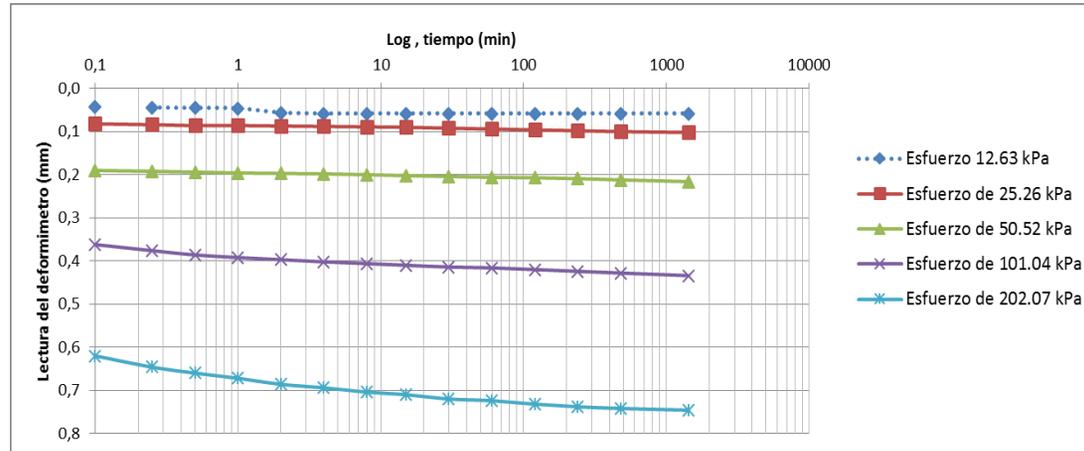
Lecturas del ensayo de consolidación anillo flotante muestra 1

Día	1	2	3	4	5
Carga	0.5 kg	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	299				
6s	320	340	394	480	609
15s	321	341	395	487	622
30s	321,5	342	396	492	629
1m	322	342	397	495	635
2m	327	342,5	397,5	497,5	642
4m	328	343	398	500	646
8m	328	343,5	399	502	651
15m	328	344	400	504	654
30m	328	345	401	506	659
1h	328	346	402	507	661
2h	328	347	402,5	509	665
4h	328	348	403,5	511	668
8h	328	349	405	513	670
24h	328	350	407	516	672
Descarga					481

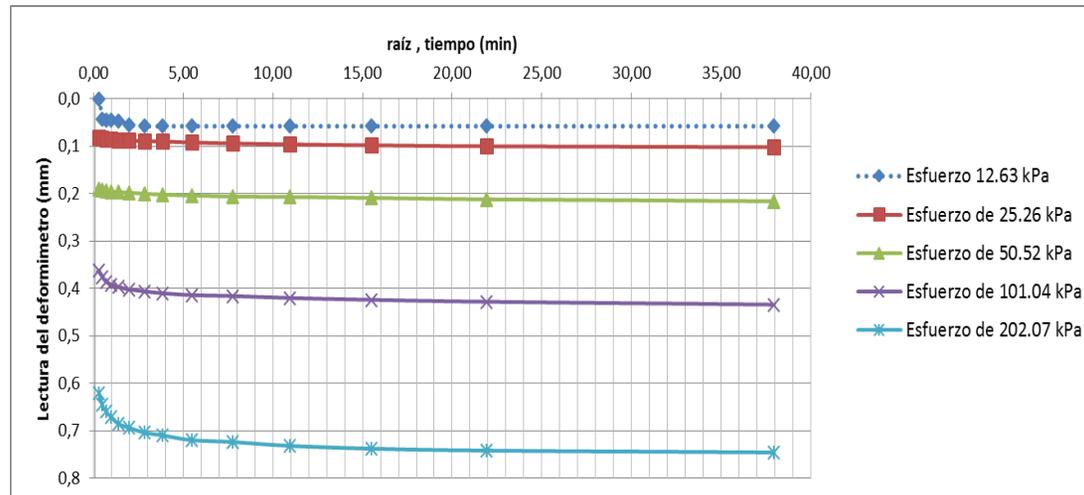
Avance real deformimetro anillo flotante muestra 1

Lectura real (Avance deformimetro)					
Carga	0.5 kg	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5
0	0				
6s	21	41	95	181	310
15s	22	42	96	188	323
30s	22,5	43	97	193	330
1m	23	43	98	196	336
2m	28	43,5	98,5	198,5	343
4m	29	44	99	201	347
8m	29	44,5	100	203	352
15m	29	45	101	205	355
30m	29	46	102	207	360
1h	29	47	103	208	362
2h	29	48	103,5	210	366
4h	29	49	104,5	212	369
8h	29	50	106	214	371
24h	29	51	108	217	373
Descarga					182

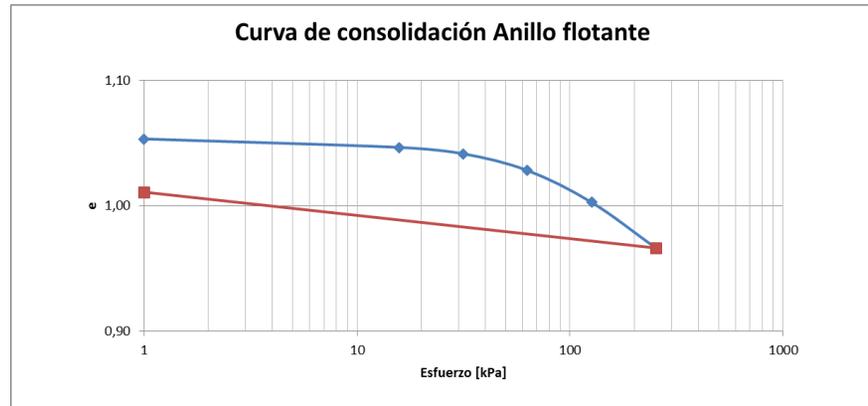
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo flotante muestra 1.



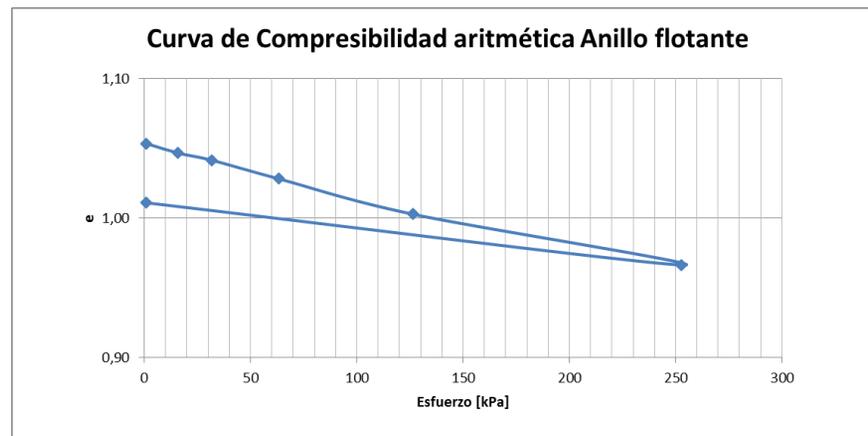
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo flotante muestra 1.



Curva de consolidación anillo flotante muestra 1.



Curva de compresibilidad aritmética anillo flotante muestra 1.



Información general de la muestra 2

Densidad aparente	
Área anillo (cm ²)	31,66
Altura anillo (cm)	2,45
Volumen (cm ³)	77,57
Peso anillo solo (g)	109,70
Peso anillo mas suelo (g)	212,80
Peso suelo (g)	103,10
Densidad aparente (g/cm ³)	1,33
Densidad aparente (kg/m ³)	1329,17
Profundidad espécimen (m)	5,20
Esfuerzo geostático (kg/m ²)	6911,70
Carga (kg)	21,88
Carga real (kg)	2,19

Cuadro de esfuerzos anillo fijo muestra 2

Cuadro de cargas (real a	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
2	63,17
4	126,34
8	252,68
16	505,37

Contenido de humedad muestra 2

Humedad natural	
Masa Tara (g)	28,50
Masa Tara + suelo (g) (humeda)	158,00
Masa Tara + suelo (g) (seca)	122,60
w: Humedad (%)	0,38

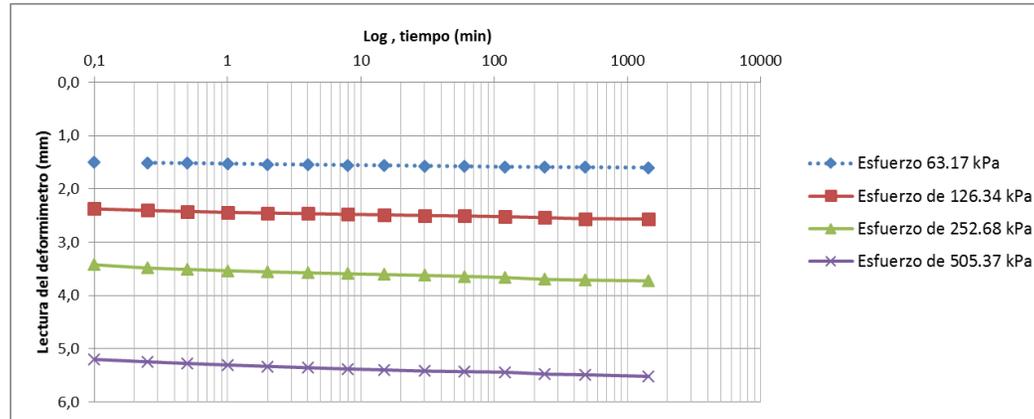
Lecturas del ensayo de consolidación anillo fijo muestra 2

Día	1	2	3	4
Carga	2 kg	4 kg	8 kg	16 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	2211			
6s	2958	3398	3922	4810
15s	2968	3413	3952	4832
30s	2972	3422	3966	4848
1m	2976	3431	3978	4862
2m	2981	3437	3989	4875
4m	2985	3443	3998	4888
8m	2989	3449	4007	4899
15m	2992	3454	4014	4908
30m	2996	3460	4022	4919
1h	3001	3465	4031	4925
2h	3005	3471	4042	4930
4h	3007	3480	4059	4947
8h	3009	3490	4066	4954
24h	3012	3492	4073	4969
Descarga				4582

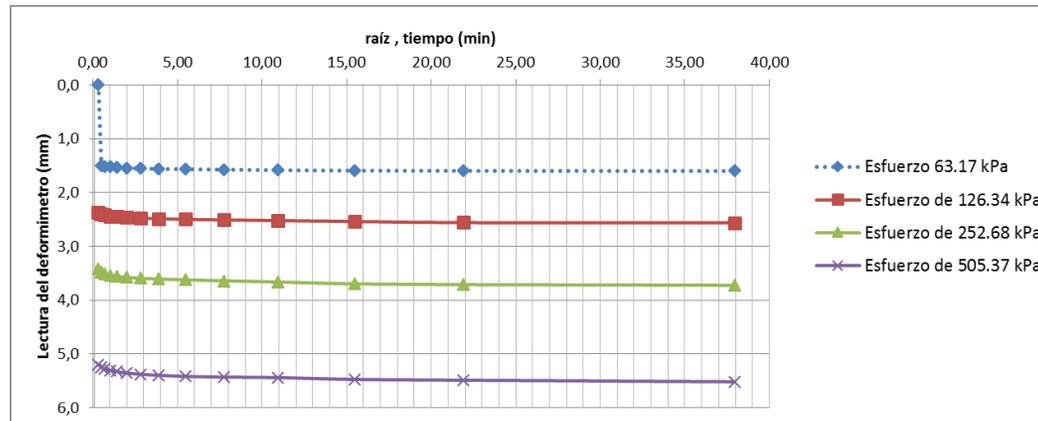
Avance real deformimetro anillo fijo muestra 2

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	2 kg	4 kg	8 kg	16 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	747	1187	1711	2599
15s	757	1202	1741	2621
30s	761	1211	1755	2637
1m	765	1220	1767	2651
2m	770	1226	1778	2664
4m	774	1232	1787	2677
8m	778	1238	1796	2688
15m	781	1243	1803	2697
30m	785	1249	1811	2708
1h	790	1254	1820	2714
2h	794	1260	1831	2719
4h	796	1269	1848	2736
8h	798	1279	1855	2743
24h	801	1281	1862	2758
Descarga				2371

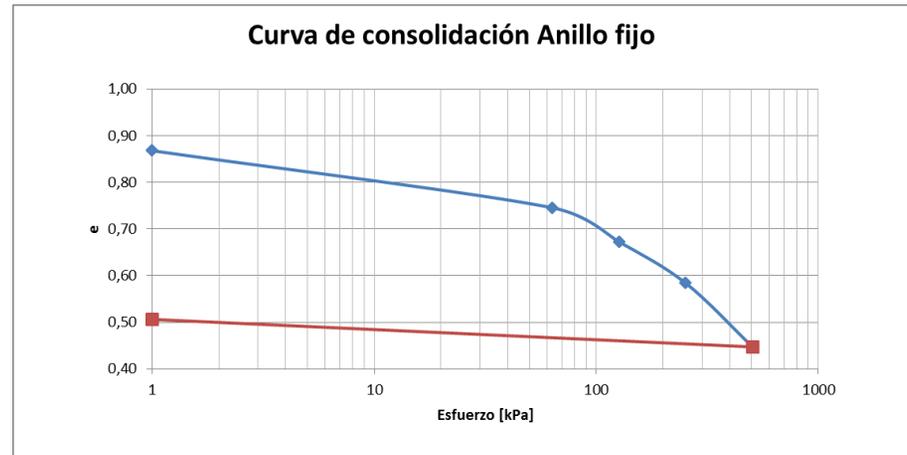
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo fijo muestra 2.



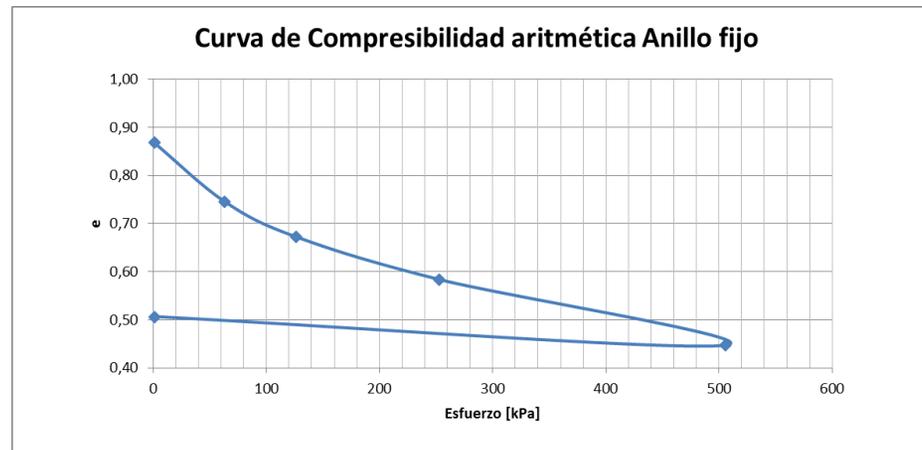
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo fijo muestra 2.



Curva de consolidación anillo fijo muestra 2.



Curva de compresibilidad aritmética anillo fijo muestra 2.



Cuadro de esfuerzos anillo flotante muestra 2

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
2	50,52
4	101,04
8	202,07
16	404,14

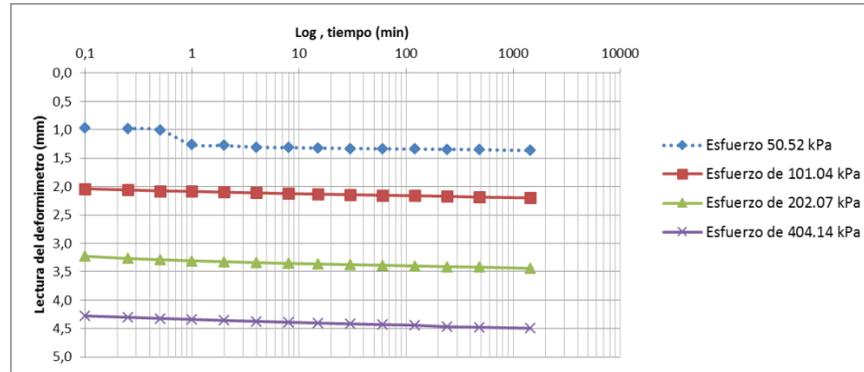
Lecturas del ensayo de consolidación anillo flotante muestra 2.

Día	1	2	3	4
Carga	2 kg	4 kg	8 kg	16 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	432			
6s	913	1450	2045	2570
15s	918	1461	2064	2582
30s	932	1469	2075	2592
1m	1060	1474	2085	2601
2m	1069	1481	2093	2610
4m	1084	1487	2101	2618
8m	1088	1493	2108	2626
15m	1091	1498	2113	2633
30m	1095	1503	2119	2640
1h	1098	1508	2124	2647
2h	1101	1512	2130	2652
4h	1102	1517	2136	2665
8h	1106	1524	2141	2670
24h	1113	1531	2152	2679
Descarga				2395

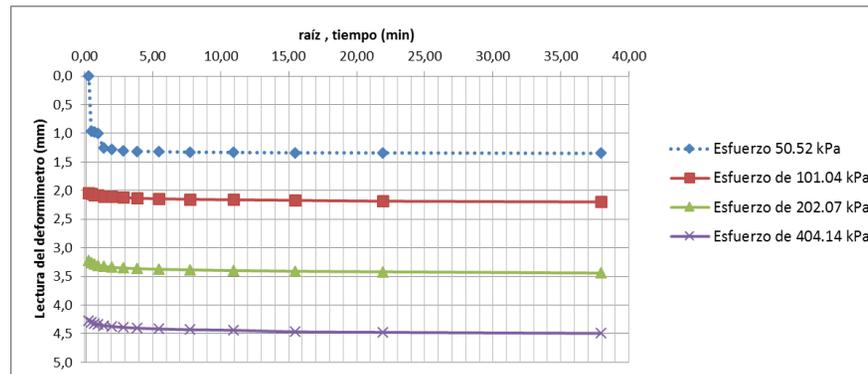
Avance real deformimetro anillo flotante muestra 2

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	2 kg	4 kg	8 kg	16 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	481	1018	1613	2138
15s	486	1029	1632	2150
30s	500	1037	1643	2160
1m	628	1042	1653	2169
2m	637	1049	1661	2178
4m	652	1055	1669	2186
8m	656	1061	1676	2194
15m	659	1066	1681	2201
30m	663	1071	1687	2208
1h	666	1076	1692	2215
2h	669	1080	1698	2220
4h	670	1085	1704	2233
8h	674	1092	1709	2238
24h	681	1099	1720	2247
Descarga				1963

Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo flotante muestra 2.



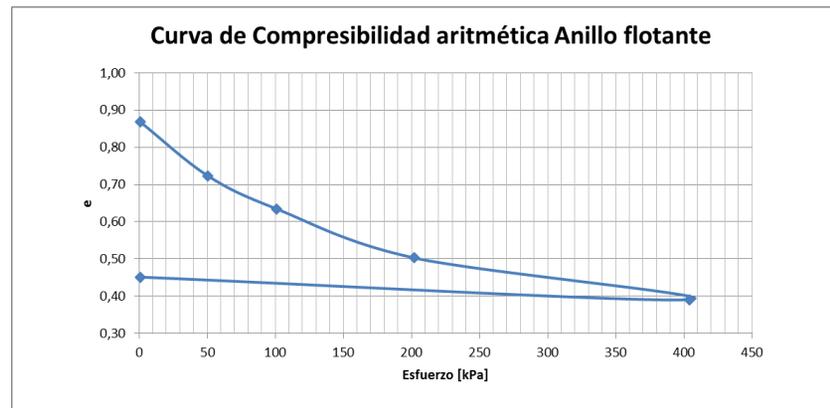
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo flotante muestra 2.



Curva de consolidación anillo flotante muestra 2.



Curva de compresibilidad aritmética anillo flotante muestra 2.



Información general de la muestra 3

Densidad aparente	
Área anillo (cm ²)	31,66
Altura anillo (cm)	2,45
Volumen (cm ³)	77,57
Peso anillo solo (g)	109,70
Peso anillo mas suelo (g)	217,80
Peso suelo (g)	108,10
Densidad aparente (g/cm ³)	1,39
Densidad aparente (kg/m ³)	1393,6
Profundidad espécimen (m)	9,10
Esfuerzo geostático (kg/m ²)	12682,07
Carga (kg)	40,15
Carga real (kg)	4,02

Cuadro de esfuerzos anillo fijo muestra 3

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
4	126,34
8	252,68
16	505,37
32	1010,74

Contenido de humedad muestra 3

Humedad natural	
Masa Tara (g)	42,80
Masa Tara + suelo (g) (humeda)	178,20
Masa Tara + suelo (g) (seca)	136,50
w: Humedad (%)	0,45

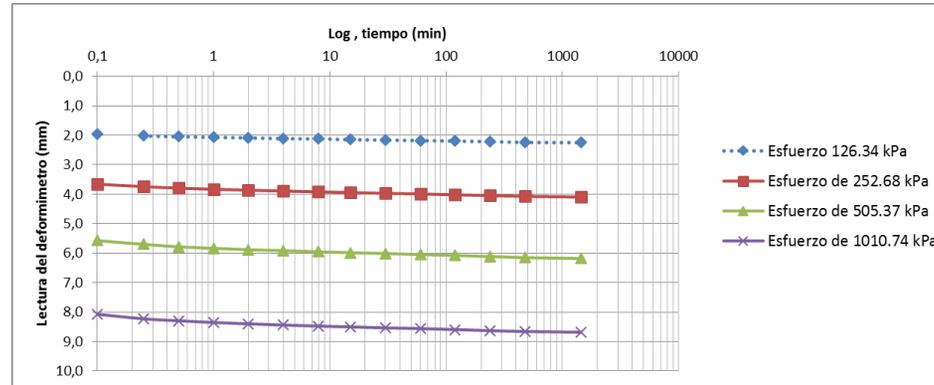
Lecturas del ensayo de consolidación anillo fijo muestra 3

Día	1	2	3	4
Carga	4 kg	8 kg	16 kg	32 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	1492			
6s	2473	3322	4279	5528
15s	2502	3363	4342	5605
30s	2514	3390	4384	5639
1m	2526	3409	4410	5668
2m	2535	3424	4434	5691
4m	2549	3439	4451	5712
8m	2553	3452	4469	5729
15m	2565	3464	4484	5743
30m	2573	3478	4499	5759
1h	2581	3488	4516	5771
2h	2590	3503	4530	5789
4h	2600	3516	4550	5807
8h	2612	3529	4568	5820
24h	2617	3541	4582	5834
Descarga				5210

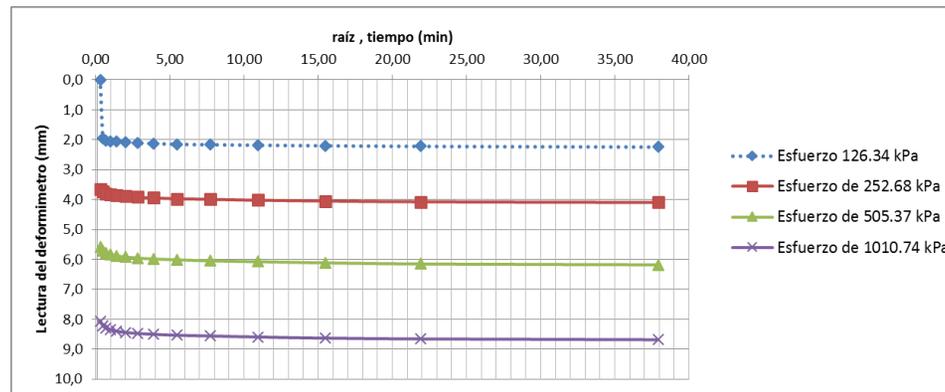
Avance real deformimetro anillo fijo muestra 3

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	4 kg	8 kg	16 kg	32 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	981	1830	2787	4036
15s	1010	1871	2850	4113
30s	1022	1898	2892	4147
1m	1034	1917	2918	4176
2m	1043	1932	2942	4199
4m	1057	1947	2959	4220
8m	1061	1960	2977	4237
15m	1073	1972	2992	4251
30m	1081	1986	3007	4267
1h	1089	1996	3024	4279
2h	1098	2011	3038	4297
4h	1108	2024	3058	4315
8h	1120	2037	3076	4328
24h	1125	2049	3090	4342
Descarga				3718

Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo fijo muestra 3.



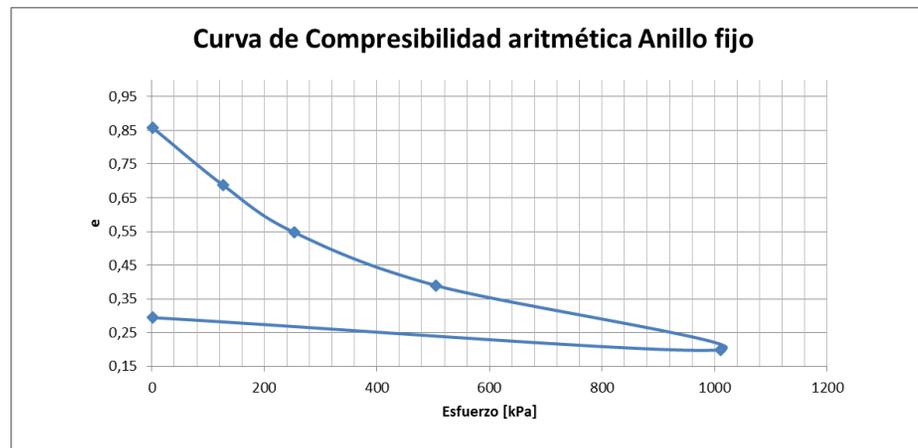
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo fijo muestra 3.



Curva de consolidación anillo fijo muestra 3.



Curva de compresibilidad aritmética anillo fijo muestra 3.



Cuadro de esfuerzos anillo flotante muestra 3.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
4	101,04
8	202,07
16	404,14
32	808,28

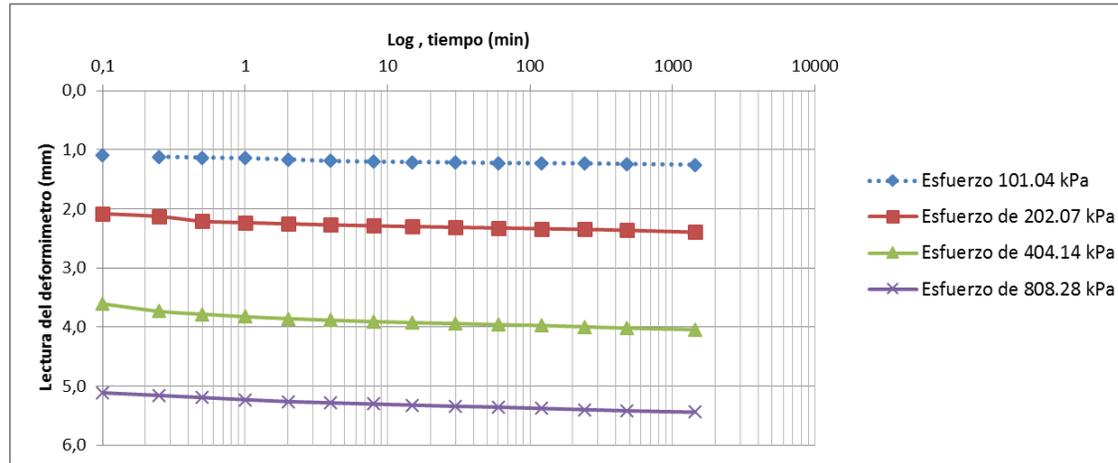
Lecturas del ensayo de consolidación anillo flotante muestra 3.

Día	1	2	3	4
Carga	4 kg	8 kg	16 kg	32 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	576			
6s	1125	1617	2380	3132
15s	1137	1641	2443	3154
30s	1144	1681	2467	3172
1m	1149	1693	2489	3190
2m	1160	1703	2505	3206
4m	1173	1712	2519	3217
8m	1179	1720	2530	3227
15m	1182	1726	2539	3236
30m	1185	1732	2547	3246
1h	1191	1738	2556	3253
2h	1192	1744	2563	3264
4h	1194	1750	2574	3274
8h	1198	1758	2585	3284
24h	1206	1774	2598	3296
Descarga				2788

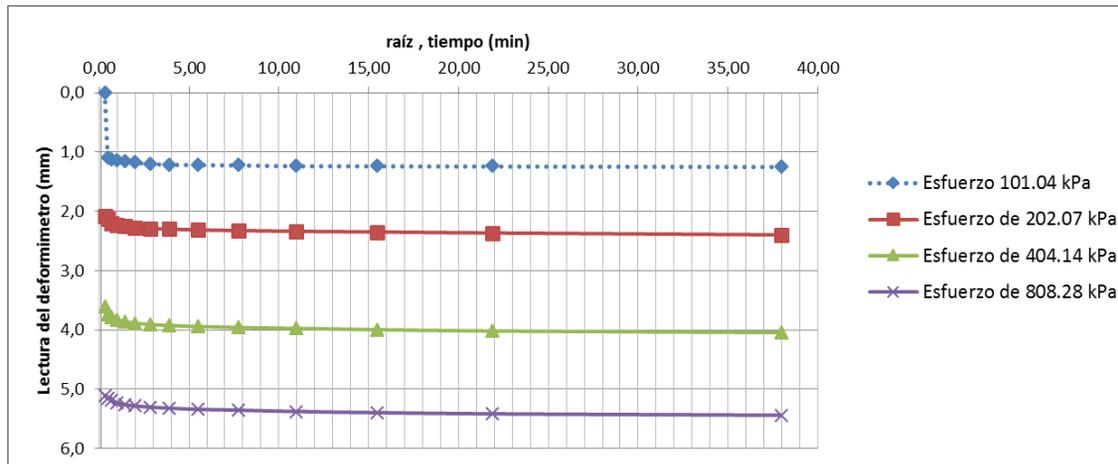
Avance real deformimetro anillo flotante muestra 3

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	4 kg	8 kg	16 kg	32 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	549	1041	1804	2556
15s	561	1065	1867	2578
30s	568	1105	1891	2596
1m	573	1117	1913	2614
2m	584	1127	1929	2630
4m	597	1136	1943	2641
8m	603	1144	1954	2651
15m	606	1150	1963	2660
30m	609	1156	1971	2670
1h	615	1162	1980	2677
2h	616	1168	1987	2688
4h	618	1174	1998	2698
8h	622	1182	2009	2708
24h	630	1198	2022	2720
Descarga				2212

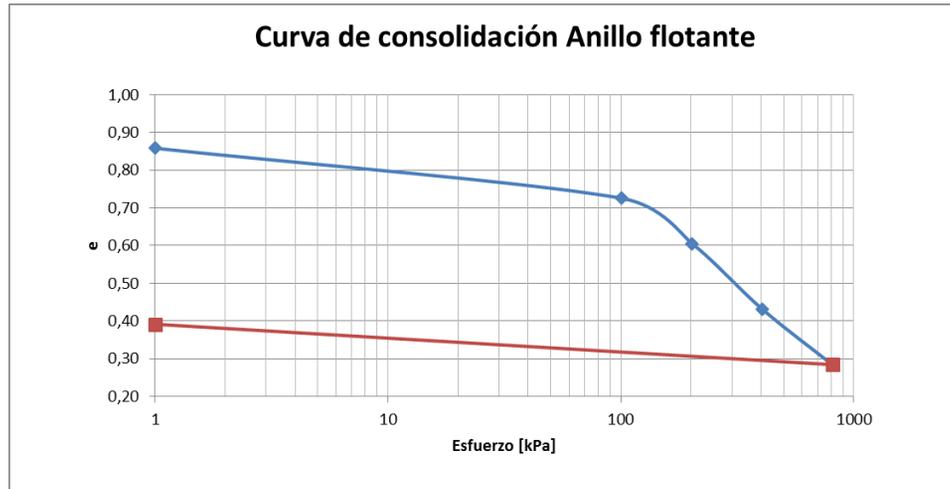
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo flotante muestra 3.



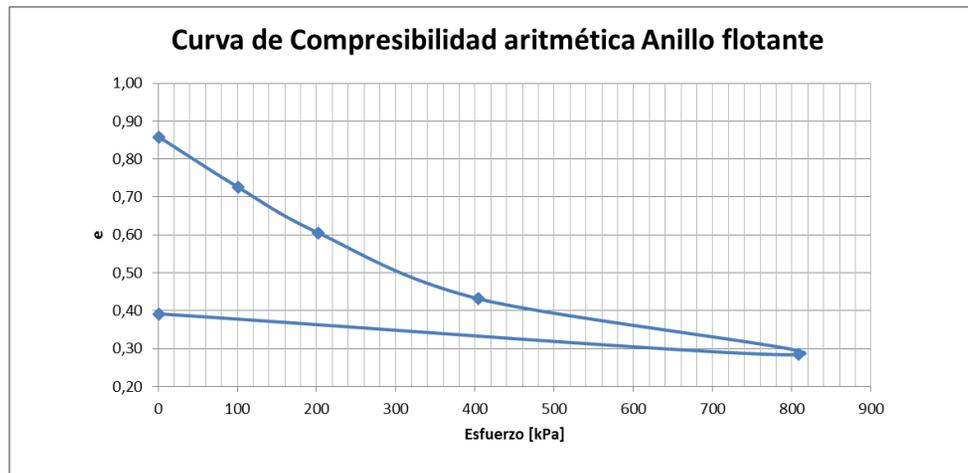
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo flotante muestra 3.



Curva de consolidación anillo flotante muestra 3.



Curva de compresibilidad aritmética anillo flotante muestra 3.



Información general de la muestra 4

Densidad aparente	
Área anillo (cm ²)	31,66
Altura anillo (cm)	2,45
Volumen (cm ³)	77,57
Peso anillo solo (g)	109,70
Peso anillo mas suelo (g)	238,10
Peso suelo (g)	128,40
Densidad aparente (g/cm ³)	1,66
Densidad aparente (kg/m ³)	1655,34
Profundidad espécimen (m)	1,80
Esfuerzo geostático (kg/m ²)	2979,62
Carga (kg)	9,43
Carga real (kg)	0,94

Cuadro de esfuerzos anillo fijo muestra 4

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1	31,59
2	63,17
4	126,34
8	252,68

Contenido de humedad muestra 4

Humedad natural	
Masa Tara (g)	45,40
Masa Tara + suelo (g) (humeda)	470,30
Masa Tara + suelo (g) (seca)	335,00
w: Humedad (%)	0,47

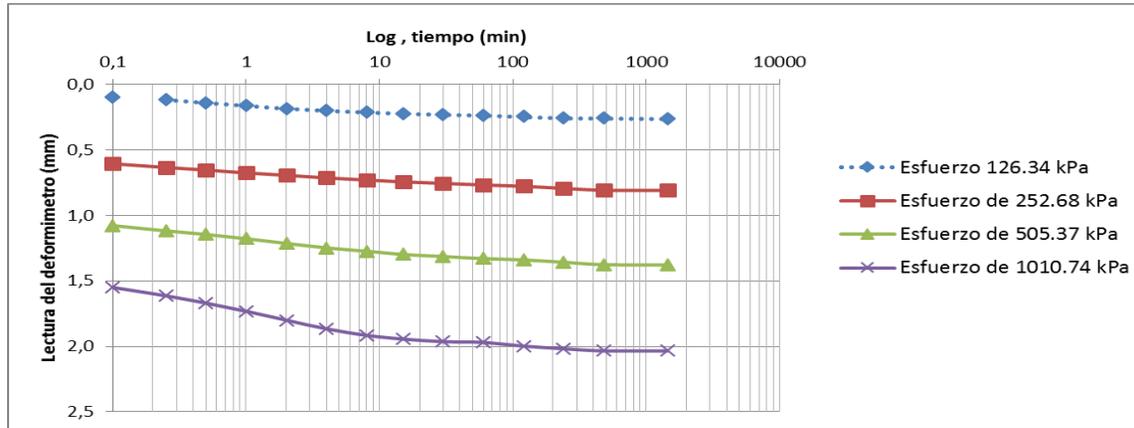
Lecturas del ensayo de consolidación anillo fijo muestra 4

Día	1	2	3	4
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	2695			
6s	2742	2998	3234	3470
15s	2754	3012	3254	3502
30s	2765	3022	3268	3530
1m	2776	3033	3284	3561
2m	2787	3042	3302	3595
4m	2795	3052	3319	3628
8m	2801	3060	3332	3653
15m	2806	3067	3344	3667
30m	2810	3073	3352	3677
1h	2813	3079	3360	3680
2h	2818	3084	3365	3694
4h	2823	3092	3374	3704
8h	2824	3099	3383	3712
24h	2826	3100	3384	3712
Descarga				3417

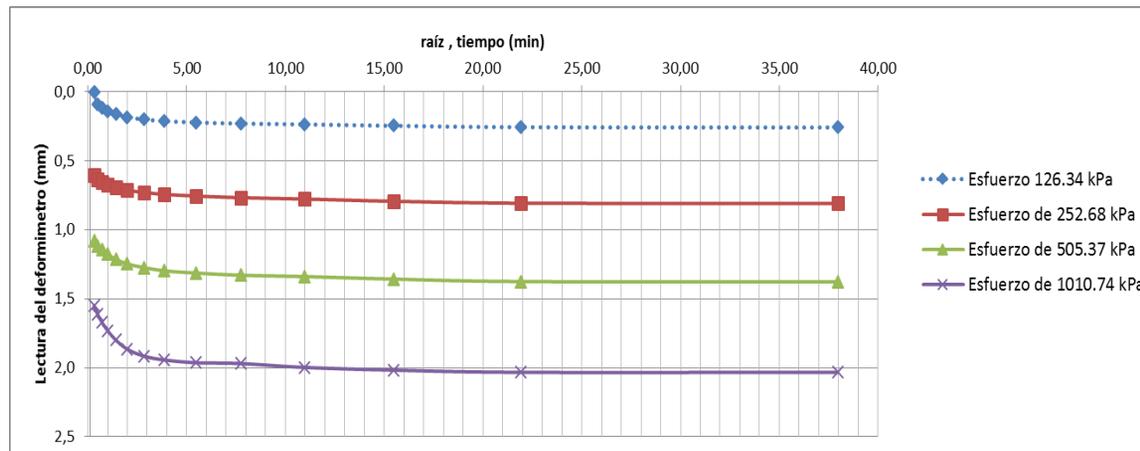
Avance real deformimetro anillo fijo muestra 4

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	47	303	539	775
15s	59	317	559	807
30s	70	327	573	835
1m	81	338	589	866
2m	92	347	607	900
4m	100	357	624	933
8m	106	365	637	958
15m	111	372	649	972
30m	115	378	657	982
1h	118	384	665	985
2h	123	389	670	999
4h	128	397	679	1009
8h	129	404	688	1017
24h	131	405	689	1017
Descarga				722

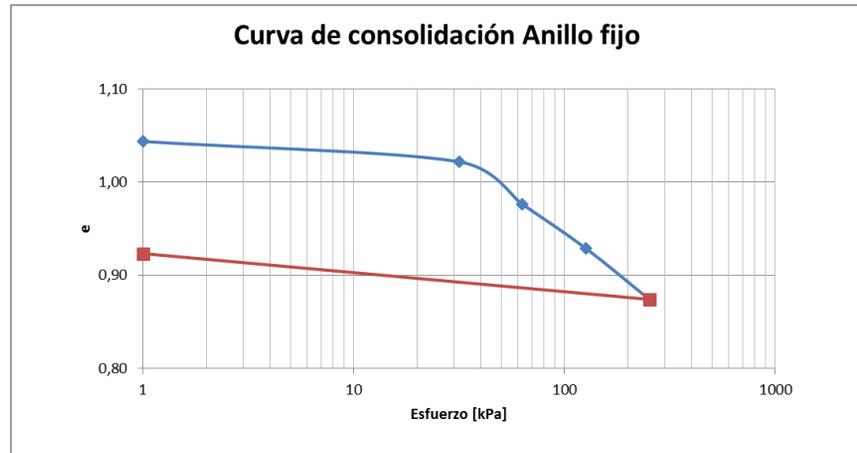
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo fijo muestra 4.



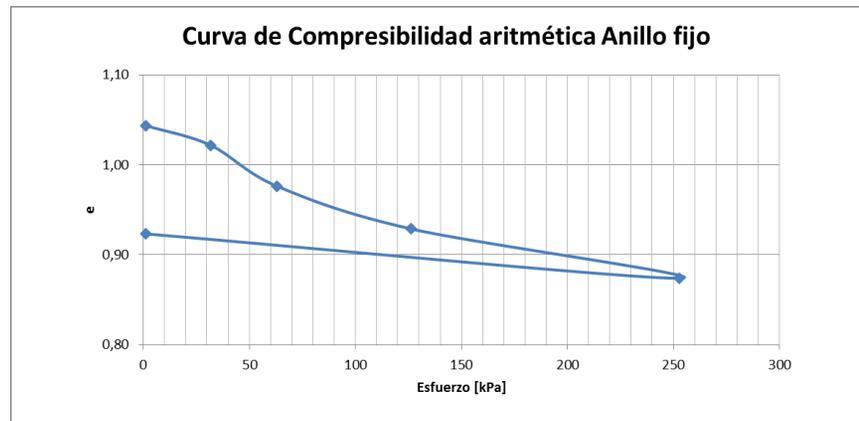
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo fijo muestra 4.



Curva de consolidación anillo fijo muestra 4.



Curva de compresibilidad aritmética anillo fijo muestra 4.



Cuadro de esfuerzos anillo flotante muestra 4.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1	25,26
2	50,52
4	101,04
8	202,07

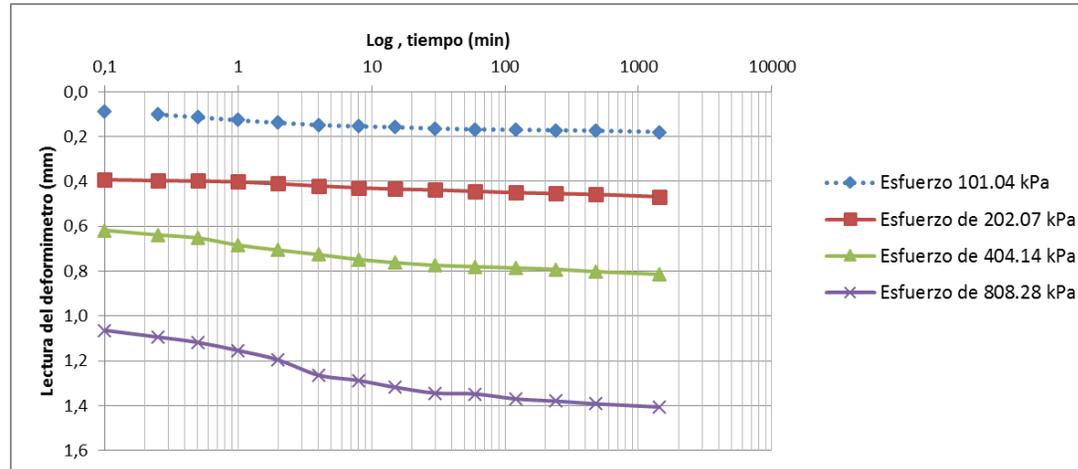
Lecturas del ensayo de consolidación anillo flotante muestra 4.

Día	1	2	3	4
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	796			
6s	839	992	1105	1328
15s	846	994	1115	1343
30s	852	995	1122	1355
1m	859	997	1138	1373
2m	865	1001	1149	1394
4m	870	1006	1159	1428
8m	873	1010	1170	1440
15m	875	1013	1177	1455
30m	878	1015	1183	1468
1h	880	1018	1186	1470
2h	881	1021	1189	1481
4h	882	1023	1192	1486
8h	883	1025	1197	1492
24h	886	1030	1203	1499
Descarga				1234

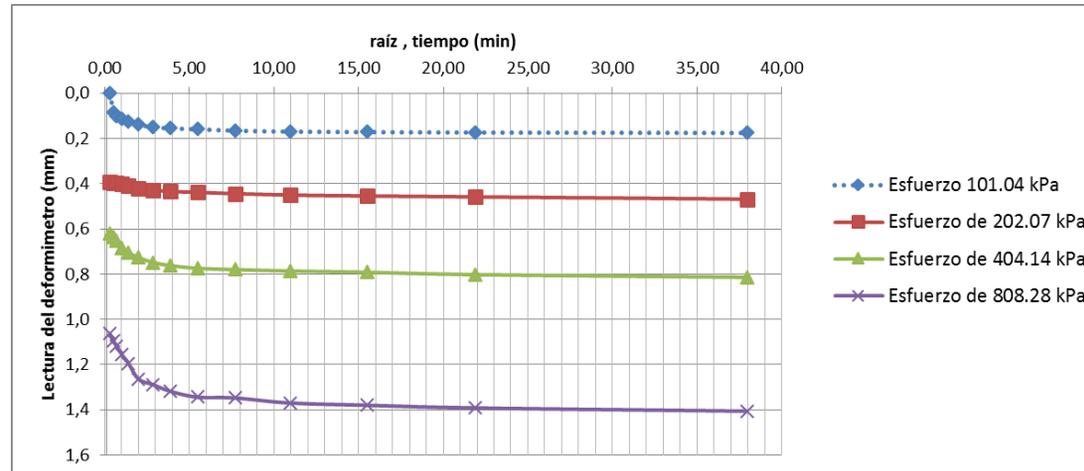
Avance real deformimetro anillo flotante muestra 4

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	43	196	309	532
15s	50	198	319	547
30s	56	199	326	559
1m	63	201	342	577
2m	69	205	353	598
4m	74	210	363	632
8m	77	214	374	644
15m	79	217	381	659
30m	82	219	387	672
1h	84	222	390	674
2h	85	225	393	685
4h	86	227	396	690
8h	87	229	401	696
24h	90	234	407	703
Descarga				438

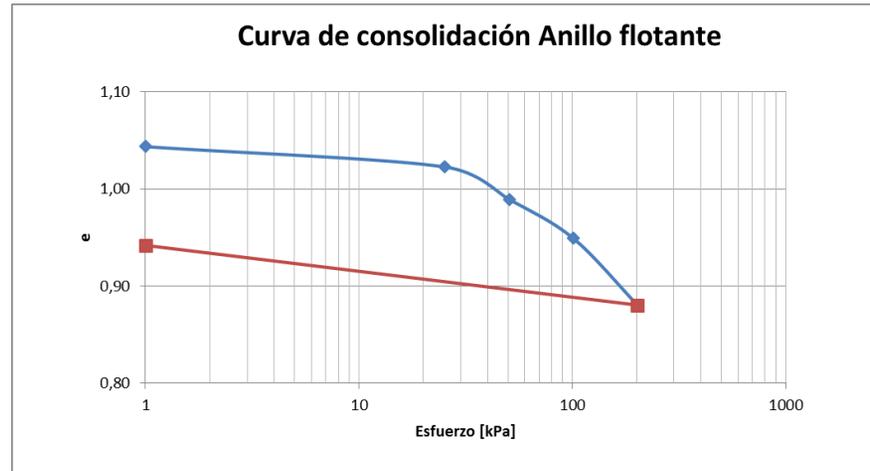
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo flotante muestra 4.



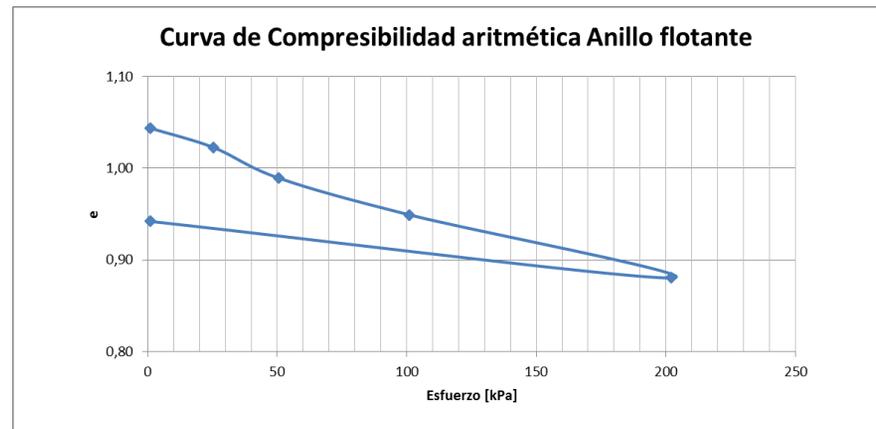
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo flotante muestra 4.



Curva de consolidación anillo flotante muestra 4.



Curva de compresibilidad aritmética anillo flotante muestra 4.



Información general de la muestra 5

Densidad aparente	
Área anillo (cm ²)	31,66
Altura anillo (cm)	2,45
Volumen (cm ³)	77,57
Peso anillo solo (g)	109,70
Peso anillo mas suelo (g)	246,60
Peso suelo (g)	136,90
Densidad aparente (g/cm ³)	1,76
Densidad aparente (kg/m ³)	1764,93
Profundidad espécimen (m)	2,40
Esfuerzo geostatico (kg/m ²)	4235,82
Carga (kg)	13,41
Carga real (kg)	1,34

Cuadro de esfuerzos anillo fijo muestra 5

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1	31,59
2	63,17
4	126,34
8	252,68

Contenido de humedad muestra 5

Humedad natural	
Masa Tara (g)	45,68
Masa Tara + suelo (g) (humeda)	249,10
Masa Tara + suelo (g) (seca)	181,30
w: Humedad (%)	0,50

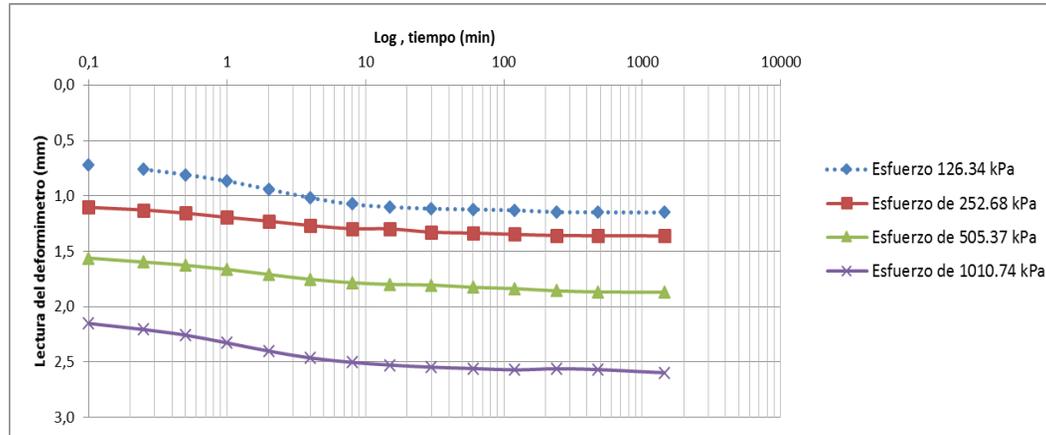
Lecturas del ensayo de consolidación anillo fijo muestra 5

Día	1	2	3	4
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	1931			
6s	2290	2483	2712	3007
15s	2312	2495	2730	3035
30s	2335	2509	2744	3060
1m	2364	2528	2763	3095
2m	2401	2545	2786	3132
4m	2439	2565	2808	3163
8m	2468	2579	2823	3183
15m	2480	2580	2831	3195
30m	2488	2595	2834	3205
1h	2491	2599	2844	3211
2h	2495	2605	2850	3217
4h	2503	2610	2860	3212
8h	2504	2611	2865	3216
24h	2505	2612	2866	3230
Descarga				3035

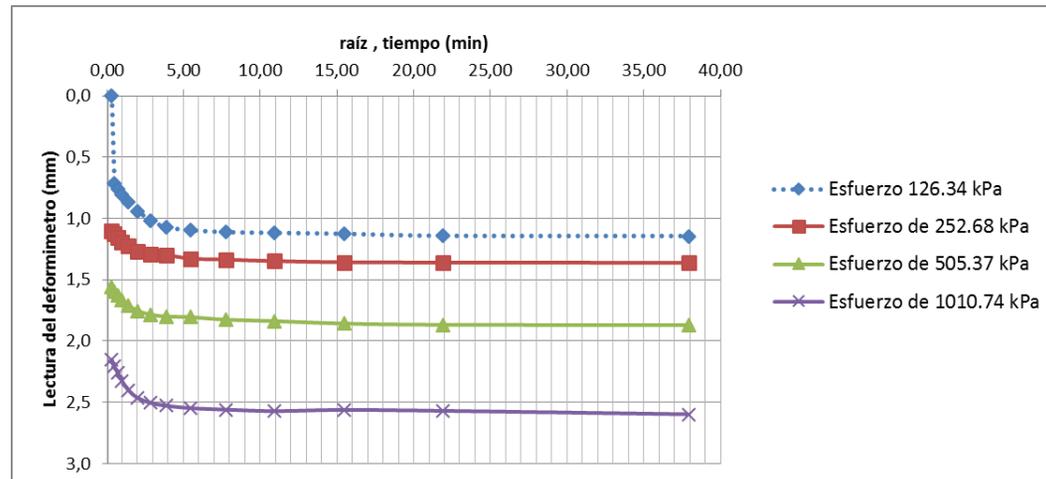
Avance real deformimetro anillo fijo muestra 5

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	359	552	781	1076
15s	381	564	799	1104
30s	404	578	813	1129
1m	433	597	832	1164
2m	470	614	855	1201
4m	508	634	877	1232
8m	537	648	892	1252
15m	549	649	900	1264
30m	557	664	903	1274
1h	560	668	913	1280
2h	564	674	919	1286
4h	572	679	929	1281
8h	573	680	934	1285
24h	574	681	935	1299
Descarga				1104

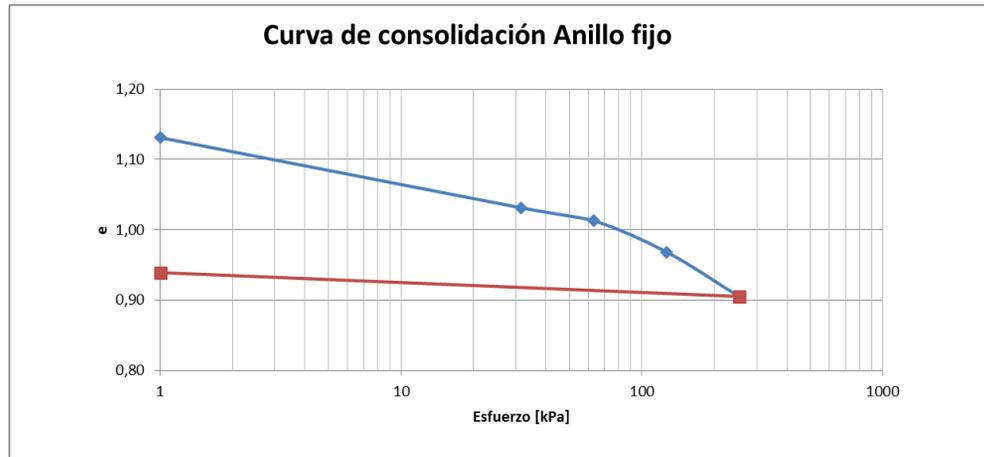
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo fijo muestra 5



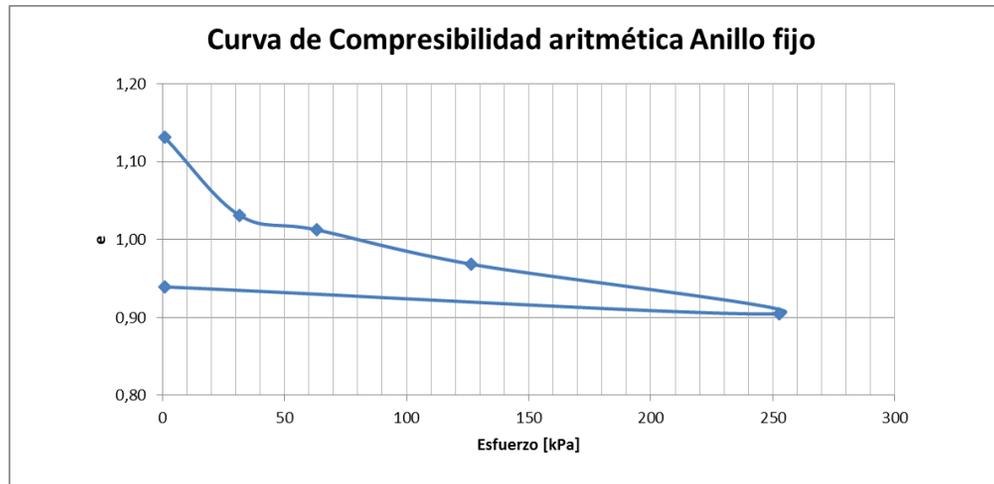
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo fijo muestra 5.



Curva de consolidación anillo fijo muestra 5.



Curva de compresibilidad aritmética anillo fijo muestra 5.



Cuadro de esfuerzos anillo flotante muestra 5.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1	25,26
2	50,52
4	101,04
8	202,07

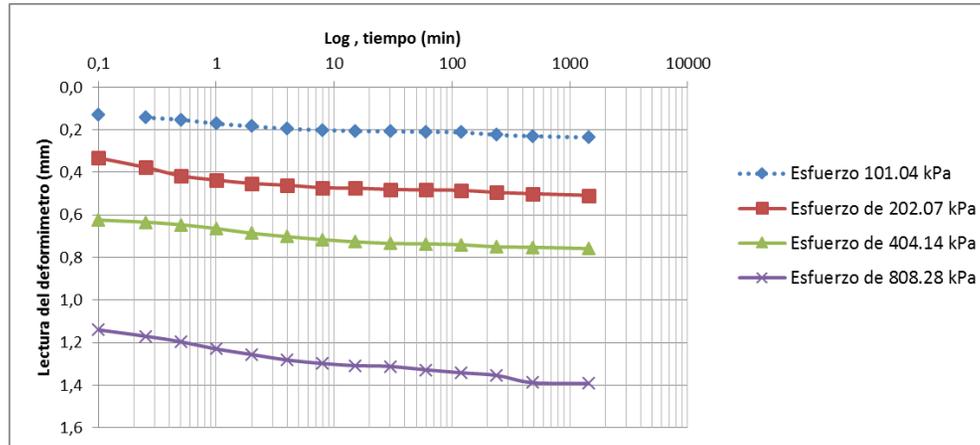
Lecturas del ensayo de consolidación anillo flotante muestra 5.

Día	1	2	3	4
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	594			
6s	659	760	906	1164
15s	665	782	911	1179
30s	670	802	917	1192
1m	679	812	926	1209
2m	685	820	937	1222
4m	691	824	945	1235
8m	694	830	952	1243
15m	696	831	957	1248
30m	697	834	961	1250
1h	698	835	962	1258
2h	699	836	964	1265
4h	705	841	969	1271
8h	708	844	970	1288
24h	711	848	973	1290
Descarga				1072

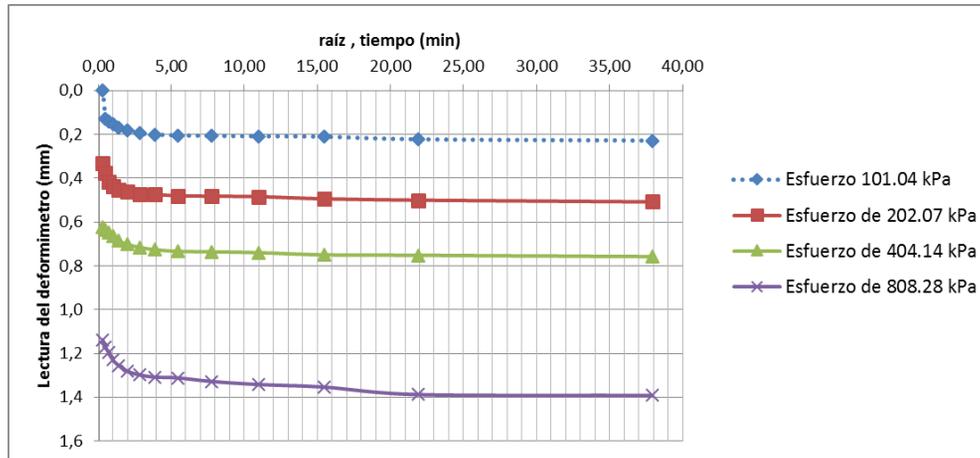
Avance real deformimetro anillo flotante muestra 5.

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	65	166	312	570
15s	71	188	317	585
30s	76	208	323	598
1m	85	218	332	615
2m	91	226	343	628
4m	97	230	351	641
8m	100	236	358	649
15m	102	237	363	654
30m	103	240	367	656
1h	104	241	368	664
2h	105	242	370	671
4h	111	247	375	677
8h	114	250	376	694
24h	117	254	379	696
Descarga				478

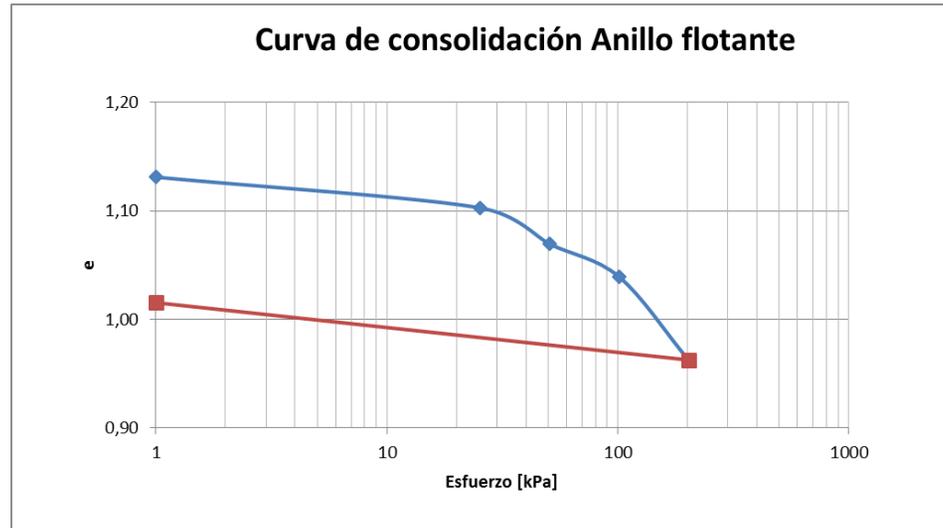
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo flotante muestra 5.



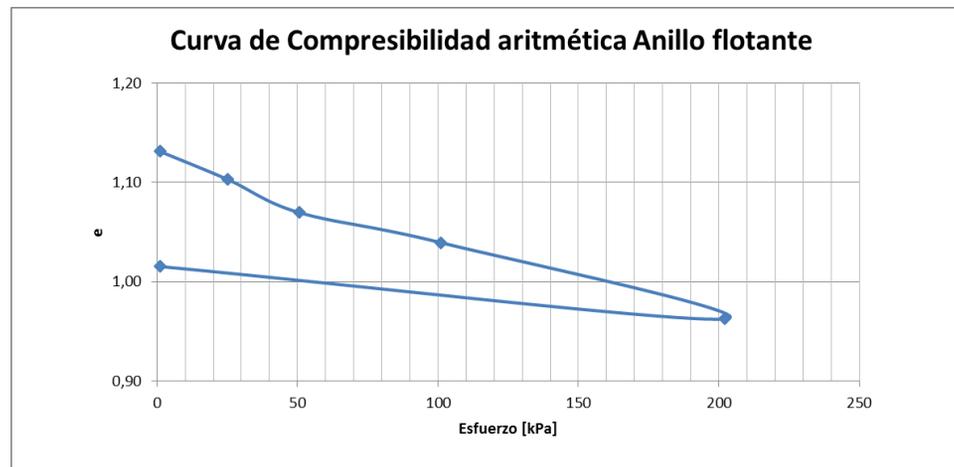
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo flotante muestra 5.



Curva de consolidación anillo flotante muestra 5.



Curva de compresibilidad aritmética anillo flotante muestra 5.



Cuadro de esfuerzos anillo fijo muestra 6.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1	31,59
2	63,17
4	126,34
8	252,68

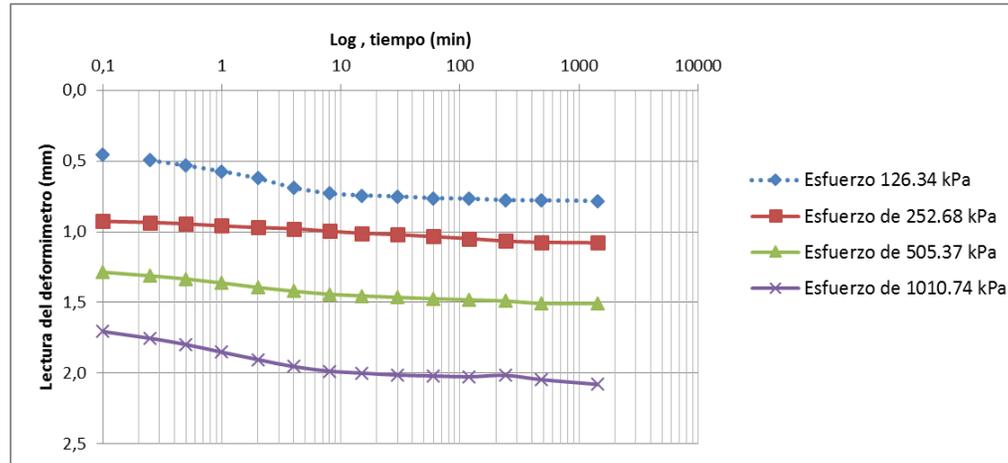
Lecturas del ensayo de consolidación anillo fijo muestra 6.

Día	1	2	3	4
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	2317			
6s	2543	2780	2960	3170
15s	2564	2784	2973	3194
30s	2582	2789	2984	3216
1m	2603	2796	2998	3243
2m	2628	2802	3014	3269
4m	2662	2806	3027	3294
8m	2682	2815	3038	3310
15m	2689	2822	3044	3317
30m	2693	2827	3049	3324
1h	2699	2834	3054	3327
2h	2701	2841	3058	3330
4h	2706	2850	3062	3325
8h	2707	2854	3070	3340
24h	2709	2856	3071	3357
Descarga				3076

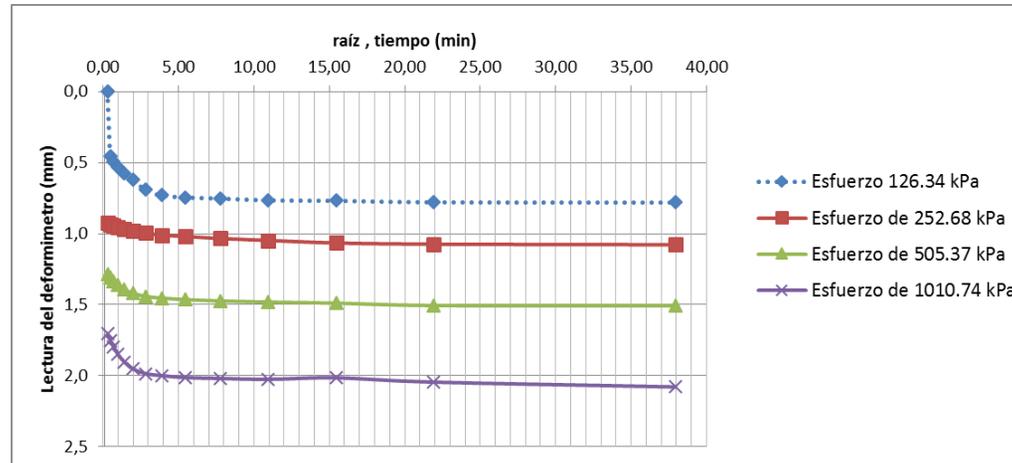
Avance real deformimetro anillo fijo muestra 6.

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	226	463	643	853
15s	247	467	656	877
30s	265	472	667	899
1m	286	479	681	926
2m	311	485	697	952
4m	345	489	710	977
8m	365	498	721	993
15m	372	505	727	1000
30m	376	510	732	1007
1h	382	517	737	1010
2h	384	524	741	1013
4h	389	533	745	1008
8h	390	537	753	1023
24h	392	539	754	1040
Descarga				759

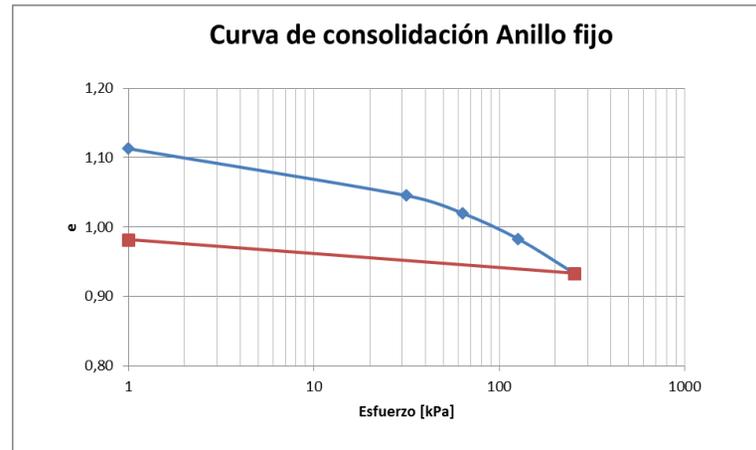
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo fijo muestra 6.



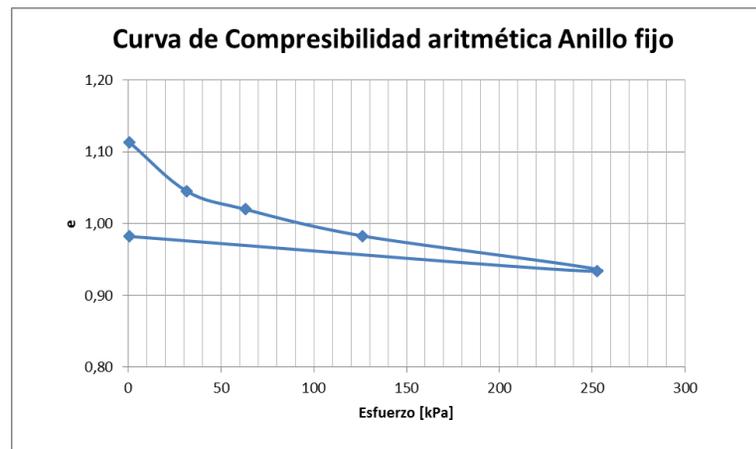
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo fijo muestra 6.



Curva de consolidación anillo fijo muestra 6.



Curva de compresibilidad aritmética anillo fijo muestra 6.



Cuadro de esfuerzos anillo flotante muestra 6.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1	25,26
2	50,52
4	101,04
8	202,07

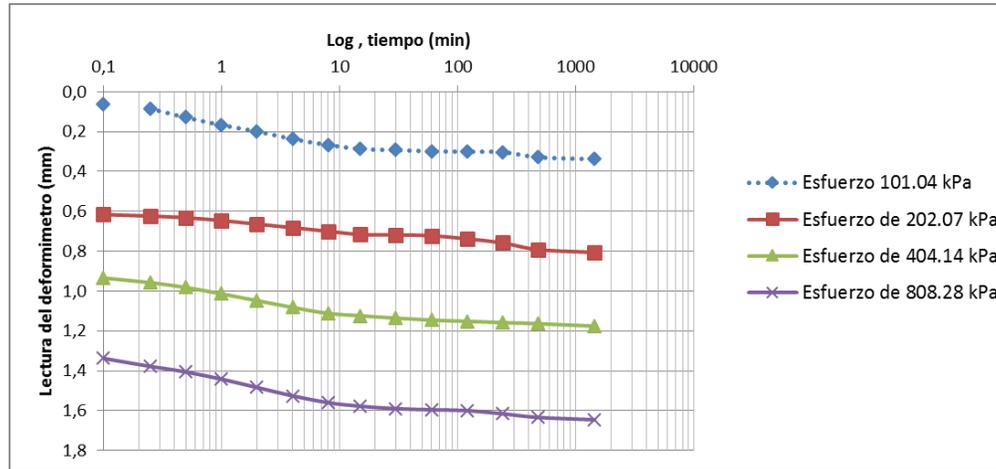
Lecturas del ensayo de consolidación anillo flotante muestra 6.

Día	1	2	3	4
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	581			
6s	612	889	1048	1250
15s	624	893	1060	1270
30s	645	897	1072	1284
1m	664	904	1088	1302
2m	680	913	1105	1323
4m	699	922	1122	1344
8m	714	931	1137	1361
15m	724	939	1143	1370
30m	727	940	1149	1376
1h	730	942	1154	1379
2h	731	950	1157	1381
4h	732	960	1160	1389
8h	745	977	1163	1398
24h	750	984	1169	1404
Descarga				1056

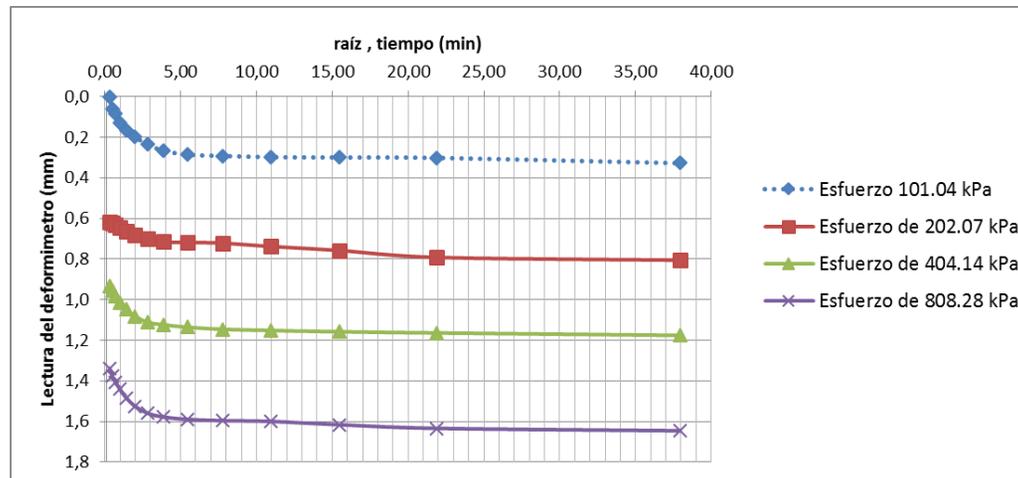
Avance real deformimetro anillo flotante muestra 6.

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1 kg	2 kg	4 kg	8 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	31	308	467	669
15s	43	312	479	689
30s	64	316	491	703
1m	83	323	507	721
2m	99	332	524	742
4m	118	341	541	763
8m	133	350	556	780
15m	143	358	562	789
30m	146	359	568	795
1h	149	361	573	798
2h	150	369	576	800
4h	151	379	579	808
8h	164	396	582	817
24h	169	403	588	823
Descarga				475

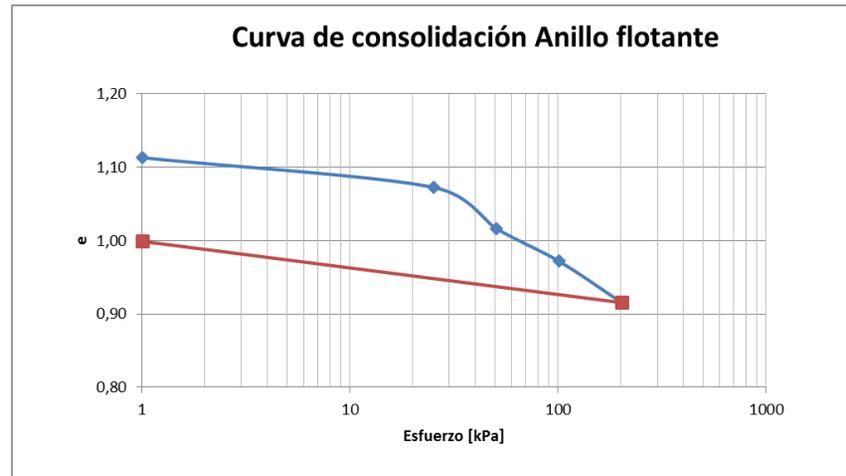
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo flotante muestra 6.



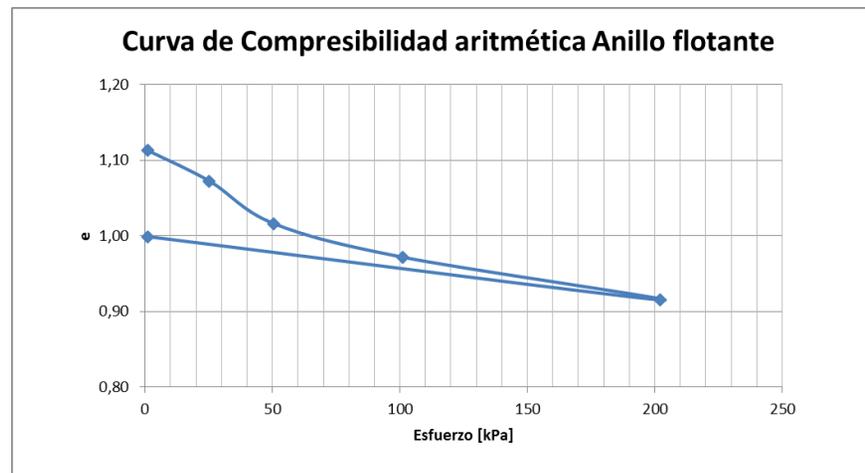
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo flotante muestra 6.



Curva de consolidación anillo flotante muestra 6.



Curva de compresibilidad aritmética anillo flotante muestra 6.



Cuadro de esfuerzos anillo fijo muestra 7.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1,5	47,38
3	94,76
6	189,51
12	379,03

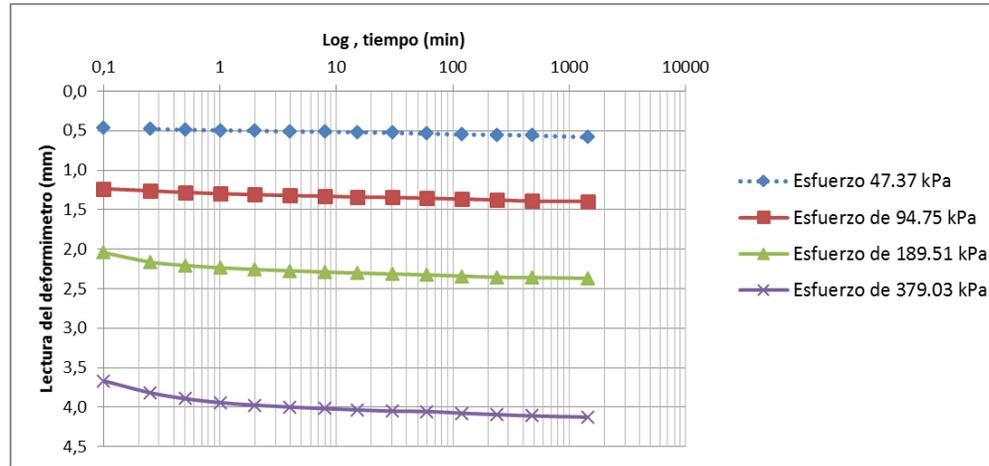
Lecturas del ensayo de consolidación anillo fijo muestra 7.

Día	1	2	3	4
Carga	1.5 kg	3 kg	6 kg	12 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	2172			
6s	2406	2790	3194	4005
15s	2412	2803	3253	4080
30s	2417	2813	3275	4118
1m	2420	2821	3290	4143
2m	2423	2827	3301	4159
4m	2427	2833	3309	4171
8m	2429	2837	3317	4181
15m	2432	2842	3323	4189
30m	2435	2845	3329	4197
1h	2440	2850	3335	4199
2h	2446	2855	3343	4210
4h	2448	2861	3350	4219
8h	2452	2868	3352	4227
24h	2462	2870	3356	4235
Descarga				3793

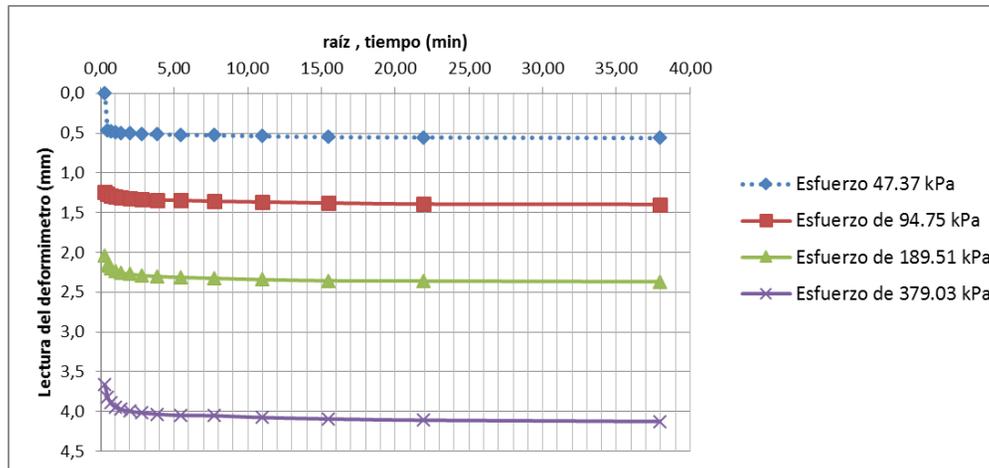
Avance real deformimetro anillo fijo muestra 7.

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1.5 kg	3 kg	6 kg	12 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	234	618	1022	1833
15s	240	631	1081	1908
30s	245	641	1103	1946
1m	248	649	1118	1971
2m	251	655	1129	1987
4m	255	661	1137	1999
8m	257	665	1145	2009
15m	260	670	1151	2017
30m	263	673	1157	2025
1h	268	678	1163	2027
2h	274	683	1171	2038
4h	276	689	1178	2047
8h	280	696	1180	2055
24h	290	698	1184	2063
Descarga				1621

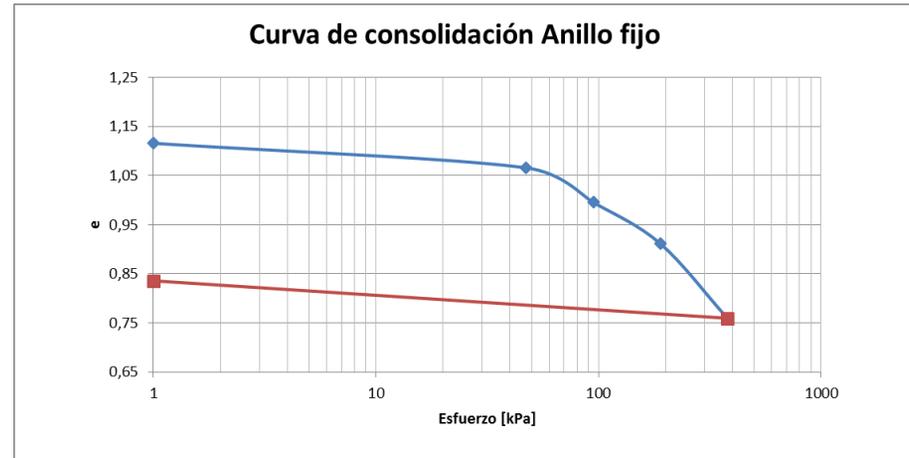
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo fijo muestra 7.



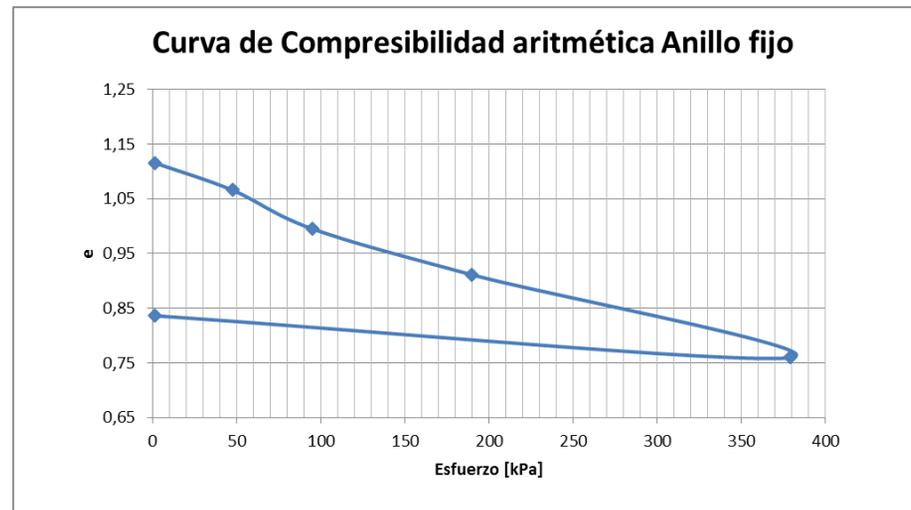
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo fijo muestra 7.



Curva de consolidación anillo fijo muestra 7.



Curva de compresibilidad aritmética anillo fijo muestra 7.



Cuadro de esfuerzos anillo flotante muestra 7.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1,5	37,89
3	75,78
6	151,55
12	303,11

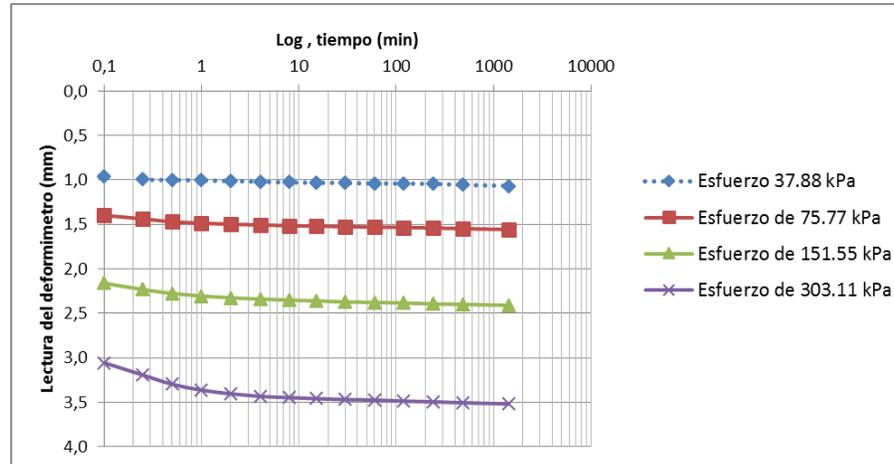
Lecturas del ensayo de consolidación anillo flotante muestra 7.

Día	1	2	3	4
Carga	1.5 kg	3 kg	6 kg	12 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	893			
6s	1372	1592	1974	2421
15s	1389	1612	2009	2490
30s	1392	1628	2031	2542
1m	1394	1636	2046	2575
2m	1398	1642	2056	2596
4m	1402	1646	2063	2610
8m	1406	1650	2069	2617
15m	1408	1652	2073	2623
30m	1410	1656	2079	2628
1h	1412	1658	2082	2631
2h	1413	1660	2085	2637
4h	1415	1663	2090	2641
8h	1421	1667	2093	2646
24h	1427	1672	2098	2653
Descarga				2140

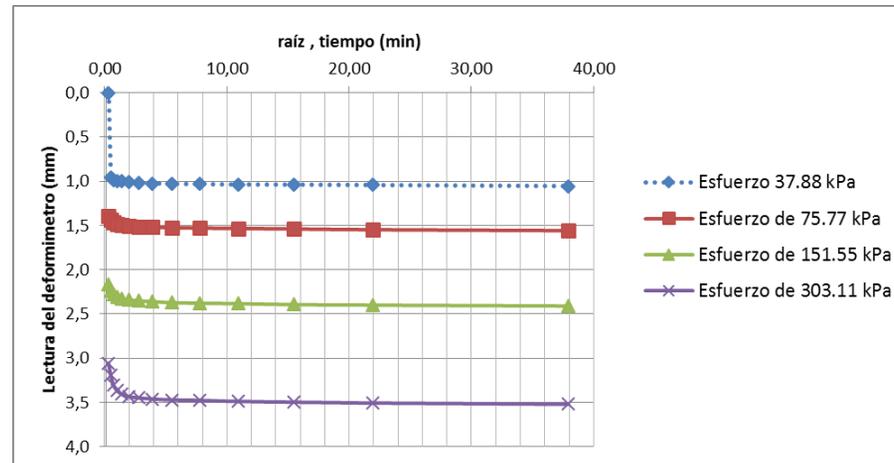
Avance real deformimetro anillo flotante muestra 7.

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1.5 kg	3 kg	6 kg	12 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	479	699	1081	1528
15s	496	719	1116	1597
30s	499	735	1138	1649
1m	501	743	1153	1682
2m	505	749	1163	1703
4m	509	753	1170	1717
8m	513	757	1176	1724
15m	515	759	1180	1730
30m	517	763	1186	1735
1h	519	765	1189	1738
2h	520	767	1192	1744
4h	522	770	1197	1748
8h	528	774	1200	1753
24h	534	779	1205	1760
Descarga				1247

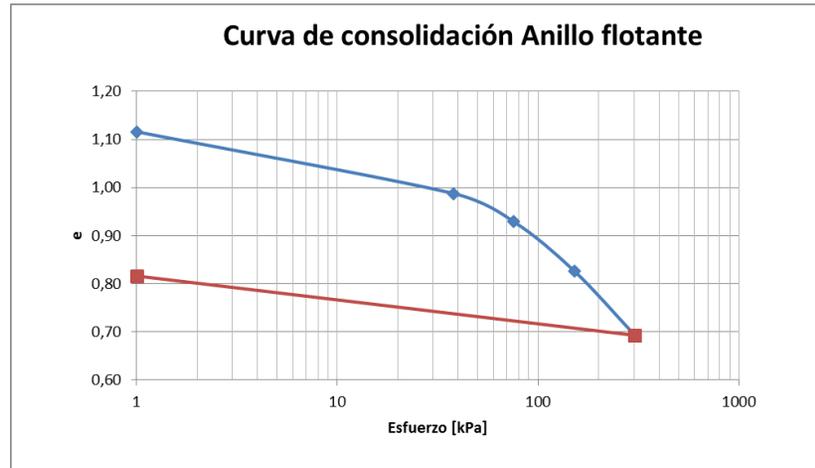
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo flotante muestra 7.



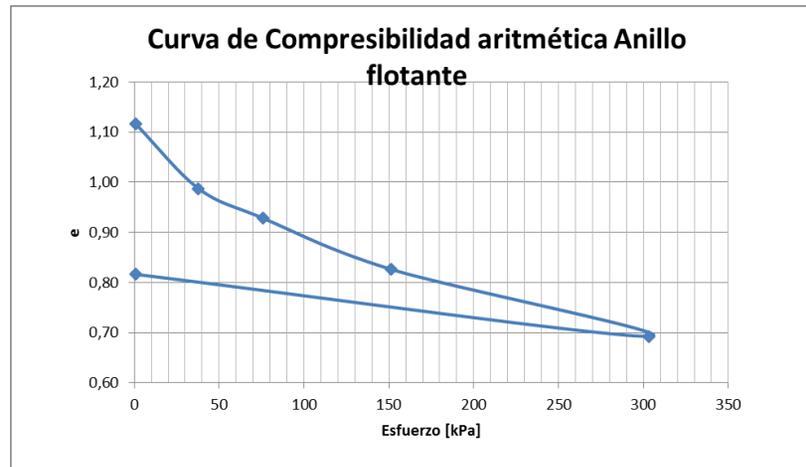
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo flotante muestra 7.



Curva de consolidación anillo flotante muestra 7.



Curva de compresibilidad aritmética anillo flotante muestra 7.



Cuadro de esfuerzos anillo fijo muestra 8.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1,4	44,22
2,8	88,44
5,6	176,88
11,2	353,76

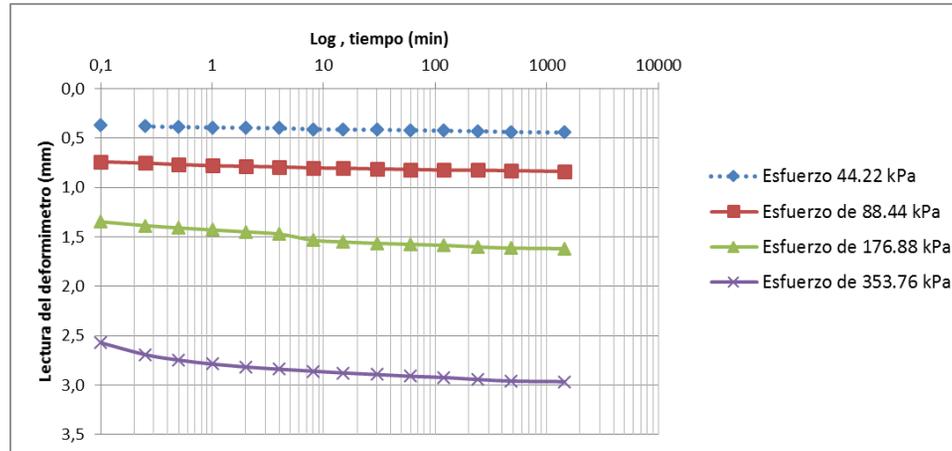
Lecturas del ensayo de consolidación anillo fijo muestra 8.

Día	1	2	3	4
Carga	1.4 kg	2.8 kg	5.6 kg	11.2 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	2479			
6s	2665	2849	3153	3765
15s	2670	2856	3172	3825
30s	2673	2863	3184	3853
1m	2675	2869	3194	3873
2m	2677	2872	3204	3888
4m	2679	2875	3215	3899
8m	2684	2880	3246	3909
15m	2686	2882	3255	3918
30m	2687	2885	3262	3926
1h	2689	2888	3267	3935
2h	2692	2891	3272	3941
4h	2694	2892	3280	3951
8h	2698	2894	3286	3959
24h	2701	2898	3289	3962
Descarga				3529

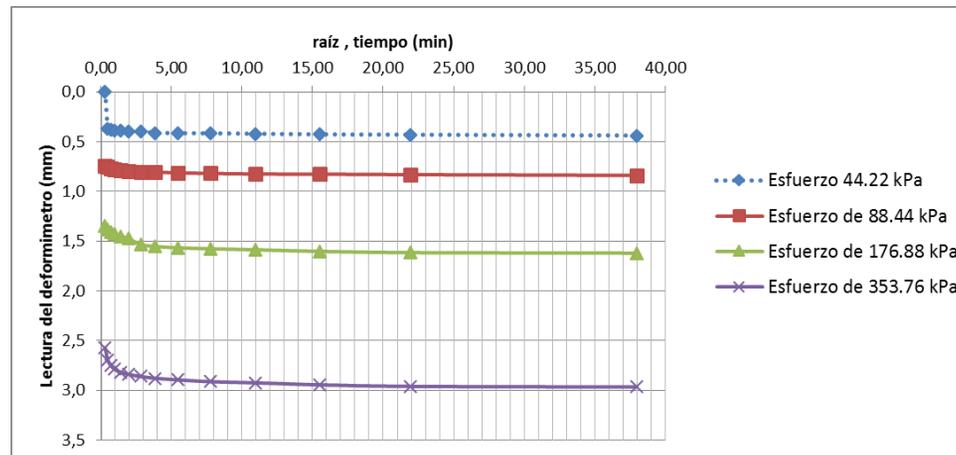
Avance real deformimetro anillo fijo muestra 8.

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1.4 kg	2.8 kg	5.6 kg	11.2 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	186	370	674	1286
15s	191	377	693	1346
30s	194	384	705	1374
1m	196	390	715	1394
2m	198	393	725	1409
4m	200	396	736	1420
8m	205	401	767	1430
15m	207	403	776	1439
30m	208	406	783	1447
1h	210	409	788	1456
2h	213	412	793	1462
4h	215	413	801	1472
8h	219	415	807	1480
24h	222	419	810	1483
Descarga				1050

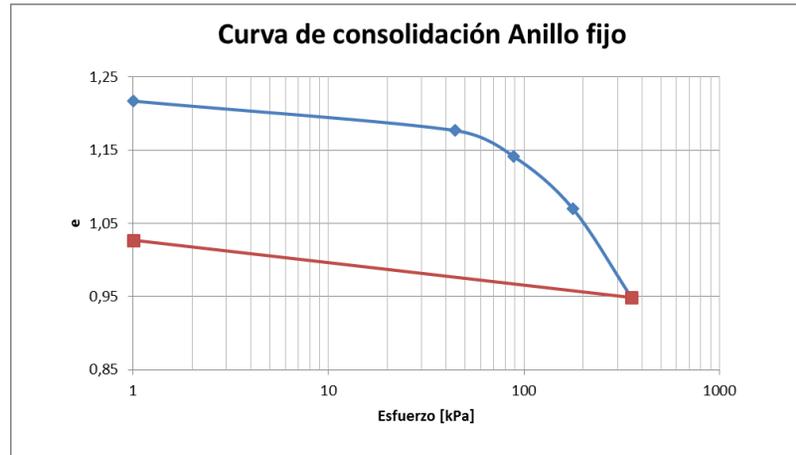
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo fijo muestra 8.



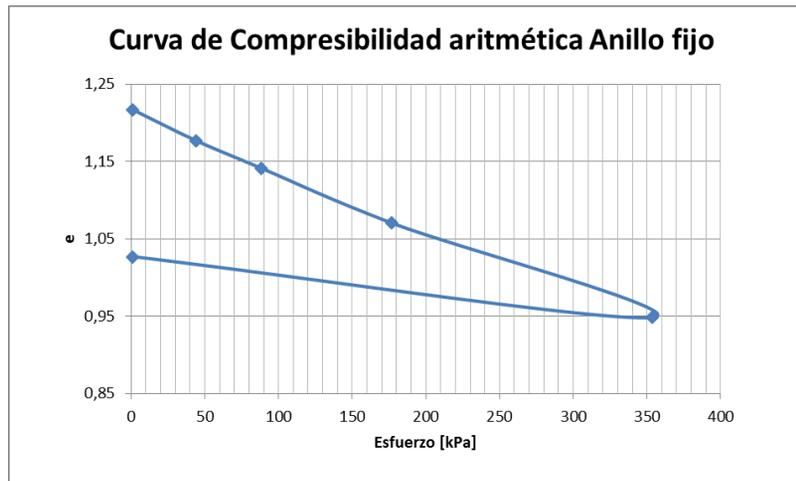
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo fijo muestra 8.



Curva de consolidación anillo fijo muestra 8.



Curva de compresibilidad aritmética anillo fijo muestra 8.



Cuadro de esfuerzos anillo flotante muestra 8.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
1,4	35,36
2,8	70,72
5,6	141,45
11,2	282,90

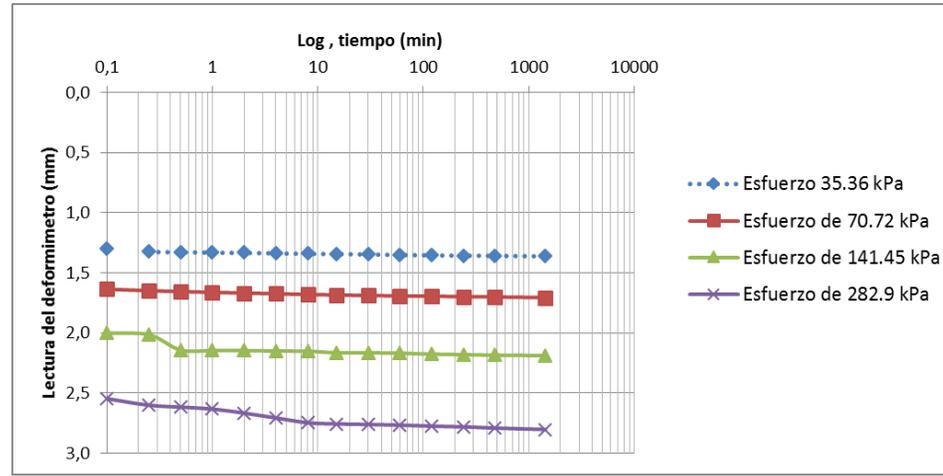
Lecturas del ensayo de consolidación anillo flotante muestra 8.

Día	1	2	3	4
Carga	1.4 kg	2.8 kg	5.6 kg	11.2 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	742			
6s	1392	1560	1743	2015
15s	1403	1566	1749	2042
30s	1405	1570	1813	2050
1m	1407	1573	1815	2058
2m	1408	1576	1815	2075
4m	1410	1579	1817	2095
8m	1412	1582	1818	2115
15m	1413	1584	1824	2120
30m	1415	1586	1824	2122
1h	1417	1588	1826	2125
2h	1419	1589	1830	2129
4h	1420	1591	1832	2132
8h	1421	1592	1834	2137
24h	1423	1595	1836	2143
Descarga				1908

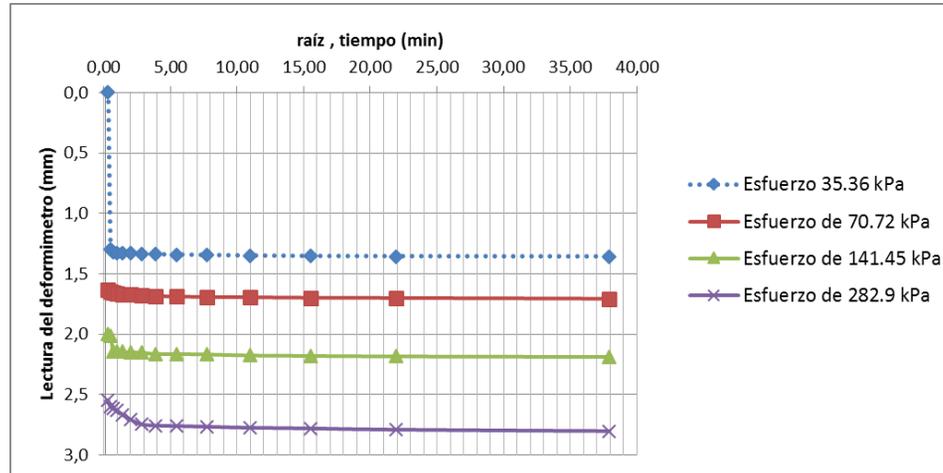
Avance real deformimetro anillo flotante muestra 8.

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	1.4 kg	2.8 kg	5.6 kg	11.2 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	650	818	1001	1273
15s	661	824	1007	1300
30s	663	828	1071	1308
1m	665	831	1073	1316
2m	666	834	1073	1333
4m	668	837	1075	1353
8m	670	840	1076	1373
15m	671	842	1082	1378
30m	673	844	1082	1380
1h	675	846	1084	1383
2h	677	847	1088	1387
4h	678	849	1090	1390
8h	679	850	1092	1395
24h	681	853	1094	1401
Descarga				1166

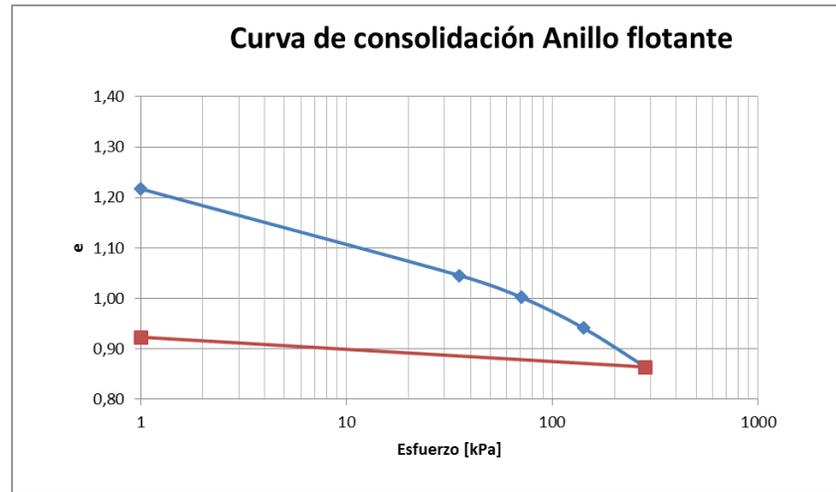
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo flotante muestra 8.



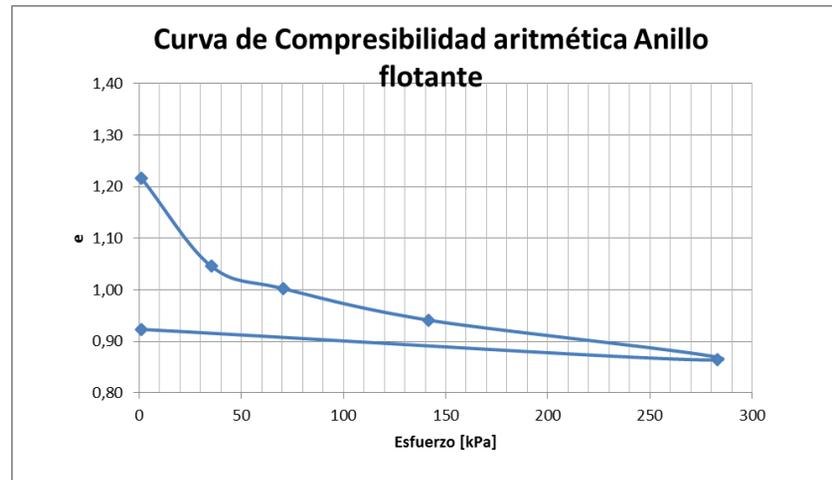
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo flotante muestra 8.



Curva de consolidación anillo flotante muestra 8.



Curva de compresibilidad aritmética anillo flotante muestra 8.



Cuadro de esfuerzos anillo fijo muestra 9.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
2	63,17
4	126,34
8	252,68
16	505,37

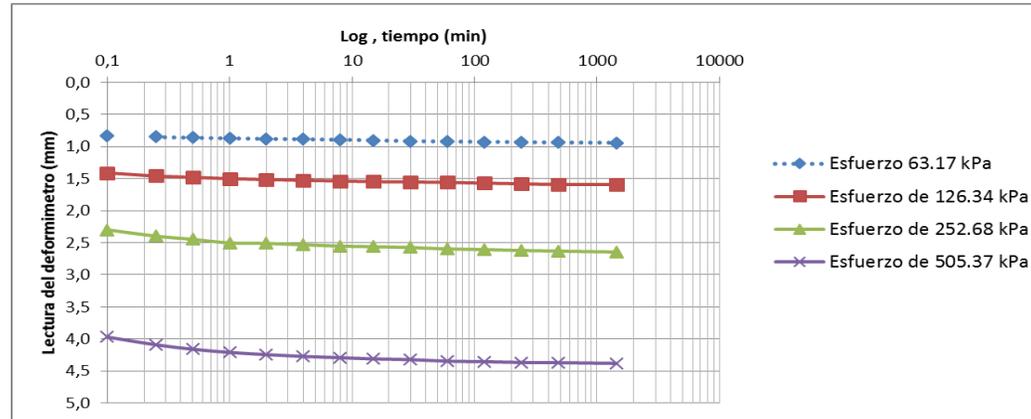
Lecturas del ensayo de consolidación anillo fijo muestra 9.

Día	1	2	3	4
Carga	2 kg	4 kg	8 kg	16 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	2425			
6s	2840	3130	3574	4410
15s	2850	3154	3623	4470
30s	2856	3165	3648	4505
1m	2861	3175	3676	4530
2m	2865	3182	3680	4547
4m	2868	3188	3691	4561
8m	2872	3193	3701	4571
15m	2876	3198	3706	4580
30m	2883	3201	3712	4586
1h	2886	3204	3723	4598
2h	2889	3210	3728	4602
4h	2891	3215	3735	4608
8h	2894	3220	3740	4610
24h	2896	3221	3747	4615
Descarga				4327

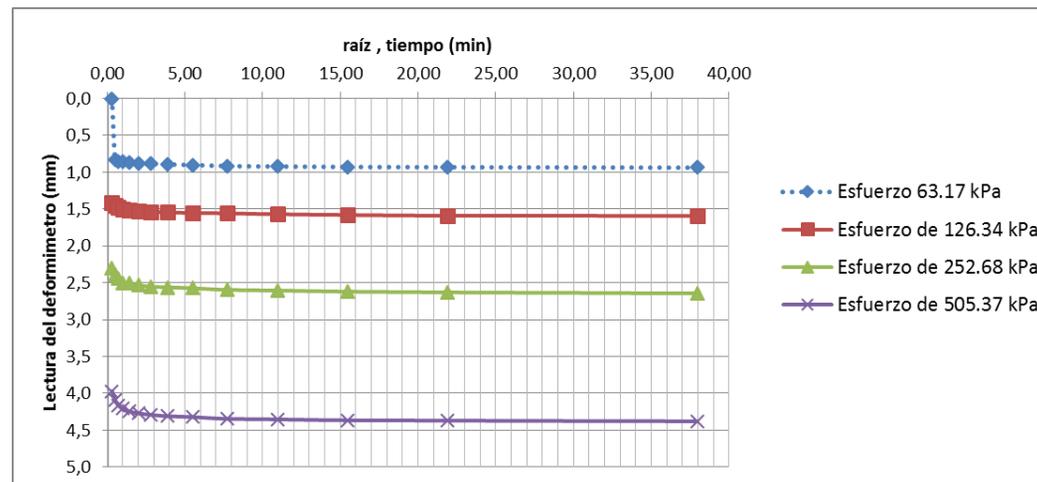
Avance real deformimetro anillo fijo muestra 9.

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	2 kg	4 kg	8 kg	16 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	415	705	1149	1985
15s	425	729	1198	2045
30s	431	740	1223	2080
1m	436	750	1251	2105
2m	440	757	1255	2122
4m	443	763	1266	2136
8m	447	768	1276	2146
15m	451	773	1281	2155
30m	458	776	1287	2161
1h	461	779	1298	2173
2h	464	785	1303	2177
4h	466	790	1310	2183
8h	469	795	1315	2185
24h	471	796	1322	2190
Descarga				1902

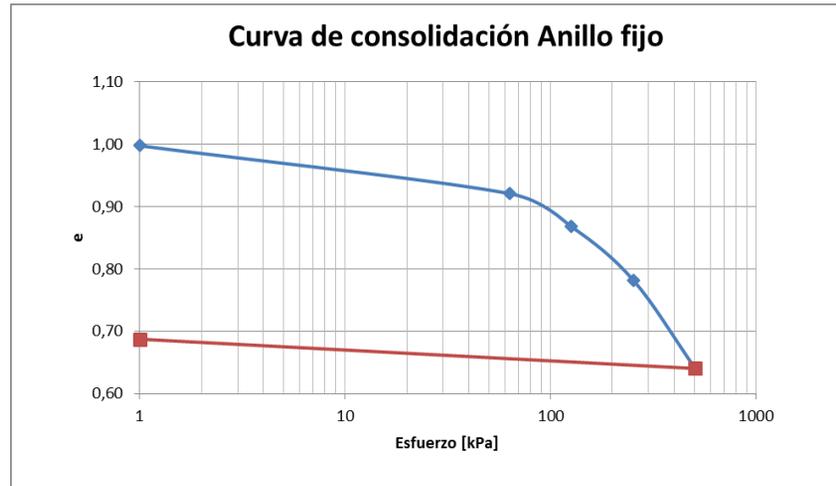
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo fijo muestra 9.



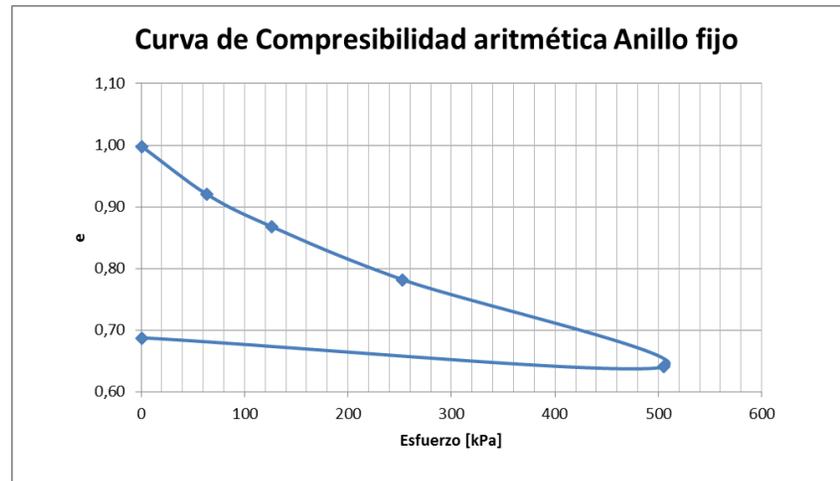
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo fijo muestra 9.



Curva de consolidación anillo fijo muestra 9.



Curva de compresibilidad aritmética anillo fijo muestra 9.



Cuadro de esfuerzos anillo flotante muestra 9.

Cuadro de cargas (real a poner)	
Carga (kg)	Esfuerzo (kPa)
2	50,52
4	101,04
8	202,07
16	404,14

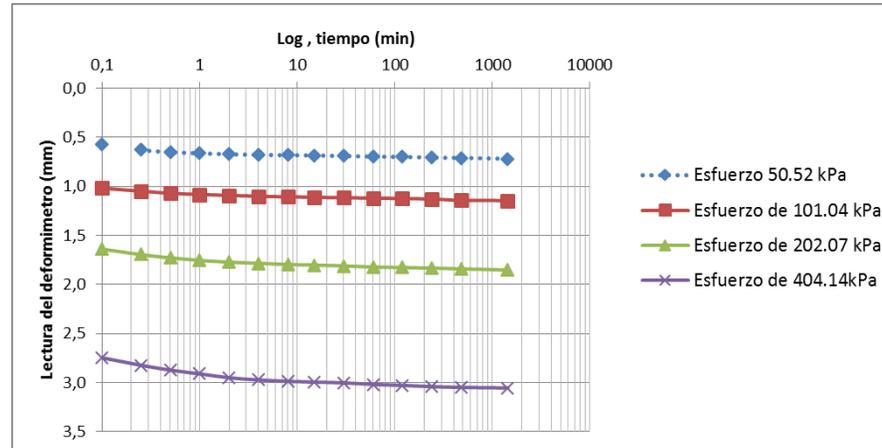
Lecturas del ensayo de consolidación anillo flotante muestra 9.

Día	1	2	3	4
Carga	2 kg	4 kg	8 kg	16 kg
Tiempo	Lectura	Lectura	Lectura	Lectura
0	810			
6s	1098	1320	1631	2184
15s	1125	1335	1658	2222
30s	1136	1346	1675	2247
1m	1142	1352	1688	2266
2m	1147	1357	1697	2286
4m	1150	1361	1703	2297
8m	1152	1364	1709	2304
15m	1153	1366	1712	2308
30m	1156	1369	1716	2312
1h	1159	1370	1722	2320
2h	1161	1373	1724	2325
4h	1164	1375	1727	2331
8h	1166	1382	1731	2335
24h	1170	1383	1737	2338
Descarga				2170

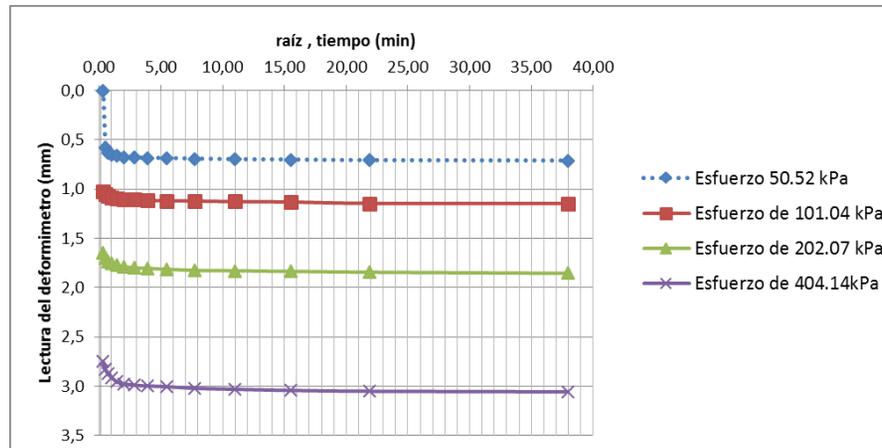
Avance real deformimetro anillo flotante muestra 9.

Lectura real (Avance deformimetro)				
Carga	2 kg	4 kg	8 kg	16 kg
Lecturas	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4
0	0			
6s	288	510	821	1374
15s	315	525	848	1412
30s	326	536	865	1437
1m	332	542	878	1456
2m	337	547	887	1476
4m	340	551	893	1487
8m	342	554	899	1494
15m	343	556	902	1498
30m	346	559	906	1502
1h	349	560	912	1510
2h	351	563	914	1515
4h	354	565	917	1521
8h	356	572	921	1525
24h	360	573	927	1528
Descarga				1360

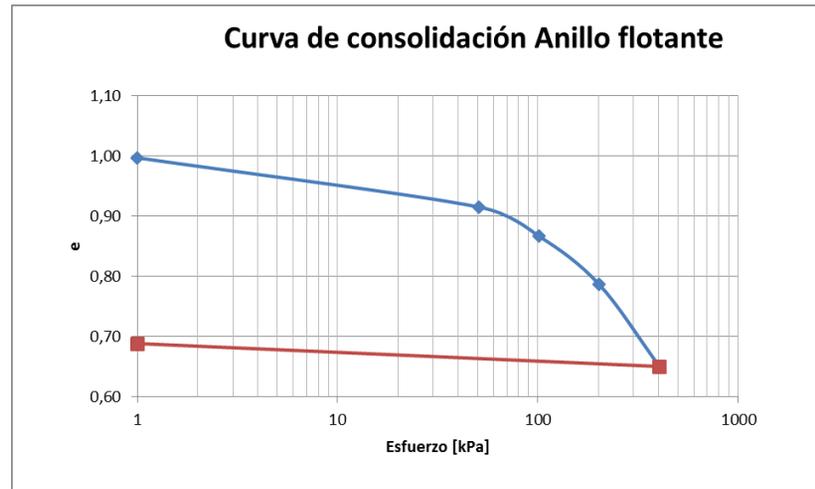
Curva de tiempo vs deformación en escala logarítmica anillo flotante muestra 9.



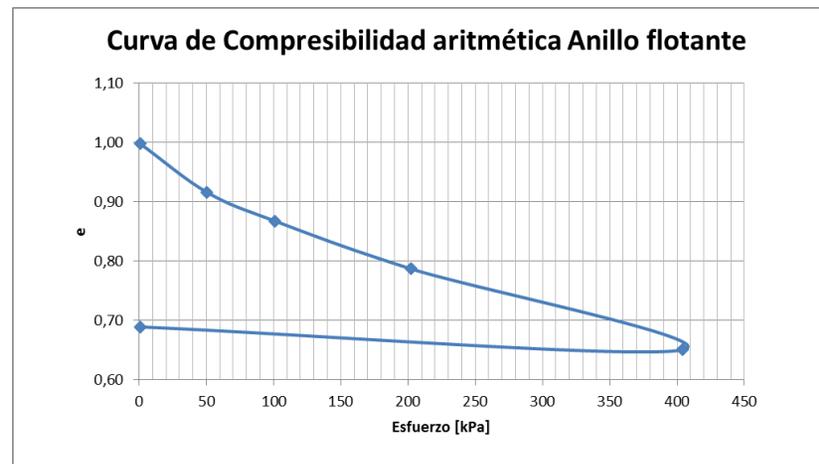
Curva de raíz de tiempo vs deformación en escala aritmética anillo flotante muestra 9.



Curva de consolidación anillo flotante muestra 9.



Curva de compresibilidad aritmética anillo flotante muestra 9.

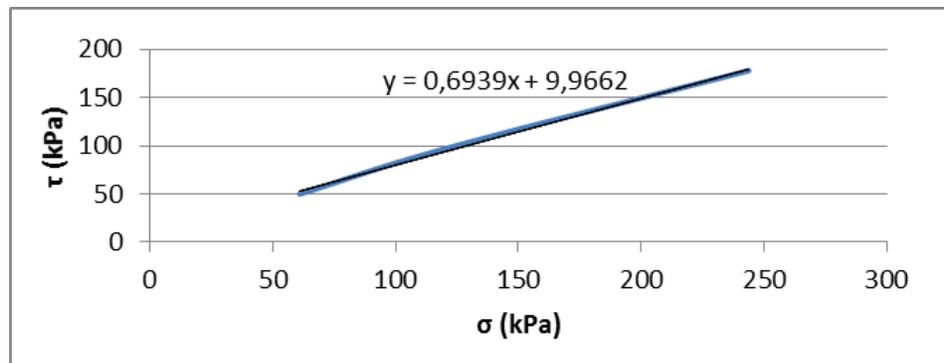
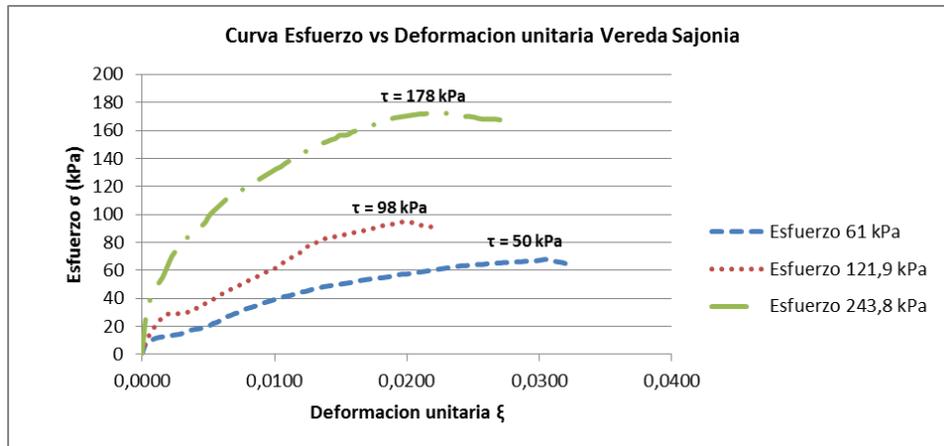


Anexo 2 Resultados ensayo de corte.

Información general sitio 1

Vereda Sajonia		
Peso	1,216	T/m ³
Diametro	6,3	cm
Altura	2,5	cm
Area	31,2	cm ²
Volumen	77,9	cm ³
Profundidad	5,1	m
σ	620,16	kPa
P	19,33	kg

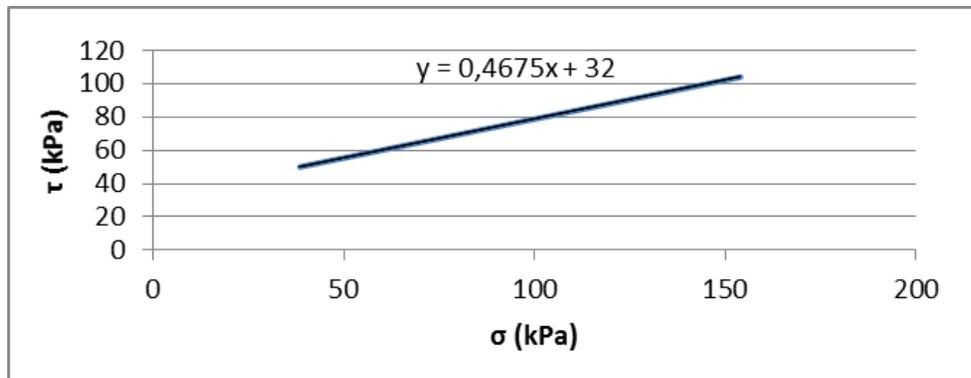
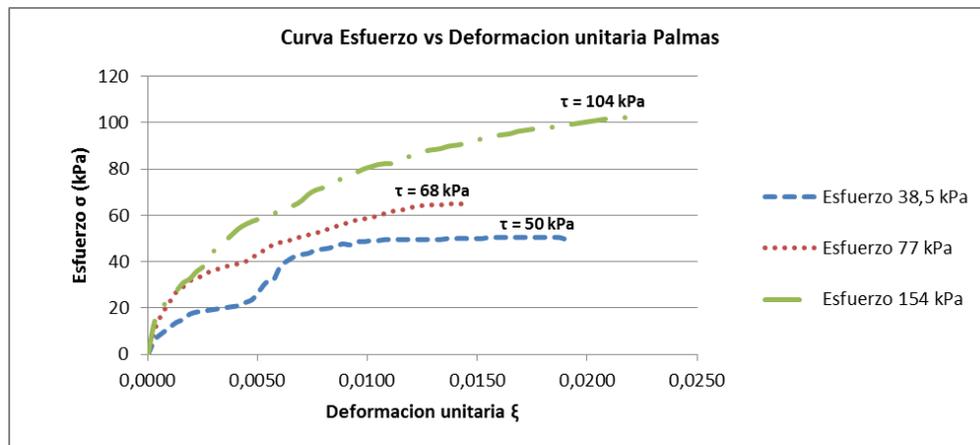
Parametros de resistencia		
C	10	kPa
ϕ	34,8	°



Información general sitio 2

Palmas		
Peso	1,29	T/m ³
Diametro	6,3	cm
Altura	2,5	cm
Area	31,2	cm ²
Volumen	77,9	cm ³
Profundidad	3,1	m
σ	399,9	kPa
P	12,47	kg

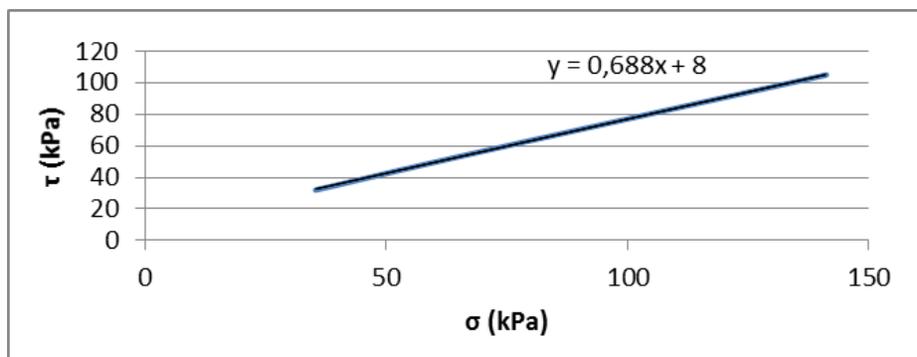
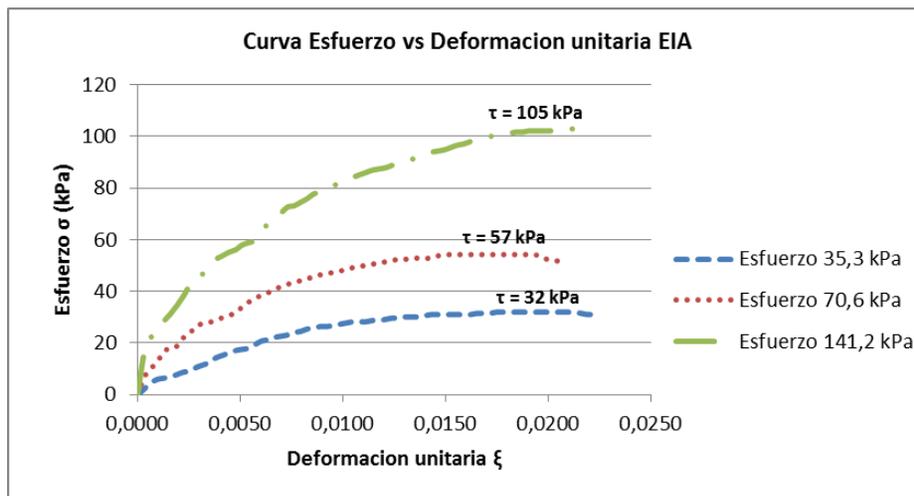
Parametros de resistencia		
C	32	kPa
ϕ	25	°



Información general sitio 3

EIA		
Peso	1,756	T/m ³
Diametro	6,3	cm
Altura	2,5	cm
Area	31,2	cm ²
Volumen	77,9	cm ³
Profundidad	2,1	m
σ	368,76	kPa
P	11,50	kg

Parametros de resistencia		
C	8	kPa
ϕ	34,5	°



Factores de capacidad de carga Terzaghi

Ø	Nc	Nq	Ny	Ø	Nc	Nq	Ny
0	5.70	1.00	0.00	26	27.09	14.21	9.84
1	6.00	1.1	0.01	27	29.24	15.90	11.60
2	6.30	1.22	0.04	28	31.61	17.81	13.70
3	6.62	1.35	0.06	29	34.24	19.98	16.18
4	6.97	1.49	0.10	30	37.16	22.46	19.13
5	7.34	1.64	0.14	31	40.41	25.28	22.65
6	7.73	1.81	0.20	32	44.04	28.52	26.87
7	8.15	2.00	0.27	33	48.09	32.23	31.94
8	8.60	2.21	0.35	34	52.64	36.50	38.04
9	9.09	2.44	0.44	35	57.75	41.44	45.41
10	9.61	2.69	0.56	36	63.53	47.16	54.36
11	10.16	2.98	0.69	37	70.01	53.80	65.27
12	10.76	3.29	0.85	38	77.50	61.55	78.61
13	11.41	3.63	1.04	39	85.97	70.61	95.03
14	12.11	4.02	1.26	40	95.66	81.27	115.31
15	12.86	4.45	1.52	41	106.81	93.85	140.51
16	13.68	4.92	1.82	42	119.67	108.75	171.99
17	14.60	5.45	2.18	43	134.58	126.50	211.56
18	15.12	6.04	2.59	44	151.95	147.74	261.60
19	16.56	6.70	3.07	45	172.28	173.28	325.34
20	17.69	7.44	3.64	46	196.22	204.19	407.11
21	18.92	8.26	4.31	47	224.55	241.80	512.84
22	20.27	9.19	5.09	48	258.28	287.85	650.67
23	21.75	10.23	6.00	49	298.71	344.63	831.99
24	23.36	11.40	7.08	50	347.50	415.14	1072.80
25	25.13	12.72	8.34				