

624
C 2
14553

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay

Ingeniería Civil



Proyecto Final

“Estudio para establecer correlaciones entre parámetros medidos in situ y en laboratorio en arcillas expansivas”

Profesor: Ing. Juan. R. Pairone

J.T.P.: Arq. Mardon Arturo

Tutores: Ing. Fabio Calvo

Lic. Luis Muñoz

Alumnos: Caffa, Mauro Valentín
Cappello, Celia Daniela



UTN - FRCU Dpto. Biblioteca

Proyecto final : Estudio para establece



14553

Abril de 2015

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar un trabajo tan arduo y lleno de dificultades como el desarrollo de una tesis es inevitable que te asalte un muy humano egocentrismo que te lleva a concentrar la mayor parte del mérito en el aporte que has hecho. Sin embargo, el análisis objetivo te muestra inmediatamente que la magnitud de ese aporte hubiese sido imposible sin la participación de personas e instituciones que han facilitado las cosas para que este trabajo llegue a un feliz término. Por ello, es para nosotros un verdadero placer utilizar este espacio para ser justo y consecuente con ellas, expresándoles nuestro agradecimientos.

- ❖ Grupo GIMAR. Por darnos la oportunidad de realizar esta tesis bajo su dirección. Su apoyo y confianza en nuestro trabajo y su capacidad para guiar nuestras ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en nuestra formación como investigadores. Las ideas propias, siempre enmarcadas en su orientación y rigurosidad, han sido la clave del buen trabajo que hemos realizado juntos, el cual no se puede concebir sin su siempre oportuna participación.
- ❖ Laboratorio de Ingeniería Civil. Por la colaboración en la realización de ensayos y préstamo de equipo.
- ❖ A nuestros padres. Porque lo que somos hoy se lo debemos a ellos y por inculcarnos la importancia de estudiar.
- ❖ A nuestros amigos. Por el apoyo incondicional.



UTN - FRCU Dpto. Biblioteca
Proyecto final : Estudio para establece



14553

*“La ciencia puede divertirnos y
fascinarnos, pero es la Ingeniería la que cambia
el mundo”*

Isaac Asimov

FACULTAD REGIONAL CONCEPCION DEL URUGUAY
UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL
MONUMENTO HISTORICO NACIONAL

TEL./FAX: (03442) 425511 / 423803
Ing. PEREYRA 676 - E3264BTD - CONCEPCION DEL URUGUAY
ENTRE RIOS - REP. ARGENTINA

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	Página 1
I.1. Objetivo principal.....	Página 1
I.2. Objetivos complementarios	Página 1
I.3. Estructura de la investigación	Página 2
II. MARCO TEÓRICO.....	Página 3
II.1. Minerales arcillosos	Página 3
II.1.1. <i>Caolinita</i>	Página 4
II.1.2. <i>Halloysita</i>	Página 6
II.1.3. <i>Montmorillonita</i>	Página 7
II.1.4. <i>Nontronita</i>	Página 9
II.1.5. <i>Vermiculita</i>	Página 9
II.1.6. <i>Illita</i>	Página 11
II.1.7. <i>Clorita</i>	Página 12
II.1.8. <i>Sepiolita y Attapulgita</i>	Página 12
II.2. Iones de cambio	Página 14
II.3. Fuerzas fisicoquímicas actuantes entre las partículas de arcilla	Página 15
II.3.1. <i>Doble capa</i>	Página 15
II.3.2. <i>Las fuerzas en los contactos</i>	Página 16
II.3.2.1. <i>Estructura floculada</i>	Página 17
II.3.2.2. <i>Estructura dispersa</i>	Página 17
II.4. Identificación de suelos potencialmente expansivos	Página 18
II.4.1. <i>Identificación Mineralógica</i>	Página 18
II.4.1.1. <i>Difracción por rayos X</i>	Página 18
II.4.1.2. <i>Análisis Térmico Diferencial</i>	Página 19
II.4.1.3. <i>Análisis de absorción de colorantes</i>	Página 19
II.4.1.4. <i>Análisis por microscopio electrónico</i>	Página 20

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
 Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
 Cappello, Celia Daniela

II.4.2. <i>Determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos</i>	Página 20
II.4.2.1. <i>Límite Líquido y Límite Plástico</i>	Página 21
II.4.2.2. <i>Límite de Contracción</i>	Página 21
II.4.2.3. <i>Contenido de coloides – Método del Hidrómetro</i>	Página 22
II.4.2.4. <i>Expansión Libre del suelo</i>	Página 29
II.4.3. <i>Métodos indirecto de determinación del potencial</i>	
<i>expansivo del suelo</i>	Página 29
II.4.3.1. <i>Método Lambe</i>	Página 29
II.4.3.2. <i>Método de McDowell</i>	Página 31
II.4.4. <i>Medidas directas de la expansión del suelo</i>	Página 32
II.5. <i>Evaluación del potencial expansivo en base a las propiedades básicas</i>	Página 33
II.5.1. <i>Método desarrollado por Holtz y Gibbs</i>	Página 33
II.5.2. <i>Índice de Deseccación de Vijayvergiya y Ghazzaly (1973)</i>	Página 34
II.5.3. <i>Índice de Deseccación de Cuellar (1978)</i>	Página 35
II.5.4. <i>Índice de Deseccación de Livneh (1969)</i>	Página 36
II.5.5. <i>Índice de Deseccación de Skempton (1953)</i>	Página 37
II.5.6. <i>Método del “Índice de la actividad de la arcilla” propuesto</i> <i>por Seed, Woodward y Lundgren</i>	Página 39
II.6. <i>Evaluación cuantitativa del potencial expansivo en base a las</i> <i>propiedades básicas</i>	Página 40
II.6.1. <i>Humedad máxima de un terreno descubierto</i>	Página 41
II.6.1.1. <i>Mc Dowell (1957)</i>	Página 41
II.6.1.2. <i>Cuellar (1978)</i>	Página 41
II.6.2. <i>Presión de Hinchamiento</i>	Página 41
II.6.2.1. <i>Vijayvergiya y Ghazzaly (1973)</i>	Página 42
II.6.2.2. <i>Nadeo (1999)</i>	Página 42
II.6.2.3. <i>Jiménez Salas (1955)</i>	Página 42
II.6.3. <i>Hinchamiento</i>	Página 43
II.6.3.1. <i>Jimenez Salas y Serratosa (1957)</i>	Página 43

II.6.3.2. Nadeo (1999).....	Página 44
II.6.3.3. Vijayvergiya y Ghazzaly (1973)	Página 44
II.6.3.4. Seed, Woodward y Lundgren (1962).....	Página 45
II.6.3.5. Komornik y David (1969)	Página 46
II.7. Factores que intervienen en el fenómeno de la expansión	Página 46
II.7.1. Naturaleza y tipo de arcilla	Página 46
II.7.2. Humedad inicial	Página 46
II.7.2.1. Curvas de Expansión vs Tiempo.....	Página 46
II.7.3. Peso específico seco del suelo	Página 47
II.7.4. Potencia del estrato activo.....	Página 47
II.7.5. Características plásticas del suelo	Página 48
II.7.6. Fatiga de la expansión	Página 48
II.8. Consolidómetro.....	Página 49
II.8.1. Clases	Página 50
II.8.1.1. Consolidómetro de anillo flotante.....	Página 50
II.8.1.2. Consolidómetro de anillo fijo	Página 50
II.8.1.3. Consolidómetro neumático “Geotec”.....	Página 51
II.8.1.4. Consolidómetro de contra presión	Página 51
II.8.1.5. Consolidómetro Rowe	Página 51
II.9. Clasificación de suelos.....	Página 52
II.9.1. Clasificación de los suelos según AASHTO.....	Página 52
II.9.1.1. Suelos granulares	Página 52
II.9.1.2. Suelos finos.....	Página 52
II.9.2. Clasificación unificada de suelos (SUCS)	Página 53
II.9.2.1. Suelo gruesos	Página 53
II.9.2.2. Suelo finos	Página 53
III. PROGRAMA EXPERIMENTAL	Página 58
III.1. Localización	Página 58

III.2. Fabricación del dispositivo de referencia	Página 60
III.3. Instalación del marco.....	Página 61
III.4. Instalación de comparadores	Página 61
III.5. Instalación de sensores de humedad y datalogger	Página 65
III.6. Extracción de muestras.....	Página 67
<i>III.6.1. Extracción de muestras para clasificación del suelo</i>	<i>Página 67</i>
<i>III.6.2. Extracción de muestras para ensayo de hinchamiento</i>	<i>Página 68</i>
III.7. Procedimiento de ensayo para clasificación y caracterización de suelo cohesivo.....	Página 72
<i>III.7.1. Determinación del contenido de humedad.</i>	<i>Página 73</i>
<i>III.7.2. Limite líquido.....</i>	<i>Página 74</i>
<i>III.7.2.1. Procedimiento para la determinación del límite líquido.</i>	<i>Página 75</i>
<i>III.7.3. Limite plástico</i>	<i>Página 77</i>
<i>III.7.3.1. Procedimiento para la determinación del límite plástico....</i>	<i>Página 77</i>
III.8. Método de ensayo para la determinación del potencial de hinchamiento unidimensional de suelos cohesivos	Página 78
<i>III.8.1. Equipo</i>	<i>Página 79</i>
<i>III.8.2. Muestreo</i>	<i>Página 81</i>
<i>III.8.3. Preparación de la muestra.</i>	<i>Página 82</i>
<i>III.8.4. Determinación de propiedades índice.....</i>	<i>Página 83</i>
<i>III.8.5. Procedimiento</i>	<i>Página 84</i>
<i>III.8.6. Cálculo</i>	<i>Página 86</i>
III.9. Densidad aparente	Página 90
<i>III.9.1. Métodos de determinación de la densidad aparente</i>	<i>Página 91</i>
<i>III.9.1.1. Método del cilindro metálico</i>	<i>Página 91</i>
<i>III.9.1.2. Método del terrón (conjunto de agregados).....</i>	<i>Página 92</i>
<i>III.9.1.3. Método de excavación y determinación del volumen extraído.....</i>	<i>Página 92</i>
IV. CONCLUSIONES.....	Página 94

V. BIBLIOGRAFÍA Página 97

ÍNDICE DE IMÁGENES Y FIGURAS

IMAGEN 1. Microfotografía de caolinita.....	Página 6
IMAGEN 2. Microfotografía de halloysita.....	Página 7
IMAGEN 3. Microfotografía de montmorillonita.....	Página 9
IMAGEN 4. Microfotografía de illita.....	Página 11
IMAGEN 5. Microfotografía de la clorita.....	Página 12
IMAGEN 6. Microfotografía de la sepiolita.....	Página 13
IMAGEN 7. Microfotografía de la attapulgita.....	Página 13
IMAGEN 8. Técnica de absorción de azul de metileno.....	Página 19
IMAGEN 9. Hidrómetro.....	Página 24
IMAGEN 10. Localización de Concepción del Uruguay.....	Página 59
IMAGEN 11. Localización de I.N.T.A.....	Página 59
IMAGEN 12. Lugar de Emplazamiento del Instrumental, lote 27. 32°30'33.15"S 58°22'12.64".	Página 59
IMAGEN 13. Armado del marco.....	Página 60
IMAGEN 14. Camisa y protección del pilar.....	Página 61
IMAGEN 15. Pozo realizado con pala vizcachera.....	Página 62
IMAGEN 16. Comparador montado en base magnética.....	Página 64
IMAGEN 17. Protección de comparadores.....	Página 64
IMAGEN 18. Sensor de humedad.....	Página 65
IMAGEN 19. Sensor de humedad instalado en pozo.....	Página 66
IMAGEN 20. Datalogger en caja metálica.....	Página 67
IMAGEN 21. "Peludo".....	Página 68
IMAGEN 22. Pala vizcachera.....	Página 68

IMAGEN 23. Extractor de muestra.....	Página 70
IMAGEN 24. Muestra dentro del sacamuestra	Página 70
IMAGEN 25. Extracción de muestra con extractor	Página 71
IMAGEN 26. Muestra extruida.....	Página 71
IMAGEN 27. Variación del suelo con la profundidad.....	Página 72
IMAGEN. 28. Cascador de Casagrande eléctrico con contador.	Página 76
IMAGEN 29. Cilindros para determinación de limite plástico	Página 78
IMAGEN 30. Equipo de carga	Página 79
IMAGEN 31. Consolidómetro ensamblado con aro de fijación.	Página 80
IMAGEN 32. Placa de carga.	Página 80
IMAGEN 33. Piedras porosas	Página 80
FIGURA 1. Estructura tetraédrica.....	Página 4
FIGURA 2. Estructura octaédrica.	Página 4
FIGURA 3. Estructura química de Caolinita	Página 5
FIGURA 4. Estructura química de Montmorillonita	Página 8
FIGURA 5. Estructura química de la Vermiculita	Página 10
FIGURA 6. Formas de visualizar la doble capa.	Página 16
FIGURA 7. Estructura floculada, estructura dispersa.....	Página 17
FIGURA 8. Relación entre el contenido de agua gravimétrico con respecto al volumen del suelo	Página 22
FIGURA 9. Aparato de Lambe	Página 30
FIGURA 10. Relación entre el índice hinchamiento y el cambio potencial de volumen del ensayo de Lambe (Jiménez Salas).....	Página 31
FIGURA 11. Grafico que muestra una relación típica entre el contenido de coloides, el índice plástico y el límite de contracción	Página 33
FIGURA 12. Criterio de Vijayvergiya y Ghazzaly (1973).	Página 34
FIGURA 13. Relaciones entre índice de sequedad, el limite plástico y la presión de	

Hinchamiento (Cuellar, 1978).....	Página 35
FIGURA 14. Gráfico de Skempton (arcillas activas en Entre Ríos, Diagnóstico y Remediación. Informe de avance N°1 – Grupo G.I.A.A. UTN FRCON)	Página 38
FIGURA 15. Criterio de Seed, Woodward y Lundgren para calificar el potencial de hinchamiento de una arcilla	Página 40
FIGURA 16. Curva de fatiga típica de las obtenidas en ensayos de laboratorio	Página 48
FIGURA 17. Consolidómetro	Página 49
FIGURA 18. Consolidómetro de anillo flotante	Página 50
FIGURA 19. Consolidómetro de anillo fijo	Página 50
FIGURA 20. Consolidómetro Rowe.....	Página 51
FIGURA 21. Carta Plasticidad para la clasificación en laboratorio de suelos de grano fino.	Página 54
FIGURA 22. Clasificación para suelo fino	Página 55
FIGURA 23. Esquema del instrumental instalado	Página 58
FIGURA 24. Instalación de varilla	Página 63
FIGURA 25. Esquema de instalación del sensor de humedad	Página 66
FIGURA 26. Esquema del sacamuestra.....	Página 69
FIGURA 27. Aparato de Casagrande	Página 75
FIGURA 28. Curva de hinchamiento (ASTM D4546-96).....	Página 87
FIGURA 29. Curva de compresibilidad (ASTM D4546-96).....	Página 89

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Capacidad de cambio de cationes de minerales arcillosos	Página 14
TABLA 2. Capacidad de cambio de aniones de minerales arcillosos	Página 15
TABLA 3. Relación entre las características plásticas y el hinchamiento de los suelos.....	Página 21
TABLA 4. Valores de profundidad efectiva L para empleo de la ecuación de Stokes en	

la determinación del diámetros de la partícula con hidrómetro ASTM152H	Página 26
TABLA 5. Valores de corrección por temperatura	Página 27
TABLA 6. Gravedad específica con respecto a la temperatura.....	Página 28
TABLA 7. Método de Lambe.....	Página 30
TABLA 8. Criterio para la identificación de suelos expansivos propuestos por Holtz.	Página 34
TABLA 9. Actividad de los suelos arcillosos	Página 37
TABLA 10. Actividad de algunos minerales constituyentes de los suelos (J.Salas).....	Página 39
TABLA 11. Hinchamiento para muestras compactadas según Seed, Woodward y Lundgren	Página 45
TABLA 12. S.U.C.S.....	Página 57

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
Cappello, Celia Daniela

I. Introducción

El trabajo que se presenta consiste en una serie de ensayos de laboratorio y ensayos de campo en suelo arcilloso. El mismo da continuidad al Proyecto Final “Caracterización Preliminar de Arcillas Activas de la Ciudad de Concepción del Uruguay” cuya autoría corresponde a Bach Adam Alejandro, Carrasco Juan Manuel y Noir Julio Andrés.

Esta tesis y el Proyecto Final recién mencionado representan diferentes etapas de un proyecto integral que desarrolla el Grupo de investigación sobre Materiales y Agregados Regionales G.I.M.A.R. de la Facultad Regional de Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional.

Para el desarrollo de este trabajo se eligió como escenario un predio localizado en la Estación Experimental Agropecuaria (E.E.A.) de Concepción del Uruguay, perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (I.N.T.A.). El motivo de esta elección es que en ese lugar se encuentra un suelo arcilloso que es el adecuado para nuestra investigación.

Allí se realizó el trabajo de campo, se emplazó un marco de hierro como punto de referencia, se instalaron comparadores para registrar ascensos y descenso del suelo a distintas profundidades. Además se colocaron tres sensores de humedad para registrar las variaciones en el contenido de humedad del suelo.

En el laboratorio de la Facultad Regional de Concepción del Uruguay se trabajó con las muestras extraídas del I.N.T.A., a las mismas se determinó Límites de Atterberg, humedad natural, densidad aparente, hinchamiento libre y presión de hinchamiento,

I.1. Objetivo Principal

1. Verificar correspondencia entre ensayos de campo y laboratorio e identificar eventuales desviaciones, comparando parámetros característicos de las arcillas expansivas expuestas a condiciones reales in situ, especialmente variaciones de humedad natural.

I.2. Objetivos Complementarios

2. Medir y verificar in situ relación entre humedad natural y movimiento de contracción y expansión de las arcillas.
3. Comparar parámetros involucrados en la actividad de las arcillas relacionando precipitaciones, humedad natural y variación volumétrica de las arcillas.

4. Establecer el grado de respuesta de la humedad natural del suelo luego de las precipitaciones a diferentes profundidades.
5. En todos los casos, idear y diseñar gráficos representando variaciones de un parámetro versus otro parámetro, utilizando unidades coherentes y escalas representativas.
6. Adquirir experiencia en trabajos de campo vinculados a la Geotecnia y Mecánica de Suelos.
7. Desarrollar capacidades vinculadas a la elaboración de procedimientos de ensayos in situ, identificando fallencias para replantear soluciones.

Como complemento y para poder llevar a cabo dichos objetivos fue necesario el cumplimiento previo de las siguientes tareas:

- Diseño, fabricación e emplazamiento de una estructura que nos permita instalar en el campo los instrumentos de medición necesarios.
- Conocer el principio del funcionamiento de los sensores de humedad utilizados para lograr la correcta interpretación de los datos obtenidos.

I.3. Estructura de la Investigación

Se detalla a continuación la organización del trabajo:

- **Capítulo I: Introducción.** Comprende el presente capítulo.
- **Capítulo II: Marco Teórico.** Se describen los distintos Minerales Arcillosos Cristalinos, los aspectos teóricos fundamentales para la comprensión del problema abordado y los métodos experimentales más usados en la actualidad para la evaluación del potencial expansivo.
- **Capítulo III: Programa Experimental.** Se detalla la ubicación de la zona donde se realizó el trabajo de campo, el equipo instalado, los elementos empleado para la extracción de muestras, el acondicionamiento del espécimen y los procedimientos de ensayo, haciendo referencia en cada caso a la normativa empleada.
- **Capítulo IV: Conclusiones.** Se exponen las conclusiones de esta investigación de acuerdo a los resultados obtenidos y se realizan propuestas para continuar con esta línea de estudio.
- **Capítulo V: Bibliografía.** Consiste en un recuento de la bibliografía y trabajos consultados durante la confección de este proyecto.

- **Capítulo VI: Anexos.** Anexo A: Resultado de ensayos de laboratorio, Anexo B: Datos pluviométricos, Anexo C: Representación gráfica de datos, Anexo D: Sensores de Humedad, características generales.

II. Marco Teórico

II.1. Minerales Arcillosos

Estos minerales son los componentes mayoritarios de las partículas de suelo de tamaño inferior a 2 μm . Se generan mediante procesos de meteorización química de rocas, y su composición depende tanto de las rocas de las que provienen como de las condiciones climáticas donde se produjo la meteorización.

En la actualidad, el estudio por rayos X ha permitido determinar que las partículas de arcilla son cristales con especies mineralógicas bien identificadas. Existe gran variedad en la composición química de las arcillas, lo que depende fundamentalmente de la mezcla entre las especies, y en un segundo lugar, de los fenómenos de adsorción desarrollados entre partículas. A parte de las especies cristalinas, que son la fracción predominante en la composición química de las arcillas, existen también cantidades menores de una mezcla de geles amorfos de sílice y sesquióxidos. Sin embargo, estos geles tienen una existencia acotada, ya que en general evolucionan hacia el estado cristalino.

Los minerales arcillosos son fundamentalmente silicatos de aluminio, hierro, magnesio, etc., y su estructura está formada por la combinación de los elementos fundamentales, que son el tetraedro y el octaedro. En el tetraedro (ver Figura 1) existen cuatro átomos de oxígeno que rodean a uno central de sílice, y luego esta unidad se dispone formando capas, de manera que los átomos de oxígeno de las bases se encuentran en un mismo plano, y a su vez cada átomo de oxígeno es compartido por dos tetraedros.

Por otra parte, el octaedro está formado por seis átomos de oxígeno o iones hidroxilos, que rodean a un átomo central de aluminio, hierro, magnesio, etc. Como en el caso anterior, estos octaedros se agrupan formando capas (ver Figura 2).

Según como se combinen estos dos tipos de capas, y de los cationes o aniones que las formen, se tendrá como resultado los distintos minerales arcillosos cristalinos. Los distintos átomos de un mineral arcilloso están unidos por enlaces muy comunes, como el iónico y el covalente. Existe también otro tipo de enlace, más débil que los anteriores, denominado enlace de hidrógeno. En este, el hidrógeno de un grupo de hidroxilo conecta dos átomos no metálicos, como lo es el oxígeno. Este enlace a veces se

encuentra entre dos capas contiguas de un mineral arcilloso, que por su debilidad característica genera una unión que se haya sujeta la exfoliación.

Lamina octaédrica (Al/Mg): Es una estructura un poco más compleja, cada átomo de aluminio o magnesio está rodeado por seis átomos (o por grupos OH), existiendo en la lámina octaédrica átomos de oxígeno con un electrón libre que se superpone a lo de lámina tetraédrica y permite así realizar enlaces tipo covalentes entre ambas laminas, estas laminas poseen un espesor de aproximadamente 3 Å.

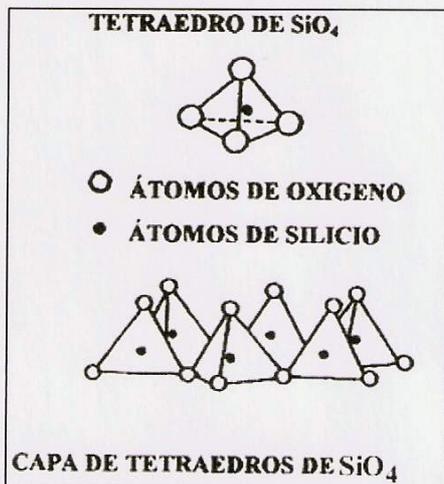


Figura 1: Estructura tetraédrica

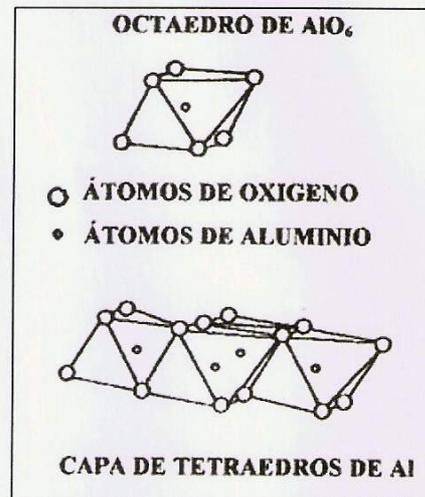


Figura 2: Estructura octaédrica

Lamina Tetraédrica de Sílice (Si): Cada átomo de sílice está rodeado por cuatro átomos de oxígeno y uno de estos átomos posee un electrón libre que se puede compartir con otra lamina, siendo el espesor de la lámina de aproximadamente 4 Å.

II.1.1. CAOLINITA

Mineral de la arcilla, constituyente primario del caolín, cuya fórmula general es $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$. La caolinita es un mineral rico en alúmina, de baja capacidad de intercambio catiónico y bajo potencial de expansión.

Está formada por un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de los feldespatos. Formada por la unión de láminas tetraédricas y octaédricas de

aluminio mediante átomos de oxígeno, con un enlace de tipo hidrogenito, por tanto débil. En los extremos, la partícula tiene carga eléctrica pues no todas las láminas son iguales.

La caolinita es una arcilla blanca muy pura que se utiliza para la fabricación de porcelanas y de aprestos para almidonar. El caolín es un suelo natural en el que abunda la caolinita, que le aporta a menudo un color blanco

Está formado por pequeñas capas hexagonales de superficie plana. En su estructura cristalina se distinguen dos láminas, una formada por tetraedros, en cuyos vértices se situarían los átomos de oxígeno y el centro estaría ocupado por el átomo de silicio, y otra formada por octaedros, en cuyos vértices se situarían los átomos del grupo hidróxido y el oxígeno, y en el centro el átomo de aluminio.

La caolinita es de los pocos minerales que pueden llegar a tener carga positiva al no presentar sustituciones. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es baja debido a que su estructura tiene una carga muy pequeña (CIC = 1-10 moles+/Kg). Los suelos ricos en caolinita son muy poco fértiles, ya que uno de los parámetros que controla la fertilidad es la CIC. La caolinita presenta baja plasticidad, cohesión superficie específica (5-20 m²/g). Son características de suelos con alta meteorización y su formación se ve favorecida porque solo requiere Si y Al.

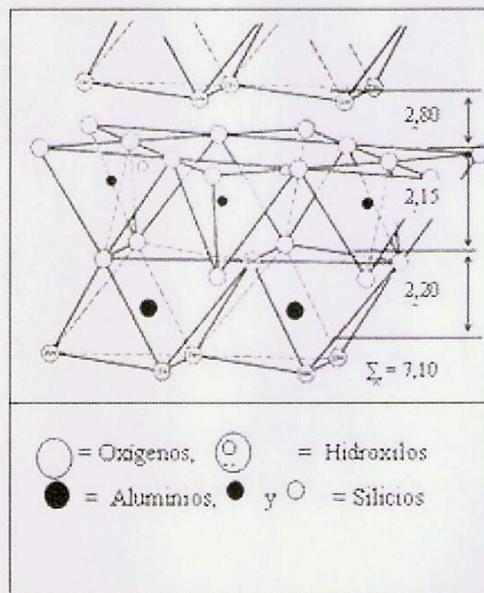


Figura 3: Estructura química de la Caolinita



Imagen 1 Microfotografía de Caolinita

II.1.2. HALLOYSITA

La más desordenada es la halloysita, que presenta dos moléculas de agua. Los minerales de este grupo apenas presentan sustituciones isomorfas, por lo que únicamente generan cargas de tipo variable

La halloysita tiene una CIC ligeramente superior (5-40 mol+/Kg) y presenta normalmente un aspecto tabular debido a que las láminas se enrollan sobre si mismas. Se forma por meteorización de calizas volcánicas y vidrios volcánicos.

Estructuralmente es semejante a la caolinita. Una diferencia es que una capa de moléculas de agua puede interponerse entre cada dos unidades fundamentales, en cuyo caso la fórmula es $[\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Al}_4(\text{OH})_8]4\text{H}_2\text{O}$. La presencia de esta capa de moléculas de agua supone un enlace débil entre las sucesivas unidades, y debido a ello las distancias en una de las caras de la unidad fundamental se acortan, en la otra se mantienen iguales a las de la caolinita. El resultado es que la hoja plana de caolinita se transforma en una hoja enrollada.



Imagen 2: Microfotografía de la Halloysita

II.1.3. MONTMORILLONITA

Enlace de láminas elementales formadas por una lámina octaédrica intercalada entre dos laminas tetraédricas. El enlace entre las dos laminas es de tipo hidrogeno muy débil

De esta manera el arreglo presente en cada estructura de arcilla, hace visible que sobre estos materiales sea más importante los efectos de superficie y que estos predominen sobre los de volumen, por tal motivo su valencia los hace más o menos atractivas a las moléculas de agua y a los iones sueltos. Como toda partícula de arcilla esta cargada negativa o positivamente, así la sustitución isomorfa, es el cambio de un elemento por otro sin crear cambio en la forma cristalina, pudiéndose sustituir iones de aluminio por silicio, para balancear la carga negativa de los iones de potasio, esto sucede en la estructura de la illita.

El arreglo de los átomos permite definir diferentes tipos de estructuras, que son función de las fuerzas entre partículas y el agua de hidratación presente en su formación, así las fuerzas de atracción y repulsión permiten describir el comportamiento mecánico y las características viscosas de los suelos blandos, como también

diferenciarlos ya que el comportamiento ante carga de una montmorillonita es diferente al de una caolinita.

Es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas. Es un hidroxisilicato de magnesio y aluminio.

Se caracteriza por una composición química inconstante. Es soluble en ácidos y se expande al contacto con agua. Estructuralmente se compone por una capa central que contiene aluminio y magnesio coordinados octaédricamente en forma de óxidos e hidróxidos. Dicha capa central está rodeada por otras dos capas. Las capas externas están formadas por óxidos de silicio coordinados tetraédricamente.

Para cimentación de construcciones es uno de los terrenos en los que se deben tomar más precauciones debido a su carácter expansivo. También posee propiedades tixotrópicas, lo que permite su utilización como lodos de perforación.

Los minerales de este grupo se expanden al humedecerse, y se contraen al secarse, debido a la introducción de agua entre las capas elementales de los cristales. El magnesio y el hierro pueden remplazar el aluminio, y éste al oxígeno en la estructura cristalina. Los minerales de este grupo, de común ocurrencia en suelos y rocas sedimentarias, se forman por alteración de minerales ferromagnesianos, feldespatos cálcicos y vidrios volcánicos, y son los constituyentes principales de la bentonita y la tierra de Fuller. Los minerales de este grupo son la montmorillonita, nontronita, saponita, hectorita, sauconita, beidellita, volkonskoitay griffitita.

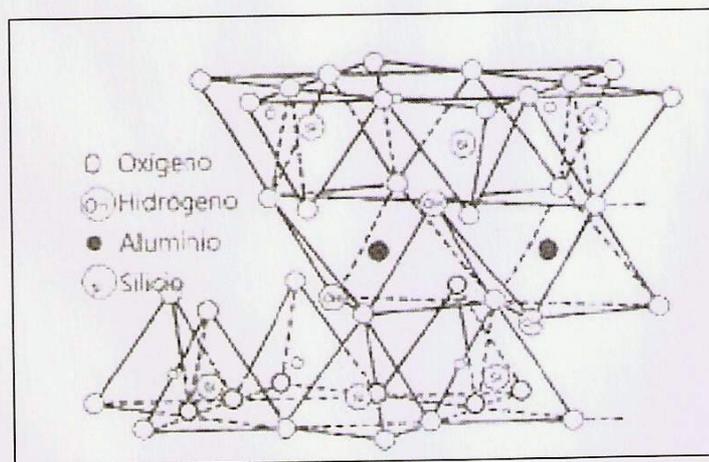


Figura 4: Estructura química de la Montmorillonita

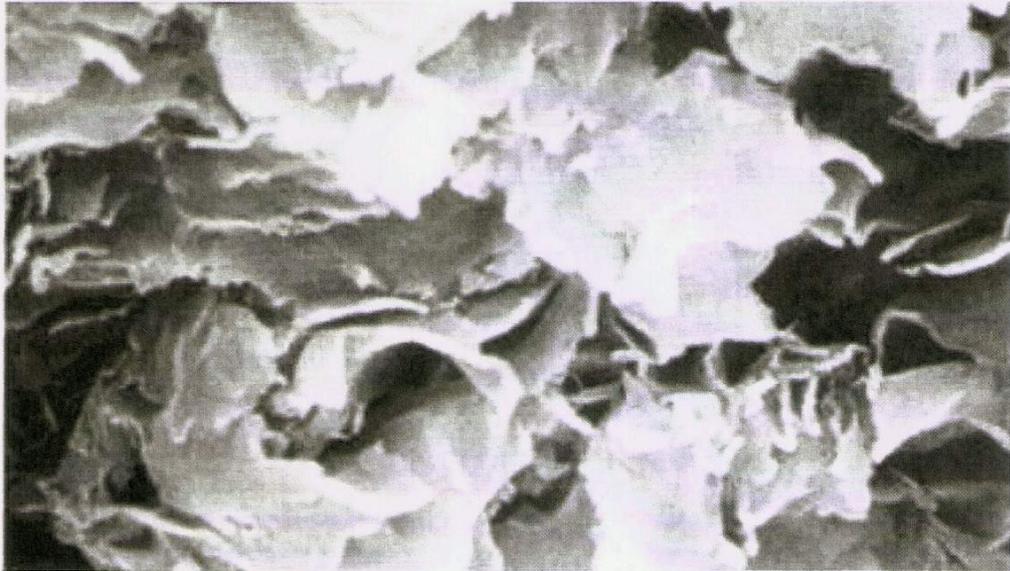


Imagen 3: Microfotografía de Montmorillonita

II.1.4. NONTRONITA

Es un mineral de la clase de los filosilicatos, y dentro de esta pertenece al llamado “grupo de la esmectita”. La estructura molecular es en láminas con tetraedros y octaedros. El grupo de la esmectita al que pertenece son todos minerales similares a la arcilla que cristalizan en el sistema monoclinico.

Además de los elementos de su fórmula, suele llevar como impurezas: titanio, magnesio y calcio, que le dan las distintas tonalidades de color que presenta. También puede formarse en suelos con ceniza volcánica pobremente drenados, así como en algunos depósitos de minerales sometidos a alteración hidrotermal de tipo basalto o calizas con metamorfismo de contacto.

II.1.5. VERMICULITA

Es un mineral formado por silicatos de hierro o magnesio, del grupo de las micas. El tamaño de sus partículas es mucho mayor que el de la montmorillonita.

Son minerales importantes, que se encuentra en sedimentos y suelos. Sus propiedades y estructura no están, sin embargo, completamente aclaradas y esto parece provenir de que, en cierta manera, aparezcan como un intermediario entre las cloritas y montmorillonitas.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
Cappello, Celia Daniela

La estructura fue determinada por Grither (1934) siendo confirmada posteriormente por Hendricks y Jefferson (1938).

La mayoría son trioctaédricas y derivan fácilmente de la biotita por meteorización. Existen también algunos análogos dioctaédricos, como lo han confirmado Brown (1953) en suelos Inglaterra.

Su estructura corresponde a una estratificación regular de unidades de talco y una doble capa de moléculas de agua, o mejor dicho, iones magnesio hidratados.

El mineral sin tratamiento tiene un espaciado basal de 14-15 Å. Este espaciado es similar al de las cloritas pero, a diferencia de estas, cuando la vermiculita se calienta, pierde agua incluida entre las hojas contrayéndose la estructura a 9-10 Å. Con respecto a la montmorillonita se diferencia en que al ser tratada con moléculas orgánicas polares, como glicerol o glicol o tilepico, no se expande más allá de 15 Å. En cambio la montmorillonita sí.

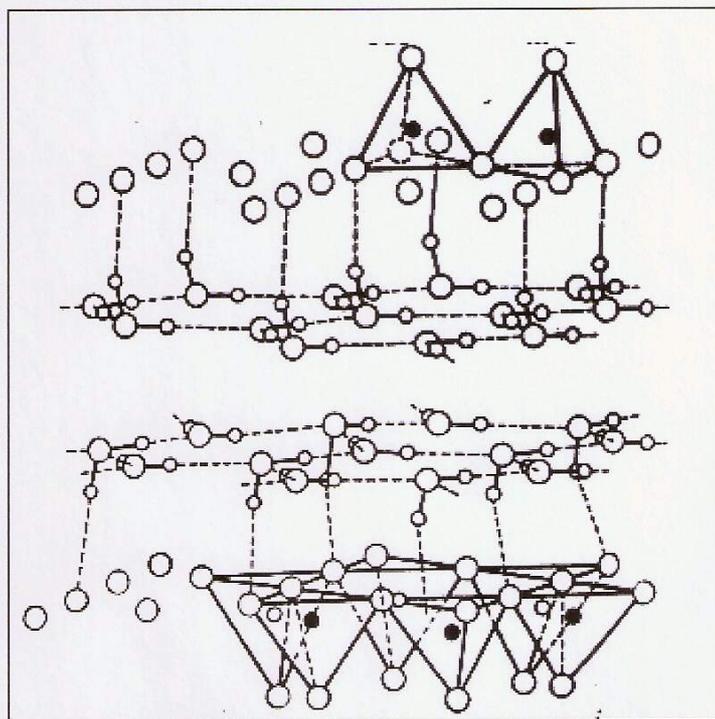


Figura 5: Estructura química de la Vermiculita

FACULTAD REGIONAL CONCEPCION DEL URUGUAY
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
MONUMENTO HISTÓRICO NACIONAL

TEL/FAX: (03442) 425541 / 423803
Ing. PEREYRA 676 - C3264BTD - CONCEPCION DEL URUGUAY
ENTRE RIOS - REP. ARGENTINA

II.1.6. ILLITA

Compuesta por enlace de láminas tetraédricas, intercaladas por iones positivos de potasio K^+ , por lo que el enlace creado es fuerte. El átomo de aluminio puede ser sustituido por iones de magnesio, lo que se conoce como sustitución isomorfa produciéndose a un desequilibrio eléctrico que se compensa con la absorción en superficie de cationes de: sodio, calcio, litio, potasio o hierro.

Es semejante a la Montmorillonita. Una de las diferencias es que las deficiencias de carga son equilibradas casi en su totalidad por átomos de potasio que se sitúan entre las diversas unidades fundamentales, y que no son intercambiables. Es una arcilla de estructura no expansiva, ya que no admite la entrada de átomos de agua entre las capas.

Término genérico para designar un grupo de minerales de arcilla caracterizados por una estructura de tres capas, ampliamente distribuidas en sedimentos arcillosos, particularmente en lutitas arcillosas y en los suelos derivados de ellas. La illita contiene menos potasio y más agua que las micas, y más potasio que la caolinita y la montmorillonitas, y ocupa un lugar intermedio entre estos dos grupos en su capacidad de intercambio catiónico, en su capacidad de absorber y retener agua, y en otras características físicas relacionadas con la actividad. Muchas de las llamadas illitas son mezclas de moscovita y montmorillonita, o arcillas que tienen capas alternadas con estructura de moscovita y montmorillonita. Es llamada también hidrómica e illidromica



Imagen 4: Microfotografía de la Illita

II.1.7. CLORITA

En los suelos este tipo de mineral puede tener varios orígenes; herencia, transformación de filosilicatos preexistentes (vermiculita y esmectitas) y neoformación. Este tipo de arcilla se forma con frecuencia a través de minerales de tres capas, particularmente los expansibles, en un fenómeno denominado clarificación, que es muy común en los suelos.

En su mayoría presentan estructuras dioctaédricas, aluminicas. Están formados por bloques estructurales de 14 Å de espesor y poseen una entrecapa incompleta de gibbsita (octaedro de aluminio), los que son conocidos como cloritas dioctaédricas, vermiculitas dioctaédricas o intergradientes de clorita-vermiculita. Resulta muy común que la clorita se halle muy entremezclada con otros materiales, lo que dificulta encuadrarla dentro de un esquema de clasificación.

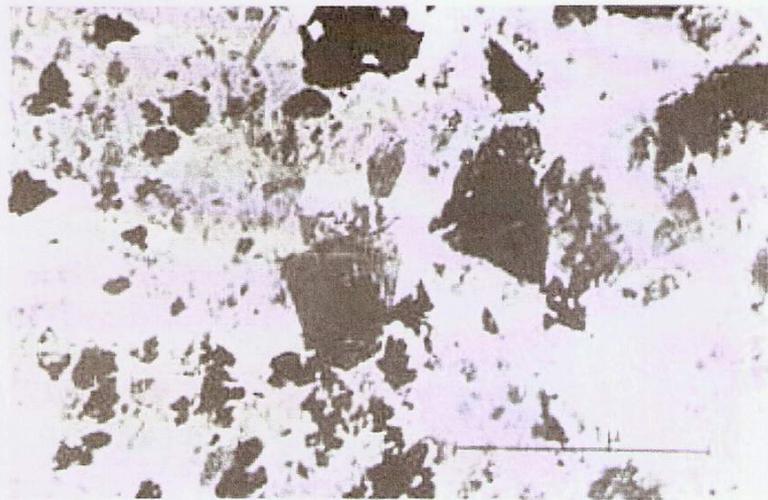


Imagen 5: Microfotografía de la Clorita

II.1.8. SEPIOLITA Y ATTAPULGITA

Se agrupan estos dos minerales por su gran similitud. Poseen una de sus dimensiones de longitud indefinida, mientras que las dos restantes son muy limitadas, presentan una elevada sustitución de aluminio por magnesio y se caracterizan por su forma alargada en el examen bajo el microscopio.

En la Imagen 6 se puede observar una fotografía en microscopio electrónico de partículas de sepiolita y en la Imagen 7 la correspondiente a partículas de atapulgita.



Imagen 6: Microfotografía de la Sepiolita



Imagen 7: Microfotografía de la Atapulgita

II.2. Iones de cambio

Como se lo ha mencionado, las partículas de arcillas presentan una deficiencia de cargas positivas, y esto se debe fundamentalmente a dos razones:

- Cuanto más pequeño resulte el tamaño de las partículas arcillosas, mayor cantidad de enlaces rotos presentaran en sus bordes, y mayor será el desequilibrio de cargas.
- Por la sustitución de iones dentro de la red cristalina, particularmente en las especies montmorillonita y vermiculita.

Para suplir esta deficiencia de cargas existen iones (principalmente cationes) que se ubican sobre los enlaces rotos de los bordes de las partículas, y en el caso de la montmorillonita y vermiculita, también entre las unidades fundamentales. Estos iones se depositan de forma transitoria sobre la partícula y reciben el nombre de iones de cambio. Esto se debe a que en el caso de que se presente otro catión de cambio que se ubica previamente.

La propiedad de un mineral que cuantifica su aptitud para absorber cationes, se denomina capacidad de cambio de cationes, y esta se mide mediante miliequivalentes cada 100g de suelo seco.

Capacidad de cambio de cationes de minerales arcillosos, en mili equivalentes cada 100g	
Cuarzo (mineral masivo)	0,04 – 0,3
Talco	< 2
Pirofilita	< 1-5
Caolinita	2,2 – 15
Metahalloysita	5 – 10
Illita y Clorita	10-40
Sepiolita y Atapulgita	20 – 30
Halloysita	10 – 50
Alófana	20 – 43
Montmorillonita	75 – 150
Vermiculita	100 - 150

Tabla 1: Capacidad de cambio de cationes de minerales arcillosos

El fenómeno de intercambio de iones puede realizarse también entre aniones, pero este caso es de menor importancia si comparamos su capacidad de cambio con respecto al de cationes, como se muestra en la siguiente tabla.

Capacidad de cambio de aniones de minerales arcillosos, en miliequivalentes cada 100g	
Caolinita	6,6 – 20,2
Halloysita	80
Montmorillonita	23 – 31
Vermiculita	4

Tabla 2: Capacidad de cambio de aniones de minerales arcillosos

II.3. Fuerzas fisicoquímicas actuantes entre las partículas de arcilla

Las fuerzas más importantes de este tipo, son aquellas de arcillas debido a la doble capa y a las fuerzas de contactos, cabe destacar también, aunque sin entrar en detalle, a las fuerzas moleculares que dan origen a la tensión superficial, y a las fuerzas atractivas de Van der Waals.

II.3.1. DOBLE CAPA

Es un modelo que se utiliza para poder visualizar y así entender mejor la atmósfera iónica presente en la proximidad de las partículas de arcilla (coloides), y de esta manera poder explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de repulsión. Esta doble capa eléctrica tiene un efecto importante sobre los coloides en cuanto a características como sedimentación, floculación y viscosidad del material.

Físicamente está formada por aniones de la superficie del coloide y cationes (Na, K, Ca) presentes en el medio acuoso, el espesor de la doble capa es de 400 \AA , y la densidad de cationes y el potencial eléctrico disminuye desde la superficie de la partícula hacia el interior de la misma, como los cationes presentan una unión débil con la superficie de la partícula, estos son intercambiables y sustituidos por otros, incluyendo directamente en las propiedades físicas y mecánicas del material.

La Figura 6 muestra a la izquierda el cambio de la densidad de carga alrededor del coloide, la derecha muestra la distribución de iones positivos y negativos alrededor del coloide cargado.

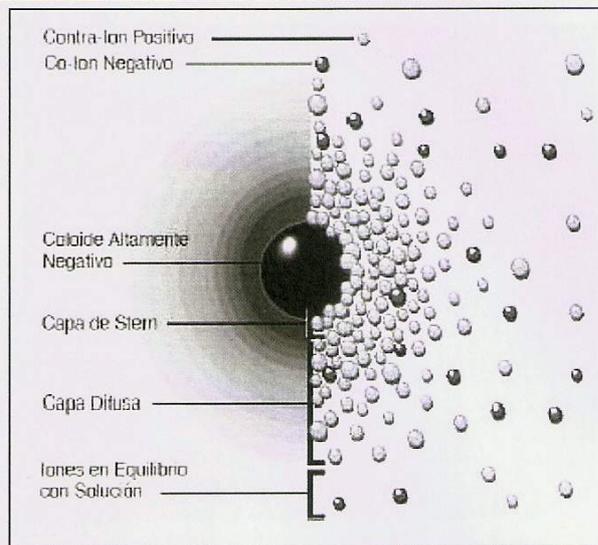


Figura 6: Formas de visualizar la doble capa

II.3.2. LAS FUERZAS EN LOS CONTACTOS

Se ha demostrado mediante experimentos con adsorción de iones, que las partículas arcillosas poseen en sus caras solo cargas negativas, mientras que en sus bordes existen tanto cargas negativas como positivas. Esto provoca fuerzas de atracción entre partículas próximas, generando tipos de contactos cara-borde o borde-borde.

Al disminuir el pH de la fase líquida de la suspensión agua-suelo, aumenta la cantidad de cargas positivas en los bordes de las partículas.

En la suspensión de arcilla, las moléculas del líquido, bombardean las partículas sólidas, sometiendo a movimiento Browniano a las de tamaño coloidal, y además, la totalidad de las partículas están también sujetas a fuerzas de gravedad que las hacen sedimentar y concentrarse. En algún momento las partículas estarán en contacto y se generarán las fuerzas fisicoquímicas. Pero existe una variable que cobra gran importancia, que es la concentración de la suspensión (medida en función de la normalidad N , es decir, el número de equivalentes de soluto por litro de solución) y a partir de determinado valor de ésta, se observa que las fuerzas de atracción predominan sobre las de repulsión ejercida por la capa doble.

Para el caso de suspensiones de montmorillonita y vermiculita, estas concentraciones son respectivamente $0,4N$ y $0,15N$, lo que indica que a partir de estos valores se comenzará a formar una estructura floculada, con abundancia de contactos cara-borde, de lo contrario existirá una estructura dispersa y con predominio de fuerzas repulsivas, Figura 7.

II.3.2.1. ESTRUCTURA FLOCULADA

Las partículas entre sí, son atraídas y forman un tipo de estructura denominado comúnmente Castillo de Naipes, en este tipo las partículas están en contacto borde contra cara, bajo el concepto de que cargas opuestas se atraen, en este arreglo de partículas a nivel micro se observa un índice de huecos muy alto, siendo estos una función de la naturaleza y cantidad de electrolitos dispuestos en la solución acuosa; es una estructura estable al mantenerse las cargas eléctricas en los puntos de contacto, si las cargas en los contactos se cambian esta estructura es colapsable.

II.3.2.2. ESTRUCTURA DISPERSA

Las partículas se rechazan entre sí por que las fuerzas eléctricas superficiales son iguales, generándose así repulsión, pues en los bordes y las caras de las partículas se presentan cargas eléctricas iguales, formando una estructura con arreglo de partículas paralelo unas a otra; presenta un índice de huecos menor a nivel micro.

Se debe también entender que la formación del material da origen al tipo de estructura.

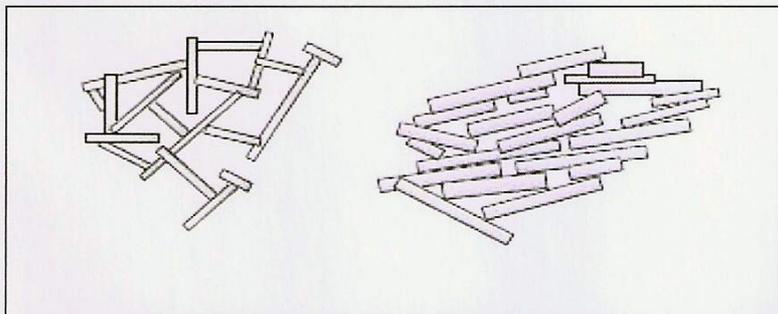


Figura 7: Estructura floculada (izquierda), estructura dispersa (derecha)

II.4. Identificación de suelos potencialmente expansivos

El término suelos expansivos, implica no solamente la tendencia a aumentar de volumen cuando aumenta el contenido de agua, sino también la disminución de volumen o contracción si el agua se pierde, pero debe tenerse presente que la contracción es simplemente el proceso inverso.

Las formas principales de identificación de un suelo potencialmente expansivo son:

II.4.1. Identificación Mineralógica

II.4.2. Determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos

II.4.3. Métodos indirectos de determinación del potencial expansivo del suelo

II.4.4. Medidas directas de la expansión del suelo.

II.4.1. IDENTIFICACIÓN MINERALÓGICA

Los tres grupos más importantes en que se clasifican los minerales arcillosos son: illita, caolinita y montmorillonita, compuestos por hidroaluminosilicatos. Los ensayos mineralógicos tienden a detectar la presencia de montmorillonita, que es el mineral preponderantemente expansivo. La presencia de cargas eléctricas negativas en la superficie de los minerales arcillosos, así como la capacidad de intercambio catiónico resultan fundamentales para la magnitud de la expansión.

Los ensayos de identificación mineralógica resultan muy usados en trabajos de investigación científica, pero resultan poco prácticos y antieconómicos para la práctica usual en ingeniería, dado que se requiere equipamiento y personal especializado. Y por ello es común recurrir a otros ensayos más rutinarios. Estos últimos son conocidos como métodos indirectos, los cuales se basan en la determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos que tienen correlación con el fenómeno de la expansión, como por ejemplo las coordenadas plásticas en la Carta de Plasticidad de Casagrande.

Dentro de los métodos directos de identificación mineralógica se encuentra:

II.4.1.1. DIFRACCIÓN POR RAYOS X

Permite determinar la estructura de los átomos del cristal y la distribución cuantitativa de los distintos minerales en las arcillas. La longitud de onda con la que trabaja este método es de 1Å.

II.4.1.2. ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL

Es un método directo menos preciso que el anterior. Cuando un suelo se calienta, se generan reacciones químicas a distintas temperaturas que dependen del tipo de mineral arcilloso. Las reacciones químicas se producen por cambios en la estructura del mineral o por pérdida de agua.

El aparato utilizado en el análisis térmico diferencial consiste en un bloque de níquel con dos orificios. En uno de estos orificios se coloca la muestra de suelo a ensayar y en el otro se coloca un material refractario inerte, a su vez se insertan pares termoelectrónicos para registrar la temperatura en ambos materiales. Luego el bloque de níquel es puesto en estufa y la temperatura se aumenta a razón de 10 a 15 °C/minuto hasta aproximadamente los 1100 °C.

Se obtienen gráficos en donde se observan las temperaturas del suelo y del material inerte, cada mineral presenta un gráfico característico, lo que permite conocer el mineral del cual se trata.

II.4.1.3. ANÁLISIS DE ABSORCIÓN DE COLORANTES

La técnica de absorción de azul de metileno forma parte también de los métodos directos y esta consiste en determinar la superficie específica de la partícula de arcilla, lo cual define su grupo mineralógico predominante. Se prepara una solución de azul de metileno al 0.50% en agua destilada, se agita durante un minuto y se deposita una gota de la mezcla sobre una pequeña muestra de suelo seco.

El ensayo finaliza cuando un halo difuso se forma en la periferia de la gota, lo que indica que la superficie de las partículas de arcilla está saturada y que queda azul de metileno libre en solución, como se muestra en la Imagen 8.

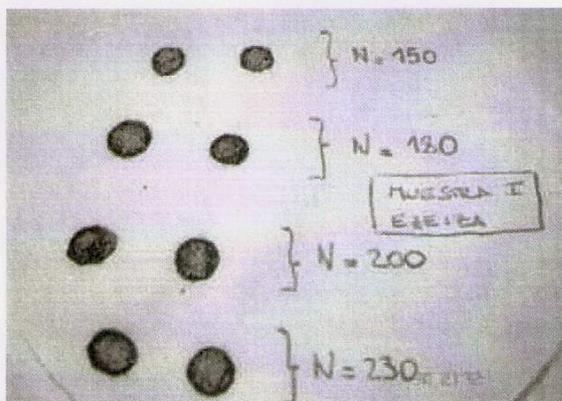


Imagen 8: Técnica de absorción de azul de metileno

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
 Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
 Cappello, Celia Daniela

Se define con la letra N al número de gotas de 0.5ml de solución de azul de metileno necesarias para que se produzca el halo difuso. Se calcula la superficie específica mediante la expresión:

$$S_e = \frac{1 \text{ gr}}{319.87 \text{ gr/mol}} \cdot \frac{1}{200 \text{ ml}} \cdot (N \cdot 0,5 \text{ ml}) \cdot N_{AV} \cdot A_{AM} \cdot \frac{1}{10 \text{ gr}}$$

dónde S_e es la superficie específica total, medida en m^2/gr , N_{AV} es el número de Avogadro, $6.02 \cdot 10^{23}$ moléculas/mol, y A_{AM} es el área de la molécula de azul de metileno, 130 \AA .

II.4.1.4. ANÁLISIS POR MICROSCOPIO ELECTRÓNICO.

El microscopio electrónico. Este emite una radiación electromagnética y según como se dispersen los electrones la atravesar el mineral, se genera una imagen que nos entrega información acerca de su forma, tamaño y estructura.

II.4.2. DETERMINACIÓN DE CIERTAS PROPIEDADES BÁSICAS DE LOS SUELOS

A través de la medida de ciertas propiedades básicas y sencillas de los suelos se puede determinar su grado de potencial expansivo.

Las propiedades a determinar son:

- **Límite Líquido y Límite Plástico**
- **Límite de Contracción**
- **Contenido de Coloides**
- **Expansión Libre del suelo**

Estos métodos tienen la ventaja de su fácil realización y de equipamiento disponible en todos los laboratorios. La desventaja es que no se cuantifica la expansión, sino que cualitativamente se establecen categorías de grados del potencial expansivo.

II.4.2.1. LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO

El límite líquido es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

El límite plástico es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico.

Investigadores como Seed, Woodward y Lundgren demostraron que las características plásticas de los suelos pueden ser usados como un indicador primario de la características expansivas de las arcillas.

Es natural pensar en una relación como la antes mencionada ya que ambas dependen en la cantidad de agua que una arcilla absorbe.

La relación entre las características plásticas y el hinchamiento de los suelos puede establecerse como:

Grado de Potencial Expansivo	Índice plástico
Bajo	0 – 15
Medio	10 – 35
Alto	20 – 55
Muy Alto	> 35

Tabla 3: Relación entre las características plásticas y el hinchamiento de los suelos

Si bien es cierto que todos los suelos altamente expansivos tienen plasticidades altas, no es cierto que los suelos con elevada plasticidad sean necesariamente expansivos.

II.4.2.2. LÍMITE DE CONTRACCIÓN

Este valor representa el contenido de humedad por debajo del cual una masa de suelo ya no presenta reducción de volumen. Es expresado en porcentaje

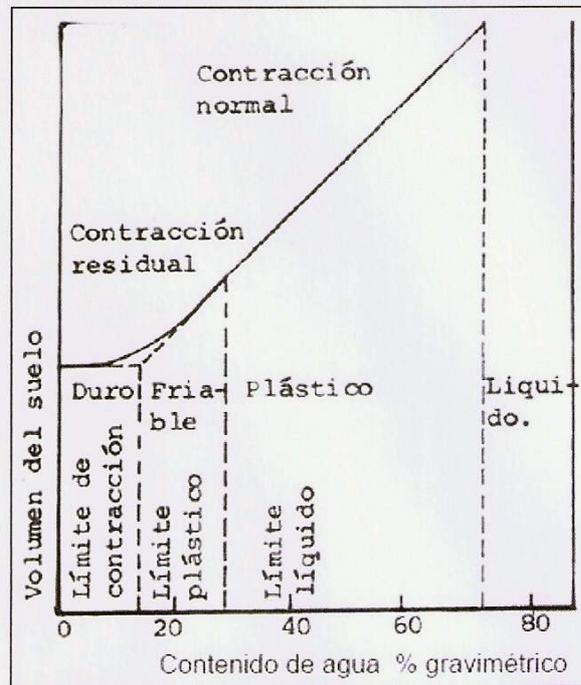


Figura 8: Relación entre el contenido de agua gravimétrico con respecto al volumen del suelo

II.4.2.3. CONTENIDO DE COLOIDES - MÉTODO DEL HIDROMETRO

Dentro de los materiales que tiene un tamaño inferior a 74 micras están los limos y las arcillas. Desde el punto de vista del tamaño se considera arcillas aquellos materiales que tienen un tamaño inferior a 2 micras (0.002 mm), siendo necesario para su determinación la realización de un ensayo hidrométrico.

El principal objetivo del análisis del hidrómetro es obtener el porcentaje de arcilla (porcentaje más fino que 0.002 mm) ya que la curva de distribución granulométrica cuando más de 12 % del material pasa a través del tamiz No. 200 no es utilizada con criterio dentro de ningún sistema de clasificación de suelos y no existe ningún tipo de conducta particular que dependa intrínsecamente de la forma de dicha curva. La conducta de la fracción de suelo cohesivo del suelo depende principalmente del tipo y porcentaje de arcilla de suelo presente, de su historia geológica y del contenido de humedad más que de la distribución misma de los tamaños de la partícula.

El análisis de hidrómetro utiliza la relación de caída de esferas en un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico tanto de la esfera como del fluido, y la viscosidad del fluido, en la forma expresada por el físico Inglés G. G. Stokes en la ecuación conocida como la ley de Stokes:

$$V = \frac{2gs - gw}{9h} \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

V = velocidad de caída de la esfera, cm/s

gs = peso específico de la esfera (peso específico = densidad x g = masa/ unidad de volumen x gravedad = g/cm³)

gf = peso específico de fluido.

h = viscosidad absoluta, o dinámica del fluido, dinas x segundo sobre cm²

D = diámetro de la esfera, cm

g = 980.7 cm/s²

1 g = 980.7 dinas

Al resolver la ecuación para D utilizando el peso específico del agua, se obtiene:

$$D = \sqrt{\frac{18hV}{gs - gw}}$$

El rango de los diámetros D de partículas de suelo para los cuales esta ecuación es válida, es aproximadamente

$$0.0002 \text{ mm} < D < 0.2 \text{ mm}$$

pues los granos mayores causan turbulencia en el fluido y los granos menores están sujetos a movimientos de tipo Browniano (fuerza de atracción y repulsión).

Obviamente para resolver la ecuación es necesario obtener el término de la velocidad V, conocer los valores correctos de gs y gw y tener acceso a la tabla de viscosidad del agua.

Como el peso específico y la viscosidad del agua varían con la temperatura es necesario tener en cuenta esta variable.

Para obtener la velocidad de caída de las partículas se utiliza el hidrómetro. Este aparato se desarrolló originariamente para determinar la gravedad específica de una solución, pero alterando su escala se puede utilizar para leer otros valores.

Al mezclar una cantidad de agua y un pequeño contenido de un agente dispersante para formar una solución de 1000 cm³, se obtiene una solución con una gravedad específica ligeramente mayor que 1.0.

El agente dispersante o defloculante se añade a la solución para neutralizar las cargas sobre las partículas más pequeñas de suelo, que a menudo tienen carga negativa. Con

orientación adecuada estos granos cargados eléctricamente se atraen entre sí con fuerza suficiente para permanecer unidos, creando así unidades mayores que funcionen como partículas.

De acuerdo con la ley de Stokes, estas las partículas mayores sedimentarán más rápidamente a través de fluido que las aisladas.

El material utilizado como agente dispersante es el hexametafosfato de sodio, también conocido como metafosfato (NaPO_3). La cantidad empleada es del orden de 125 cm^3 de solución al 4% de hexametafosfato de sodio en los 1000 cm^3 de la suspensión suelo-agua.

El Hidrómetro más usado comúnmente es el 152H (designado por la norma ASTM) y esta calibrado para leer g de suelo de un valor de $G_s = 2.65$ en 1000 cm^3 de suspensión siempre que no haya más de 60 g de suelo en la solución.

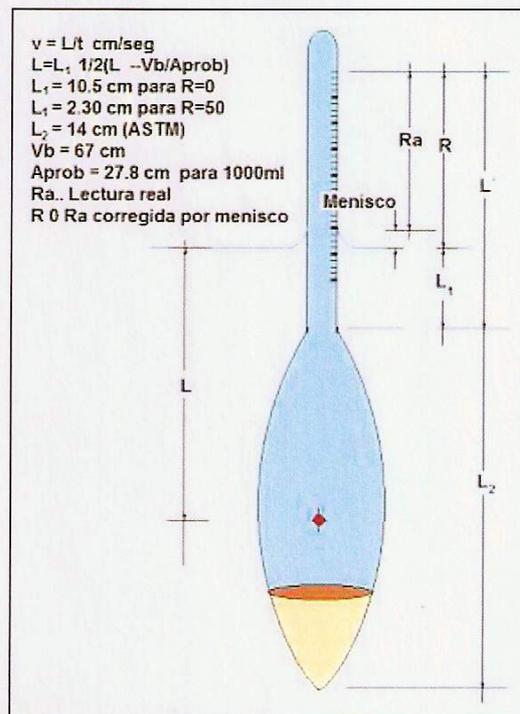


Imagen 9: Hidrómetro

La lectura está directamente relacionada con la gravedad específica de la solución. El hidrómetro determina la gravedad específica de la suspensión agua – suelo en el centro del bulbo. Todas las partículas de mayor tamaño que se encuentran aún en la suspensión en la zona mostrada como L (distancia entre el centro del volumen del bulbo y la

superficie del agua) habrá sido por debajo de la profundidad del centro del volumen del hidrómetro. Además como el hidrómetro tiene peso constante a medida que disminuye la gravedad específica de la suspensión, el hidrómetro se hundirá más adentro de la suspensión (aumentando así la distancia L). Es preciso recordar también que la gravedad específica del agua decrece a medida que la temperatura aumenta de 4°C. Esto ocasiona adicionalmente un hundimiento mayor de hidrómetro.

Como L representa la distancia de caída de las partículas en un tiempo dado t, y la velocidad se puede definir como la distancia dividida por el tiempo, es evidente que la velocidad de caída de las partículas es:

$$V = L/t$$

Por consiguiente es necesario encontrarla profundidad L correspondiente a un tiempo transcurrido t de forma que se pueda determinar la velocidad necesaria para utilizar la ecuación de Stokes.

Durante el ensayo se van registrando lecturas a diferentes intervalos de tiempo, correspondiente a la parte superior del menisco de la suspensión sobre el vástago graduado del hidrómetro, denominadas lecturas reales, Ra. Esto se realiza así, ya que en una suspensión turbia es imposible leer el nivel de la superficie libre sobre el vástago, denominada lectura corregida por menisco, R. Esta última es en realidad la medida que se considera para el cálculo de la distancia de caída de la partícula L, y su valor resulta de la adición de la altura del menisco a la lectura real. Ver Imagen 9.

Para simplificar las determinaciones, el valor de la profundidad efectiva L ya se encuentra tabulado en función exclusivamente de la lectura corregida por menisco R. Solo se considera esta corrección, ya que la distancia L que las partículas han recorrido resulta independiente de la temperatura, la gravedad específica de la solución, o cualquier otro tipo de variable.

Lectura corregida por menisco R	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura corregida por menisco R	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura corregida por menisco R	Profundidad efectiva L (cm)
0	16.3	21	12.9	42	9.4
1	16.1	22	12.7	43	9.2
2	16.0	23	12.5	44	9.1
3	15.8	24	12.4	45	8.9
4	15.6	25	12.2	46	8.8
5	15.5	26	12.0	47	8.6
6	15.3	27	11.9	48	8.4
7	15.2	28	11.7	49	8.3
8	15.0	29	11.5	50	8.1
9	14.8	30	11.4	51	7.9

10	14.7	31	11.2	52	7.8
11	14.5	32	11.1	53	7.6
12	14.3	33	10.9	54	7.4
13	14.2	34	10.7	55	7.3
14	14.0	35	10.5	56	7.1
15	13.8	36	10.4	57	7.0
16	13.7	37	10.2	58	6.8
17	13.5	38	10.1	59	6.6
18	13.3	39	9.9	60	6.5
19	13.2	40	9.7		
20	13.0	41	9.6		

Tabla 4: Valores de profundidad efectiva L para empleo de la ecuación de Stokes en la determinación de diámetros de la partícula con hidrómetro ASTM152H

Si se conoce el diámetro de la partícula y el porcentaje de suelo que aún permanece en suspensión –m el cual en este caso es el porcentaje de material más fino- se tiene suficiente información para trazar la curva granulométrica.

El porcentaje más fino se relaciona directamente de la lectura de hidrómetro 152H ya que la lectura proporciona los gramos de suelo que aún se encuentran en suspensión directamente si la gravedad específica del suelo es de 2.65 g/cm^3 y el agua se encuentra a una densidad de 1.00 g/cm^3 . El agente dispersante tendrá algún efecto sobre el agua y, adicionalmente la temperatura del ensayo deberá ser cercana a 20°C y la Gs de los granos del suelo seguramente no es 2.65; por consiguiente se necesita corregir la lectura real del hidrómetro para obtener la lectura correcta de los granos de suelo todavía en suspensión en cualquier instante del ensayo.

El efecto de las impurezas en el agua y el agente dispersante sobre las lecturas del hidrómetro se pueden obtener utilizando un cilindro de sedimentación de agua de la misma fuente y con la misma cantidad de agente dispersivo que se utilizó al hacer la suspensión agua-suelo para obtener la “corrección de cero “. Este cilindro de agua debe tenerse a la misma temperatura a la cual se encuentra la solución de suelo.

Una lectura de menos de cero en el jarro o en el patrón de agua se registra como un valor negativo. Una lectura entre 0 y 60 se registra como un valor positivo. Todas las lecturas se deben tomar desde la parte superior del menisco en ambos cilindros tanto el patrón (con agua clara) como el que contiene la suspensión suelo-agua (agua turbia)

Si la temperatura es demasiado alta en los dos cilindros, la densidad del agua será igualmente menor y el hundimiento del hidrómetro será el mismo por ese concepto. Siguiendo este razonamiento, si ambos cilindros tienen la misma temperatura, el efecto que ella produzca será el mismo en los dos, y entonces será posible obtener una corrección única de temperatura para utilizar en la suspensión suelo-agua, como se detalla en la tabla.

T ° C	Ct
15	-1,10
16	-0,90
17	-0,70
18	-0,50
19	-0,30
20	0,00
21	0,20
22	0,40
23	0,70
24	1,00
25	1,30
26	1,60
27	2,00
28	2,50
29	3,05
30	3,80

Tabla 5. Valores de corrección por temperatura

Como la corrección por cero es (\pm) y la corrección por temperatura CT es también (\pm), la lectura corregida del hidrómetro para granos de suelo en suspensión se calcula como:

$$R_c = R_{\text{real}} - \text{corrección de cero} + CT$$

Una vez corregida la lectura del hidrómetro (sin incluir el hecho que la gravedad específica de los sólidos puede diferir de 2.65), el porcentaje de material más fino puede calcularse por simple proporción (si $G_s = 2.65$) como:

$$\text{Porcentaje más fino} = \alpha R_c / W_s \times 100$$

R_c = granos de suelo en suspensión en un tiempo t dado

W_s = peso original de suelo colocado en suspensión, g.

α : factor de corrección por gravedad específica distinta de 2,65.

En caso de que el suelo presente G_s igual a 2,65, α adopta un valor unitario de lo contrario se debe calcular como sigue:

$$\alpha = \frac{G_s(1,65)}{(G_s - 1)2,65}$$

Para introducir L en cm y t en minutos, D adopta unidades en mm y queda expresado como:

$$D = \sqrt{\frac{30h}{980(G_s - G_w)} \frac{L}{t}}$$

que puede a su vez ser simplificada

$$D = K \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (mm)$$

Como todas las variables menos L/t son independientes del problema excepto por la temperatura de la suspensión, es posible evaluar $K = f(T, G_s, u)$ de una sola vez, como se muestra en la Tabla 6.

Temperatura °C	Gravedad específica (G_s)						
	2.5	2.55	2.6	2.65	2.7	2.75	2.8
17	0.0149	0.0146	0.0144	0.0142	0.014	0.0138	0.0136
18	0.0147	0.0144	0.0142	0.014	0.0138	0.0136	0.0134
19	0.0145	0.0143	0.0140	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132
20	0.0143	0.0141	0.0139	0.0137	0.0134	0.0133	0.0131
21	0.0141	0.0139	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129
22	0.0140	0.0137	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0128
23	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.013	0.0128	0.0126
24	0.0137	0.0134	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0125
25	0.0135	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123
26	0.0133	0.0131	0.0129	0.0127	0.0125	0.0124	0.0122
27	0.0132	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.0120
28	0.0130	0.0128	0.0126	0.0124	0.0123	0.0121	0.0119
29	0.0129	0.0127	0.0125	0.0123	0.0121	0.0120	0.0118
30	0.0128	0.0126	0.0124	0.0122	0.012	0.0118	0.0117

Tabla 6. Gravedad específica con respecto a la temperatura.

II.4.2.4. EXPANSIÓN LIBRE DEL SUELO

Este ensayo consiste en colocar en una probeta normalmente cilíndrica un volumen conocido de suelo “seco” y sumergirlo en agua sin aplicación de sobrecarga alguna, mientras se mide la expansión. La diferencia entre el volumen final e inicial, expresado como un porcentaje del volumen inicial es la expansión libre. Esta medida de la expansión se realiza en condiciones muy desfavorables, ya que se hace en condiciones de ninguna sobrecarga y hoy en día se utilizan métodos más adecuados a tales efectos. Experimentos realizados por Holtz indican que una arcilla como la bentonita comercial puede tener en este ensayo expansión del orden de 1200 a 2000 %.

Holtz sugiere que las expansiones medidas en este ensayo por encima del 100% pueden causar daños significativos a la estructura, mientras que suelos que alcanzan una expansión por debajo del 50%, rara vez experimentan cambios de volumen apreciable bajo la aplicación de cargas estructurales, aún cuando estas sean provenientes de estructuras livianas.

II.4.3. MÉTODO INDIRECTOS DE DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL EXPANSIVO DEL SUELO

Estos métodos se ejecutan sobre muestras remoldeadas, compactadas a condiciones de densidad y humedad prefijadas, y a través de la medición de la expansión, estiman de forma indirecta un valor cualitativo de su potencial expansivo. Los métodos de este tipo más generalizadas son el Lambe y el de McDowell.

II.4.3.1. MÉTODO LAMBE

Ensayo rápido cuyo objetivo es, descubrir o evaluar la susceptibilidad de un suelo al hinchamiento o la retracción. Es un ensayo de identificación, por ello no sustituye a ensayos realizados con muestras inalteradas o compactadas en las mismas condiciones que en obra, por ello ha recibido numerosas críticas principalmente por trabajar con muestras remoldeadas donde es difícil reproducir las condiciones in situ.

Se toma una muestra de suelo que pase por el tamiz N° 10 ASTM (10 mm) que deberá cumplir con uno de los siguientes estados: seco, húmedo o en el límite plástico.

La muestra se compacta mediante el pisón de ensayos Proctor (según el estado en que se encuentre el suelo, será la energía de compactación utilizada según lo indicado en la Tabla 6 dentro de la célula interior del aparato Lambe. Realizada la compactación, se aplica una presión a la muestra de $0,1 \text{ kg/cm}^2$, mediante un vástago ajustable.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
 Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
 Cappello, Celia Daniela

Estado de la muestra de suelo	Nº de capas	Nº de golpes por capa	Energía de compactación n por unidad de volumen
Seco	3	7	$E = PM = 27,2 \text{ Kg f}^* \text{ cm} / \text{cm}^3$
Húmedo	3	4	$E = \frac{1}{2} P M = 13,6 \text{ Kg f}^* \text{ cm} / \text{cm}^3$
Límite plástico	1	5	$E = PN = 6,0 \text{ K g f}^* \text{ cm} / \text{cm}^3$

Tabla 7. Método de Lambe

Finalmente, se inunda la muestra y la presión que actúa sobre esta al cabo de dos horas, se designa con el nombre de índice de expansividad. La sección del equipo utilizado, se puede apreciar en la Figura 9.

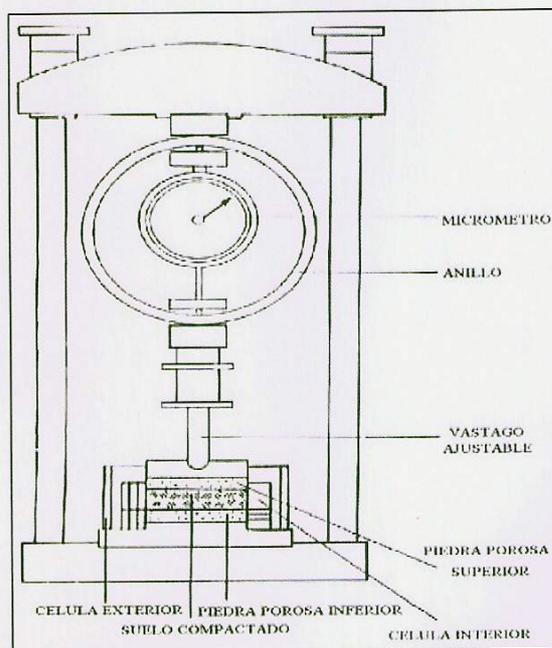


Figura 9. Aparato de Lambe

Obtenido el índice de expansividad, valor que es similar pero no igual a la presión de hinchamiento, se ingresa al gráfico de la Figura 10 y se intersecta la curva

correspondiente al contenido de humedad al que se efectuó el ensayo con lo que se obtiene el Cambio Potencial de Volumen (PVC).

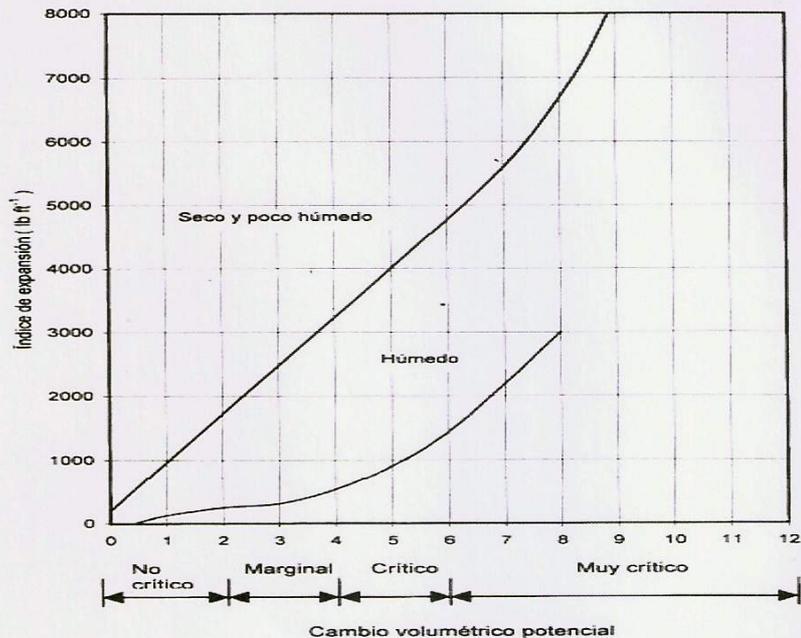


Figura 10. Relación entre el índice hinchamiento y el cambio potencial de volumen del ensayo de Lambe (Jiménez Salas)

II.4.3.2. MÉTODO McDOWELL

Para el año 1956 McDowell ya había establecido una medida previa del potencial de expansión, determinando el porcentaje de hinchamiento volumétrico que experimenta una probeta en un aparato triaxial modificado, bajo condiciones de absorción capilar a una presión de confinamiento de 1 psi.

El lapso durante el cual las probetas están sometidas a la absorción capilar depende de las características de plasticidad de la arcilla. Se recomienda un número de días igual al límite plástico en aquellas arcillas para las cuales este valor supera a 15.

Se encontró que el cambio volumétrico porcentual de las arcillas, para ciertas condiciones iniciales, tiene buena correlación con el índice de plasticidad, posibilitando así su clasificación en base a cambios volumétricos.

II.4.4. Medidas directas de la expansión del suelo

Estos métodos consisten en medir la expansión del suelo al saturarlo bajo diferentes condiciones de carga, graficándose las variaciones de hinchamiento para diferentes presiones aplicadas. Es universalmente aceptado que los dos parámetros que definen el potencial de hinchamiento son:

Presión de hinchamiento (σ_{sp}) definida como la presión aplicada en laboratorio sobre una muestra de suelo expansivo para que, una vez en contacto con agua, la probeta mantenga constante su volumen inicial, es decir que la variación de volumen sea nula.

Hinchamiento libre (%) es el aumento en la altura de una probeta de suelo con respecto a su altura inicial, expresado en forma porcentual, al estar sometida a una presión de 10 g/cm^2 y entrar en contacto con el agua.

Las medidas de estos parámetros se realizan fundamentalmente mediante pruebas edométricas o en técnicas basadas en la succión, tendiendo a simular los factores relevantes que sigue el fenómeno cuando se desarrolla in situ. Para lograr este objetivo se han propuestos innumerables metodologías experimentales que siguen operativas distintas, cuando no opuestas. Las principales divergencias radican en:

- Forma de simular las condiciones de campo en el edómetro
- Tamaño y forma de la muestra
- Valor de la humedad inicial del ensayo
- Magnitud de la precarga y secuencias de cargas
- Momento de saturación
- Mecanismos para medir el hinchamiento
- Número de muestras que intervienen en el ensayo.

Es por esto que la abundante bibliografía internacional disponible evidencia marcadas discrepancias en los valores finales obtenidos y que la predicción del comportamiento resulte fuertemente influenciada por aquellas variables, más precisamente, por el camino de tensiones seguido y por el criterio de saturación utilizado.

Por lo expuesto la definición de hinchamiento no es tan simple como la definida con anterioridad, ya que está supeditada al procedimiento experimental utilizado para su cuantificación.

Si bien estos métodos constituyen el procedimiento más adecuado para predecir la expansión del suelo, además de las dificultades señaladas, tienen el inconveniente de requerir un equipamiento bastante completo (celdas de cargas, pesas, etc.), no disponibles en los laboratorios de uso común en ingeniería.

II.5. Evaluación del potencial expansivo en base a las propiedades básicas

Existen varios métodos que realizando diversas combinaciones de los resultados de las medidas de las propiedades antes mencionadas clasifican en categorías los potenciales expansivos del suelo.

II.5.1. MÉTODO DESARROLLADO POR HOLTZ Y GIBBS

En el gráfico siguiente se muestra una relación típica entre el contenido de coloides, el Índice Plástico y el límite de contracción.

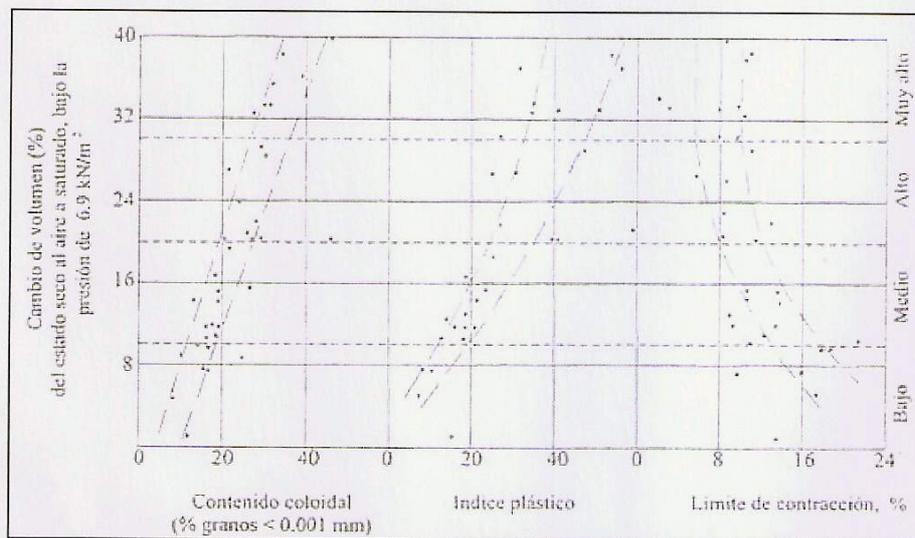


Figura 11. Gráfico que muestra una relación típica entre el contenido de coloides, el índice plástico y el límite de contracción.

Basado en las curvas presentadas Holtz propone el siguiente criterio para la identificación de suelos expansivos:

Contenido de coloide (< 0.001 mm) en %	Índice Plástico	Shrinkage Limit	% Expansión bajo carga de 1.0 psi	Grado de Expansión
> 28	>35	<11	>30	Muy alto
20-13	25-41	7-12	20-30	Alto
13-23	15-28	10-16	10-30	Medio
>15	<18	>15	<10	Bajo

Tabla 8. Criterio para la identificación de suelos expansivos propuestos por Holtz.

II.5.2. ÍNDICE DE DESECACIÓN DE VIJAYVERGIYA Y GHAZZALY (1973)

Estos autores dan un estimativo del potencial de hinchamiento a través del grafico que se muestra a continuación, en función del $I_{\omega L} = \omega_0/\omega_L$

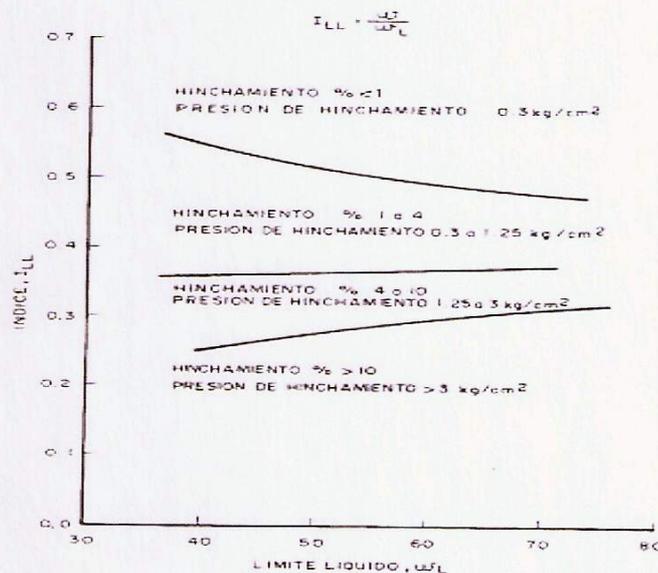


Figura 12. Criterio de Vijayvergiya y Ghazzaly (1973)

Por su parte, Nadeo (1999) estudia las arcillas activas del Gran La Plata y La Plata empleado esta carta clasificación, y redefine los límites del grado de actividad en función de su índice de desecación como presenta a continuación:

$I_{wL} \geq 0,4$	No activo.
$0,20 < I_{wL} < 0,4$	Activo
$I_{wL} \leq 0,2$	Muy activo

II.5.3. ÍNDICE DE DESECACIÓN DE CUELLAR (1978)

Transformo el grafico confeccionado por los dos autores anteriores, ahora en función del índice de desecación $I_{wp} = \omega_0/\omega_p$ (Figura 13) más usado en la práctica por ser más rápido de determinar y por necesitarse una muestra menos voluminosa.

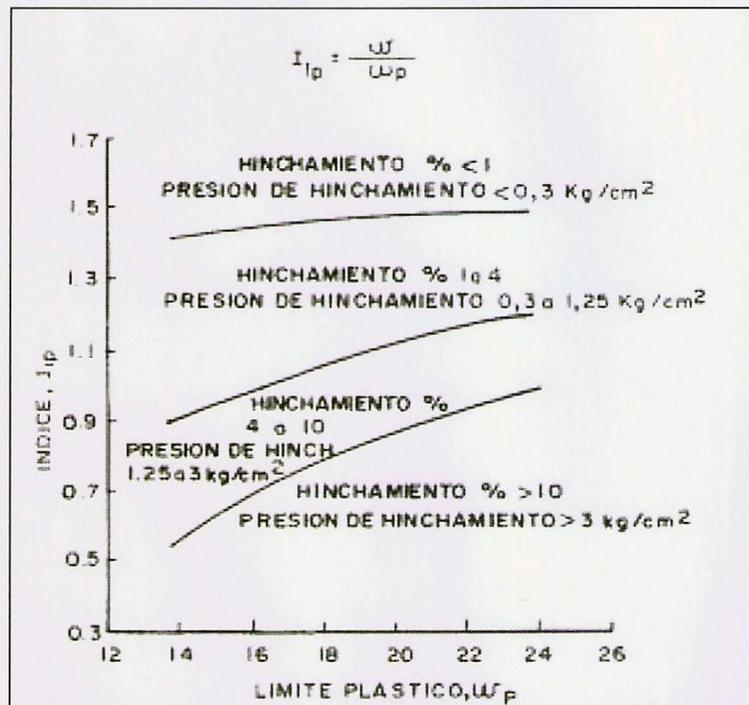


Figura 13. Relaciones entre índice de sequedad, el límite plástico y la presión de hinchamiento (Cuellar, 1978)

II.5.4. ÍNDICE DE DESECACIÓN DE LIVNEH (1969)

Este muchacho estudio muestras remoldeadas de arcillas expansivas con límites plásticos entre 25 y 35 %, y encontró que para determinados valores de succión o potencial capilar p_f (p_f = logaritmo de la tensión capilar expresada en cm de columna de agua), se podía expresar su contenido de humedad natural en función del límite plástico, como se indica a continuación:

$$\text{Para } pF = 3 \Rightarrow \omega_0 = -13,47 + 1,9 \omega_p$$

$$\text{Para } pF = 4 \Rightarrow \omega_0 = -16,21 + 1,62 \omega_p$$

Para el caso de muestras inalteradas, los valores de potencial capilar son 0,8 más bajos que para muestras remoldeadas, entonces las ecuaciones mencionadas anteriormente son para potenciales capilares de 2,2 y 3,2 respectivamente. La primera corresponde a la de una arcilla humedad que ya no hincha más, y la segunda, a la humedad de equilibrio de una arcilla bajo una superficie cubierta. Para fines comparativos, un suelo secado al aire a humedad higroscópica presenta $p_f = 6$.

El índice de desecación de Livneh se expresa como:

$$I.D. (Livneh) = \frac{1,9 \omega_p - 13,47 - \omega}{0,28 \omega_p + 2,74}$$

Donde es igual a cero para $p_f = 2,2$ e igual a uno para $p_f = 3,2$ esto significa que cuando I.D. (Livneh) sea menor o igual a cero, el suelo no hinchara más bajo cualquier incremento de humedad, lo que se verifica para humedades del suelo iguales o mayores a las determinadas para cuando $p_f = 3$ cuando I.D. (Livneh) es mayor a cero, la humedad del suelo resulta menor a la obtenida para cuando $p_f = 3$, por lo que es esperable que se genera hinchamiento con el aumento de humedad. Podemos resumir entonces:

- I.D. (Livneh) ≤ 0 No Activo
- I.D. (Livneh) > 0 Activo

Nadeo (1999) encontró que en los suelos activos platenses resulta más ajustada la siguiente graduación del potencial de hinchamiento.

- I.D. (Livneh) ≤ 1 No Activo
- $1 < I.D. (Livneh) < 2$ Activo
- I.D. (Livneh) ≥ 2 Muy Activo

II.5.5. ÍNDICE DE DESECACIÓN DE SKEMPTON (1953)

Basándose en los límites de Atterberg, Skempton (1953) definió lo que llamó la actividad A de los suelos arcillosos:

$$A = \frac{Ip}{c}$$

c representa el porcentaje en peso de los granos más finos que 2 micrones.

La actividad refleja la capacidad de las partículas de un suelo arcilloso para retener la humedad, y se clasifica según se indica en la Tabla 8. Además de las pruebas que se realizan para determinar los Límites de Atterberg, existen otras que permiten obtener información acerca del contenido de humedad de los suelos.

Entre ellas está la prueba de la Humedad Equivalente y la de Humedad Centrifuga Equivalente.

La humedad equivalente es el mínimo contenido de humedad para el cual una superficie lisa de suelo no absorbe más agua en 30 segundos, cuando se le van agregando gotas sucesivas en forma continua.

La humedad centrifuga equivalente es el contenido de humedad de un suelo luego que la muestra saturada es centrifugada durante una hora bajo una fuerza igual a 1.000 veces la fuerza de la gravedad. Los valores bajos de la humedad centrifuga equivalente (10%) corresponden a suelos permeables, como las arenas, mientras que los valores elevados (25%) son indicativos de impermeabilidad considerable, como en las arcillas. Si se supera el 30%, los suelos resultan expansivos.

Clasificación	A	Mineral Predominante
Baja	$A \leq 1$	Caolinita
Media	$1 < A \leq 4$	Illita
Alta	$A > 4$	Montmorillonita

Tabla 9. Actividad de los suelos arcillosos

Otro concepto que interesa en la ingeniería de suelos es el de la retracción volumétrica, que resulta el cambio de volumen para determinados porcentajes de agua. La retracción volumétrica y se expresa como un porcentaje del volumen de la muestra seca, cuando se reduce el contenido de humedad desde un valor estipulado, hasta el límite de retracción.

$$V_r = (W_{N1} - LR) I_R$$

WN1 es el contenido de humedad obtenido de la prueba de humedad equivalente. La retracción volumétrica permite conocer la variación de volumen que sufrirá un suelo cuando se seca hasta el Límite de Retracción, contrayéndose, o la expansión producida a partir del Límite de Retracción, cuando va absorbiendo agua.

El grado de actividad de los suelos queda definido por cuatro zonas como muestra la Figura 14.

- Zona de actividad baja
- Zona de actividad media
- Zona de actividad alta
- Zona de actividad muy alta

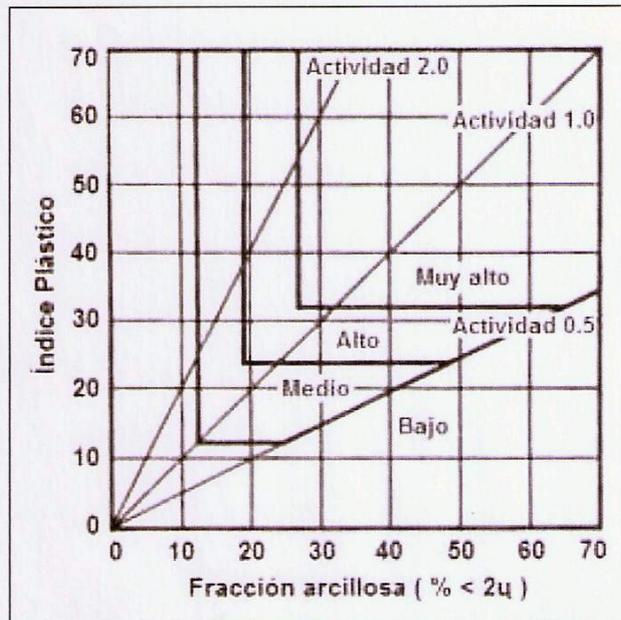


Figura 14. Gráfico de Skempton (Arcillas Activas en Entre Ríos, Diagnóstico y Remediación.
Informe de avance N°1 – Grupo G.I.A.A. UTN FRCON)

En la Tabla 10 se muestran los valores más frecuentes de la actividad de los minerales más importantes.

Mineral	Actividad
Cuarzo	0,00
Halloysita	0,02 – 0,07
Metahalloysita	0,07 – 0,16
Calcita	0,18
Mica (Moscovita)	0,23
Caolinita	0,01 – 0,41
Illita	0,23 – 0,8
Atapulgita	0,57 – 1,23
Montmorilonita (Ca, Mg, K, NH ₄)	0,32 – 3,09
Montmorilonita (Na, Li)	1,12 – 11,5

Tabla 10. Actividad de algunos minerales constituyentes de los suelos (J. Salas)

II.5.6. MÉTODO DEL “ÍNDICE DE LA ACTIVIDAD DE LA ARCILLA” PROPUESTO POR SEED, WOODWARD Y LUNDGREN

Está basado en muestras remoldeadas de suelo compuestos por mezcla de arcillas, bentonita, illita, caolinita y arena fina. La expansión se midió como un % del hinchamiento que experimentan probetas compactadas al 100 % según Proctor Estándar y con el contenido de humedad óptimo y sometidas a una sobrecarga de 1 Psi

$$\text{Actividad} = \frac{I_p}{C-10}$$

Siendo I_p = Índice de Plasticidad

C = Porcentaje de Arcilla

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
 Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
 Cappello, Celia Daniela

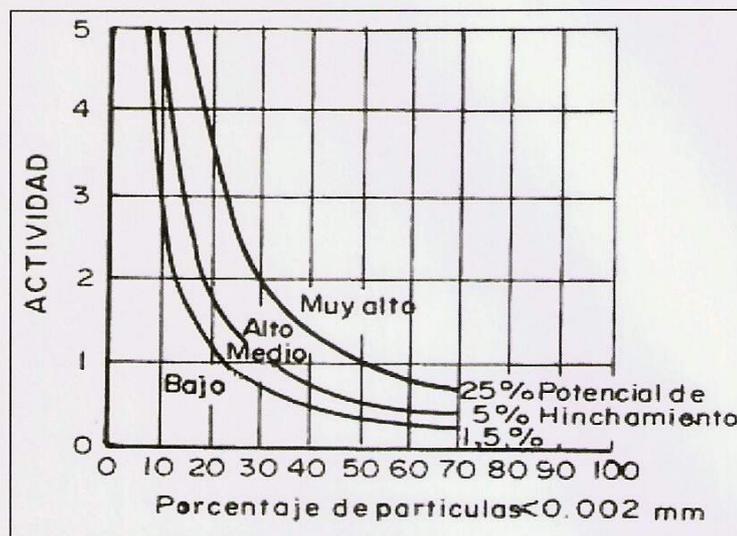


Figura 15. Criterio de Seed, Woodward y Lundgren para calificar el potencial de Hinchamiento de una Arcilla.

II.6. Evaluación cuantitativa del potencial expansivo en base a las propiedades básicas

Los resultados de los métodos directos de determinación del potencial expansivo presentan a menudo gran dispersión, y esto se debe fundamentalmente a que las características medidas dependen mucho de las variaciones de densidad y humedad de un punto a otro en el terreno. También tiene gran influencia sobre los valores obtenidos el grado de alteración de las muestras, ya sea por desecación, descomposición, apertura de fisuras, etc. Por esto, en muchas ocasiones resulta más conveniente realizar ensayos más sencillos, pero en mayor cantidad, que guardan cierta relación con el grado de expansión del suelo.

Desde que se empezó a estudiar el fenómeno de los suelos expansivos se está en busca de correlaciones empíricas, y hoy en día se tienen algunas que resultan muy valiosas. Su importancia radica en la utilidad para obtener evaluaciones preliminares, y en segundo lugar, en la posibilidad de interpolar o extrapolar resultados de ensayos más completos en otros puntos del terreno. Sin embargo, los datos obtenidos no deben ser sobrevalorados ni tomar decisiones basadas únicamente en los mismos.

II.6.1. HUMEDAD MÁXIMA DE UN TERRENO DESCUBIERTO

II.6.1.1. MC DOWELL (1957)

Encontró que en tejas, la humedad mínima que llega a contener un suelo descubierto está dado por:

$$\omega_{\min} = 0,2 \omega_L + 9$$

Por otro lado la humedad máxima que alcanza por capilaridad y estando sometido a 1 psi de presión, resulta:

$$\omega_{\max} = 0,47 \omega_L + 2$$

II.6.1.2. CUELLAR (1978)

Basado en los datos de Vijayvergiya y Ghazzaly (1973), llego a que la expresión para la humedad máxima de un terreno descubierto es

$$\omega_{\max} = 85,8 + 38,5 \gamma_d$$

Si conocemos la Gravedad Especifica G_s de los sólidos del suelo, se puede determinar el grado de saturación del mismo mediante:

$$S(\%) = \frac{85,8 + 38,5 \gamma_d}{G_s - \gamma_d}$$

II.6.2. PRESIÓN DE HINCHAMIENTO

Además de la importancia de este parámetro para el cálculo de sollicitaciones sobre una estructura, el mismo constituye un indicador sobre el problema que puede ocasionar, de esta manera podemos decir que:

- Si la presión de hinchamiento no supera los $0,2 \text{ kg/cm}^2$ al final del verano, en general no se producirá ningún tipo de daño.
- Cuando se halla entre los $0,2$ y $0,5 \text{ kg/cm}^2$, pueden generarse pequeñas grietas.
- Entre $0,5$ y $1,0 \text{ kg/cm}^2$, las grietas pasan a ser importantes.
- De $1,0$ a $2,0 \text{ kg/cm}^2$, los daños son graves.
- Por encima de $2,0 \text{ kg/cm}^2$ será prácticamente necesario proceder a demoler el edificio, siempre y cuando no se hayan tomado las precauciones pertinentes.

II.6.2.2. VIJAYVERGIYA Y GHAZZALY (1973)

Estos dos autores dan las siguientes correlaciones que permiten prever la presión de hinchamiento:

$$\text{Log } \sigma_{SP} = \frac{1}{12} (0,4 \omega_L - \omega_0 - 0,4)$$

$$\text{Log } \sigma_{SP} = \frac{1}{19,5} (62,5 \gamma_d - 0,65 \omega_L - 139,5)$$

En estas ecuaciones, ω_L es el límite líquido, ω_0 es la humedad del terreno para la cual se desea calcular la presión de hinchamiento σ_{SP} (kg/cm²), y γ_d es el peso unitario seco inicial (t/m³)

II.6.2.2. NADEO (1999)

Modifica las expresiones propuestas por los dos autores anteriores, ajustándolas para suelos activos de la zona del Gran la Plata y La Plata.

$$\text{Log } \sigma_{SP} = \frac{1}{12} (0,4 \omega_L - \omega_0 - 9,7)$$

$$\text{Log } \sigma_{SP} = \frac{1}{19,5} (62,5 \gamma_d - 0,65 \omega_L - 149,9)$$

II.6.2.3. JIMÉNEZ SALAS (1955)

Para muestras inalteradas con índices de plasticidad entre 10 y 20, este autor propuso la siguiente correlación:

$$\text{Log } \sigma_{sp} = \frac{4}{5} \frac{(\omega_L - 10)^{0,7}}{(5 + \log M)^{0,7}} - 5,66$$

siendo:

$$M = \frac{\gamma_d (\text{desecada}) - \gamma_d (\text{natural})}{\gamma_d (\text{desecada})}$$

En esta expresión, γ_d (desecada) es el peso unitario seco luego de 24 horas en estufa a 105 °C.

Analizando la ecuación, indica que al aumentar la retracción, se produce una disminución de la presión de hinchamiento, lo cual resulta poco lógico. Es por esto que

vale aclarar, que la capacidad expansiva del suelo predicha por la ecuación queda caracterizada por el límite líquido, mientras que el parámetro M lo que mide es que parte de la expansión ya se ha producido a partir de la sequedad.

La ecuación resulta valida solo para pesos unitarios secos superiores al correspondiente al límite de contracción. Se supone que el peso unitario seco luego de 24 hs en estufa a 105 °C, es igual al peso unitario seco en el límite de contracción.

Nadeo (1999) corrige la correlación de Jiménez Salas para suelos ensayados en La Plata, llegando :

$$\text{Log } \sigma_{sp} = \frac{4}{5} \frac{(Wl-10)^{0,7}}{(5+\log M)^{0,7}} - 8,4$$

II.6.3. HINCHAMIENTO

Como cualquier material ingenieril, para definir el comportamiento del suelo es necesario conocer la relación esfuerzo – deformación. En el párrafo anterior se hizo referencia a la primera de las variables, es decir, al esfuerzo o presión. En esta sección se trata la deformación o hinchamiento, la cual puede determinarse de forma aproximada con los métodos desarrollados a continuación.

II.6.3.1. JIMÉNEZ SALAS Y SERRATOSA (1957)

Estos autores llegaron a una ley que relaciona el hinchamiento de una arcilla expansiva con la presión aplicada, según la ecuación:

$$s = K_s \log \frac{\sigma_{sp}}{\sigma}$$

Donde s : hinchamiento, expresado en tanto por uno

σ_{sp} : Presión de hinchamiento, en kg/cm²

σ : presión bajo la cual se desea calcular el hinchamiento, en kg/cm²

K_s : constante, determinada con algún dato de la curva de hinchamiento obtenida, o bien puede estimarse igual a 0,0188 σ_{sp} .

II.6.3.2. NADEO (1999)

Demostró que el coeficiente K_s de la ecuación de Jiménez Salas y Serratosa no es en realidad una constante como habían propuesto estos autores, sino que varía linealmente con la intensidad de las presiones adoptadas. De esta manera se tiene:

- Hinchamiento Libre con etapa posterior de carga:

$$\text{Log } K_s = -\frac{1}{10} (\sigma - \sigma_i) + \text{log } K_{si}$$

- Presión de Hinchamiento con etapa posterior de descarga :

$$\text{Log } K_s = \text{Log } K_{si} - \frac{1}{7} (\sigma - \sigma_i)$$

Siendo

σ : Presión a la cual se desea calcular K_{si} , en Kg/cm^2

σ_i = presión a la que se produce el hinchamiento libre, siendo en nuestro caso igual a 10 g/cm^2 (otros autores consideran 100 g/cm^2).

K_{si} : K_s correspondiente a la presión σ_i , deduciendo de la curva de hinchamiento

Vale aclarar que para el primer camino de las tensiones, el valor de K_s aumenta con la presión, mientras que para el segundo, el aumento de la presión genera la disminución de K_s .

II.6.3.3. VIJAYVERGIYA Y GHAZZALY

Luego de realizar más de 250 ensayos de presión de hinchamiento a volumen constante sobre muestras inalteradas, extraídas desde profundidades entre 0,15 y 3,0 metros en Israel y Estados Unidos, estos investigadores plantearon las siguientes ecuaciones empíricas:

$$\text{Log } s(100 \text{ g/cm}^2) = \frac{1}{12} (0,4 \omega_L - \omega_0 + 5,5)$$

$$\text{Log } s(100 \text{ g/cm}^2) = \frac{1}{19,5} (62,5\gamma_d + 0,65 \omega_L - 130,5)$$

El camino de tensiones correspondiente a estos ensayos es la carga hasta la presión de hinchamiento, y luego la descarga por etapas hasta los 100 g/cm^2 , presión bajo la que se mide el hinchamiento libre s , y que resulta igual al valor entregado por estas ecuaciones. Los términos ω_0 y γ_d son respectivamente la humedad y el peso unitario seco bajo los que se les desea calcular el hinchamiento s , expresado el valor de este último en forma porcentual.

Nadeo comprobó que para humedades y densidades por debajo de los correspondientes al límite de contracción, las ecuaciones anteriores carecen de validez, por la cual deja propuestas las siguientes correcciones a dichas expresiones:

$$\text{Log } s(140 \text{ g/cm}^2) = \frac{1}{12} (0,4 \omega_L - \omega_0 - 8,8)$$

$$\text{Log } s(140 \text{ g/cm}^2) = \frac{1}{19,5} (62,5\gamma_d + 0,65 \omega_L - 148,4)$$

En estas últimas, corresponde al hinchamiento bajo 140kg/cm^2 , expresado en forma porcentual.

II.6.3.4. SEED, WOODWARD Y LUNDGREN (1962)

Se obtuvieron excelentes correlaciones entre el hinchamiento libre S%, la actividad A, y el contenido de arcilla C, resultando en la siguiente ecuación:

$$S = 3,6 * 10^{-5} * A * C^{3,44}$$

Según Seed y otros, para suelos naturales remoldeados, el hinchamiento libre, S en %, se puede relacionar con el índice de plasticidad como sigue:

$$S = 2,16 * 10^{-3} * (I_p)^{2,44}$$

En el caso de muestras secadas al aire los hinchamientos resultan mucho mayores que las entregadas por esta correlación, y así lo marca la Tabla 11.

I_p	S% con humedad inicial igual a la de Proctor	S% con muestras desecadas al aire
10	0,4 – 1,5	4,5 – 10
20	2,2 – 3,8	13,5 – 18,7
30	5,7 – 12,2	21,4 – 28,0
40	11,8 – 25,0	28,0 - 35,0
50	20,1 – 42,6	33,0 – 40,0

Tabla 11. Hinchamiento S% para muestras compactadas según Seed, Woodward y Lundgren

II.6.3.5. KOMORNIK Y DAVID (1969)

Esta correlación esta efectuada en base a ensayos de hinchamiento libre 370 muestras inalteradas, y sugiere que:

$$S\% = 2,27 + 0,131 \omega_L - 0,274 \omega_0$$

Para el caso mencionado antes de los suelos de La Plata, Nadeo propuso una modificación en esta ecuación, sujeta a futuras revisiones para distintos contenidos de humedad, pero hasta el momento se presenta como:

$$S\% = 25,2 + 0,131 \omega_L - 0,906 \omega_0$$

II.7. Factores que intervienen en el fenómeno de la expansión.

El potencial expansivo de un suelo (presión de hinchamiento y elevación) dependen, como mínimo, de las siguientes variables:

II.7.1. NATURALEZA Y TIPO DE ARCILLA

La composición mineralógica de la arcilla (porcentajes de illita, caolinita y montmorillonita) que está compuesto la arcilla resulta fundamentales en cuanto al potencial expansivo del suelo. Los suelos expansivos por excelencia son aquellos que tienen altos porcentajes de montmorillonita.

II.7.2. HUMEDAD INICIAL

El elemento “catalizador” del fenómeno de la expansión, es precisamente, la variación en el contenido de humedad del suelo. Por más montmorillonita que esté compuesta una arcilla, si no hay variación en el contenido de humedad del suelo, no habrá cambios volumétricos.

No es necesario que el suelo se sature completamente para que produzca expansión del mismo.

Por el contrario, en determinados casos, es suficiente variaciones en el contenido de humedad del suelo de sólo 1 o 2 puntos porcentuales, para causar hinchamientos y producir daños estructurales.

El contenido de humedad inicial del suelo controla la magnitud del asentamiento.

Arcilla “secas”, con contenido de humedad por debajo del 15 % indican un riesgo de expansión alto, pues fácilmente pueden llegar a absorber contenidos de humedad de 35 % con los consecuentes daños estructurales.

Por el contrario, arcillas cuyo contenido de humedad está por encima del 30 % indica que la mayoría de la expansión ya ha tenido lugar y sólo es esperable algún leve hinchamiento remanente.

II.7.3. PESO ESPECÍFICO SECO DEL SUELO

Muy relacionada con la humedad inicial, el peso específico seco del suelo es otra variable fundamental en el proceso expansivo del suelo.

La densidad seca de una arcilla se ve reflejada en valores altos en los resultados en el ensayo de penetración estándar. Valores de "N" inferiores a 15 indican densidades secas bajas y riesgo expansivo bajo, aumentando significativamente estos a medida que aumenta el valor de “N”.

II.7.4. POTENCIA DEL ESTRATO ACTIVO

A través de ensayos de laboratorio sobre muestras de un mismo suelo, compactadas al mismo grado de densidad y humedad inicial, se ha estudiado el efecto del espesor del estrato en la magnitud total del hinchamiento.

Los resultados mostraron que la magnitud del cambio volumétrico experimentado es proporcional al espesor del estrato, mientras que la presión de expansión se mantiene constante.

Esto nos estaría indicando que si una estructura es capaz de transmitir una presión uniforme y constante a profundidades importantes debajo de la fundación se podría contrarrestar el fenómeno de cambio volumétrico. Pero como sabemos esto no es posible, ya que, a medida que aumentamos la profundidad, la presión transmitida por la zapata de fundación disminuye y por lo tanto no constituye un método efectivo para el control de la expansión.

II.7.5 CARACTERÍSTICAS PLÁSTICAS DEL SUELO

Como ya fue explicado anteriormente las propiedades plásticas del suelo juegan un importante papel en el fenómeno expansivo

II.7.6. FATIGA DE LA EXPANSIÓN

En muestras sometidas en laboratorio a ciclos de saturación y disecado mostraron señales de fatiga después de varios ciclos.

Este fenómeno no ha sido todavía suficientemente investigado. Se ha notado en pavimentos sometidos a variaciones estacionales en el contenido de humedad del mismo que tienden a un cierto punto de estabilización luego de un cierto número de años.

En la gráfico adjunto se puede ver una curva de fatiga típica de las obtenidas en ensayos de laboratorio

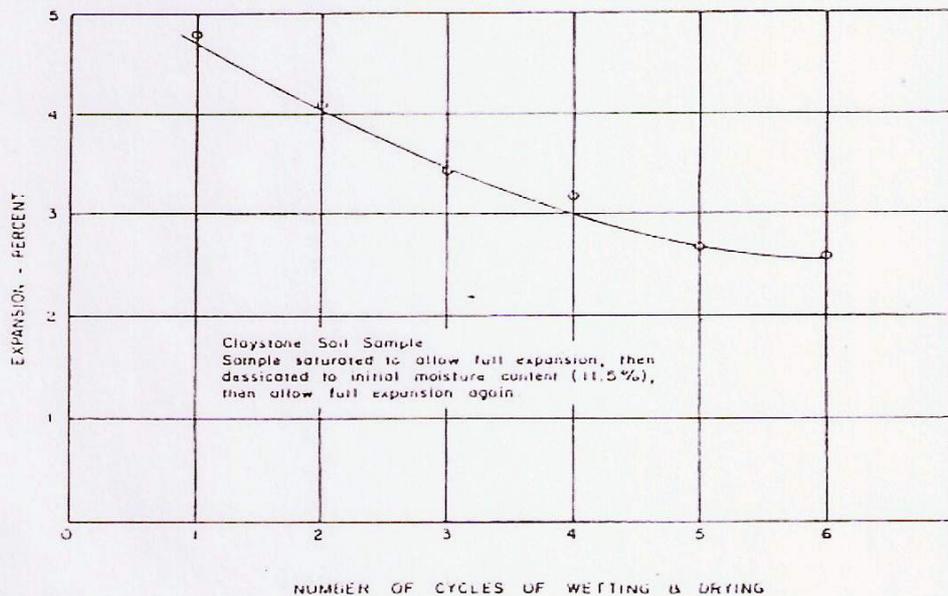


Figura 16. Curva de fatiga típica de las obtenidas en ensayos de laboratorio

II.8. Consolidómetro

El estudio de compresión unidimensional de los suelos se suele hacer en el consolidómetro, también conocido como Edómetro.

Este equipo se utiliza para realizar ensayos de expansión libre o controlada, además permite determinar el asentamiento que puede sufrir un suelo cuando es sometido a diversas cargas bajo condiciones de saturación o estado natural.

Consiste esencialmente en un anillo cortador, en el cual se encuentra comprimido el suelo entre dos placas porosas cuyo desplazamiento relativo puede medirse con gran exactitud. Si las placas no fuesen porosas, el ensayo sería completamente inútil en suelos saturados de agua, porque se mediría la compresibilidad de ésta y no la del suelo. Se consigue con ello, además, que la presión total pase a ser una presión efectiva. La carga se aplica a través de un yugo y por medio de un sistema de palancas.

En ensayos de rutina sobre suelos que no sean excesivamente duros, la deformación del suelo se mide por medio de un comparador situado sobre el yugo y adosado a un porta comparador rígidamente unido a la base de la célula. Con ello lo que se pretende es disminuir las deformaciones en todos los contactos intermedios.

Las presiones se aplican en series con intervalos de 24 horas tales como: 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10 kp/cm^2 .

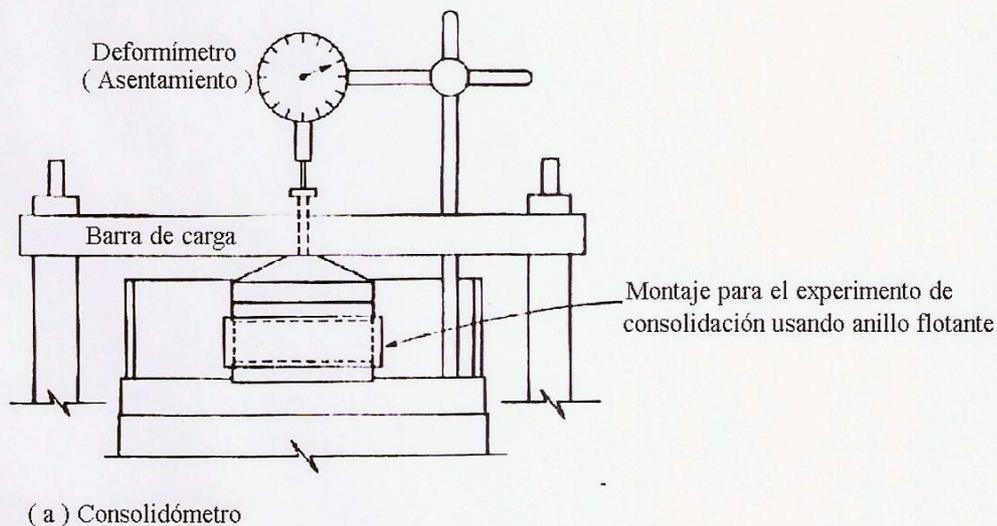


Figura 17. Consolidómetro

II.8.1. CLASES

II.8.1.1. CONSOLIDÓMETRO DE ANILLO FLOTANTE

Es llamado así, principalmente, porque al utilizarlo se puede desplazar durante la consolidación del suelo.

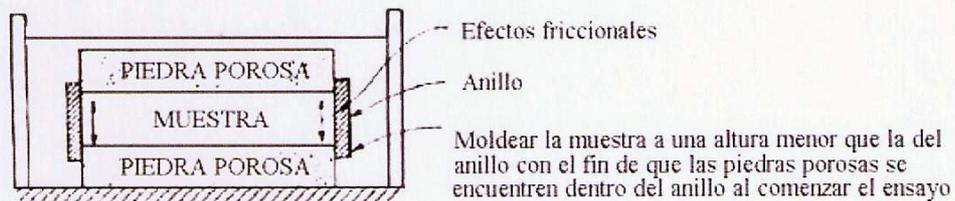


Figura 18. Consolidómetro de Anillo Flotante

II.8.1.2. CONSOLIDÓMETRO DE ANILLO FIJO

Este tipo de consolidómetro es poco usado actualmente, excepto para la realización de pruebas de permeabilidad ejecutadas simultáneamente con la de la consolidación.

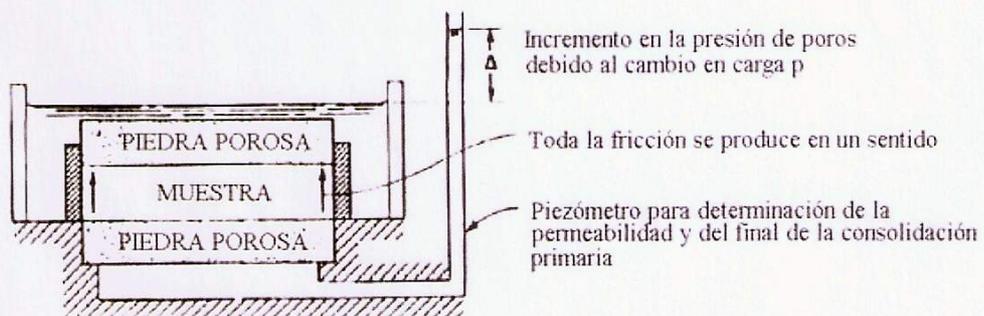


Figura 19. Consolidómetro de Anillo Fijo

II.8.1.3. CONSOLIDÓMETRO NEUMÁTICO "GEOTEC"

Es una modificación del aparato tradicional; es del tipo de anillo flotante. El sistema de aplicación de la carga es accionado mediante presión de aire, la cual se controla con un regulador de presión constante, midiéndose directamente la carga con un anillo calibrado de la precisión y capacidad requeridas.

II.8.1.4. CONSOLIDÓMETRO DE CONTRA PRESIÓN

Este tipo de consolidómetro está diseñado para realizar mediciones de presión y permeabilidad durante las pruebas de consolidación.

II.8.1.5. CONSOLIDÓMETRO ROWE

En caso de querer realizar el ensayo para arenas, gravillas o para muestras remoldeadas, se puede emplear un edómetro especial de gran diámetro propuesto por Rowe y Barden (1966).

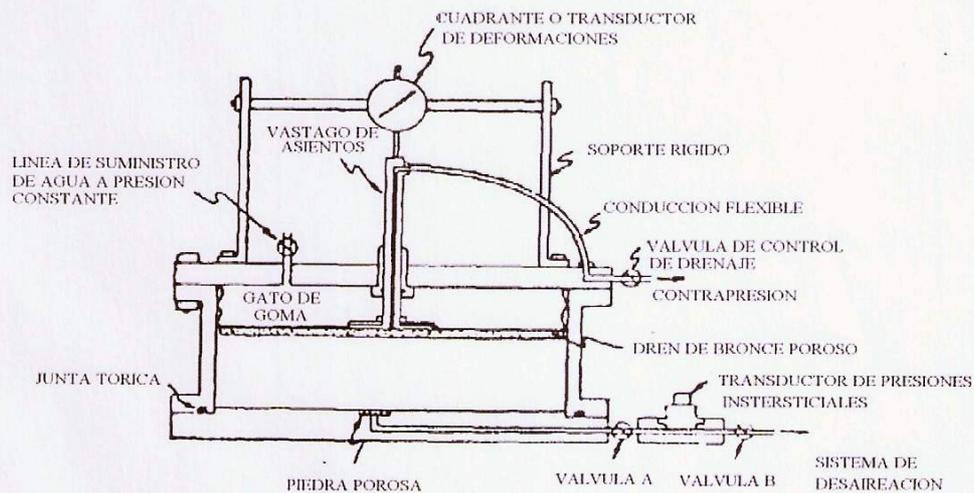


Figura 20. Consolidómetro Rowe

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
Cappello, Celia Daniela

II.9. Clasificación de Suelos

Existen varios sistemas de clasificación de los cuales los más utilizados en el país son:

- Sistema de clasificación de los suelos según **AASHTO**.
- Sistema de clasificación de los suelos según **SUCS**. (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)
 - ✓ Ambos métodos se basan en la determinación de la composición granulométrica del suelo y de los límites de Atterberg de la fracción fina de los mismos.
 - ✓ La clasificación de suelos según la **AASHTO** se utiliza en obras viales, y la clasificación de suelos según **SUCS** se utiliza para cimentaciones.
 - ✓ Esta clasificación se basa en los resultados obtenidos como el límite líquido, índice de plasticidad y material que pasa el tamiz No. 10, 40 y 200.

II.9.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN AASHTO

II.9.1.1. SUELOS GRANULARES:

Son aquellos que tienen el 35% o menos, del material fino que pasa por el tamiz N° 200, estos suelos forman los grupos A-1, A-2, A-3.

II.9.1.2. SUELOS FINOS:

Son suelos limo-arcillosos que tienen más del 35% que pasa el tamiz N° 200. A este tipo de suelos les corresponde los grupos A-4, A-5, A-6, A-7

La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se hace por medio del “índice de grupo”, mismo que se calcula con la siguiente fórmula empírica.

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

Donde

IG	=	Índice de grupo
F	=	Porcentaje del suelo que pasa por el tamiz N° 200, expresado como número entero.
LL	=	Límite líquido.
IP	=	Índice de plasticidad

II.9.2. CLASIFICACIÓN UNIFICADA DE SUELOS (SUCS)

- Sistema concebido para permitir la identificación de los suelos en el terreno, los agrupa de acuerdo a su comportamiento como material para construcción en función de sus propiedades de granulometría y plasticidad.
- El primer paso para clasificar el suelo consiste en identificar si es altamente orgánico o no. De serlo, se anota las principales características como: textura, olor, etc., y se identifica simplemente como turba (Pt); y, si no lo es, se continúa el proceso con ayuda de pruebas de laboratorio, indicando si el suelo es grueso o fino.

II.9.2.1. SUELOS GRUESOS

Son aquellos suelos que más del 50% de las partículas son retenidas en el tamiz N° 200. Un suelo grueso será grava, si la mayor parte de la fracción gruesa queda retenida en el tamiz N° 4 y se considera como arena en el caso contrario.

II.9.2.2. SUELOS FINOS:

Son aquellos suelos que más del 50% de las partículas pasan el tamiz N° 200. Para distinguir si la fracción fina es de carácter limoso o arcilloso, se emplea la carta de plasticidad de Casagrande. Figura 21.

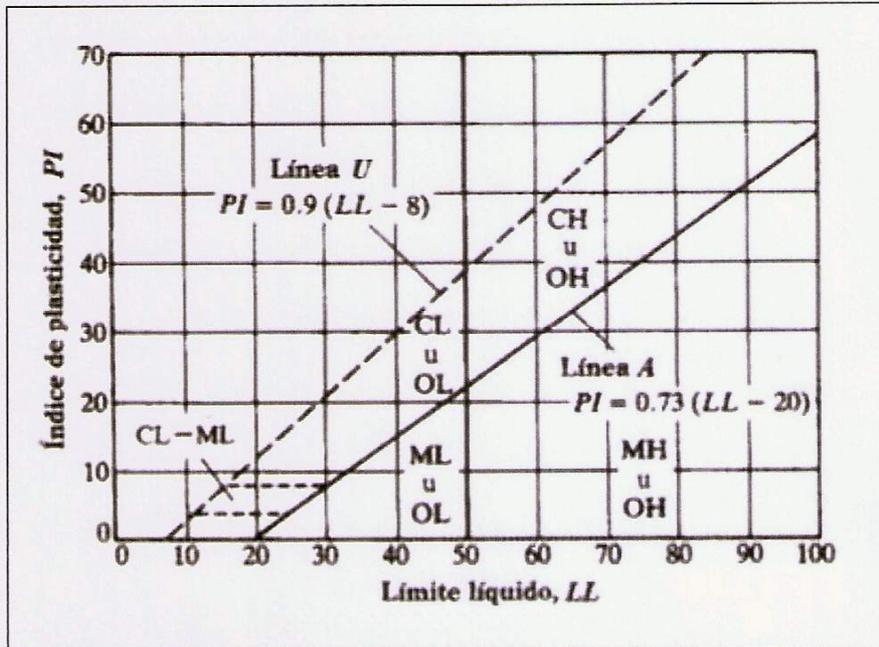


Figura 21. Carta de Plasticidad para la clasificación en Laboratorio de suelos de Grano Fino

La característica importante de esta carta es la línea A empírica dada por la ecuación $PI = 0.73 (LL - 20)$. La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos. Las gráficas de los índices de plasticidad contra límites líquidos para las arcillas inorgánicas se encuentran arriba de la línea A y aquellas para limos inorgánicos se hayan debajo de la línea A.

Los limos orgánicos se grafican en la misma región (debajo de la línea A y con el LL variando entre 30 y 50) que los limos inorgánicos de compresibilidad media. Las arcillas orgánicas se grafican en la misma región que los limos inorgánicos de alta compresibilidad (debajo de la línea A y LL mayor que 50).

La información proporcionada en la carta de plasticidad es de gran valor y es la base para la clasificación de los suelos de grano fino en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

La línea llamada línea U se encuentra arriba de la línea A. La línea U es aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora

En el siguiente cuadro se grafica el proceso de clasificación para suelo fino

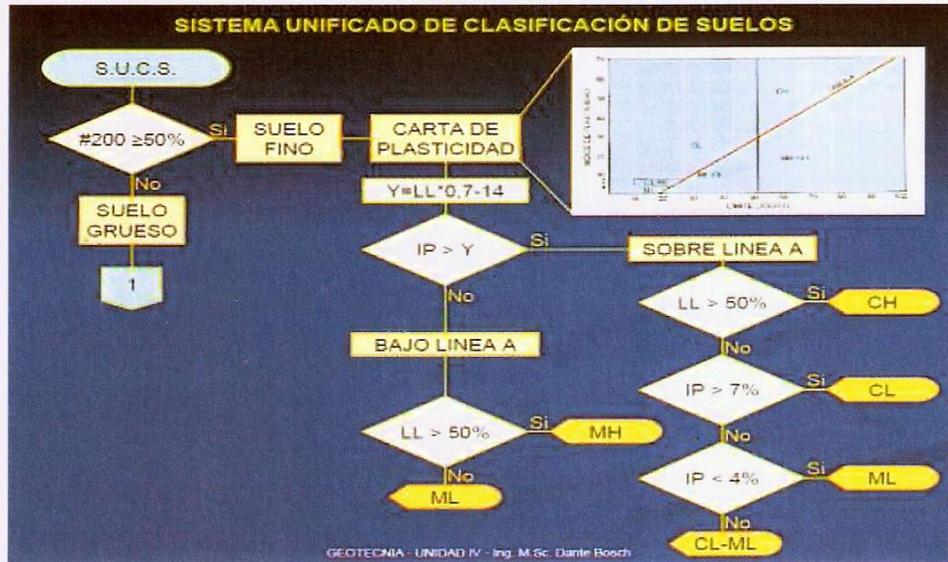


Figura 22. Clasificación para suelo fino

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS UNIFICADO "S.U.C.S."

DIVISIONES PRINCIPALES		Simbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO
SUELOS DE GRANO GRUESO	GRAVAS	Gravas limpias	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ $Cc = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3 No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.
		(sin o con pocos finos)	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	
	MÁS de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Gravas con finos	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$. Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.
		(apreciable cantidad de finos)	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.	Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.
ARENAS	Arenas limpias	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	$< 5\% \rightarrow GW, GP, SW, SP$. $> 12\% \rightarrow GM, GC, SM, SC$.	
		(pocos o sin finos)	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.	
	MÁS de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	Arenas con finos	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW. Límites de Atterberg debajo de la línea A o $IP < 4$. Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan símbolo doble.
		(apreciable cantidad de finos)	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Límites de Atterberg sobre la línea A con $IP > 7$.

SUELOS DE GRANO FINO	Limos y arcillas: Límite líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
Suelos muy orgánicos	Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50	OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.
		MH	Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.
		CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.
Suelos muy orgánicos	Limos y arcillas: Límite líquido mayor de 50	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.
		PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.

Tabla 12. S.U.C.S.

III. Programa Experimental

En este capítulo se indica el lugar donde se realizó el trabajo de campo, desde el cual se obtuvieron las muestras de estudio. Se describirá el proceso de fabricación y emplazamiento del marco, la instalación de los instrumentos de medición necesarios para la obtención de datos in situ, comparadores y sensores de humedad, Figura 23. Finalmente se describirá el procedimiento de los ensayos realizados.

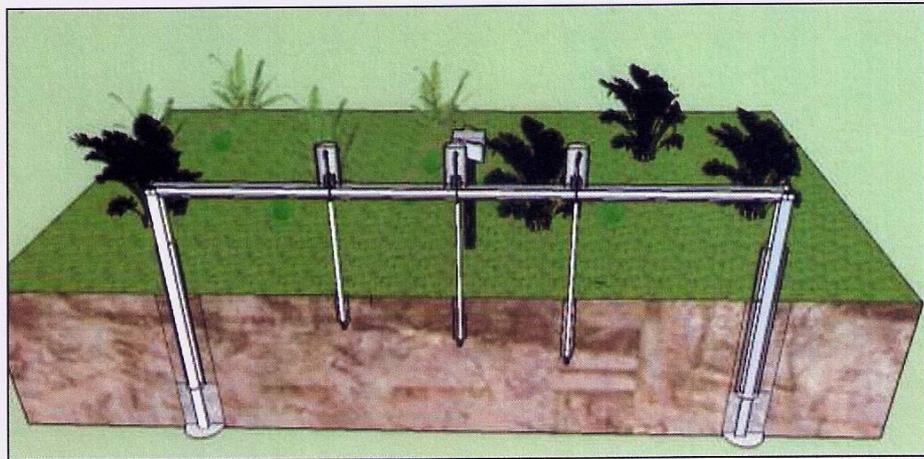


Figura 23. Esquema del instrumental Instalado.

III.1. Localización

El lugar elegido para realizar el trabajo de campo y la extracción de muestras fue un lote que se encuentra dentro de las instalaciones de la Estación Experimental Agropecuaria (E.E.A.) de Concepción del Uruguay perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), precisamente el lote N° 27, el cual se encuentra aproximadamente a 2 km del acceso. Imagen 17, 18 y 19.

El motivo de esta elección es que en dicho lugar el suelo está compuesto por un manto arcilloso el cual es adecuado para esta investigación.



Imagen 10. Localización de Concepción del Uruguay



Imagen 11: Localización de INTA



Imagen 12: Lugar de emplazamiento del instrumental. Lote 27. $32^{\circ}30'33.15''S$ $58^{\circ}22'12.64''$

III.2. Fabricación de dispositivo de referencia

Para la ejecución de este trabajo de investigación fue necesario contar con un dispositivo de referencia, para ellos se diseñó un marco de hierro formado por un dintel de 4,20m de longitud y dos pilares de 4,00m de longitud. Los tres elementos del marco se formaron soldando un perfil T de 80x60x6 mm con una planchuela de $\frac{1}{4}$ " de espesor y 3" de ancho quedando una sección doble T de 12cm de altura.

Para materializar la unión entre dintel y pilar, se soldó en un extremo de este último, dos varillas roscada de $\frac{5}{8}$ " de diámetro y 18 cm de largo y en ambos extremos del dintel una planchuela de 15x15cm con dos perforaciones para permitir el calce de las varillas roscadas fijando pilar y dintel mediante tuercas, en el otro extremo de los pilares se soldó una planchuela para dar una base de apoyo. Imagen 13.

Una vez soldados todos los elementos se pintó íntegramente con esmalte blanco.

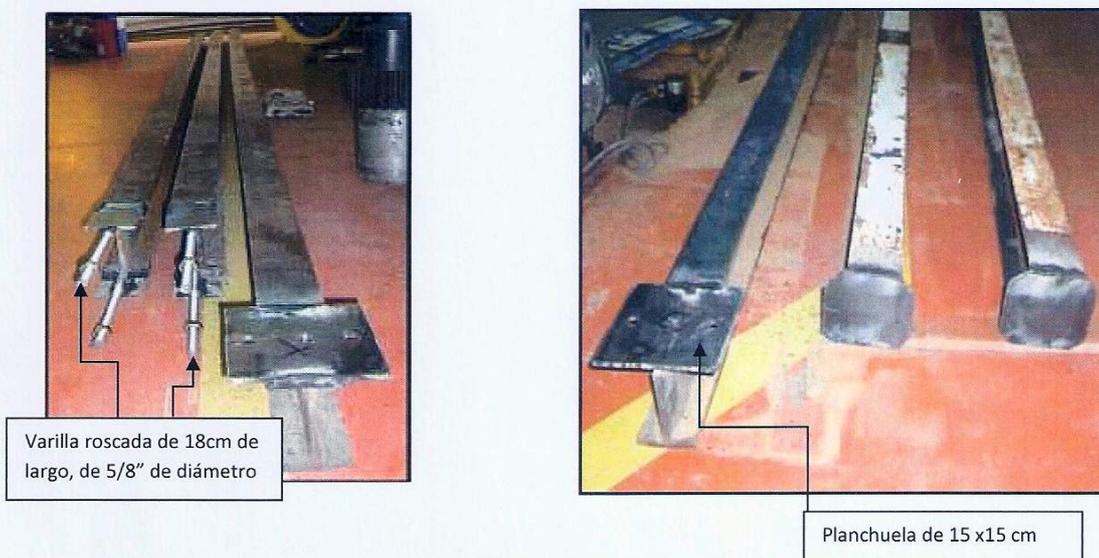


Imagen 13: Armado del marco

III.3. Instalación del marco

Para el emplazamiento, se practicaron dos pozos de 3m de profundidad y 20cm de diámetro.

Una vez verticalizados los pilares en los pozos, mediante apuntalamiento, se relleno con hormigón hecho in situ hasta 1m de altura. Una vez fraguado el hormigón se colocó en ambos pilares una camisa metálica, utilizando caños de chapa galvanizada de 150mm de diámetro, hasta sobre salir el nivel de la superficie. El extremo de la camisa se protegió con goma para evitar el ingreso del agua. Imagen 14.



Imagen 14: Camisa y protección del pilar

III.4. Instalación de comparadores

Coincidente con la línea del dintel y dentro del espacio limitado por los pilares, se realizaron tres pozos con pala vizcachera de 0,60m, 1,00m y 1,30m de profundidad y 0,20m de diámetro, con una separación entre ellos de próxima a 1m. En cada pozo se instaló una varilla de hierro liso de $\frac{3}{4}$ " de diámetro, de una longitud igual al pozo más un metro, de manera que el extremo superior queda próximo al nivel del dintel del marco. Se soldaron planchuelas en cada extremo, una para brindar apoyo y la otra para hacer contacto con el comparador.

Aproximadamente 10cm antes de llegar a las profundidades mencionadas se sacó una muestra de suelo en cada pozo, utilizando el sacamuestra fabricado por el grupo de investigación que realizó el trabajo precedente al nuestro (del cual se hace mención en la introducción de este trabajo). De esta manera en el fondo queda un hueco de 0,075m de diámetro y 0,12m de la altura (medidas del sacamuestra) que completa la profundidad requerida. Imagen 15.



Imagen 15: Pozo realizado con pala vizcachera

Una vez colocadas las varillas en los pozos, se rellenó y compactó con el mismo suelo el hueco dejado por el sacamuestras, a partir de ese nivel se colocó un caño de pvc de 40mm de diámetro a modo de camisa para evitar el roce de la varilla con el suelo y garantizar su libre movimiento, como se aprecia en la Figura 24.

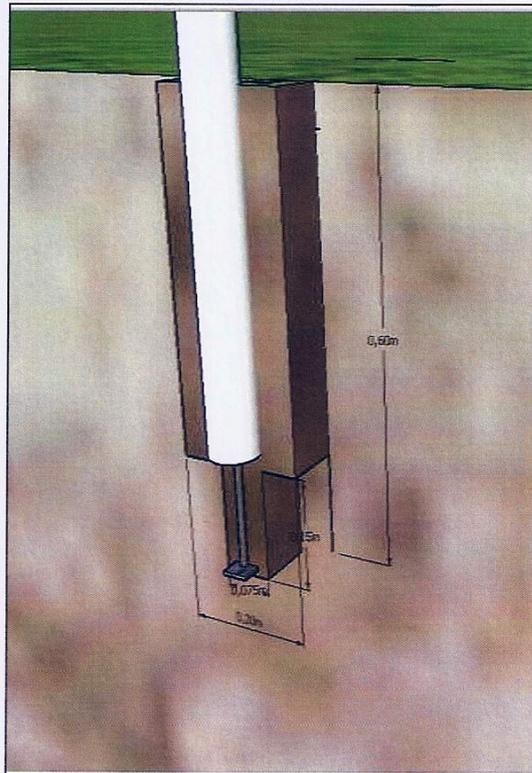


Figura 24: Instalación de varilla

En el extremo de la camisa se colocó una goma para evitar el ingreso del agua, lo cual provocaría una alteración en las condiciones de humedad natural.

Sobre el dintel y haciendo uso de bases magnéticas se montaron los comparadores en coincidencia con el eje de las varillas para registrar su movimiento vertical. En la cara inferior del dintel se colocaron argollas que evitan que las varillas se desplacen lateralmente de manera importante en caso de viento. Imagen 16.



Imagen 16. Comparador montado en base magnética

Para proteger los comparadores de las inclemencias climáticas se instaló en cada uno un sombrerete de caños de chapa galvanizada con el extremo cubierto con goma. Imagen 17.



Imagen 17: Protección de comparadores

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
Cappello, Celia Daniela

III.5. Instalación de Sensores de Humedad y Datalogger

Para conocer el funcionamiento y las técnicas de instalación de los sensores de humedad utilizados se recomienda ver el Apartado I.

El propósito de la instalación de los sensores de humedad es para obtener datos del contenido de humedad a diferentes profundidades y observar como varia la misma a través del tiempo. A tal fin se practicaron tres pozos próximos al marco de profundidades igual a los pozos practicados entre los dinteles, es decir de 0,60m, 1,00m y 1,30m y se colocó un sensor en cada uno. Imagen 18 y 19, Figura 25.



Imagen 18. Sensor de humedad

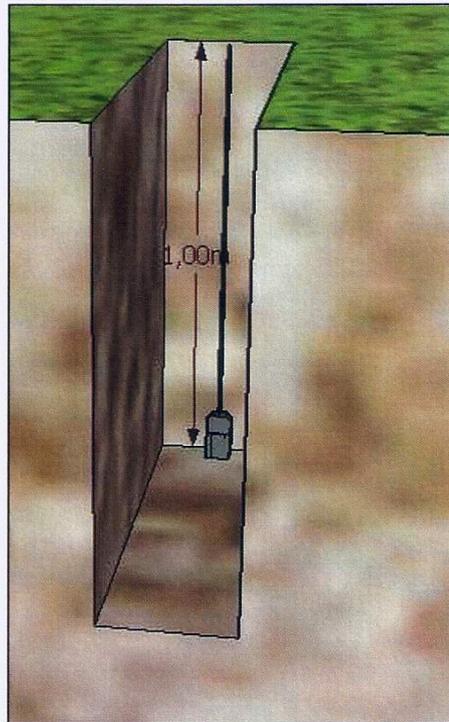


Figura 25. Esquema de instalación del sensor de humedad



Imagen 19. Sensor de humedad instalado en el pozo

Una vez instalados los sensores, se rellenó y compacto el pozo con el mismo suelo extraído.

Las fichas plug del extremo del cable se conectaron a un datalogger, este dispositivo recibe y graba los datos enviados por cada sensor. Para proteger del sol y del agua se fijó el datalogger dentro de una caja metálica. El conjunto datalogger y caja se monto en una estaca de madera detrás del marco. Imagen 20.



Imagen 20. Datalogger en caja metálica

III.6. Extracción de Muestras

III.6.1. EXTRACCIÓN DE MUESTRAS PARA CLASIFICACIÓN DEL SUELO

En el sector 27 de INTA de Concepción del Uruguay, se extrajo muestras para clasificar el suelo de dicho lugar. Para las perforaciones más profundas se utilizó una pala llamada vulgarmente en la zona “peludo” y para la extracción a menos profundidad se utilizó una pala vizcachera. Imagen 21 y 22.



Imagen 21. "Peludo"



Imagen 22. Pala Vizcachera

Se realizó dos pozos, del primero se extrajo muestra a 0,50m y 1,00m; del segundo pozo se extrajo muestra a 1,00m; 1,15m; 1,30m; 1,45m y 1,60m; 2,20m; 2,30m; 2,40 y 2,50m. Los espécimen se colocaron en bolsas de polietileno y frascos de vidrio con tapa sellada con cinta aisladora para evitar la variación en el contenido de humedad hasta su ensayo en laboratorio.

III.6.2. EXTRACCIÓN DE MUESTRAS PARA ENSAYO DE HINCHAMIENTO

Para realizar el ensayo de hinchamiento se extrajo una muestra de tres pozos diferentes, a 0,60m, 1,00m y 1,30m respectivamente. Dicho ensayo se debe realizar con muestras inalteradas, es por ello que para la extracción de las mismas se utilizó el sacamuestra fabricado por el grupo de investigación que realizo el trabajo "Caracterización Preliminar de Arcillas Activas de la Ciudad de Concepción del Uruguay. Su fabricación y características se detallan en dicho trabajo.

La Figura 26 muestra un esquema del mismo donde se observan sus dimensiones.

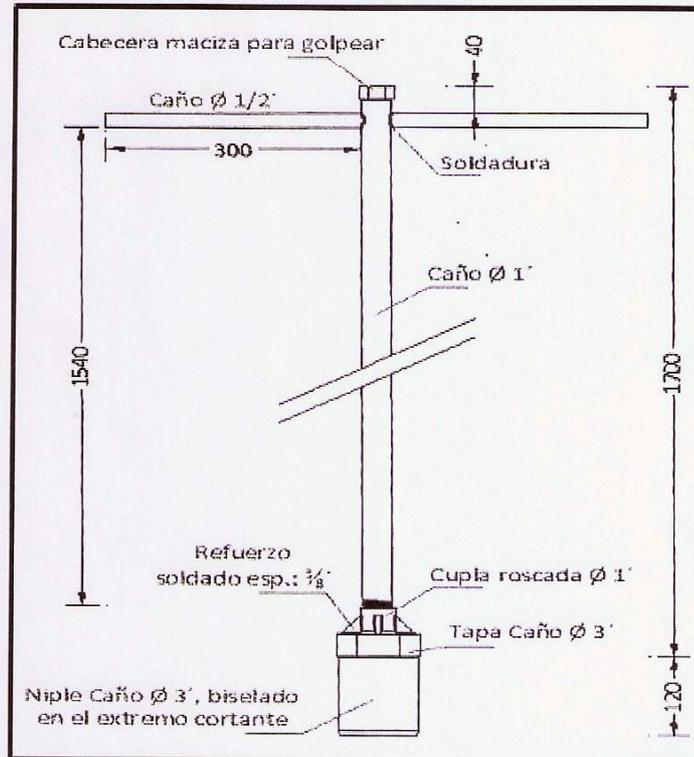


Figura 26. Esquema del Sacamuestra

Este sacamuestras consiste básicamente en un tubo cilíndrico de hierro galvanizado de 3 pulgadas de diámetro en el cual se aloja el suelo extraído. Este tubo tiene un borde biselado. El espesor de la pared es de 1/16 de pulgada siguiendo las recomendaciones generales de ensayos de suelos, en referencia a la utilización de toma muestras de paredes delgadas, a fin de producir alteraciones mínimas en la extracción.

El otro componente es el mango del sacamuestras, conformado por un caño de hierro de sección anular de 1 pulgada de diámetro. Sobre uno de sus extremos se ejecutó una rosca whitworth y se enroscó una cupla de 1 pulgada de diámetro. Esta cupla a su vez unida a una tapa de hierro galvanizado de 3 pulgadas mediante soldadura de arco, reforzando luego la unión en 4 puntos por medio de escuadras. Este extremo del mango es el que permite ensamblar el tubo al conjunto.

El extremo opuesto tiene la similitud de un mango de pala vizcachera, conformado por dos barras de hierro de 1/2 pulgada dispuestas normales al eje del sacamuestras, con una longitud suficiente para aplicar un esfuerzo torsor. Se le incorporó también a este extremo una sufridera para poder imprimirle la acción de hincado mediante martillo.

Para la extracción inmediata de las muestras alojadas dentro del tubo durante las tareas de campaña, se diseñó un dispositivo simple que consiste en una pieza realizada sobre una tapa de hierro galvanizada idéntica a la del sacamuestras. Sobre el centro de esta tapa se practicó una perforación para permitir el paso de una barra roscada de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro. La barra roscada y la tapa se encuentran vinculadas entre sí por medio de una tuerca adherida a la tapa mediante un cordón de soldadura. Imagen 23.

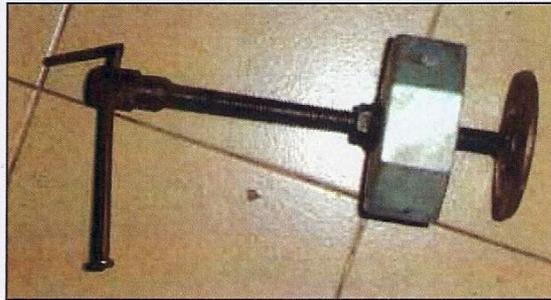


Imagen 23. Extractor de muestra

Uno de los extremos de la barra posee un disco de chapa de $\frac{1}{8}$ de pulgada de espesor, con un diámetro sensiblemente inferior al interior del tubo. Este disco tiene la libertad de girar independientemente de la barra, lo cual ofrece una menor dificultad para la extracción de la muestra y que la misma sea extraída con menor probabilidad de daño. Sobre el extremo opuesto se fijó una manivela de forma permanente para facilitar la rotación de la barra roscada y con ella el empuje de la muestra fuera del tubo. Imagen 24, 25 y 26.



Imagen 24. Muestra dentro del sacamuestra



Imagen 25. Extracción de muestra con extractor.

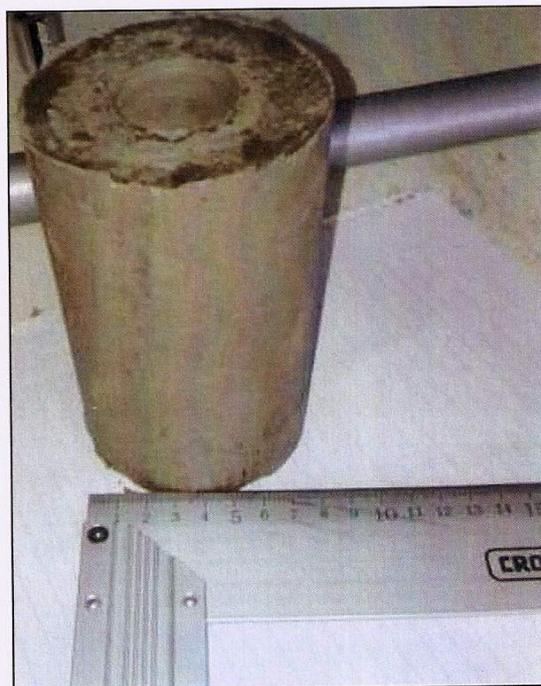


Imagen 26. Muestra extruida

A medida que se realizaban las perforaciones se ha observado la variación del suelo con respecto a la profundidad. Los primeros 0,30m - 0,35m el suelo es vegetal, presencia de humus, tiene una textura limosa de color gris oscuro a negro, de aspecto opaco, luego hasta los 0,40m - 0,45m cambia a un color grisáceo más claro con componentes de partículas sólidas blanquecinas, finalmente a partir de los 0,60m - 0,65m es de color gris más definido, con una textura plástica y claramente arcilloso. Imagen 27.

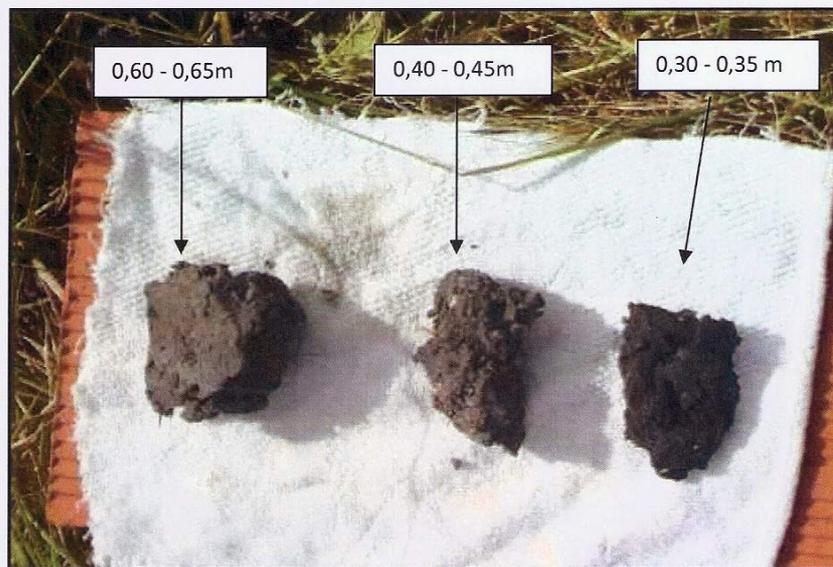


Imagen 27. Variación del suelo con la profundidad

A partir aproximadamente de 1,00m de profundidad y hasta 2,50m (profundidad hasta donde se extrajo muestra) el suelo toma un color gris claro con una textura de mediana a alta plasticidad con alto contenido de humedad. No se ha observado un horizonte neto en el pasaje de un suelo a otro.

III.7. Procedimientos de ensayo para clasificación y caracterización de suelo cohesivo.

Para clasificar el suelo se utilizó el método SUCS, el cual fue descrito en el capítulo II.

III.7.1. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD.

Este ensayo tiene por finalidad, determinar el contenido de humedad de una muestra de suelo. El contenido de humedad de una masa de suelo, está formado por la suma de sus aguas libre, capilar e higroscópica. Como referencia se utilizó la Norma IRAM 10519.

La importancia del contenido de agua que presenta un suelo representa junto con la cantidad de aire, una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este (especialmente en aquellos de textura más fina), como por ejemplo cambios de volumen, cohesión, estabilidad mecánica.

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio, es por medio del secado a horno, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas, o sea:

$$w = (W_w / W_s) * 100 (\%)$$

donde:

w = contenido de humedad expresado en %

W_w = peso del agua existente en la masa de suelo

W_s = peso de las partículas sólidas

Equipo necesario:

- Horno de secado con circulación de aire y temperatura regulable capaz de mantenerse en $110^\circ \pm 5^\circ \text{C}$.
- Balanza. Su precisión variará de acuerdo a la cantidad de muestra a pesar.
- Herramientas y accesorios. Recipientes de porcelana, guantes, espátula y brocha.
- Procedimiento. Se toma una muestra representativa de suelo, de acuerdo al tamaño máximo de las partículas.

A continuación, se coloca la muestra húmeda en un recipiente previamente tarado (M_r), para proceder a pesar la muestra húmeda más el recipiente, obteniendo M_h . Luego se coloca el conjunto dentro del horno durante 24 horas, a una temperatura de $110^\circ \pm 5^\circ \text{C}$. Transcurrido dicho tiempo, se determina el peso del recipiente con la muestra seca (M_s).

- Cálculos.

- Calcular el contenido de humedad (w) de la muestra:

$$w = (M_h - M_s) / (M_s - M_r) * 100 (\%) \text{ donde:}$$

Mh = peso recipiente más la muestra de suelo húmedo (gr)

Ms = peso recipiente más la muestra de suelo seca (gr)

Mr = peso recipiente (gr)

En la mayoría de los casos, el tiempo de secado varía dependiendo del tipo de suelo. Por ejemplo una muestra de arena puede secarse en sólo algunas horas, ciertas arcillas podrán tardar más de 24 horas. En caso de que el tiempo establecido sea insuficiente, la muestra continuará en el horno hasta obtener pesadas consecutivas constantes transcurridas 4 horas entre ellas

Para evitar pérdidas de humedad, como también absorción de humedad atmosférica luego de extraer la muestra del horno, se recomienda el empleo de recipientes herméticos con tapa.

Las muestras ensayadas para determinar la humedad, deberán ser descartadas y no se utilizarán en ningún otro ensayo.

Para la clasificación del suelo se debe conocer en principio sus propiedades plásticas.

Los límites propuestos por Atterberg son cinco: Límite de Cohesión, Límite de Pegajosidad, Límite de Contracción, Límite Plástico y Límite Líquido, los dos últimos han sido universalmente adoptados en la identificación y clasificación de suelos.

Como referencia se utilizó Norma IRAM 10501 que corresponde a la revisión de las normas IRAM 10501: 1968 e IRAM 10502: 1968, habiéndose acordado la unificación de ambas normas bajo la designación IRAM 10501.

III.7.2. LIMITE LÍQUIDO

Una mezcla de suelo y agua, capaz de ser moldeada, se deposita en la Cuchara de Casagrande o Copa de Casagrande y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela hasta que el surco que previamente se ha practicado con un acanalador, se cierre en una longitud de 12,7mm. Si el número de golpes para que se cierre el surco es 25, la humedad del suelo (razón peso de agua/peso de suelo seco) corresponde al límite líquido. Para realizar este ensayo se utiliza el Aparato de Casagrande. Figura 27.

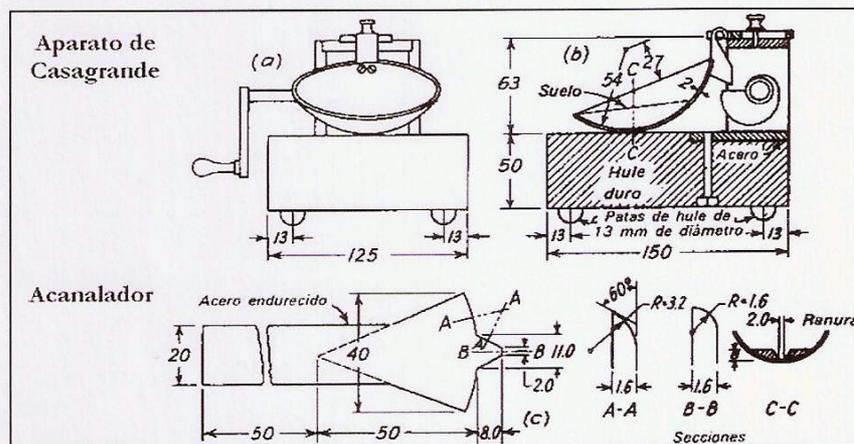


Figura 27. Aparato de Casagrande

Dado que no siempre es posible que el surco se cierre en la longitud de 12 mm exactamente con 25 golpes, se ha encontrado que si se hace una gráfica en la cual se representa la variación del número de golpes necesarios para cerrar la ranura en una escala logarítmica, contra el contenido de humedad correspondiente en una escala aritmética, el lugar geométrico de los puntos resultantes insinúa una variación de tipo lineal. Se dibuja la recta de mejor ajuste y el límite líquido queda determinado al intersectar esta recta con el valor de 25 golpes, proyectando luego sobre el eje de ordenadas para leer el correspondiente valor de humedad.

Para realizar la ranura en la cazuela se utilizan herramientas patrón, una de ellas es la propuesta por ASTM con mango de bronce teniendo en un extremo una sección cuadrada de 10 mm que sirve de calibre y en el otro extremo una curva de acero inoxidable de medidas normalizadas. La otra herramienta es la desarrollada por Casagrande, la cual tiene la ventaja de permitir un mejor control de la profundidad de la pasta de suelo.

III.7.2.1. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.

Se pone a secar al aire aproximadamente 5kg de suelo durante una semana. Del retenido del tamiz N° 40 se aparta para el ensayo $250 \pm 10g$.

Se recomienda asegurar mediante el uso de un mortero, la destrucción de todos los grumos presentes, dado que una de las principales fuentes de error del ensayo consiste en fallar en la obtención de una muestra verdaderamente representativa, al permitir que suelo fino quede retenido en forma de grumos en el tamiz N° 40.

Se debe verificar que la altura de la máquina del límite líquido que se va a utilizar sea exactamente 1cm ($\pm 0,10\text{mm}$), para ello puede utilizarse el extremo en forma de dado del ranurador ASTM.

En nuestro caso, para la determinación del límite líquido se utilizó un cascador de Casagrande eléctrico con contador que posee altura de caída controlable por medio de un tornillo de regulación y otro de ajuste. Imagen 28.



Imagen 28. Cascador de Casagrande eléctrico con contador.

Colocar los 250g de suelo en un recipiente de porcelana, añadir sucesivamente pequeñas cantidades de agua y mezclar cuidadosamente hasta conseguir un color uniforme y una apariencia cremosa.

Cuando se encuentre el suelo con una consistencia tal que pueda estimarse que tomara alrededor de 30 a 40 golpes para cerrar en una longitud de 12,7 mm la ranura, colocar en la cazuela de bronce una pequeña cantidad de suelo. Se debe emparejar cuidadosamente la superficie del suelo con una espátula y mediante el uso de la herramienta ranuradora, cortar una ranura clara y recta que separe la masa de suelo en dos partes.

La mayor profundidad del suelo en la pasta debe ser aproximadamente igual a la altura de la cabeza de la herramienta patrón ASTM. Si se utiliza la herramienta de Casagrande, se debe mantener firmemente perpendicular a la tangente instantánea a la superficie de la

cazuela y la herramienta, de forma que la profundidad de la ranura sea homogénea en toda su longitud. El suelo no debe ser alterado por los “hombros” de la herramienta.

Después de realizar la ranura se hace el conteo de golpes. Si se permite una demora innecesaria en este proceso, y la humedad del laboratorio es baja, se puede secar la superficie de la muestra, lo cual afectará el conteo de los golpes. Este efecto mostrará cuando se dibujan los datos una tendencia errática de los puntos en el plano.

Tomar una muestra para medir contenido de humedad y colocarla en un recipiente cuyo peso debió ser determinado anteriormente y asegurarse que esta muestra corresponda a la zona donde se cerró la ranura. Remover los restos de suelo en la cazuela y limpiarla perfectamente.

Repetir la secuencia para dos ensayos adicionales con un número de golpes entre 20 y 25 y entre 20 y 15 respectivamente, obteniendo así un mínimo de tres determinaciones. Es necesario que la diferencia entre el número de golpes de cada ensayo individual sea de por lo menos dos y preferiblemente tres, para obtener luego una dispersión adecuada de puntos en el gráfico

III.7.3. LIMITE PLÁSTICO

El límite plástico se define como el contenido de humedad de un suelo por debajo del cual se considera al mismo como material semisólido. Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado (IRAM 10501)

III.7.3.1. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO.

Para aumentar la precisión eliminando los errores de pesada, el ensayo se debe realizar de la siguiente forma:

Dividir en varias porciones pequeñas la muestra de 20 a 30g de suelo, obtenido del retenido del tamiz 40.

Realiza una mezcla de agua y suelo, sobre una placa de vidrio o sobre un trozo de papel colocado a su vez sobre una superficie lisa amasa con la mano extendida con presión suficiente para modelarlo en forma de cilindro de 3 mm de diámetro uniforme. Imagen 29.

Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro, y vuelve a amasarse hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 mm. Esto se realiza consecutivamente hasta que no es posible obtener el cilindro de la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad) o se vuelve pulverulento.

Se mide el contenido de humedad, el cual corresponde al límite plástico. Se recomienda realizar este procedimiento al menos 3 veces para disminuir los errores de interpretación o medición.



Imagen 29. Cilindros para determinación de Limite Plástico

Una vez calculado el contenido de humedad de las muestras se dibuja una grafica de contenido de humedad contra numero de golpes resultantes del ensayo de limite liquido en escalasemilogaritmica con el fin de obtener el valor del limite liquido tal como se describio anteriormente. Se calcula el Indice de Plasticidad como:

$$I_p = w_l - w_p$$

siendo

I_p : Indice de Plasticidad

w_l : Contenido de humedad correspondiente al limite liquido

w_p : Contenido de humedad correspondiente al limite plastico

III.8. Método de ensayo para la determinación del potencial de hinchamiento unidimensional de suelos cohesivos

El método para la determinación de la presión de hinchamiento empleado en este trabajo es el que figura como Método A en la norma ASTM D 4546 – 96.

El ensayo comienza al inundar una muestra de suelo dentro del consolidómetro y permitiéndole hinchar verticalmente bajo la presión de asiento. Esta última puede tener un valor mínimo de 1Kpa (10kg/cm²) que corresponde al peso en conjunto de la piedra porosa superior y de la placa de carga . el hinchamiento continua hasta que la expansión primaria se haya completado, momento en el cual se comienza a cargar la muestra sucesivos escalones de carga, hasta retornar a la relación de vacíos/altura original.

III.8.1. EQUIPO

El equipo empleado es prácticamente el mismo que en el ensayo de consolidación unidimensional. Se recomienda ver el Anexo B “Manual de Uso de Maquina de Consolidación” del Proyecto Final “Caracterización Preliminar de arcillas Activas de la Ciudad de Concepción del Uruguay”, allí describe el uso y cada una de las partes del equipo utilizado en este ensayo.

A continuación y a modo de referencia se mencionan sus partes:

- Equipo de carga con relación de amplificación 10:1. (Imagen 30)
- Consolidómetro de anillo fijo. (Imagen 31)
- Placa de Carga. (Imagen 32)
- Piedras porosas. (Imagen 33)
- Balanza de laboratorio con sensibilidad de 0,1 g.
- Horno de secado con temperatura uniforme de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Extensómetro con sensibilidad de 0,01 mm y 10 mm de carrera.
- Elementos menores como cuchillo o espátula cortante, probeta, pesafiltros, etc.



Imagen 30. Equipo de carga

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
Cappello, Celia Daniela



Imagen 31. Consolidómetro ensamblado con aro de fijación.



Imagen 32. Placa de carga



Imagen 33. Piedras porosas

El consolidómetro de anillo fijo es un recipiente que contiene la muestra dentro de un anillo fijo a su base, con piedras porosas en cada una de las caras del espécimen. Este dispositivo sirve además para contener agua cuando se ensaya simulando condiciones de saturación, y cuenta con un orificio lateral para posibilitar el drenaje.

A continuación se exponen los requisitos a cumplir según las normativas para el anillo del consolidómetro, ya que existen de distintos tipos y dimensiones. Seguidamente a cada

punto se marca las condiciones que presenta el respectivo anillo con el que se efectuaron los ensayos de laboratorio.

- Diámetro interior mínimo del anillo (diámetro de la muestra): deberá ser al menos 5 mm menor que el diámetro del tubo sacamuestras, y como mínimo deberá tener 45 mm de diámetro, el diámetro interior del anillo es de 63,5 mm, y el anillo interno del sacamuestras de 69 mm.
- Altura mínima de la muestra: deberá ser como mínimo 10 mm, pero no menor a 10 veces el diámetro máximo de la partícula, la altura del anillo del consolidómetro empleado es de 20 mm.
- Relación mínima diámetro – altura de la muestra: deberá ser de 2,5. – en el presente caso es de 3,175.
- Rigidez: la rigidez del anillo deberá ser suficiente, para que bajo condiciones de esfuerzo hidrostático junto con la mayor carga aplicada en la muestra, el cambio de diámetro del anillo no supere el 0,03 %.
- El material del anillo no deberá ser corroído por el suelo ensayado. La superficie interior deberá ser altamente pulida, o bien estar cubierta con un material de baja fricción. En este último caso se recomienda grasa de silicona o politetrafluoroetileno para suelos no arenosos.

El material de las piedras porosas puede ser carburo de sílice, óxido de aluminio, o cualquier otro metal que no sufra ataque del suelo o la humedad del mismo. El grano de las piedras debe ser lo suficientemente fino para evitar la intrusión del suelo en sus poros.

Para garantizar esto último, se suele emplear también un papel de filtro sobre la muestra, pero en este caso se debe asegurar que la permeabilidad conjunta del papel y la piedra no sea escasa, para no reducir el tiempo de drenaje y la consolidación.

El diámetro de las piedras debe ser de 0,2 a 0,5 mm menor que el diámetro interior del anillo. El espesor de las piedras, como rigidez de la placa de carga, serán los suficientes para evitar la rotura de las piedras.

III.8.2. MUESTREO

La alteración de las muestras a ensayar debe ser mínima, ya que con ella disminuye la exactitud de los datos obtenidos en el ensayo.

No es recomendable almacenar las muestras dentro del tubo de muestreo, ya que la humedad y el oxígeno en el suelo pueden ocasionar la formación de óxido y con ello la alteración del espécimen, si las muestras serán almacenadas previamente a su ensayo, deberán extraerse del tubo lo antes posible y sellarse con un film adherente de pvc, para luego ser guardadas dentro de un recipiente hermético con una esponja o algodones húmedos en su interior. Esto último se realiza para mantener por mayor tiempo la humedad natural de las muestras, y así obtener resultados más representativos de las condiciones de campo.

Antes de la extracción de la muestra, se aplica aceite sobre las paredes del tubo para facilitar la posterior extrusión del espécimen. Una vez extraída la muestra del tubo, se debe recortar de 3 a 6 mm la superficie externa del cilindro de suelo para eliminar el aceite adherido y que este no influya en el resultado de los ensayos.

III.8.3. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Para el caso de muestras que no fueron almacenadas y se dispuso su ensayo de inmediato una vez extraída del tubo de muestreo, ya sea con el extractor de muestras blandas de campo o bien con el extractor de muestras firmes en prensa, se ejecutó un corte transversal con un hilo de nylon para lograr una sección limpia y bien nivelada. Sobre esta sección se insertó el anillo por la parte que posee el bisel, se recortó el material sobrante y se enraso cada cara al nivel de la superficie plana del anillo mediante el uso de una regla con filo, cuchillo o espátula.

En aquellas muestras en las que se decidió ensayar a humedad natural, en el momento de su preparación fue necesario extruir la probeta en sentido hacia la cara inferior del anillo. La extrucción de la muestra se efectuó colocando la placa de carga sobre la cara superior del espécimen, ejerciendo luego una leve presión para desplazar el suelo una distancia equivalente al canto de la placa, es decir, de 4 a 5 mm. A continuación, el suelo sobrante por la cara inferior del anillo fue recortado empleando hilo de nylon, cuchillo o espátula, logrando así su enrase con la superficie del anillo.

Esta tarea se realiza para que durante el hinchamiento, el espécimen quede confinado en todo momento por el anillo metálico, y al continuar con la etapa de cargas este no escape por la cara superior del anillo. Luego se midió con un calibre en 3 o 4 puntos de distancia entre la superficie rebajada de la muestra y el nivel superior del anillo. Luego se determinó el promedio de estos valores, y substrayendo esta última medida de la correspondiente a la altura del anillo, se obtuvo la altura inicial de la probeta, H_i .

III.8.4. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES ÍNDICE

A partir del material sobrante del tallado de la muestra se extrae una porción adecuada para la determinación del contenido de humedad natural ω_n según norma IRAM 10519, del mismo remanente, se aparta una cantidad adicional de suelo para la gravedad específica de los sólidos G_s .

Una vez preparada la muestra se determinó su peso junto con el del anillo de consolidación.

El peso húmedo inicial de la muestra W_{ti} , queda definido al substraer el peso del anillo del peso combinado de muestra y anillo. El volumen inicial de la muestra V_{ti} , resulta del producto de su altura inicial H_i y el área A de la sección transversal del anillo.

Con los datos anteriores es posible calcular el peso unitario húmedo inicial γ_{hi} y el peso unitario seco inicial γ_{di} a través de las siguientes ecuaciones:

$$\gamma_{hi} = \frac{W_{ti}}{H_i \cdot A}$$

El peso de los sólidos W_s puede estimarse de forma aproximada antes de finalizar el ensayo de presión de hinchamiento, en función del contenido de humedad natural y el peso húmedo inicial de la muestra, según la siguiente expresión:

$$W_s = \frac{W_{ti}}{1 + w_i}$$

Por otro lado, el volumen de sólidos V_s puede calcularse en forma aproximada como:

$$V_s = \frac{W_s}{G_s \cdot \gamma_w}$$

Luego, el volumen inicial de vacíos es:

$$V_{vi} = V_{ti} - V_s$$

A través de las dos ecuaciones anteriores ahora es posible calcular de forma aproximada la relación de vacíos inicial e_i , antes de la finalización del ensayo de presión de hinchamiento, según:

$$e_i = \frac{V_{vi}}{V_s}$$

El grado de saturación inicial se define como

$$S_i(\%) = \frac{(W_{ti} - W_s)}{H_{vi} \cdot A} = \frac{V_{wi}}{V_{vi}}$$

Al finalizar el ensayo, la muestra se seca en estufa y con ello se obtiene su contenido de humedad final W_f y el valor exacto del peso seco de los sólidos W_s . Estos dos últimos se emplean para calcular el volumen final de agua en la muestra V_{wf} , que servirá, en conjunto con la altura inicial H_i de la probeta y la deformación final ΔH registrada durante el ensayo para la determinación del verdadero valor de la relación de vacíos inicial e_i a su vez, el volumen final de agua es igual al volumen final de vacíos al termino del ensayo, por lo que el cociente entre este último valor con respecto al volumen de sólidos resulta en la relación de vacíos final e_f .

III.8.5. PROCEDIMIENTO

Los pasos para la ejecución del ensayo de hinchamiento libre-presión de hinchamiento son los que se describen en forma seguida:

- Como primera medida se debe procurar que la leva se encuentre en posición perfectamente horizontal, para lo que se pueda emplear un nivel circular de ojo o un nivel de albañil ubicado sobre la misma y que sirva de referencia para su balance. El cabezal de carga puede sostenerse manualmente en forma vertical, mientras se ajusta el contrapeso hasta obtener el nivel horizontal de la leva. El equilibrio de todo el sistema es muy delicado; cualquier modificación en la posición de algunos de sus elementos lo desestabiliza, por lo que se aconseja que antes de proceder al balance de la leva, se ajuste la altura del tornillo calante lo más preciso posible a cómo quedaría una vez colocada la muestra debajo del mismo.

- En el caso de ensayar una muestra a humedad natural, luego de ser preparada, se debe determinar su altura inicial H_i y ser ensamblada junto a las piedras porosas secas dentro del consolidómetro. Paso seguido se centra este último sobre la base del equipo auxiliándose de las marcas para tal fin.
- Para ensayos con humedad inicial menor a la natural, durante la preparación de la muestra esta debe quedar enrasada con los bordes del anillo, ya que durante el periodo de secado se genera una pequeña reducción en su altura. Cuando el peso de la muestra se encuentra por debajo del correspondiente a un contenido de humedad igual al límite plástico, se determina su altura inicial H_i , y se monta el consolidómetro en el equipo de carga.
- Una vez ensamblada la muestra con contenido de humedad natural en el consolidómetro y montado este sobre la base de la máquina, se aplica una presión de asiento de 1Kpa ($0,01\text{kg/cm}^2$). Esta presión se logra colocando la piedra porosa superior y la placa de carga encima de la muestra alojada en el consolidómetro. La aplicación de dicha presión se efectúa durante un lapso de 5 minutos, luego del cual se ubica el extensómetro sobre el eje de la placa de carga y se ajusta su lectura en la posición cero.
- En muestras desecadas este paso debe omitirse, ya que las mismas se encuentran sometidas a la presión de asiento desde un principio. Por ello, una vez montado el consolidómetro en la máquina, se ajusta el comparador en la lectura inicial o cero y se continúa directamente con el siguiente paso de este procedimiento.
- A continuación se inunda el consolidómetro hasta que el nivel del agua sea tal que solo entre en contacto con la muestra por la piedra porosa inferior. Con esto se evita que quede aire aprisionado dentro de la muestra. De forma inmediata se comienzan a registrar los hinchamientos a través del comparador en intervalos de tiempo de 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 15 y 30 min- 1 – 2 – 4 – 8 – 24 – 48 – 72 hs, tomando luego lecturas cada 24 hs de ser necesario, hasta que la zona de expansión secundaria quede bien definida por una recta sobre el gráfico deformación vs tiempo en min., en escala semilogarítmica (curva de hinchamiento). En realidad, el proceso de hinchamiento puede considerarse cumplido en el momento en que es posible definir el fin del hinchamiento primario, el cual se determina de manera análoga que en el ensayo de consolidación unidimensional.
- A partir del instante en que se puede garantizar el fin del hinchamiento primario, que por lo general queda cumplido luego de 72 hs, se continúa con la consolidación de la muestra. Para ello se quita momentáneamente el comparador y se aproxima el tornillo calante del cabezal hasta lograr un leve contacto con la placa de carga. Luego se ubica el extensómetro sobre el eje del tornillo y se lo vuelve a ajustar en su posición inicial o cero.

- Transcurridos unos 5 minutos de la colocación del cabezal de carga y verificado el equilibrio del sistema, se procede a la consolidación de la muestra mediante la aplicación de escalones de carga de 0,05 – 0,1 – 0,2 – 0,4 – 0,8 – 1,6 – etc. kg/cm², manteniendo constante la presión en cada uno de ellos y registrando las deformaciones correspondientes; la duración típica de cada incremento de carga es de 24 horas.
- La aplicación de los sucesivos incrementos de carga debe continuar hasta que la muestra retorne a su relación de vacíos/altura inicial. En realidad, la aplicación de incrementos debe continuar hasta que la relación de vacíos/altura de la muestra sea menor que la inicial, ya que la magnitud exacta de la presión requerida para retornar el espécimen a su condición inicial es desconocida, dicha presión se determina gráficamente una vez confeccionada la curva de compresibilidad al finalizar el ensayo.
- Al finalizar el ensayo, antes de extraer la muestra se la descarga hasta la presión de asiento, dejando actuar la misma unos 5 min. Para evitar una posible expansión. Luego se quita esta carga final, se desmonta rápidamente el anillo con la muestra, se evacua el agua libre que pueda contener y se remueve la muestra del anillo. Después se pesa la muestra (incluyendo todas las partículas que pudieran haberse exprimido fuera del anillo y quedaron dentro del consolidómetro), se seca en horno y se vuelve a pesar para determinar el peso seco de los sólidos W_s y volumen final de agua V_{of} . Se compara el peso seco de sólidos; por último se lavan las piedras porosas con un cepillo no abrasivo, y se las hierve para evitar que la arcilla se seque y obture sus poros con el consecuente reducción de su permeabilidad.

III.8.6. CALCULO

A continuación se enumeran los pasos a seguir en la determinación de los parámetros fundamentales del ensayo de hinchamiento libre – presión de hinchamiento:

Se confecciona la curva de expansión o hinchamiento (Figura 28), tal cual relaciona lectura de deformación vs tiempo en min. (tiempo en escala logarítmica), y en ella se establecen la lectura cero para hinchamiento primario D_0 , la lectura y el tiempo para el fin de hinchamiento primario, D_{100} y t_{100} respectivamente, y las magnitudes de hinchamiento primario y secundario.

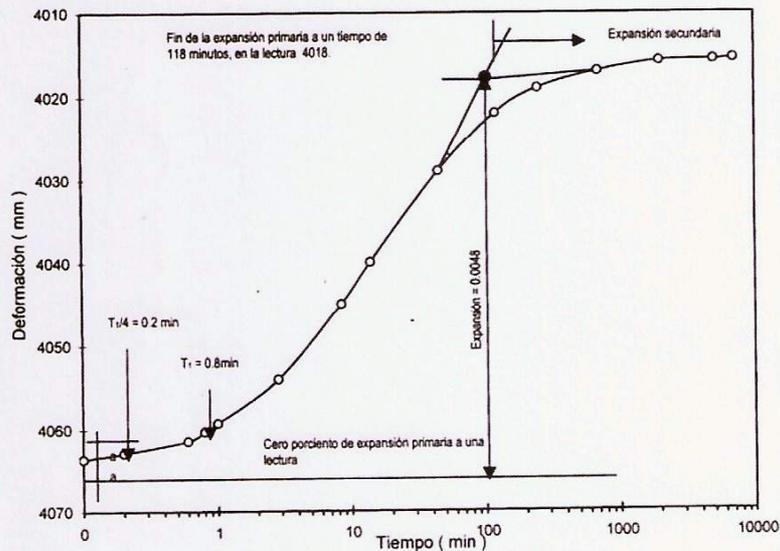


Figura 28 Curva de Hinchamiento (ASTM D4546-96)

Para determinar la lectura de deformación correspondiente al 100% de la expansión primaria, se traza una tangente sobre la porción secundaria del gráfico, luego se dibuja otra tangente sobre la parte central más empinada de la curva, y proyectando horizontalmente en el eje ordenado la intersección de estas dos rectas dibujadas, se obtiene la lectura al 100% de expansión primaria, D_{100} . El hinchamiento que tiene lugar más allá de este valor se define como expansión secundaria. El valor del tiempo t_{100} para el que se cumple el fin de hinchamiento primario, queda definido al proyectar verticalmente el punto de intersección de las tangentes sobre el eje de abscisas.

A continuación se debe definir la lectura de deformación para el 0% de expansión primaria, D_0 . Como esta lectura es la correspondiente al tiempo $t = 0$, resulta imposible marcarla sobre un gráfico semilogarítmico. Para ello, si la parte inicial de la curva es parabólica, se eligen dos puntos sobre la misma de manera que el tiempo correspondiente a uno de ellos sea 4 veces el valor del restante. Luego se halla la diferencia de ordenadas entre ambos puntos, y esta magnitud se transporta por encima del primero de los puntos en la curva, trazando a continuación una horizontal por el extremo superior de dicho segmento hasta cortar el eje de ordenadas.

El valor así hallado resulta la deformación al 0% de expansión primaria, D_0 . Se puede refinar este valor, tomando varios pares de puntos y luego seleccionando el promedio de las diferencias de ordenadas para trazar la horizontal antes descrita. Si el valor D_0 hallado resulta considerablemente distinto al que debería ser para el instante inicial $t = 0$, o bien si la parte inicial de la curva no es parabólica, se adopta como D_0 a la lectura del extensómetro para $t = 0$.

Se calcula la relación de vacíos inicial e_i (esta puede considerarse aproximadamente igual a la relación de vacíos in situ e_0). La relación de vacíos instantánea e correspondiente a cada incremento de carga, como la relación de vacíos e_{se} luego del hinchamiento libre se calcula:

$$e = \frac{H_{vi} - \Delta H}{H_s} = e_i - \frac{\Delta H}{H_s} \quad \text{o bien} \quad e = e_i - \Delta e$$

Cabe añadir que el cálculo de la relación de vacíos se realiza en todos los casos con los valores finales de deformación. Esto significa que para el cálculo de e_{se} se emplea el valor máximo de hinchamiento secundario y para la relación de vacíos en los incrementos de cargas posteriores, se utilizan los valores de deformación registrados a las 24 hs de la aplicación de cada incremento. De esta manera se cuenta con todos los datos para graficar la curva de compresibilidad e vs p (relación de vacío vs presión) en escala semilogarítmica. Figura 29.

γ_{di} = peso unitario seco correspondiente a la relación de vacíos e_i .

γ_{dse} = peso unitario seco correspondiente a la relación de vacíos e_{se} .

III.9. Densidad aparente.

La densidad de volumen o densidad aparente se define como el peso seco del suelo por unidad de volumen de suelo inalterado, tal cual se encuentra en su emplazamiento natural, incluyendo el espacio poroso.

Para medir la densidad aparente se retira del campo una muestra de suelo de volumen conocido y se seca en el horno a 105°C, hasta que alcanza un peso constante. La densidad aparente se calcula dividiendo el peso seco del suelo por el volumen que ocupaba en el campo:

Peso de los sólidos de la muestra o peso seco D.a. (g/cm^3 o Mg/m^3) =
Volumen de los sólidos + Volumen de los poros

Dependiendo del uso que vayan a tener los datos de densidad aparente del suelo cabe distinguir dos medidas de densidad aparente: la densidad aparente global y la densidad aparente de la tierra fina.

La primera de ellas corresponde al peso seco total de un volumen dado de suelo, incluyendo todos sus elementos (piedras, raíces y tierra fina). Este valor es muy importante cuando se trata de trabajos relacionados con excavaciones, movimientos de tierras y obras de ingeniería.

La segunda corresponde al peso de un volumen dado de tierra fina (fracción del suelo con tamaño de partícula inferior a 2 mm) en condiciones de campo. El cálculo de la densidad aparente esta última exige conocer la fracción de peso y volumen de suelo que corresponde a la tierra fina, lo que exige determinar el volumen ocupado por las fracciones minerales y orgánicas gruesas, y el peso de cada una de ellas, determinando los correspondientes a la tierra fina por diferencia.

Los valores que puede tomar la densidad aparente dependen de muchos factores, incluyendo la textura, estructura y contenido de materia orgánica del suelo, así como del manejo del mismo. En contraste con la densidad real, que es más o menos constante, la densidad aparente es altamente variable debido a variaciones en la cantidad / calidad del espacio poroso.

Los suelos de textura fina, bien estructurados y con altos contenidos de materia orgánica presentan valores más bajos de densidad aparente que los suelos de textura gruesa, poco estructurados y con bajos contenidos de materia orgánica.

Algunos valores de referencia, con relación a la textura son los siguientes (Schargel y Delgado, 1990)

Textura Densidad Aparente

Fina (arcillosos)	1,00-1,30 Mg m-3
Media (francos)	1,30-1,50 Mg m-3
Gruesa (arenosos)	1,50-1,70 Mg m-3

Los valores pueden llegar a ser inferiores a 0,25 Mg m-3 en suelos turbosos y superiores a 1,90 Mg m-3 en suelos muy compactados. En suelos minerales volcánicos los valores se aproximan a 0,85 Mg m-3.

Aunque se trata de un parámetro básico y fácil de obtener en la mayoría de los suelos hay que significar que se trata de un indicador muy general sobre las características físicas del suelo que no proporciona información sobre los tamaños de poro, ni sobre las conexiones en el espacio poroso, aspectos que resultan esenciales para predecir los movimientos de agua en el suelo y los riesgos de degradación de la estructura del suelo.

Ello hace que suelos con valores similares de densidad aparente puedan tener un comportamiento muy diferente ante perturbaciones externas.

III.9.1. MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE

Existen diversos métodos para determinar la densidad aparente del suelo. Los más utilizados son:

III.9.1.1 .MÉTODO DEL CILINDRO METÁLICO.

Es el método más sencillo y consiste en tomar un volumen fijo de suelo sin perturbar y pesarlo una vez seco, por calentamiento en el horno a 105° C durante 24 horas. Para ello se suele utilizar un cilindro metálico con un volumen conocido.

En uno de sus extremos se le coloca un cabezal cilíndrico, que se irá golpeando con un mazo de goma para poder presionar e introducir el cilindro o anillo toma de muestras dentro del suelo sin afectar a la muestra. Una vez clavado completamente, se extrae el cilindro del suelo, cortando con una herramienta apropiada, que nos permitirá eliminar el sobrante del extremo que se ha clavado. Una vez el cilindro esté lleno y enrasado en ambos

extremos, se le coloca dos tapaderas de plástico a ambos extremos. Ya en el laboratorio se extrae el suelo contenido, cuyo volumen corresponde con el del cilindro y que es conocido, se seca y se pesa. La densidad viene determinada por la relación entre el peso seco obtenido y el volumen correspondiente.

El principal inconveniente que presenta el método del cilindro es la presencia de piedras, por lo que solo puede utilizarse adecuadamente en suelos poco pedregosos que, por lo menos en sistemas forestales, son los menos. Asimismo, cuando se toman muestras subsuperficiales con una barrena que contiene los cilindros se corre el riesgo de compactar el suelo por la mera adherencia del mismo al deslizarse sobre las paredes de los cilindros.

III.9.1.2. MÉTODO DEL TERRÓN (CONJUNTO DE AGREGADOS).

Consiste en tomar un agregado del suelo, lo más grande posible, desecarlo y pesarlo para conocer su masa. Se ata con un hilo y se sumerge en parafina fundida para impermeabilizar su superficie, y una vez solidificada ésta puede volver a pesarse.

El agregado parafinado se introduce en una probeta graduada y llena de agua en la que se mide el incremento de volumen sufrido por el agua como consecuencia de la introducción del agregado, que corresponde con el volumen de éste. De esta forma conocemos los dos parámetros necesarios para el cálculo de la densidad.

Aunque la capa de parafina es muy tenue y su volumen despreciable, puede estimarse en función de su densidad y del incremento de peso sufrido por el agregado tras el proceso de impermeabilización.

El principal inconveniente de este método es que no puede precisar el volumen de las grietas y de los huecos interpedales. Mas como quiera que todos ellos desaparecen al humedecerse el suelo, si sirve para determinar el comportamiento del suelo húmedo.

Es también difícil de usar en suelos con alto contenido de materiales gruesos (gravas y piedras).

III.9.1.3. MÉTODO DE EXCAVACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN EXTRAÍDO

Este tipo de método consiste en cavar un hoyo y, conservando toda la tierra retirada del hoyo como muestra, determinar el volumen de la muestra de suelo vertiendo en el hoyo del cual se extrajo la muestra un volumen de arena seca o agua. Por último, la muestra de suelo retirada es secada para determinar el peso seco del suelo extraído.

Una variante de este método, introducida por Muller y Hamilton en 1992, consiste en determinar el volumen inalterado de suelo extraído fabricando un molde exacto de la oquedad con espuma de poliuretano. Básicamente, el método consiste en:

- 1) fabricar un hueco más o menos regular con el utensilio que sea más adecuado a las características del suelo y al volumen del mismo que se quiere muestrear, transfiriendo cuantitativamente el material extraído a un recipiente hermético;
- 2) rellenar el hueco con espuma de poliuretano aplicada de forma circular y sin alcanzar el borde;
- 3) colocar un tope (cartón con peso) para evitar el rebosamiento de la espuma;
- 4) dejar curar la espuma durante al menos 3-4 horas, antes de enrasar y retirar el molde;
- 5) determinar el volumen del molde de poliuretano por desplazamiento de agua en un contenedor graduado.

Las ventajas de este método, según describen sus autores son:

- 1) En suelos pedregosos sus resultados son similares a otros métodos de excavación/relleno (por ejemplo con arena o agua) y mejores que los obtenidos por el método del cilindro.
- 2) Este método es muy útil en zonas con marcada inclinación del terreno e incluso en caras verticales donde fallan los otros dos métodos de relleno citados (arena y agua).
- 3) En sitios alejados de vías de comunicación este método permite efectuar determinaciones evitando el transporte de sustancias pesadas -como arena o agua- hasta los puntos de muestreo así como de otros utensilios distintos de los elementos de excavación. El reducido peso de los moldes de poliuretano permite transportar de decenas de ellos sin soportar pesos significativos (< 1 kg)

IV. Conclusiones

En cumplimiento con los objetivos mencionados al comienzo de este trabajo, una vez reunidos los datos provenientes de los ensayos de campo y de laboratorio, se observó y analizó los mismos y en base a ello se arribó a las siguientes conclusiones.

Conclusión 1: Existe una correlación entre el contenido de humedad registrado por los sensores y los ascensos y descensos registrado por los comparadores. (gráficos 10 a 15 y 19 a 22 Anexo C)

De los tres comparadores instalados, el análisis de datos se realizó con los valores arrojados solo por dos de ellos, el correspondiente al pozo de 0,60m y el correspondiente al pozo de 1,30m. Entre el comparador instalado en el pozo de 1,00m y su correspondiente sombrerete se formó un panal de abejas, imposibilitando la continuidad en la toma de datos, por este motivo, los obtenidos hasta ese momento se descartaron por considerarse insuficientes

En términos generales cuando los sensores registran un aumento de humedad se observa, coincidente con el mismo periodo, un hinchamiento que aumenta progresivamente cuando la humedad volumétrica supera el $0,400 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Desde el 06/11/2014 hasta el 15/01/2015 en el pozo de 0,60m de profundidad los registros del comparador mostraron un ascenso del suelo de aproximadamente 4mm, en este mismo periodo los registros de humedad mostraron un rango de variación de aproximadamente 0,2mm.

En el pozo de 1,30m de profundidad, para el mismo periodo se registró un ascenso de aproximadamente 2,4mm coincidente con un rango de variación de la humedad de 0,02. Esto es congruente con el hecho de que una mayor variación del contenido de humedad produce una mayor expansión.

Conclusión 2: Se pudo determinar una clara influencia de la humedad natural inicial sobre la presión de hinchamiento. (gráficos 2, 4 y 6 Anexo A)

Cuando la humedad inicial toma un valor por debajo del límite de plasticidad, una pequeña variación en el contenido de humedad activa el fenómeno expansivo, de lo contrario la expansión del suelo se produce en forma atenuada.

Las muestras extraídas arrojaron valores de humedad natural altos, esto se tradujo en valores reducido de hinchamiento libre y presión de hinchamiento, además las propiedades plásticas de las mismas resultaron ser buenos indicadores de la actividad de los suelos estudiados pero no de los valores cuantitativos del potencial expansivo.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
Cappello, Celia Daniela

Conclusión 3: Existe una correlación entre las precipitaciones y los valores registrados por los sensores de humedad. (gráficos 7, 8, 9, 10, 12, 14,16 17, 18, 19, 21 y 23 Anexo C)

Observando los valores suministrados por la Estación Experimental Agropecuaria de Concepción del Uruguay de precipitaciones diarias del mes de Noviembre, Diciembre y Enero y los valores obtenidos por los sensores de humedad, se determinó una correlación entre ambos.

A 0,60m de profundidad los sensores registran el aumento de humedad generalmente a las 24 hs de haberse producido la precipitación, además es apreciable la pérdida de humedad entre dos eventos de precipitación.

A 1,30m de profundidad los registros muestran un aumento de humedad más atenuado y con un menor rango de variación, siendo esto más notorio durante el mes de noviembre porque en promedio ha sido más lluvioso. A esta profundidad no se registra pérdida de humedad, el periodo más largo entre precipitaciones fue cinco días, se concluye que a 1,30m de profundidad no es tiempo suficiente para que disminuya el contenido de humedad y la misma se puede considerar constante.

Conclusión 4: Existe una correlación entre humedad gravimétrica y humedad volumétrica.

Se calculó la densidad aparente (δ) en cuatro puntos distintos, a 0,12m, 0,30m, 0,50m y 0,60m. El cálculo de esta variable se realizó de dos maneras, por un lado se utilizó el método del cilindro, por otro lado se despejó el valor de δ de la ecuación $\theta = W \times \delta$ siendo θ el valor de contenido de humedad registrado en las profundidades mencionadas por los sensores, y W el contenido de humedad calculado en laboratorio.

De ambas maneras se obtuvo valores muy próximos de la densidad aparente esto indica la correlación entre los valores de humedad gravimétrica y humedad volumétrica.

Conclusión 5: La magnitud del cambio volumétrico es proporcional al espesor del estrato mientras que la presión de hinchamiento se mantiene constante.

Recomendaciones

- A- En todos los ensayos de hinchamiento libre la estabilización de las deformaciones hizo suponer que las muestras habían saturado completamente. Se recomienda comprobar que el grado de saturación final sea 100% dado que es posible que la variación de volumen de este tipo de suelo requiera mayores tiempos que los considerados.

- B- Se propone realizar los ensayos de hinchamiento libre y presión de hinchamiento con muestras inalteradas extraídas después de un periodo seco de manera que el valor de la humedad natural se encuentre por debajo del límite plástico y evaluar el grado de expansión para confirmar la relación entre humedad natural y grado de expansión.
- C- Dado que el potencial expansivo se ha determinado en muestras inalteradas y teniendo en cuenta que las arcillas expansivas expanden poco cuando son compactadas a densidades bajas y alto contenido de humedad, pero expanden mucho cuando son compactadas a densidades altas y bajos contenidos de humedad, se sugiere determinar el grado de expansión en muestras remoldeadas compactadas en condiciones de densidad y humedad prefijadas.
- D- Si bien según lo expresado en la conclusión 3 se puede considerar la humedad constante a 1,30m de profundidad, se sugiere realizar las mediciones de humedad natural a mayores profundidades y en periodos menos lluviosos en los que se realizó este trabajo, para verificar la profundidad de la zona activa.

Si bien este proyecto es una continuación de un trabajo presentado en este establecimiento, constituyendo este último un antecedente, ha sido todo un desafío su concreción.

Se ha debido afrontar en ciertas circunstancias obstáculos y contratiempos que ha provocado por momentos sensaciones de frustración, pero decididos en continuar el camino fijado, se supo reforzar la constancia y el esfuerzo frente a la adversidad.

Desde el punto de vista académico ha sido una experiencia enriquecedora ya que se ha aprendido a desarrollar una investigación de laboratorio, moldeando un criterio científico a la hora de observar y analizar resultados, concluyendo además que en esta especialidad de la Ingeniería como es la Geotecnia, no existen soluciones exactas sino que ellas representan aproximaciones a la realidad.

Finalmente se desea valorar y agradecer el apoyo y la guía brindada por los profesores tutores y destacar que esta experiencia nos ha dado una visión con alto grado de importancia sobre esta rama de la Ingeniería como es la investigación, siendo la misma la base fundamental del conocimiento.

V. BIBLIOGRAFÍA

- ARRIETA, L. SANCHEZ NAVEDA F 2003. "Comportamiento de edificaciones ligeras construidas sobre arcillas expansivas. Técnicas de Ingeniería Civil, Universidad C.O.Lisandro Alvarado. Venezuela.
- BERNAL, JORGE R. 2005. "Hormigón Armado: Zapatas". Editorial Nobuko, Primera Edición, Buenos Aires, Argentina.
- BOWLES, JOSEPH E. 1980. "Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil". Editorial International Thomson Editores, S.A., Cuarta Edición.
- BRAJA M. DAS 2001. "Principios de Ingeniería de Cimentaciones". Editorial International Thomson Editores, S.A., Cuarta Edición.
- CODEVILLA, MAURO. "Arcillas expansivas del Gran Buenos Aires". Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
- CRESPO VILLALAZ, C. 2004. "Mecánica de Suelos y Cimentaciones". Editorial Limusa, S.A., Grupo Noriega Editores, Quinta Edición.
- DELGADO MARTINEZ, D. Y QUEVEDO SOTOLONGO, G. 2009. "Aplicación y validación de una metodología integral para la evaluación de la expansividad de suelos arcillosos". Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-1, pp. 5-12, ISSN.1665-529X.
- JIMENEZ SALAS, JOSE A. 1980. "Geotecnia y Cimientos". Tomo I y Tomo III. Primera Parte. Editorial Rueda, Segunda Edición, Madrid, España.
- JUAREZ BADILLO, RICO RODRIGEZ. "Mecánica de Suelos". Tomo II. Editorial Limusa.
- LEONI, AUGUSTO J. 2008. "Técnicas de Muestreo para Arcillas muy blandas o suelos contaminados". CAMSIG XIX -15-17 Octubre. La Plata, Argentina.
- NADEO JULIO R. 1999. "Arcillas Activas. Evaluaciones cuali y cuantitativas". Revista Ciencia y Tecnología N°9. Editor Universidad Tecnológica Nacional, Secretaria de Ciencia y Tecnología.
- PATRONE, J., PERFUMO, JOSE E. "La acción de los suelos expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control". Tema presentado en las primeras jornadas de Ingeniería de Cimentaciones, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Montevideo.
- RODRÍGUEZ –ROA, F. "Fundaciones en Arcillas Expansivas". Universidad Católica de Chile.
- TISSERA BRACAMONTE, L. 2012. "Sensibilidad expansiva de las margas arcillosas sobre el revestimiento de túnel. Aplicación de los ensayos de hinchamiento in situ y de laboratorio, para la construcción de túneles". Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2012, CAMSIG XXI, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FISICAS Y NATURALES. 1992. "Geotecnia III".
- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL, FRCON, GRUPO G.I.A.A. 2005. "Arcillas activas en Entre Ríos. Diagnóstico y Remedación. Informe de avance N°1".
- UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL, FRCON, GRUPO G.I.A.A. "Contribución al conocimiento de las Arcillas Activas".

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
Cappello, Celia Daniela

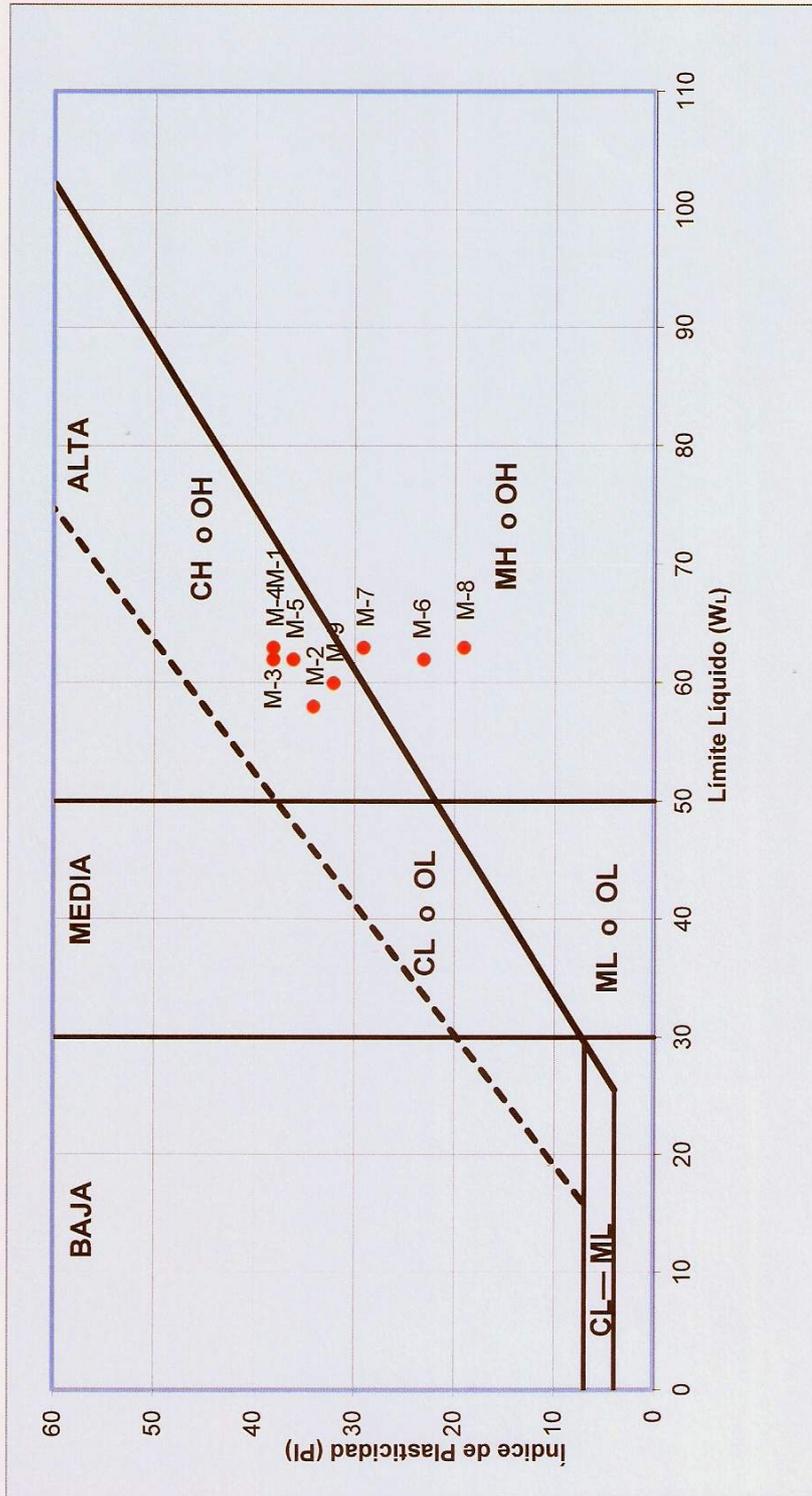
- YANES BUSTAMANTE, EMILIO 1992. "Arcillas expansivas: Su estudio y patología". Actas del congreso sobre patología y control de calidad en la construcción, Sevilla, España.
- Sitio web www.decagon.com

ANEXO A

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO



Clasificación según Carta de Casagrande



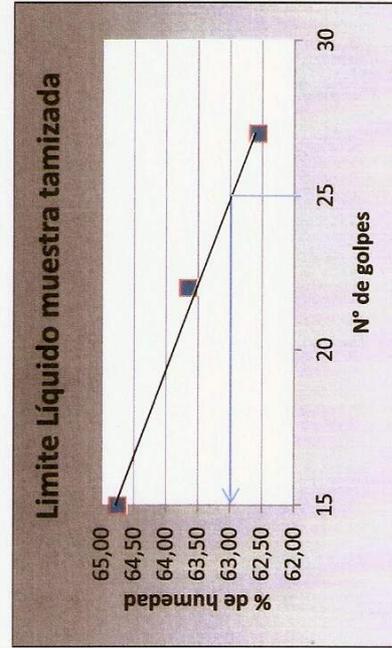
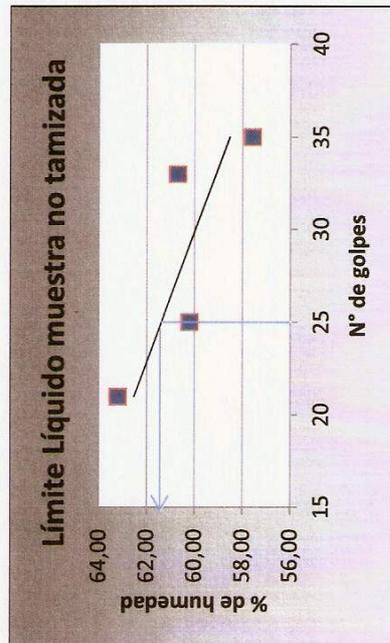
DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL, LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO

Muestra: 1
 Profundidad: 0,50m
 Pozo: 1
 Fecha: 26/08/13

Humedad Natural	
Pesafiltro N°	11
W(Pf + Sh)	19,81
W(Pf + Ss)	17,16
Wag	2,65
Wpf	9,44
Wss	7,72
W%	34,33

Pesafiltro N°	Límite Plástico	
	Muestra no Tamizada	Muestra no Tamizada
5	5	7
W(Pf + Sh)	6,11	8,91
W(Pf + Ss)	5,7	8,51
Wag	0,41	0,4
Wpf	4,2	6,91
Wss	1,5	1,6
W%	27,33	25,00

	Límite Líquido						
	Muestra no tamizada			Muestra tamizada			
Determinación	1	2	3	4	1	2	3
N° de Golpes	35	33	25	21	27	22	15
Pesafiltro N°	7	21	12	3	2	18	12
W(Pf + Sh)	29,7	25,82	24,38	24,8	23,37	25,8	26
W(Pf + Ss)	24,01	21,41	20,71	20,7	17,91	21,39	21,52
Wag	5,69	4,41	3,67	4,1	5,46	4,41	4,48
Wpf	14,12	14,14	14,61	14,21	9,18	14,46	14,6
Wss	9,89	7,27	6,1	6,49	8,73	6,93	6,92
W%	57,53	60,66	60,16	63,17	62,54	63,64	64,74

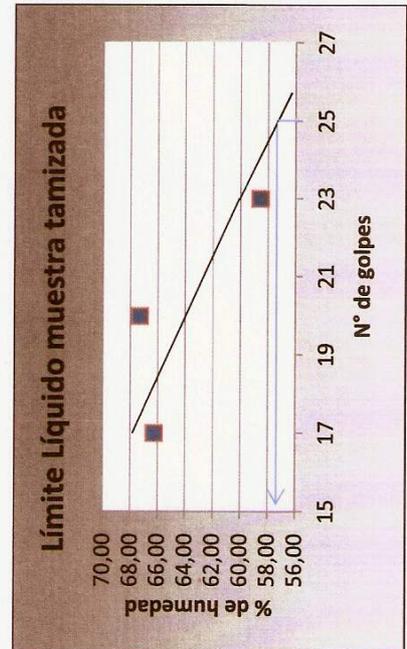


Muestra: 2
 Profundidad: 1,00 m
 Pozo: 1
 Fecha: 26/08/13

Humedad Natural	
Pesafiltro N°	4
W(Pf + Sh)	24,33
W(Pf + Ss)	20,58
Wag	3,75
Wpf	9,21
Wss	11,37
W%	32,98

Pesafiltro N°	Límite Plástico	
	Muestra no tamizada	Muestra tamizada
	9	1
W(Pf + Sh)	5,35	6,72
W(Pf + Ss)	5,11	6,47
Wag	0,24	0,25
Wpf	4,23	5,39
Wss	0,88	1,08
W%	27,27	23,15

Límite Líquido		
Determinación	1	2
N° de Golpes	23	20
Pesafiltro N°	12	3
W(Pf + Sh)	29,04	22,3
W(Pf + Ss)	23,72	17,17
Wag	5,32	5,13
Wpf	14,62	9,54
Wss	9,1	7,63
W%	58,46	67,23
		66,20



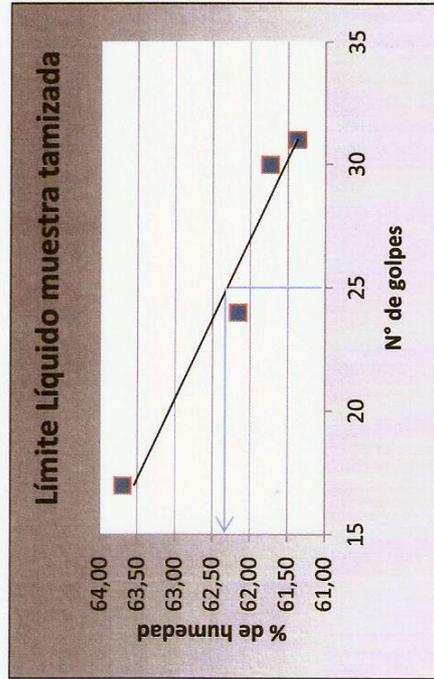
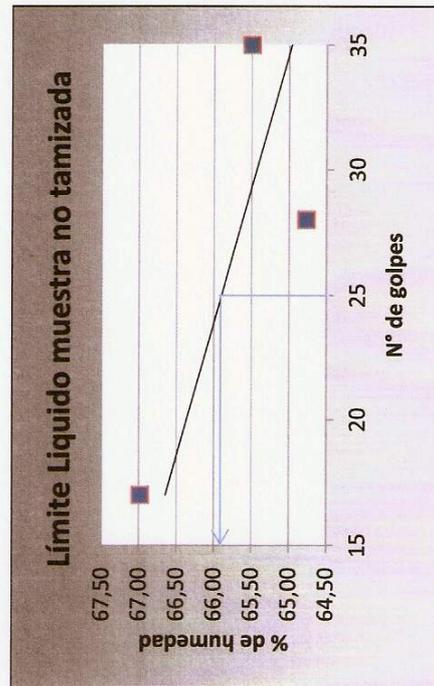
Muestra: 3
 Profundidad: 1,00m – 1,15m
 Pozo: 2
 Fecha: 26/08/13

Humedad Natural	
Pesafiltro N°	1
W(Pf + Sh)	21,18
W(Pf + Ss)	18,05
Wag	3,13
Wpf	9,56
Wss	8,49
W%	36,87

	Límite Plástico	
	Muestra no tamizada	Muestra tamizada
Pesafiltro N°	10	7
W(Pf + Sh)	8,05	8,67
W(Pf + Ss)	7,81	8,32
Wag	0,24	0,35
Wpf	6,96	6,9
Wss	0,85	1,42
W%	28,24	24,65

Determinación	Muestra no tamizada			Muestra tamizada			
	1	2	3	1	2	3	4
N° de Golpes	35	28	17	31	30	24	17
Pesafiltro N°	15	7	21	12	7	21	18
W(Pf + Sh)	25,64	26,51	30,17	28,89	34,4	30,76	29,65
W(Pf + Ss)	21,01	21,64	23,74	23,46	26,66	24,39	23,74
Wag	4,63	4,87	6,43	5,43	7,74	6,37	5,91
Wpf	13,94	14,12	14,14	14,61	14,12	14,14	14,46
Wss	7,07	7,52	9,6	8,85	12,54	10,25	9,28
W%	65,49	64,76	66,98	61,36	61,72	62,15	63,69

Límite Líquido

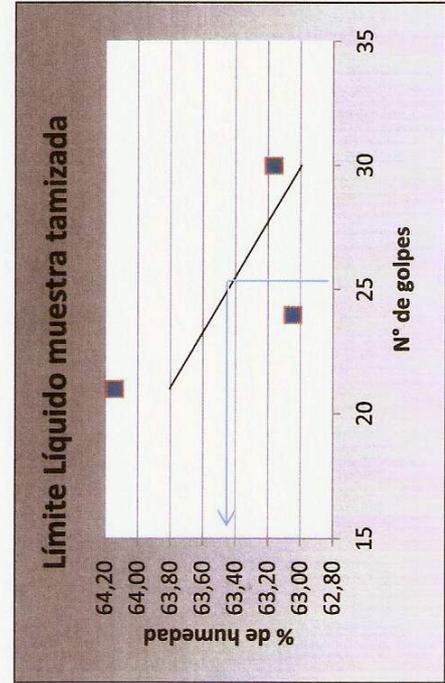
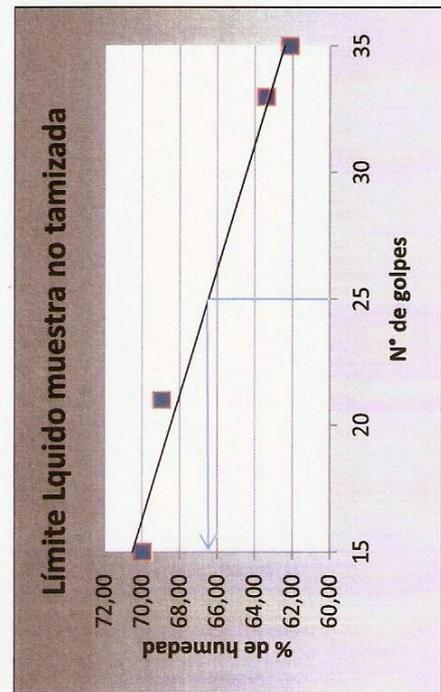


Muestra: 4
 Profundidad: 1,15m – 1,30m
 Pozo: 2
 Fecha: 26/08/13

Humedad Natural	
Pesafiltro N°	12
W(pf + Sh)	27,77
W(pf + Ss)	25,88
Wag	1,89
Wpf	14,59
Wss	11,29
W%	16,74

	Límite Plástico	
	Muestra no tamizada	Muestra tamizada
Pesafiltro N°	18	7
W(pf + Sh)	8,57	8,61
W(pf + Ss)	8,29	8,27
Wag	0,28	0,34
Wpf	6,83	6,91
Wss	1,46	1,36
W%	19,18	25,00

Determinación	Límite Líquido						
	Muestra no tamizada			Muestra tamizada			
	1	2	3	4	1	2	3
N° de Golpes	35	33	21	15	30	24	21
Pesafiltro N°	12	7	5	4	2	15	1
W(Pf + Sh)	22,14	28,37	26,8	23,79	17,22	27,88	31,37
W(Pf + Ss)	19,26	22,84	21,55	17,79	14,46	22,49	24,7
Wag	2,88	5,53	5,25	6	2,76	5,39	6,67
Wpf	14,62	14,11	13,93	9,21	10,09	13,94	14,3
Wss	4,64	8,73	7,62	8,58	4,37	8,55	10,4
W%	62,07	63,34	68,90	69,93	63,16	63,04	64,13

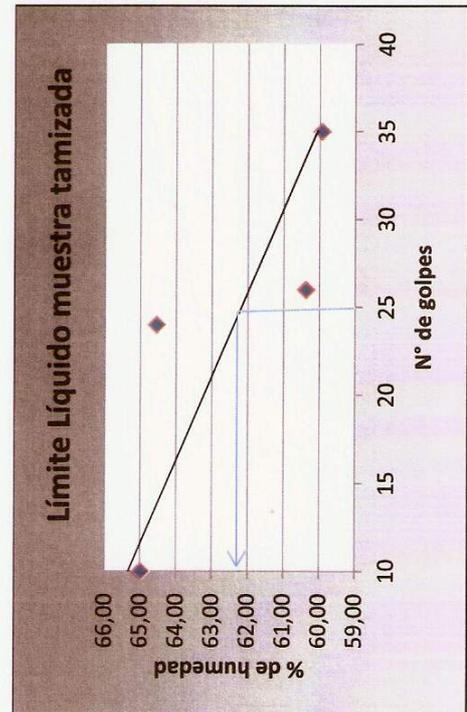


Muestra: 5
 Profundidad: 1,45m – 1,60m
 Pozo: 2
 Fecha: 26/08/13

Humedad Natural	
Pesafiltro N°	19
W(Pf + Sh)	25,41
W(Pf + Ss)	21,21
Wag	4,2
Wpf	9,18
Wss	12,03
W%	34,91

Pesafiltro N°	Límite Plástico	
	Muestra no tamizada	Muestra tamizada
11		6
W(Pf + Sh)	8,16	6,24
W(Pf + Ss)	7,89	5,84
Wag	0,27	0,4
Wpf	6,9	4,32
Wss	0,99	1,52
W%	27,27	26,32

Límite Líquido			
Muestra tamizada		Muestra no tamizada	
1	2	3	4
35	26	24	10
2653	2654	2	2665
26,82	22,04	26,17	27,1
22,13	17,2	19,86	22,13
4,69	4,84	6,31	4,97
14,3	9,18	10,08	14,48
7,83	8,02	9,78	7,65
59,90	60,35	64,52	64,97



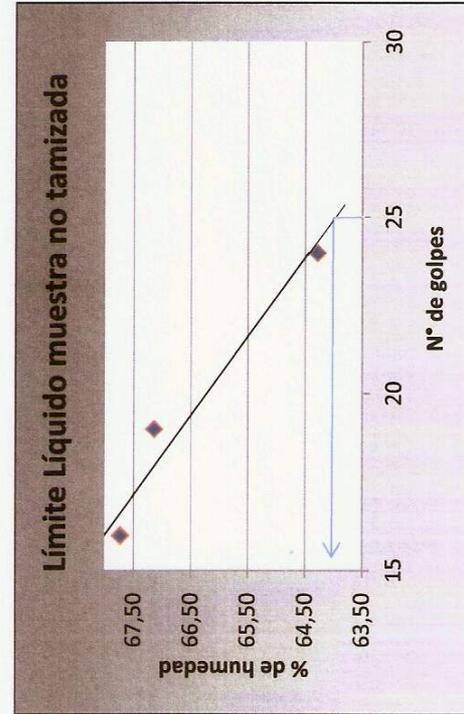
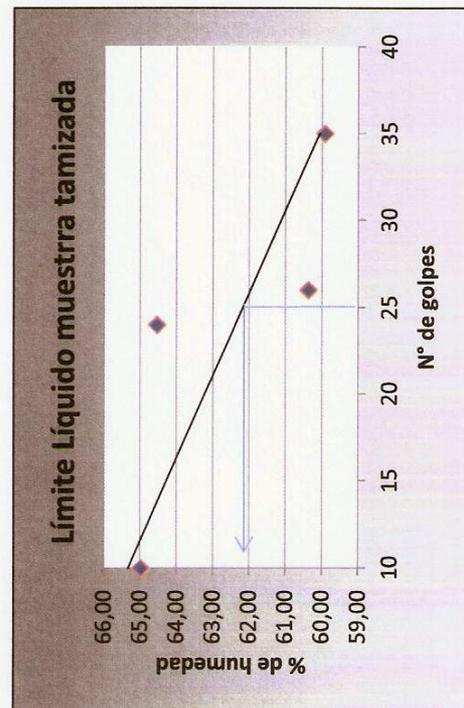
Muestra: 6
 Profundidad: 2,00m – 2,20m
 Pozo: 2
 Fecha: 26/08/13

Humedad Natural	
W(Pf + Sh)	1007,89
W(Pf + Ss)	820
Wag	187,89
Wpf	180,22
Wss	639,78
W%	29,37

Pesafiltro N°	Límite Plástico	
	Muestra no tamizada	Muestra tamizada
	14	1
W(Pf + Sh)	8,48	6,96
W(Pf + Ss)	8,09	6,52
Wag	0,39	0,44
Wpf	6,97	5,39
Wss	1,12	1,13
W%	34,82	38,94

Determinación	Muestra no tamizada			Muestra tamizada			
	1	2	3	1	2	3	4
N° de Golpes	24	19	16	31	25	22	17
Pesafiltro N°	12	21	13	13	21	12	7
W(Pf + Sh)	21,45	22,53	23,9	30,64	29,3	30,88	27,13
W(Pf + Ss)	18,77	19,16	20,06	24,51	23,4	24,5	22,05
Wag	2,68	3,37	3,84	6,13	5,9	6,38	5,08
Wpf	14,6	14,14	14,39	14,4	14,15	14,6	14,3
Wss	4,17	5,02	5,67	10,11	9,25	9,9	7,75
W%	64,27	67,13	67,72	60,63	63,78	64,44	65,55

Límite Líquido



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay

Proyecto: Caffa, Mauro Valentin

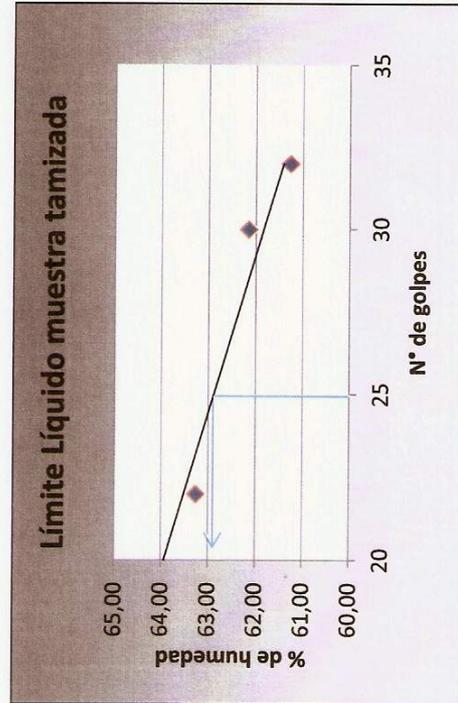
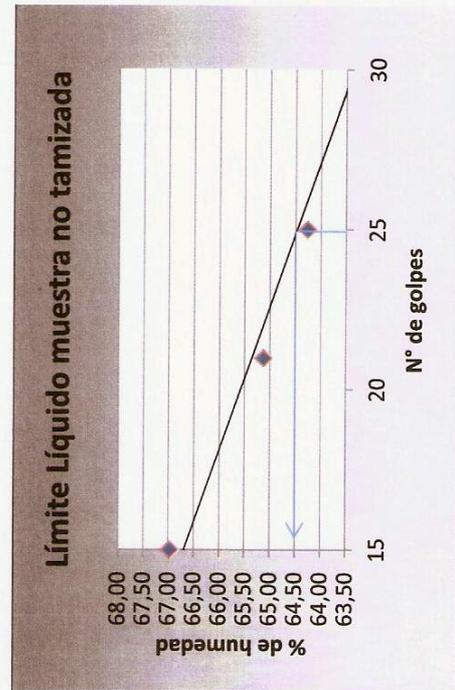
Cappello, Celia Daniela

Muestra: 7
 Profundidad: 2,25m
 Pozo: 2
 Fecha: 26/08/13

Humedad Natural	
Pesalidro N°	19
W(Pf + Sh)	24,32
W(Pf + Ss)	20,98
Wag	3,34
Wpf	9,18
Wss	11,8
W%	28,31

Pesafiltro N°	Límite Plástico	
	Muestra no tamizada	Muestra tamizada
1	1	14
W(Pf + Sh)	6,53	7,84
W(Pf + Ss)	6,27	7,62
Wag	0,26	0,22
Wpf	5,39	6,97
Wss	0,88	0,65
W%	29,55	33,85

Determinación	Límite Líquido							
	Muestra no tamizada				Muestra tamizada			
	1	2	3	4	1	2	3	4
N° de Golpes	35	25	21	15	32	30	22	18
Pesafiltro N°	13	18	2	3	21	7	5	12
W(Pf + Sh)	27,4	29,62	22,67	29,16	29,49	30,3	27,73	29,06
W(Pf + Ss)	22,4	23,69	17,35	23,16	23,66	24,1	22,38	23,39
Wag	5	5,93	5,32	6	5,83	6,2	5,35	5,67
Wpf	14,39	14,46	9,18	14,2	14,14	14,12	13,92	14,6
Wss	8,01	9,23	8,17	8,96	9,52	9,98	8,46	8,79
W%	62,42	64,25	65,12	66,96	61,24	62,12	63,24	64,51



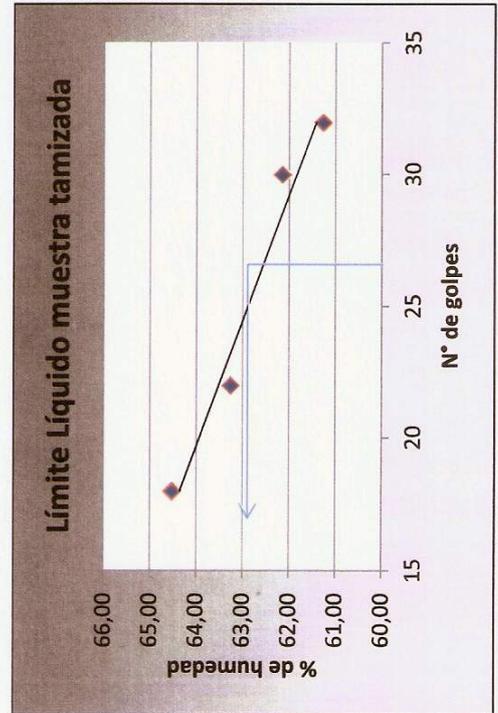
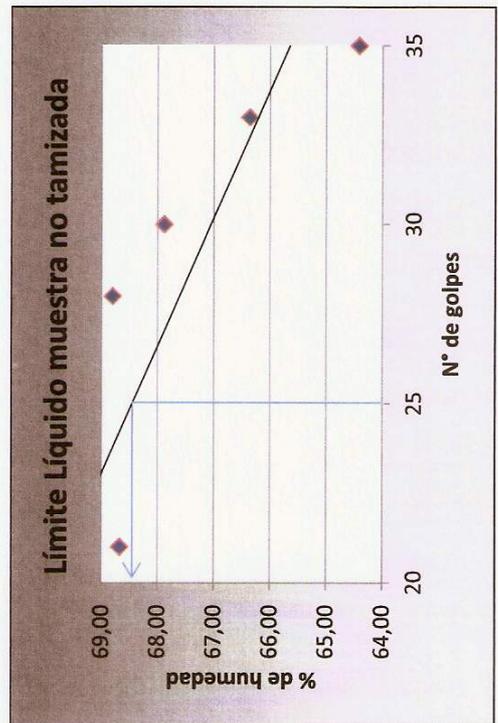
Muestra: 8
 Profundidad: 2,30m
 Pozo: 2
 Fecha: 26/08/13

Pesafiltro N°	Límite Plástico	
	Muestra no tamizada	Muestra tamizada
	14	1
W(Pf + Sh)	9,52	7,26
W(Pf + Ss)	8,87	6,69
Wag	0,65	0,57
Wpf	6,97	5,39
Wss	1,9	1,3
W%	34,21	43,85

Humedad Natural	
W(B + Sh)	546,53
W(B + Ss)	460
Wag	86,53
Wbandeja	155,73
Wss	304,27
W%	28,44

Determinación	Muestra no tamizada				Muestra tamizada				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
N° de Golpes	35	33	30	28	21	35	27	19	12
Pesafiltro N°	13	21	12	3	18	4	14	3	18
W(Pf + Sh)	27,47	26,41	25,74	20,69	25,72	25,54	28,96	23,86	29,98
W(Pf + Ss)	22,35	21,52	21,24	16,15	21,14	21,21	23,37	18,22	23,82
Wag	5,12	4,89	4,5	4,54	4,58	4,33	5,59	5,64	6,16
Wpf	14,4	14,15	14,61	9,55	14,47	14,23	14,48	9,56	14,47
Wss	7,95	7,37	6,63	6,6	6,67	6,98	8,89	8,66	9,35
W%	64,40	66,35	67,87	68,79	68,67	62,03	62,88	65,13	65,88

Límite Líquido

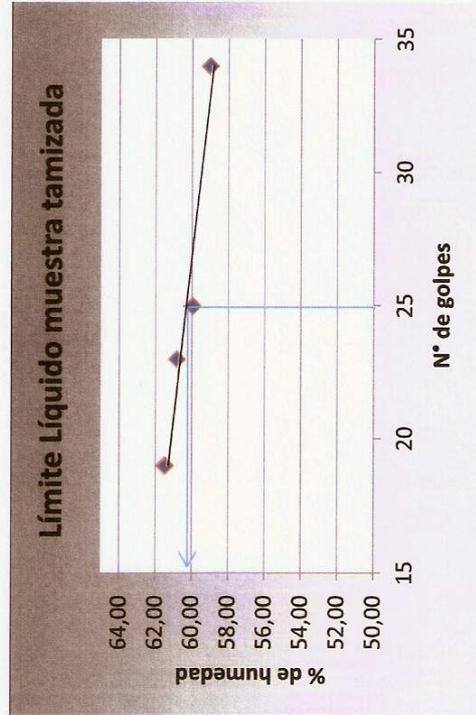
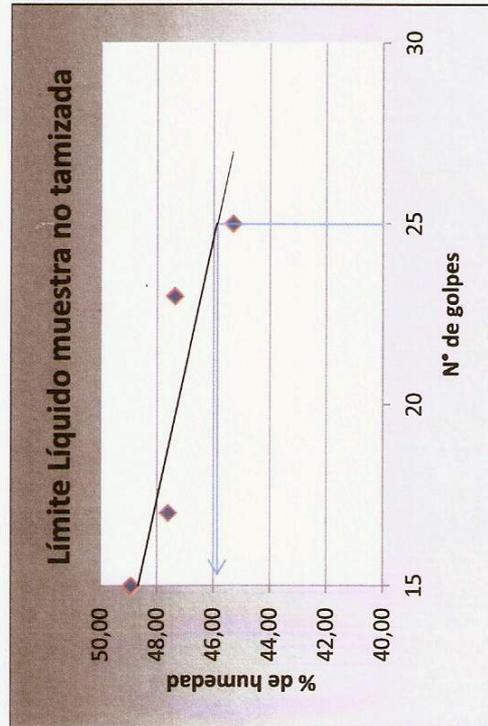


Muestra: 9
 Profundidad: 2,30m – 2,50m
 Pozo: 2
 Fecha: 26/08/13

Humedad Natural	
W(B + Sh)	667,31
W(B + Ss)	560,41
Wag	106,9
Wbandeja	167,34
Wss	393,07
W%	27,20

	Límite Plástico	
	Muestra no tamizada	Muestra tamizada
Pesafiltro N°	1	14
W(Pf + Sh)	6,38	8,2
W(Pf + Ss)	6,16	7,93
Wag	0,22	0,27
Wpf	5,39	6,97
Wss	0,77	0,96
W%	28,57	28,13

Determinación	Límite Líquido							
	Muestra no tamizada				Muestra tamizada			
	1	2	3	4	1	2	3	4
N° de Golpes	25	23	17	15	34	25	23	19
Pesafiltro N°	16	18	2	13	3	12	7	21
W(Pf + Sh)	31,44	28,62	24,44	30,04	29,22	30,43	29,65	29,18
W(Pf + Ss)	25,98	24,07	19,52	24,9	23,65	24,5	23,78	23,46
Wag	5,46	4,55	4,92	5,14	5,57	5,93	5,87	5,72
Wpf	13,92	14,46	9,18	14,39	14,2	14,6	14,12	14,15
Wss	12,06	9,61	10,34	10,51	9,45	9,9	9,66	9,31
W%	45,27	47,35	47,58	48,91	58,94	59,90	60,77	61,44



PROPIEDADES DE EXPANSIVIDAD DE MUESTRAS INALTERADAS

MUESTRA	CLASIFICACIÓN SUCS	HINCHAMIENTO LIBRE, Sw (libre) (%)	PRESIÓN DE HINCHAMIENTO, σ_{sp} (kg/cm ²)
1	CH	0,41	0,01
2	CH	4,2	0,01
3	CH	17,45	0,012

Datos preliminares de los ensayos de Hinchamiento Libre y Presión de Hinchamiento

Muestra N° 1

Profundidad de la Muestra: 0,60m

Fecha de la Practica: 01/10 al 11/10/2014

Clasificación SUCS: CH

Consolidómetro Tipo: Anillo fijo

Dimensiones del anillo: $\varnothing = 63,5\text{mm}$

Área: $31,67\text{cm}^2$

Altura: 20mm

Altura inicial de la muestra, H_i (mm):

Gravedad específica del suelo, G_s

Peso del anillo más muestra al comienzo del ensayo (gr)

Peso del anillo (gr)

Peso del suelo húmedo, W_{ti} (gr)

Peso de suelo seco al horno, W_s (gr)^{a)}

14,47

2,72

160,19

73,3

86,89

61,39

DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL	
Peso de pesafiltro (gr)	13,93
Peso pesafiltro + Peso suelo húmedo (gr)	23,97
Peso pesafiltro + Peso suelo seco (gr)	21,09
Contenido de humedad natural w_n (%)	40,22

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL	
Peso de bandeja (gr)	108,59
Peso final suelo húmedo + bandeja (gr)	191,85
Peso final suelo húmedo (gr)	83,26
Peso final suelo seco + bandeja (gr)	169,98
Peso final suelo seco al horno, W_s (gr)	61,39
Contenido de humedad final, w_f (%)	35,6

a) obtenido de los datos finales de contenido de humedad

Lectura del deformimetro en el ensayo de Hinchamiento Libre

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lecturas del deformimetro	
		Lectura real (mm)	Lectura ajustada ($\times 10^2$)
01/10/2014 9:35 hs	0,1	0	0
	0,2	0	0
	0,3	0	0
	1	0	0
	2	-0,01	1
	4	-0,01	1
	8	-0,02	2
	15	-0,02	2
	30	-0,03	3
	60	-0,03	3
	120	-0,04	4
	240	-0,04	4
	480	-0,04	4
02/10/2014 9:35 hs	1440	-0,06	6
03/10/2014 9:35 hs	2880	-0,06	6
04/10/2014 9:35 hs	4320	-0,06	6

Lecturas de los escalones de carga en el ensayo de Presión de Expansión

Carga: 0,05 kg/cm²
 Fecha de aplicación: 07/10/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
07/10/2014 10hs	0,1	1,91
	0,25	1,93
	0,5	1,95
	1	1,98
	2	2
	4	2,02
	8	2,04
	15	2,05
	30	2,07
	60	2,08
	120	2,09
	240	2,1
	480	2,12
08/10/2014 10hs	1440	2,13

Carga: 0,10 kg/cm²
 Fecha de aplicación: 08/10/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
08/10/20 14 10hs	0,1	2,18
	0,25	2,19
	0,5	2,19
	1	2,2
	2	2,21
	4	2,22
	8	2,23
	15	2,24
	30	2,25
	60	2,26
	120	2,27
	240	2,29
	480	2,3
09/10/20 14 10hs	1440	2,31

Carga: 0,40 kg/cm²
Fecha de aplicación: 10/10/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
10/10/2014 10:30hs	0,1	3,69
	0,25	3,72
	0,5	3,75
	1	3,78
	2	3,83
	4	3,9
	8	3,99
	15	4,09
	30	4,21
	60	4,36
	120	4,52
	240	4,68
	480	4,76
11/10/2014 10:30hs	1440	4,82

Carga: 0,20 kg/cm²
Fecha de aplicación: 09/10/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
09/10/2014 10:30hs	0,1	2,6
	0,25	2,62
	0,5	2,65
	1	2,68
	2	2,72
	4	2,78
	8	2,84
	15	2,91
	30	2,99
	60	3,05
	120	3,07
	240	3,09
	480	3,1
10/10/2014 10:30hs	1440	3,13

Curva de Expansión – 01/10 al 04/10/2014

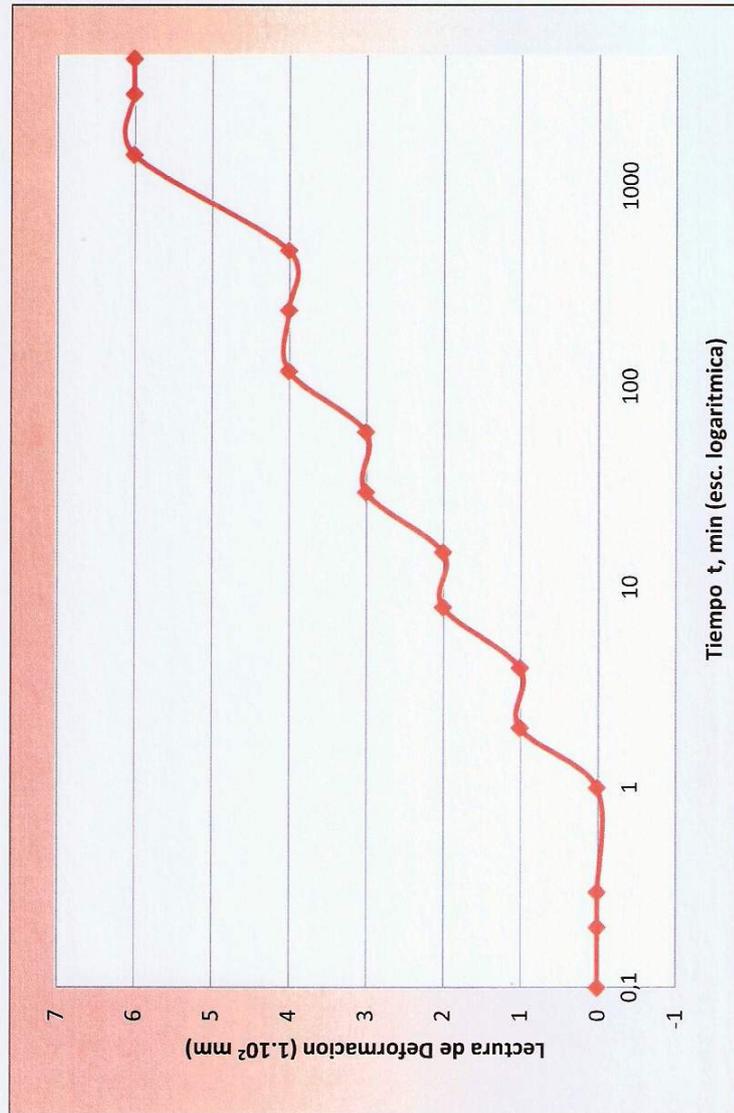


Gráfico 1

Datos de la muestra para curva de compresibilidad

Vol. Inicial de muestra, V_i (cm ³)	45,84	Peso seco de sólidos, W_s (gr)	61,39
Gravedad específica del suelo, G_s	2,72	Altura de los sólidos, H_s (cm)	0,72
Altura inicial de vacíos, H_{vi} (cm)	0,726	Relación de vacío inicial, e_i	1,008

Incremento de carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (mm)	Cambio de altura de la muestra ΔH (cm)	$\Delta e = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e
0,01	0,06	0,006	0,0083	1,0173
0,05	-2,13	-0,213	-0,2953	0,7137
0,1	-2,31	-0,231	-0,3203	0,6887
0,2	-3,13	-0,313	-0,4339	0,5751
0,4	-4,76	-0,476	-0,6599	0,3491

Curva de Compresibilidad

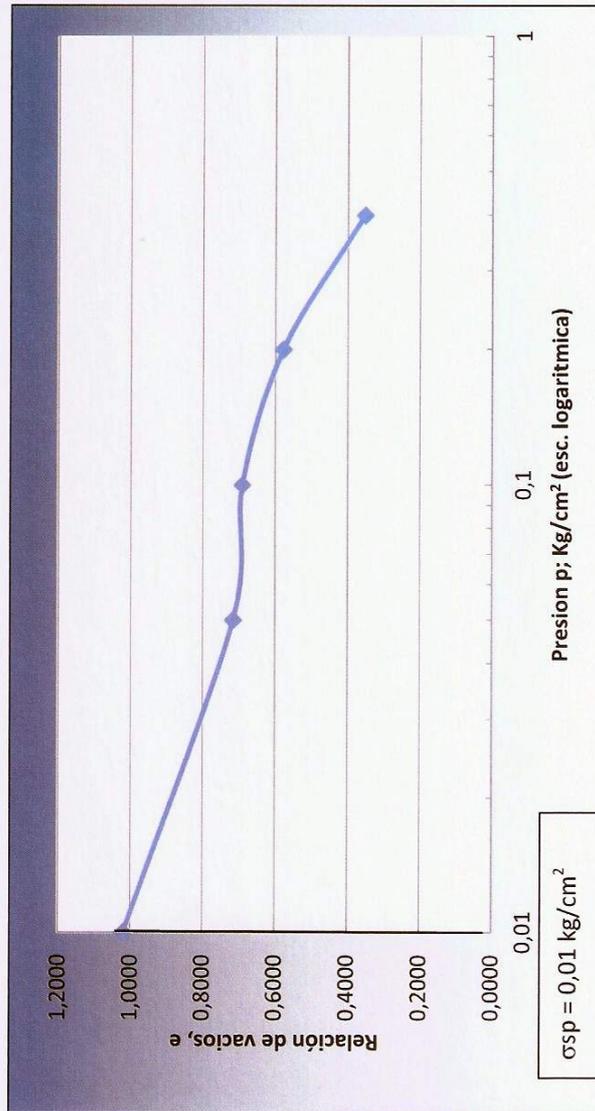


Gráfico 2

Calculo del Hinchamiento Libre

$$\frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 = \frac{e_{se} - e_i}{1 + e_i} \cdot 100 = \left(\frac{\gamma_{di}}{\gamma_{dse}} - 1 \right) \cdot 100 = 0,41\%$$

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
 Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
 Cappello, Celia Daniela

Datos preliminares de los ensayos de Hinchamiento Libre y Presión de Hinchamiento

Muestra N° 2

Profundidad de la Muestra; 1,00m

Fecha de la Practica: 15/10 al 24/10/2014

Clasificación SUCS: CH

Consolidometro Tipo: Anillo fijo

Dimensiones del anillo: $\varnothing = 63,5\text{mm}$

Área: $31,67\text{cm}^2$

Altura: 20mm

Altura inicial de la muestra, H_i (mm):

14,23

Gravedad específica del suelo, G_s

2,72

Peso del anillo mas muestra al comienzo del ensayo (gr)

162,12

Peso del anillo (gr)

73,3

Peso del suelo húmedo, W_{ti} (gr)

88,82

Peso de suelo seco al horno, W_s (gr)^{a)}

61,51

DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL	
Peso de pesafiltro (gr)	10,12
Peso pesafiltro + Peso suelo húmedo (gr)	23,17
Peso pesafiltro + Peso suelo seco (gr)	20,05
Contenido de humedad natural ω_n (%)	31,42

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL	
Peso de bandeja (gr)	108,62
Peso final suelo húmedo + bandeja (gr)	190,69
Peso final suelo húmedo (gr)	82,07
Peso final suelo seco + bandeja (gr)	170,13
Peso final suelo seco al horno, W_s (gr)	61,51
Contenido de humedad final, w_f (%)	33,42

a) obtenido de los datos finales de contenido de humedad

Lecturas del deformimetro en el ensayo de Hinchamiento Libre

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lecturas del deformimetro	
		Lectura real (mm)	Lectura ajustada ($\times 10^2$)
15/10/2014 10:15 hs	0,1	0,23	23
	0,2	0,56	56
	0,5	0,61	61
	1	0,66	66
	2	0,68	68
	4	0,7	70
	8	0,68	68
	15	0,67	67
	30	0,65	65
	60	0,64	64
	120	0,62	62
	240	0,62	62
	480	0,61	61
16/10/2014 10:15 hs	1440	0,61	61
17/10/2014 10:15 hs	2880	0,6	60
18/10/2014 10:15 hs	4320	0,6	60

Lectura de los escalones de carga en el ensayo de Presión de Expansión

Carga: 0,05 kg/cm²
Fecha de aplicación: 20/10/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
20/10/2014 10:00hs	0,1	1,27
	0,25	1,3
	0,5	1,34
	1	1,38
	2	1,42
	4	1,47
	8	1,49
	15	1,52
	30	1,55
	60	1,56
	120	1,58
	240	1,6
	480	1,61
21/10/2014 10:00hs	1440	1,63

Carga: 0,10 kg/cm²
Fecha de aplicación: 21/10/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
21/10/2014 10:00hs	0,1	1,74
	0,25	1,75
	0,5	1,76
	1	1,77
	2	1,79
	4	1,83
	8	1,87
	15	1,91
	30	1,95
	60	1,98
	120	2,4
	240	2,46
	480	2,48
22/10/2014 10:00hs	1440	2,51

Carga: 0,40 kg/cm²
Fecha de aplicación: 23/10/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
23/10/2014 10:00hs	0,1	3,89
	0,25	3,91
	0,5	3,93
	1	3,96
	2	3,99
	4	4,04
	8	4,09
	15	4,16
	30	4,24
	60	4,34
	120	4,52
	240	4,67
	480	4,76
24/10/2014 10:00hs	1440	4,81

Carga: 0,20 kg/cm²
Fecha de aplicación: 22/10/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
22/10/2014 10:00hs	0,1	2,84
	0,25	2,87
	0,5	2,91
	1	2,94
	2	3
	4	3,06
	8	3,14
	15	3,22
	30	3,32
	60	3,41
	120	3,55
	240	3,62
	480	3,67
23/10/2014 10:00hs	1440	3,71

Curva de Expansión – 15/10 al 18/10/2014

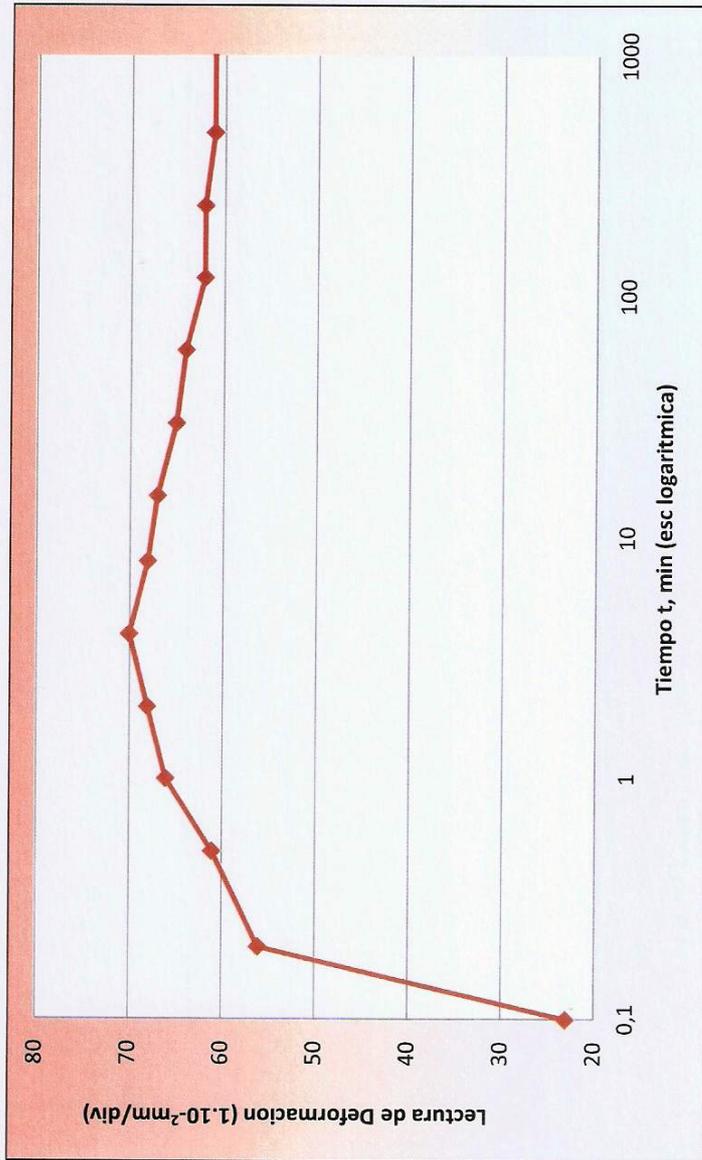


Gráfico 3

Datos de la muestra para curva de compresibilidad

Vol. Inicial de muestra, Vi (cm ³)	45,05	Peso seco de sólidos, Ws (gr)	61,51
Gravedad específica del suelo, Gs	2,72	Altura de los sólidos, Hs (cm)	0,714
Altura inicial de vacíos, Hvi (cm)	0,708	Relación de vacío inicial, ei	0,992

Incremento de carga	Lectura del deformímetro al final del incremento (mm)	Cambio de altura de la muestra ΔH (cm)	$\Delta \varepsilon = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e
0,01	-0,6	-0,06	-0,084	0,908
0,05	-1,63	-0,163	-0,228	0,764
0,1	-2,51	-0,251	-0,352	0,641
0,2	-3,71	-0,371	-0,520	0,473
0,4	-4,81	-0,481	-0,674	0,319

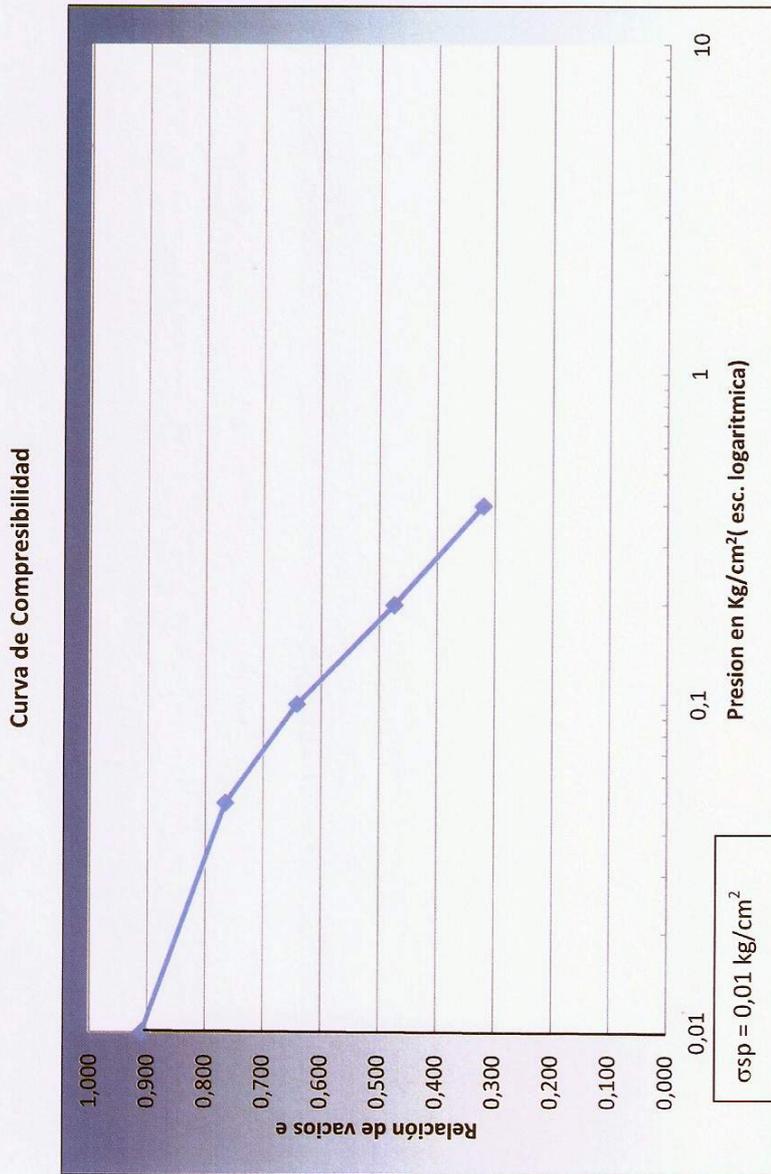


Gráfico 4

Calculo del Hinchamiento Libre

$$\frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 = \frac{e_{se} - e_i}{1 + e_i} \cdot 100 = \left(\frac{\gamma_{di}}{\gamma_{dse}} - 1 \right) \cdot 100 = 4,2\%$$

Datos preliminares de los ensayos de Hinchamiento Libre y Presión de Hinchamiento

Muestra N° 3

Profundidad de la Muestra; 1,30m

Fecha de la Practica: 27/10 al 06/11/2014

Clasificación SUCS: CH

Consolidometro Tipo: Anillo fijo

Dimensiones del anillo: $\varnothing = 63,5\text{mm}$

Área: $31,67\text{cm}^2$

Altura: 20mm

Altura inicial de la muestra, H_i (mm): 15,246

Gravedad específica del suelo, G_s : 2,72

Peso del anillo mas muestra al comienzo del ensayo (gr): 167,64

Peso del anillo (gr): 73,3

Peso del suelo húmedo, W_{ti} (gr): 94,34

Peso de suelo seco al horno, W_s (gr)^{a)}: 56,06

DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL	
Peso de pesafiltro (gr)	14,31
Peso pesafiltro + Peso suelo húmedo (gr)	28,68
Peso pesafiltro + Peso suelo seco (gr)	25
Contenido de humedad natural ω_n (%)	34,42

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL	
Peso de bandeja (gr)	91,21
Peso final suelo húmedo + bandeja (gr)	168,19
Peso final suelo húmedo (gr)	76,98
Peso final suelo seco + bandeja (gr)	147,27
Peso final suelo seco al horno, W_s (gr)	56,06
Contenido de humedad final, w_f (%)	39,81

a) obtenido de los datos finales de contenido de humedad

Lecturas del deformimetro en el ensayo de Hinchamiento Libre

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lecturas del deformimetro	
		Lectura real (mm)	Lectura ajustada (x102)
27/10/2014 10:15 hs	0,1	0	0
	0,2	0	0
	0,5	-0,01	1
	1	-0,01	1
	2	-0,02	2
	4	-0,03	3
	8	-0,04	4
	15	-0,06	6
	30	-0,09	9
	60	-0,12	12
	120	-0,16	16
	240	-0,18	18
	480	-0,21	21
28/10/2014 10:15 hs	1440	-0,22	22
29/10/2014 10:15 hs	2880	-0,22	22
30/10/2014 10:15 hs	4320	-0,22	22

Lectura de los escalones de carga en el ensayo de Presión de Expansión

Carga: 0,05 kg/cm²
Fecha de aplicación: 03/11/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
03/11/2014 10:00hs	0,1	1,69
	0,25	1,74
	0,5	1,79
	1	1,87
	2	1,97
	4	2,08
	8	2,2
	15	2,31
	30	2,43
	60	2,51
	120	2,57
	240	2,6
	480	2,62
04/11/2014 10:00hs	1440	2,66

Carga: 0,10 kg/cm²
Fecha de aplicación: 04/11/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
04/11/2014 10:00hs	0,1	2,69
	0,25	2,69
	0,5	2,7
	1	2,71
	2	2,72
	4	2,73
	8	2,75
	15	2,77
	30	2,79
	60	2,83
	120	2,87
	240	2,91
	480	2,93
05/11/2014 10:00hs	1440	2,95

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
 Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
 Cappello, Celia Daniela

Carga: 0,40 kg/cm²
 Fecha de aplicación: 06/11/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
06/11/2014 10:00hs	0,1	3,93
	0,25	3,95
	0,5	3,97
	1	3,99
	2	4,02
	4	4,06
	8	4,11
	15	4,17
	30	4,25
	60	4,33
	120	4,42
	240	4,49
	480	4,52
07/11/2014 10:00hs	1440	4,53

Carga: 0,20 kg/cm²
 Fecha de aplicación: 05/11/2014

Fecha y hora en reloj	Tiempo transcurrido (min)	Lectura del comparador (mm)
05/11/2014 10:00hs	0,1	3,11
	0,25	3,13
	0,5	3,15
	1	3,18
	2	3,22
	4	3,27
	8	3,34
	15	3,4
	30	3,49
	60	3,57
	120	3,67
	240	3,71
	480	3,74
06/11/2014 10:00hs	1440	3,77

Curva de Expansión – 27/10 al 30/10/2014

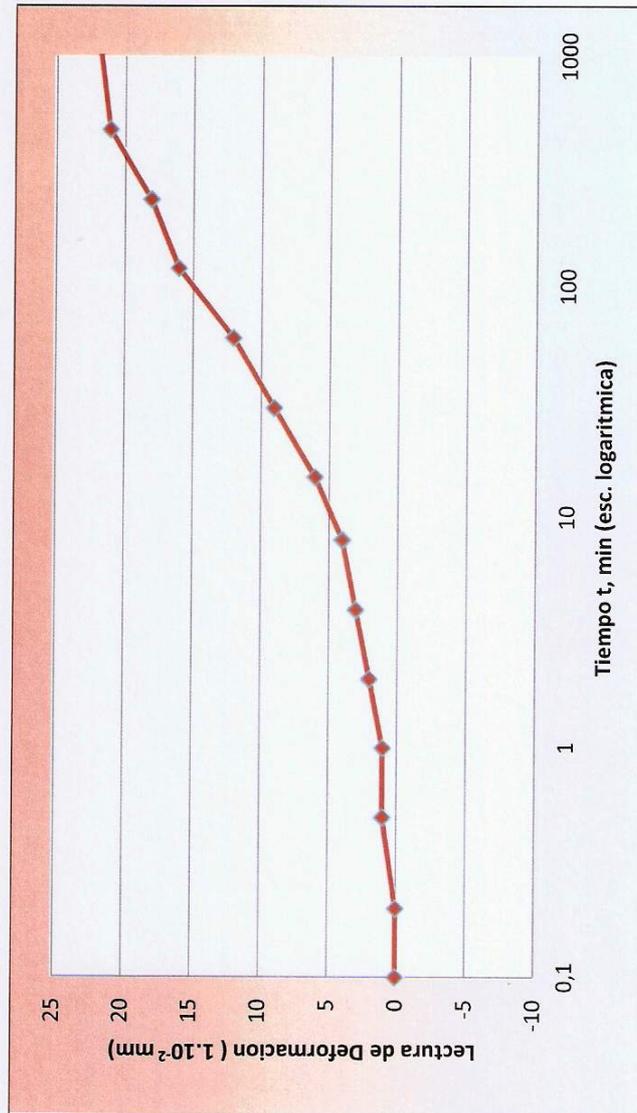


Gráfico 5

Datos de la muestra para curva de compresibilidad

Vol. Inicial de muestra, V_i (cm ³)	48,28	Peso seco de sólidos, W_s (gr)	56,06
Gravedad específica del suelo, G_s	2,72	Altura de los sólidos, H_s (cm)	0,65
Altura inicial de vacíos, H_{vi} (cm)	0,875	Relación de vacío inicial, e_i	1,346

Incremento de carga (kg/cm ²)	Lectura del deformímetro al final del incremento (mm)	Cambio de altura de la muestra ΔH (cm)	$\Delta \varepsilon = \Delta H/H_s$	Relación de vacíos instantánea e
0,01	0,22	0,022	0,0338	1,3766
0,05	-2,66	-0,266	-0,4092	0,9335
0,1	-2,95	-0,295	-0,4538	0,8889
0,2	-3,77	-0,377	-0,5800	0,7627
0,4	-4,53	-0,453	-0,6969	0,6458

Curva de Compresibilidad

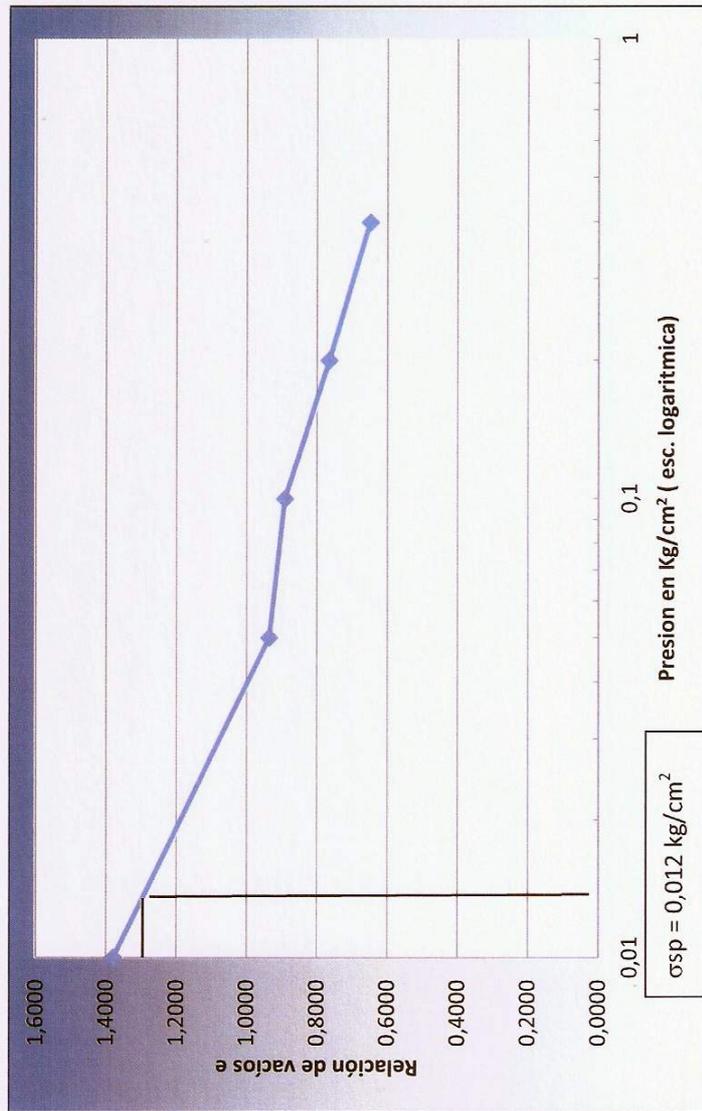


Gráfico 6

Calculo del Hinchamiento Libre

$$\frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 = \frac{e_{se} - e_i}{1 + e_i} \cdot 100 = \left(\frac{\gamma_{di}}{\gamma_{dse}} - 1 \right) \cdot 100 = 17,45\%$$

Determinación de la Densidad Aparente

Profundidad (m)	Diámetro (cm)	Longitud cilindro (cm)	Volumen (cm ³)	Mss (g)	Densidad Aparente (g/cm ³)
0,12	1,7	9	20,42	22,07	1,08
0,3	1,7	9	20,42	22,53	1,10
0,5	3,48	3,2	30,42	34	1,12
0,6	1,7	9	20,42	23,37	1,14

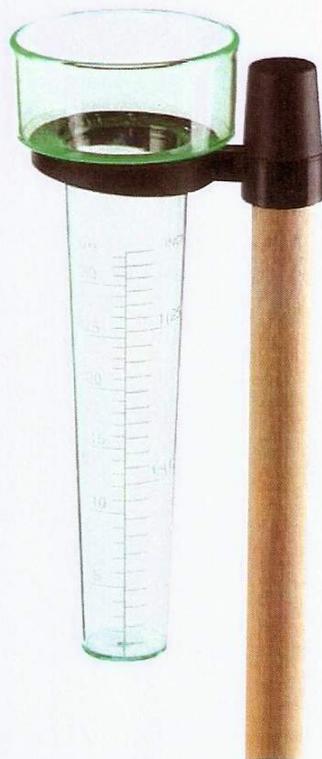
Densidad Aparente, δ (g/cm³)

Valores obtenidos por el método del cilindro	Valores obtenidos a partir de la ecuación $\theta = W \times \delta$
1,08	1,09
1,10	1,08
1,12	1,08
1,14	1,08

ANEXO B

DATOS PLUVIOMÉTRICOS

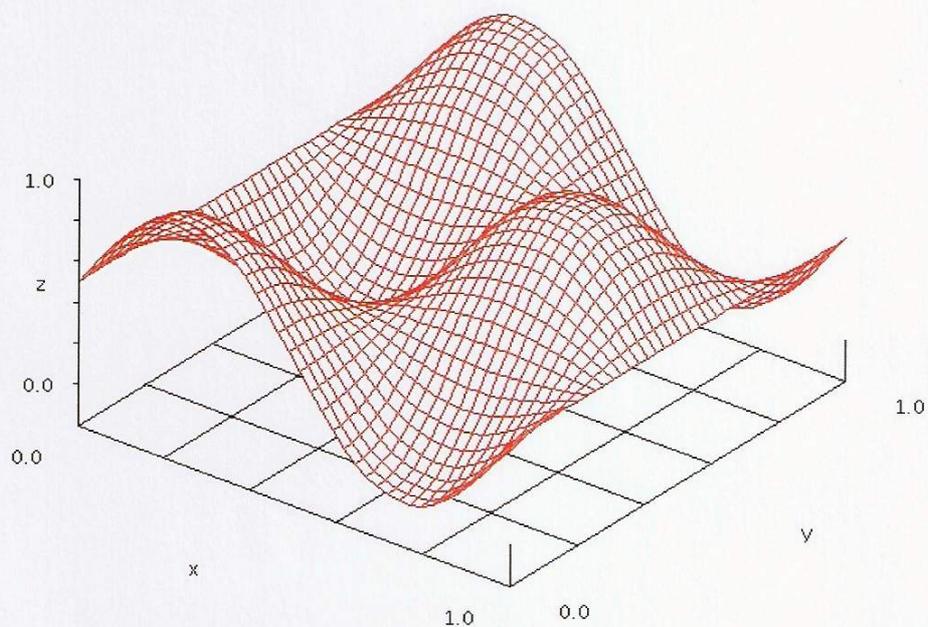
SUMINISTRADOS POR LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROPECUARIA (E.E.A.) DE CONCEPCIÓN
DEL URUGUAY DEL INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (I.N.T.A.)



Proyecto: Caffa Valentin
Cappello Daniela

ANEXO C

REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE DATOS



Proyecto: Caffa Valentin
Cappello Daniela

Datos de Precipitaciones

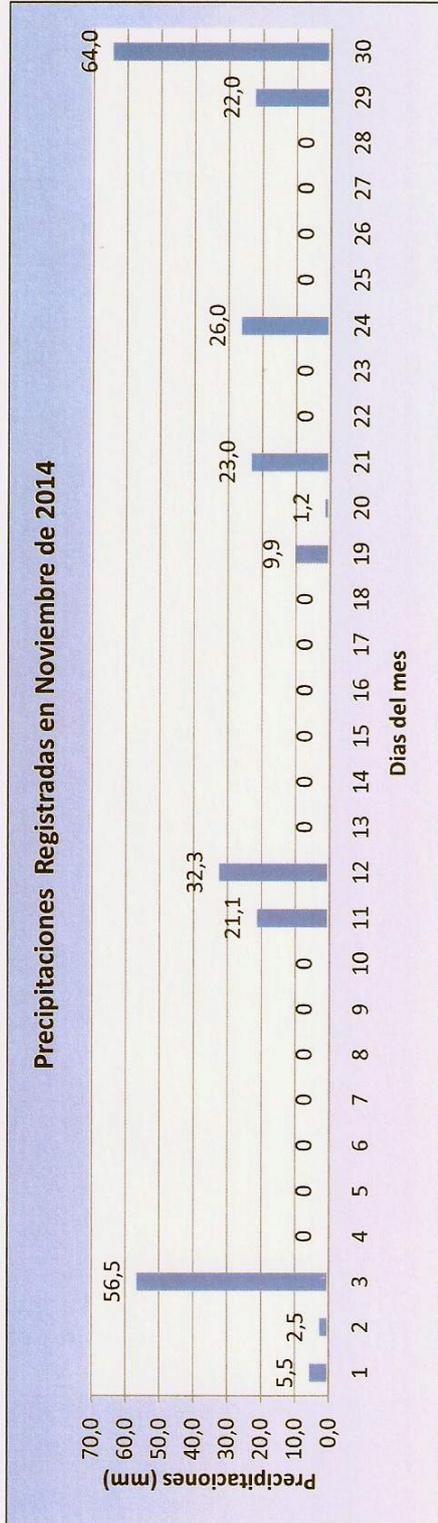


Gráfico 1

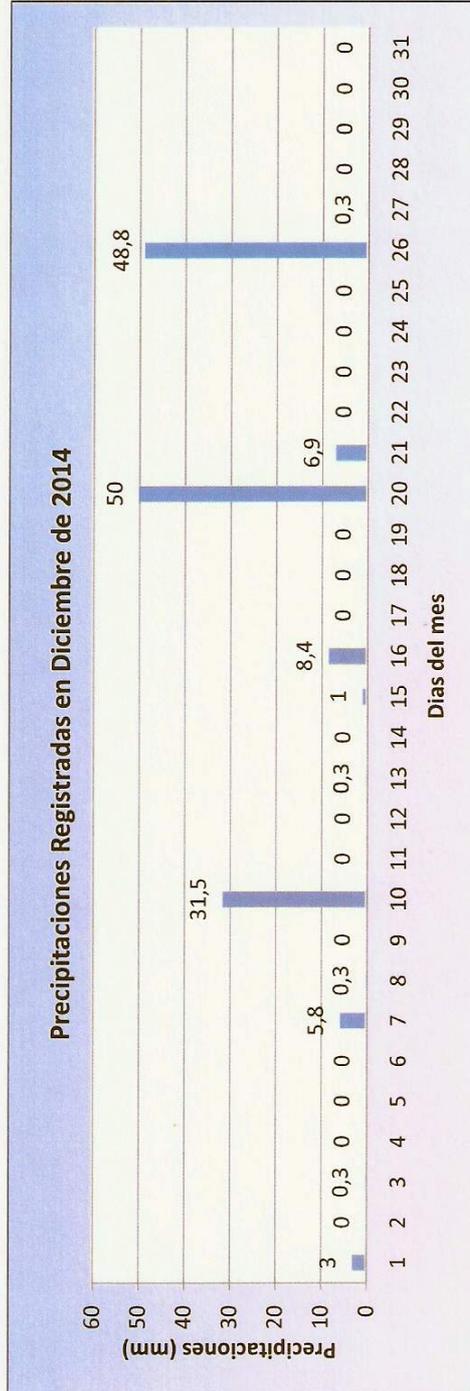


Gráfico 2

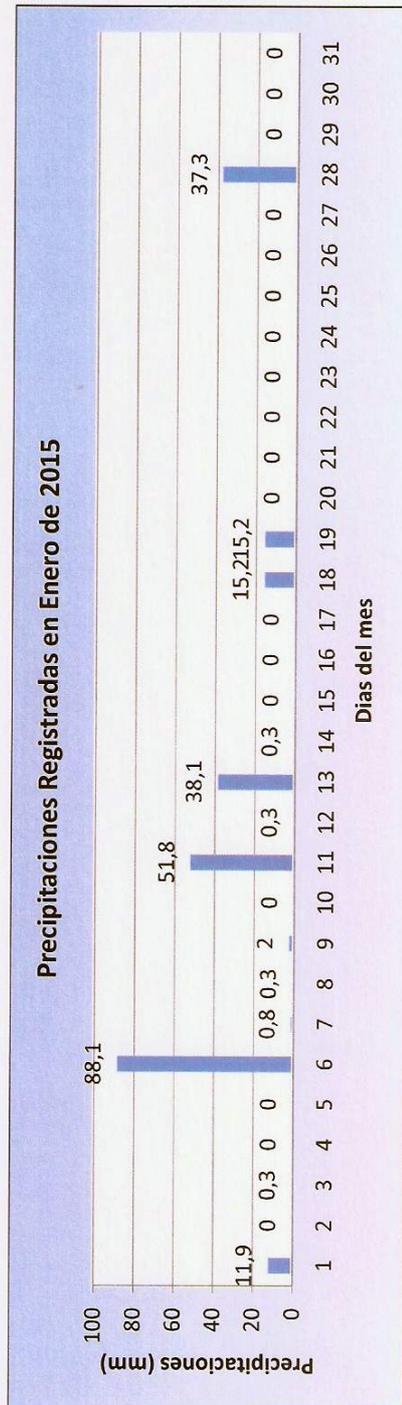


Gráfico 3

Datos registrados a 0,60m de profundidad

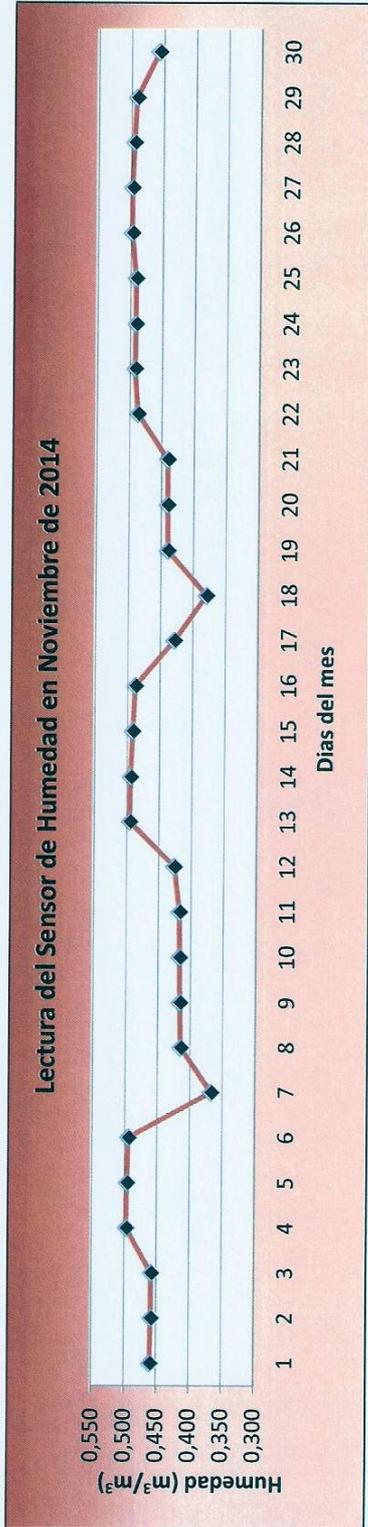


Gráfico 4

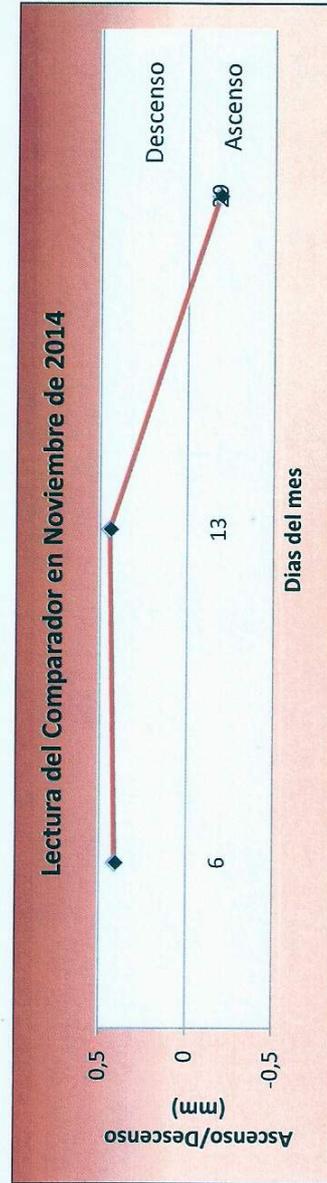


Gráfico 5

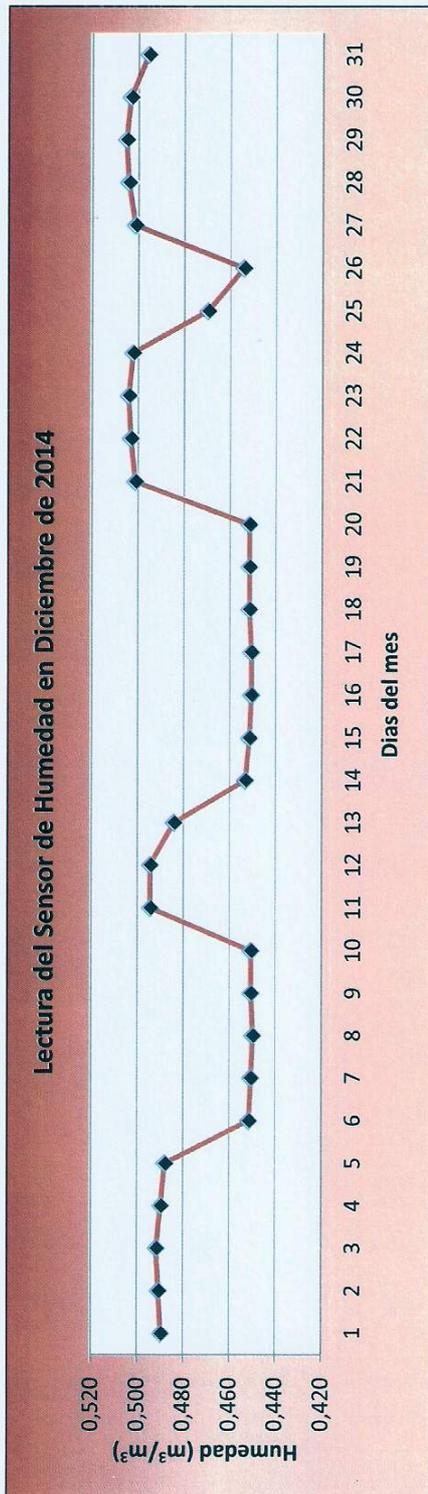


Gráfico 6

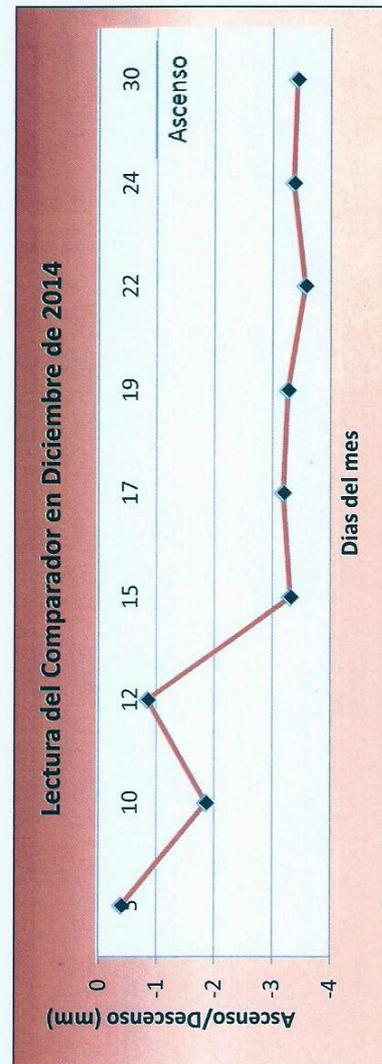


Gráfico 7

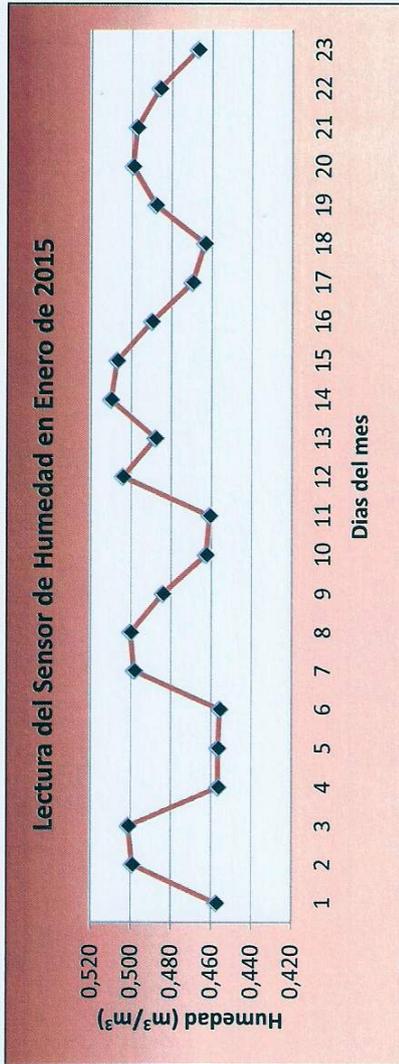


Gráfico 8

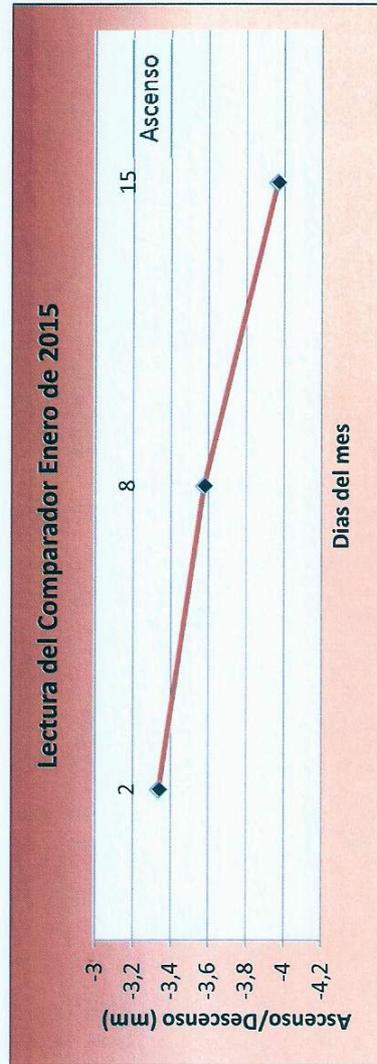


Gráfico 9

Datos registrados a 1,00m de profundidad

(se descartó los datos del comparador por lo expuesto en las conclusiones)

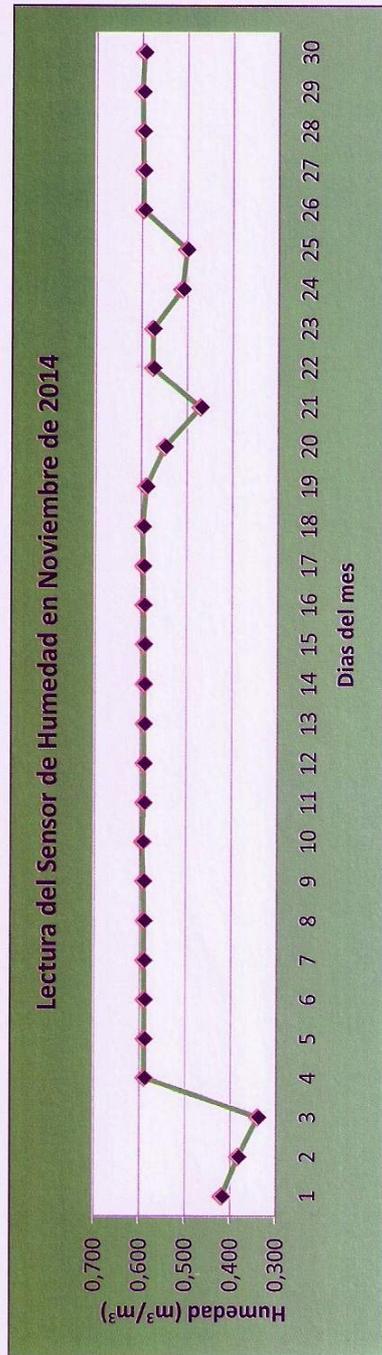


Gráfico 10

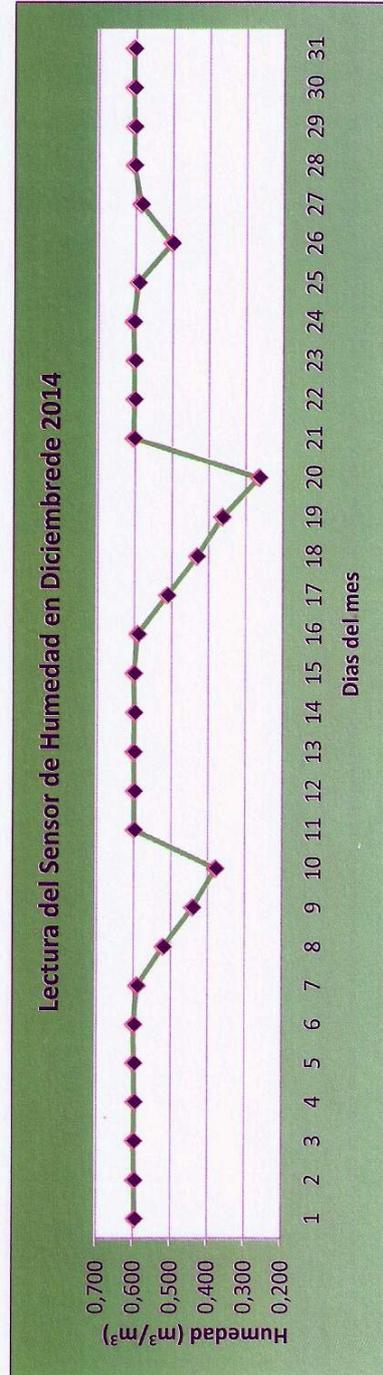


Gráfico 11

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay

Proyecto: Caffa, Mauro Valentin

Cappello, Celia Daniela

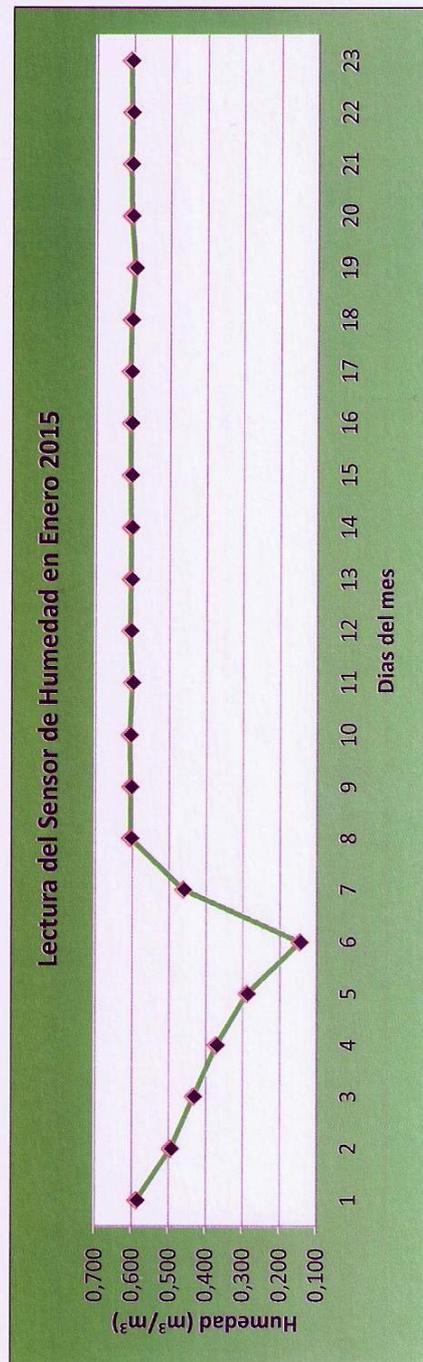


Grafico 12

Datos registrados a 1,30m de profundidad

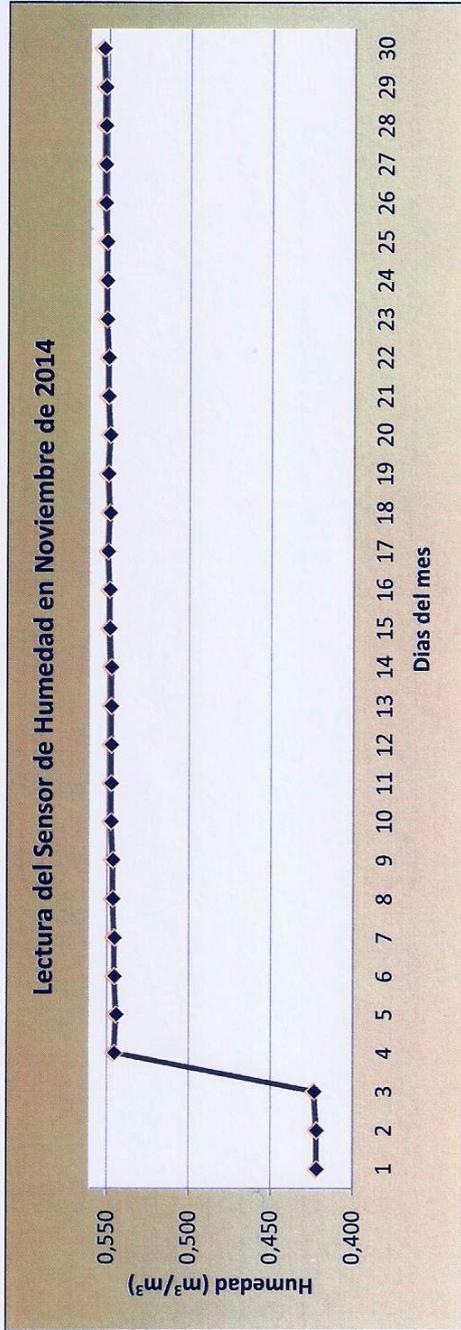


Gráfico 13

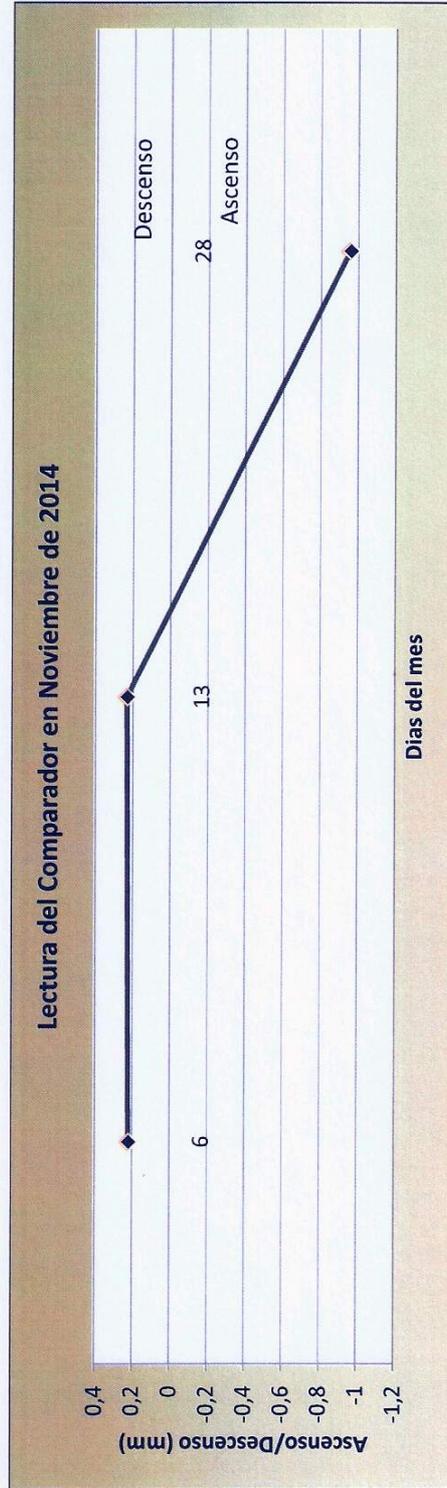


Gráfico 14

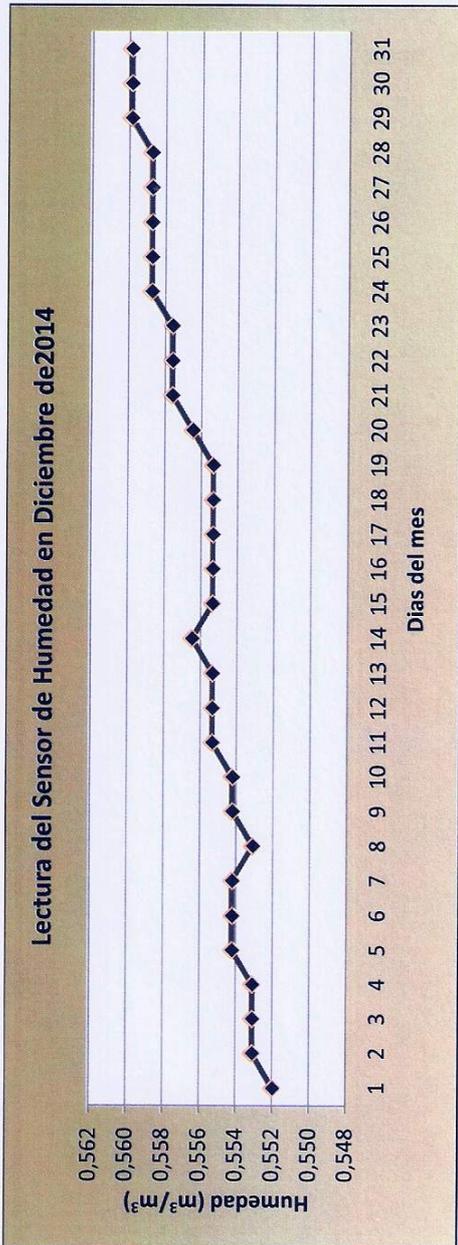


Gráfico 15

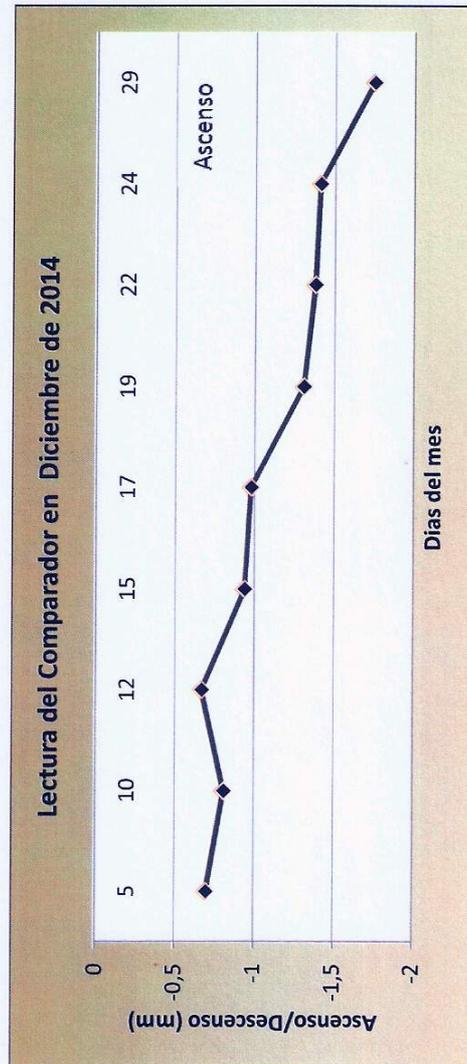


Gráfico 16

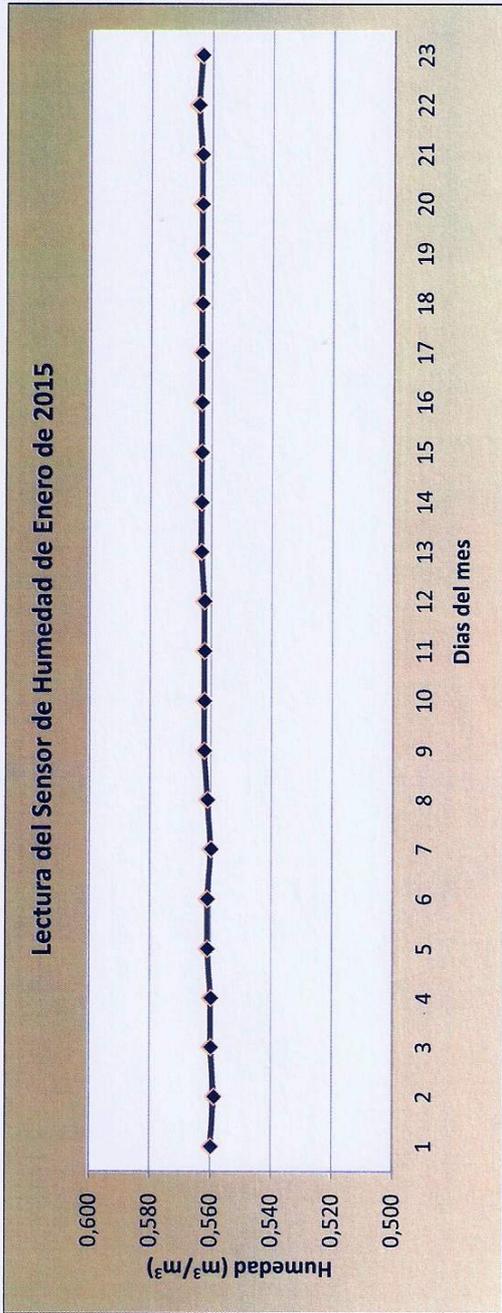


Gráfico 17

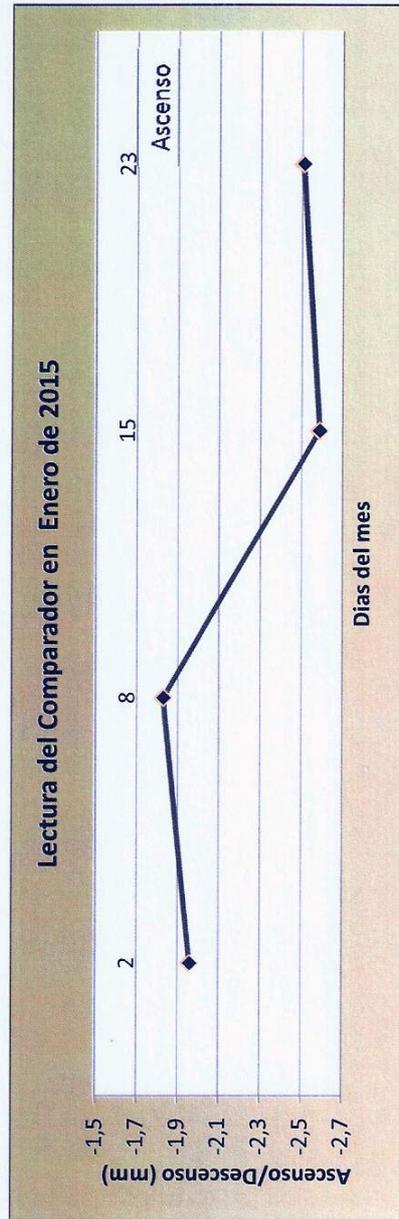


Gráfico 24

ANEXO D

SENSORES DE HUMEDAD

CARACTERÍSTICAS GENERALES



Proyecto: Caffa Valentin
Cappello Daniela

En este apartado se mencionara algunos aspectos generales y técnicos que caracterizan a los sensores de humedad utilizados en nuestro proyecto. Los dispositivos utilizados fueron los sensores de humedad del tipo FDR 10HS de la marca Decagon

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los sensores miden en forma indirecta el contenido de agua del suelo porque miden una propiedad del mismo que está muy relacionada en forma cuantitativa con la humedad. Esa propiedad es la Permitividad Dieléctrica ϵ , llamada también Constante Dieléctrica. La permitividad es una constante física adimensional que está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico. Por ejemplo, en un condensador una alta permitividad hace que la misma cantidad de carga eléctrica se almacene con un campo eléctrico menor y, por ende, a un potencial menor, llevando a una mayor capacidad del mismo.

La teoría dieléctrica dice que en un medio heterogéneo, la fracción de volumen de cualquier componente está relacionada con la ϵ total. Cambiando el volumen de cualquier componente, cambia el valor de ϵ . A causa de su elevada ϵ , los cambios en el volumen de agua tiene un efecto significativo sobre el total.

Las fracciones de volumen V_x , son factores que constituyen la unidad, la permitividad total de un volumen heterogéneo es:

$$\epsilon_t^b = \epsilon_m^b V_m + \epsilon_a^b V_a + \epsilon_w^b \theta + \epsilon_{om}^b V_{om} + \epsilon_i^b V_i$$

Siendo:

ϵ : es la permitividad dieléctrica o constante dieléctrica

b: es una constante de valor próximo a 0,5

t, m, a, om, i y w representan suelo mineral, aire, materia orgánica, hielo y agua.

Reorganizando la ecuación que muestra el contenido de humedad θ , se relacionada directamente con la permitividad dieléctrica mediante:

$$\theta = \frac{1}{\epsilon_w^{0.5}} \epsilon_t^{0.5} - \frac{\epsilon_m^{0.5} V_m + \epsilon_a^{0.5} V_a + \epsilon_{om}^{0.5} V_{om} + \epsilon_i^{0.5} V_i}{\epsilon_w^{0.5}}$$

En la siguiente tabla se muestran las permitividades de algunos dieléctricos:

Material	Permitividad ϵ
Aire	1
Suelos minerales	3-7
Materia orgánica	2-5
Hielo	5
Agua	80

Los métodos para medir la constante dieléctrica son TDR (Time Domain Reflectometry) y el FDR (Frequency Domain Reflectometry)

TDR. Mide el tiempo que tarda un pulso electromagnético en recorrer la longitud de los electrodos de metal colocados en el suelo. Como este tiempo es función de la constante dieléctrica del suelo, es posible establecer relaciones entre este tiempo y el contenido de agua del suelo.

FDR. (Reflectometría de dominio de frecuencias). La reflectometría es una técnica que se basa en la reflexión que experimenta un pulso electromagnético cuando es transmitido al suelo mediante electrodos.

En la reflectometría en el dominio de la frecuencia se mide la frecuencia de resonancia del circuito formado por los electrodos y el suelo tras la emisión del pulso. El pulso que es enviado a través del suelo no solo es reflejado sino que experimenta una atenuación proporcional a la conductividad eléctrica del mismo.

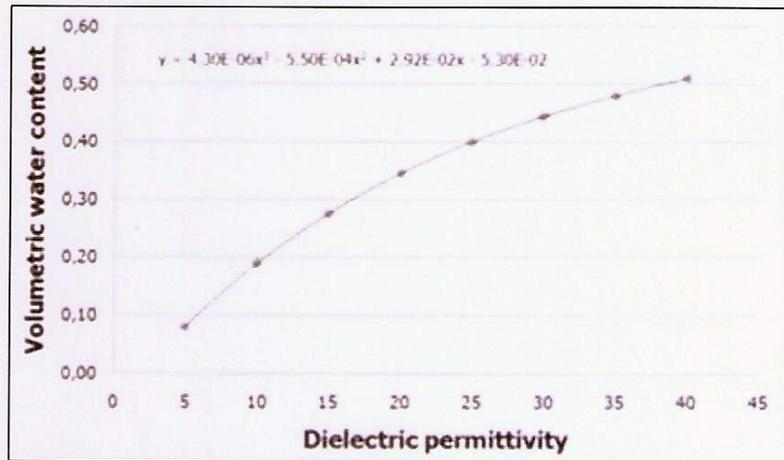
Los sensores de humedad FDR, también llamados sondas capacitivas, son un gran condensador, el medio que lo rodea se comporta como un dieléctrico, el campo electromagnético se produce entre las placas positiva y negativa del sensor.

La estimación del contenido de humedad está basada en la medida de la constante dieléctrica compuesta del suelo (ϵ) (dieléctrico) mediante el sensor (electrodos de placas paralelas) que, en su conjunto constituyen un condensador. Cuando varía ϵ , debido al contenido de humedad del suelo, cambia la capacitancia y la carga del suelo, el circuito del sensor es capaz de transformar esta variación en un voltaje que se transporta a un datalogger y se convierte a volumen de agua del suelo.

Para encontrar el valor del contenido volumétrico de agua en el suelo se requiere de una curva de calibración, es decir una relación matemática entre el valor de permitividad dieléctrica que nos da la sonda y el contenido de agua del suelo. La curva de calibración, que puede ser una recta o una curva, la provee el fabricante y se ha obtenido a partir del análisis de una gran cantidad de

tipos de suelos diferentes desde arenosos hasta arcillosos, pasando por los diversos tipos intermedios

A modo de ejemplo esta es la curva de calibración del sensor utilizado.



REGISTRO DE LOS DATOS

Para obtener las lecturas del sensor se deben conectar los mismos a un Datalogger. En este caso se utilizó el Datalogger Emeb de la marca Decagon, este dispositivo registra y almacena los datos de humedad recibidos por los sensores como humedad volumétrica (θ). Para acceder a estos registros se requiere el software ECH2O Utility, el cual se provee en forma gratuita en el sitio web de Decagon (www.decagon.com/support)

EXPRESIÓN DEL CONTENIDO HÍDRICO

El estado hídrico del suelo puede ser expresado de dos maneras:

- Por unidad de masa de suelo: conocido como Humedad Gravimétrica (W) es la relación entre la masa de la fracción líquida y la masa de la fracción sólida.

$$W = M_a / M_s \text{ (gr / gr; tn / tn)}$$

donde: M_a es masa de agua
 M_s es masa de suelo

Generalmente se expresa en porcentaje

$$W\% = (M_a / M_s) \times 100$$

Indica por ejemplo que un suelo con 20% de humedad contiene 20 gr de agua en 100 gr de suelo.

- Por unidad de volumen de suelo: conocido como Humedad Volumétrica (θ TITA). Es la relación entre el volumen de la fracción líquida (V_a) y el volumen de la muestra (V_s).

$$\theta = V_a / V_s \text{ (cm}^3 / \text{cm}^3; \text{m}^3 / \text{m}^3)$$

También puede ser expresada en porcentaje si se multiplica por 100. Indica por ejemplo que un suelo con una humedad volumétrica del 20% contiene 0,2 cm³ de agua en 1 cm³ de suelo

Relación entre ambas formas de expresión

La relación entre ambas unidades se puede expresar a través de la Densidad Aparente (δ) del suelo.

$$\theta = W \times \delta$$

Como valores orientativos de densidad aparente, pueden considerarse los siguientes:

Textura de suelo	δ (g / cm ³)
Arcillosa	1,00 – 1,25
Limosa	1,25 – 1,40
Arenosa	1,40 – 1,80

INSTALACIÓN

Al seleccionar un sitio para la instalación, es importante recordar que el suelo adyacente a la superficie del sensor tiene la más fuerte influencia en la lectura del mismo, por lo tanto si hubiera bolsas de aire o piedras en contacto con la sonda, el valor estimado se distorsionaría comparado con el valor del litro que está explorando.

No se debe instalar el sensor adyacente a objetos metálicos de gran tamaño, como postes de metal o estacas. Esto atenuaría el campo electromagnético del sensor y provocaría resultados adversos en la lectura. Además, el sensor 10HS no se debe instalar dentro de 5cm de la superficie

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL – Facultad Regional de Concepción del Uruguay
Proyecto: Caffa, Mauro Valentin
Cappello, Celia Daniela

del suelo, o el volumen de detección del campo electromagnético se puede extender fuera del suelo y reducir la precisión.

Debido a que el 10HS tiene huecos entre sus dientes, también es importante tener en cuenta el tamaño de las partículas del medio que va a insertar el sensor. Es posible que palos, corteza, raíces u otros materiales queden atrapados entre los dientes de los sensores, lo que afectará negativamente a las lecturas.

En la instalación es imperativo maximizar el contacto entre sensor y suelo, para una mayor exactitud en la medición se deberá insertar la sonda en suelo inalterado.

El sensor puede instalarse verticalmente u horizontalmente, sin embargo, la orientación del lado plano perpendicular a la superficie del suelo minimizará los efectos sobre el movimiento del agua hacia abajo. Se debe tener en cuenta que el sensor mide el contenido de humedad volumétrica en promedio a lo largo de su longitud, por lo que en una instalación vertical se integrara la medición en 10cm de profundidad mientras que la instalación horizontal lo hará a una profundidad más discreta.