

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES



PRÁCTICA SUPERVISADA

**ESTUDIO DE FENÓMENOS DE VARIACIÓN VOLUMÉTRICA EN
SUELOS LIMO ARCILLOSOS DE RUTA PROVINCIAL 14-60
PROVINCIA DE SAN JUAN**

Autora: Laura Guillermina Casas Brega

Tutor U.N.C.: Dr. Ing. Juan José Clariá

Tutor externo: Dr. Ing. Marcelo Zeballos

Carrera: Ingeniería Civil

Abril 2018

RESUMEN

El presente informe técnico es el resultado de los trabajos realizados durante la Práctica Profesional Supervisada de la alumna Guillermina Casas Brega.

La misma fue desarrollada en el “Laboratorio de Geotecnia” de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba durante los meses de noviembre del 2017 a marzo del 2018. El Laboratorio de Geotecnia es un de Centro de Investigación y Vinculación de la U.N.C., en el que desarrollan estudios de investigación y se brindan servicios y asesoramientos a terceros dentro del campo de la ingeniería geotécnica, fundaciones y mecánica de suelos.

Los tutores designados para el seguimiento de la alumna durante la ejecución de la Práctica Supervisada fueron el Dr. Ing. Juan José Clariá por parte de la Universidad Nacional de Córdoba, y el Dr. Ing. Marcelo Zeballos por parte del Centro de Vinculación.

El objetivo del trabajo desarrollado por la alumna fue la caracterización geotécnica de suelos y rocas presentes a los largo de un tramo de la traza de la Ruta Provincial 14-60 de la Provincia de San Juan, los cuales fueron empleados como subrasante de la misma. Los estudios de caracterización geotécnica se enfocaron fundamentalmente en la evaluación del potencial de expansión y presión de hinchamiento de los mismos, en estado natural y compactado. Estos trabajos se desarrollan con motivo de los daños sufridos por la ruta a menos de un año de su construcción.

Los resultados de la Práctica Profesional Supervisada desarrollada en el Centro de Vinculación Laboratorio de Geotecnia fueron volcados en el presente informe técnico, el cual se compone de dos partes principales. La primer parte describe el problema sufrido por la carpeta de rodamiento de la Ruta Provincial 14-60 en el tramo que va desde el Dique de Ullúm al Dique de la Roza, en una longitud de poco más de 3.300 metros. Además de la descripción del problema, se plantean algunas hipótesis para justificar los daños observados. En la segunda parte, se describen los ensayos de caracterización y comportamiento mecánico realizados en laboratorio durante los meses de ejecución de la presente Práctica Supervisada. Finalmente se resumen las principales conclusiones a las que se arribó en base a los ensayos desarrollados y se proponen diferentes alternativas para la mitigación del problema.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
2.1 INTRODUCCIÓN	13
2.2 ANTECEDENTES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO	14
2.3 AMBIENTE DE LOCALIZACIÓN DE LA OBRA	15
2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS DETERIOROS OBSERVADOS	16
2.4.1 Antecedentes de Materiales e Interpretación para el Diseño.....	16
2.4.2 Inspección de campo	18
2.4.3 Deterioros medidos	21
2.5 ANTECEDENTES GENERALES DE LA GEOTECNIA DEL FENÓMENO.....	25
2.5.1 Características de la expansión	25
2.5.2 Procesos generales de expansión de rocas.....	26
2.5.3 Controles geológicos	27
2.5.4 Controles mineralógicos.....	27
2.5.5 Controles químicos	28
2.5.6 Controles hidráulicos	29
2.5.7 Procesos acoplados.....	30
2.5 INTERPRETACIÓN PRELIMINAR DEL PROBLEMA.....	30
2.6 CONTINUIDAD DE LOS TRABAJOS.....	30
CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS	32
3.1 INTRODUCCIÓN	33
3.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL	33
3.2.1 Introducción	33
3.2.2 Concepto	33
3.2.3 Procedimiento	33
3.2.4 Cálculos	33
3.3 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.....	34
3.3.1 Introducción	34
3.3.2 Concepto	34
3.3.3 Procedimiento	34
3.3.4 Cálculos	35
3.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO.....	35
3.4.1 Introducción	35

3.4.2 Concepto	35
3.4.3 Procedimiento	35
3.4.4 Cálculos	36
3.5.1 Introducción	36
3.5.2 Concepto	36
3.5.3 Procedimiento	36
3.6 MÉTODO DEL HIDRÓMETRO	37
3.6.1 Introducción	37
3.6.2.1 Cálculo de los diámetros	37
3.6.2.2 Cálculo del porcentaje de partículas más finas que un tamaño dado ...	39
3.6.3 Procedimiento	40
3.6.4 Cálculos	41
3.7 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA	42
3.7.1 Introducción	42
3.7.2 Concepto	42
3.7.3 Procedimiento	42
3.7.4 Cálculos	43
3.8 ENSAYO DE EXPANSIÓN	43
3.8.1 Introducción	43
3.8.2 Alcance	43
3.8.3 Resumen de los métodos	43
3.8.3.1 Método A	44
3.8.3.2 Método B	44
3.8.3.3 Método C	44
3.8.4 Significado y uso	44
3.8.4.1 Método A	44
3.8.4.2 Método B	44
3.8.4.3 Método C	45
3.8.5 Procedimiento	45
3.8.5.1 Método A	45
3.8.5.2 Método B	45
3.8.5.3 Método C	45
CAPÍTULO 4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	47
4.1 INTRODUCCIÓN	48

4.2 PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS	48
4.3 CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL.....	49
4.4 LÍMITES DE ATTERBERG.....	50
4.5 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	51
4.7 MÉTODO DEL HIDRÓMETRO	53
4.9 PESO UNITARIO	56
4.10 ENSAYO DE EXPANSIÓN Y COMPRESIÓN	57
4.11 CONCLUSIONES.....	71
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....	73
5.1 INTRODUCCIÓN	74
5.2 CONCLUSIONES DE LAS TAREAS DESARROLLADAS	74
BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS.....	78
ANEXO 1. PLANILLAS DE CÁLCULO MÉTODO DEL HIDRÓMETRO.	79
ANEXO 2. PLANILLA DE CÁLCULO GRAVEDAD ESPECÍFICA	83
ANEXO 3. PLANILLAS DE ENSAYO DE EXPANSIÓN Y COMPRESIÓN.....	84
ANEXO 4. PLANILLAS DE ENSAYO DE EXPANSIÓN Y COMPRESIÓN.....	103
ANEXO 5. PLANILLAS DE ENSAYO DE EXPANSIÓN Y COMPRESIÓN.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ubicación de la zona de estudio.	13
Figura 2.2: Formaciones presentes en la zona de estudio	15
Figura 2.3: Ambiente general de implantación de la obra	19
Figura 2.4: Fisuración con un patrón frecuente en dirección SW-NE.	19
Figura 2.5: Vista de deterioros en margen izquierda.....	20
Figura 2.6: Muestras de material tipo lutitas.....	20
Figura 2.7: Relevamiento topográfico en borde de calzada.....	21
Figura 2.8: Relevamiento topográfico en borde de calzada.....	22
Figura 2.9: Relevamiento topográfico en borde de calzada.....	22
Figura 2.10: Relevamiento topográfico en borde de calzada.....	23
Figura 2.11: Relevamiento topográfico en borde de calzada.....	23
Figura 2.12: Perfil transversal en progresiva 00+930.	24
Figura 2.13: Perfil transversal en progresiva 1+420.	25
Figura 2.14: Expansión de arcillas y sulfatos.	26
Figura 2.15: Relación lineal entre presión de expansión y logaritmo de presión.	29
Figura 3.1: Hidrómetro 152H.....	38
Figura 4.1: Ubicación de la extracción de muestras.	48
Figura 4.2: Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro	53
Figura 4.3: Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro	54
Figura 4.4: Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro	54
Figura 4.5: Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro	55
Figura 4.6: Curva de compresibilidad para muestra inalterada N°1.....	57
Figura 4.7: Curva de compresibilidad para muestra inalterada N°3.....	58
Figura 4.8: Curva de compresibilidad para muestra inalterada N°4.....	58
Figura 4.9: Curva de compresibilidad para muestra inalterada N°5.....	59
Figura 4.10: Curva de compresibilidad para muestra recompactada N°1.....	59
Figura 4.11: Curva de compresibilidad para muestra recompactada N°3.....	60
Figura 4.12: Curva de compresibilidad para muestra recompactada N°4.....	60
Figura 4.13: Curva de compresibilidad para muestra recompactada N°5.....	61
Figura 4.14: Curva de compresibilidad para muestra recompactada N°3.....	61
Figura 4.15: Curva de expansión para muestra inalterada N°1	62
Figura 4.16: Curva de expansión para muestra inalterada N°3	62
Figura 4.17: Curva de expansión para muestra inalterada N°4	63
Figura 4.18: Curva de expansión para muestra inalterada N°5	63
Figura 4.19: Curva de expansión para muestra recompactada N°1	64
Figura 4.20: Curva de expansión para muestra recompactada N°3	64
Figura 4.21: Curva de expansión para muestra recompactada N°4	65
Figura 4.22: Curva de expansión para muestra recompactada N°5	65
Figura 4.23: Curva de expansión para muestra recompactada en seco N°3.....	66
Figura 4.24: Curva de consolidación para muestra inalterada N°1	66
Figura 4.25: Curva de consolidación para muestra inalterada N°3.....	67
Figura 4.26: Curva de consolidación para muestra inalterada N°4.....	67
Figura 4.27: Curva de consolidación para muestra inalterada N°5.....	68
Figura 4.28: Curva de consolidación para muestra recompactada N°1	68

Figura 4.29: Curva de consolidación para muestra recompactada N°3.....	69
Figura 4.30: Curva de consolidación para muestra recompactada N°4.....	69
Figura 4.31: Curva de consolidación para muestra recompactada N°5.....	70
Figura 4.32: Curva de consolidación para muestra recompactada en seco N°3.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Datos de ensayos de suelos característicos de subrasante.....	17
Tabla 2.2: Resumen de sectores con mayor nivel de afectación del deterioro.....	21
Tabla 4.1: Ubicación de la extracción de las muestras.....	49
Tabla 4.2: Contenido de humedad natural.....	49
Tabla 4.3: Límite Líquido.....	50
Tabla 4.4: Límite Plástico.....	50
Tabla 4.5: Índice de Plasticidad.....	51
Tabla 4.6: Porcentaje retenido y pasante por tamiz IRAM N° 200.....	51
Tabla 4.7: Clasificación de suelos según S.U.C.S y H.R.B.....	52
Tabla 4.8: Descripción de los tipos de suelo.....	52
Tabla 4.9: Gravedad específica.....	55
Tabla 4.10: Peso unitario seco y húmedo en muestra inalterada.....	56
Tabla 4.11: Relación de vacíos.....	56
Tabla 4.12: Presión de expansión.....	71

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1 | INTRODUCCIÓN

El presente informe técnico es el resultado de los trabajos realizados durante la Práctica Profesional Supervisada de la alumna Guillermina Casas Brega, para cumplimentar con los requerimientos y adquirir el título de Ingeniera Civil en la facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

La Práctica Profesional Supervisada fue desarrollada en el Centro de Vinculación “Laboratorio de Geotecnia” de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, desde el mes de octubre de 2017 hasta febrero de 2018. Para la ejecución de la misma se cumplieron un total de 200 horas de trabajo, establecidas como mínimo requerido por reglamento. Se cumplió un horario de aproximadamente 20 horas semanales, distribuidos en 4 horas por día de lunes a viernes, por la mañana.

En el Centro de Vinculación Laboratorio de Geotecnia se realizan investigaciones, asesoramientos, peritajes, tareas de desarrollo, mantenimiento y transferencia de tecnologías en todas las áreas vinculadas a la ingeniería geotécnica entre las que se destacan la mecánica, dinámica e hidráulica de suelos y rocas y la ingeniería de fundaciones. Asimismo en el Laboratorio de Geotecnia se desarrollan tareas de investigación y extensión en el área de la mecánica de suelos, ensayos no destructivos, métodos geofísicos de prospección, procesamiento digital de señales e imágenes y modelación numérica. Los trabajos que se desarrollan en el ámbito del Laboratorio de Geotecnia están dirigidos por un grupo de profesionales especialistas (todos profesores e investigadores de la U.N.C.) con dilatada trayectoria en el medio y con experiencia en centros de perfeccionamientos nacionales y extranjeros con niveles de maestría y doctorado. Asimismo, estudiantes de grado y postgrado de Ingeniería realizan sus estudios experimentales como complemento a sus Prácticas Profesionales Supervisadas, Tesis de Maestría y Doctorales, lo cual conforma un marco apropiado para el desarrollo de este Centro de Vinculación. Para el desarrollo de las actividades descritas, el laboratorio cuenta con uno de los más avanzados y completos equipamientos en geotecnia, tanto a nivel nacional como de Sudamérica. Asimismo, cuenta con una biblioteca propia con bibliografía actualizada de nivel nacional e internacional. Entre los potenciales demandantes del Laboratorio de Geotecnia se encuentran Municipios, Ministerios de Infraestructura, Servicios Públicos y demás entes gubernamentales con roles técnicos en el ámbito de la construcción, otros Laboratorios de Investigación, Centros e Instituciones de la U.N.C. y otras universidades, empresas constructoras y mineras, industrias, empresas de servicios públicos y privados.

Los tutores designados para el seguimiento de la alumna durante la ejecución de la Práctica Profesional Supervisada fueron, el Dr. Ing. Juan José Clariá por parte de la Universidad Nacional de Córdoba, y el Dr. Ing. Marcelo Zeballos por parte del Centro de Vinculación. Las actividades de la alumna dentro del laboratorio fueron definidas por el tutor externo, el Dr. Marcelo Esteban Zeballos; mientras que con el tutor por la U.N.C., el Dr. Ing. Juan José Clariá, se realizaban reuniones periódicamente a los fines de revisar las tareas realizadas y confeccionar el presente informe técnico.

Las tareas principales de la alumna consistieron en la caracterización geotécnica de los suelos y rocas presentes a lo largo de la traza de la Ruta Provincial 14-60 de la Provincia de San Juan, los cuales fueron empleados como subrasante de la misma. Los estudios de caracterización geotécnica se enfocaron fundamentalmente en la evaluación del potencial de expansión y presión de hinchamiento de los mismos, en estado natural y compactado.

Los resultados de la Práctica Profesional Supervisada fueron volcados en el presente informe técnico, el cual se compone de dos partes.

En la primera parte se presenta un fragmento de un informe realizado por el Dr. Ing. Marcelo Zeballos en el que se plantea la problemática de deterioro sobre la superficie de la calzada de un tramo de la Ruta Provincial 14-60 en la Provincia de San Juan. El informe cuenta con descripciones globales de la situación observada en la visita a obra. Asimismo se presenta un análisis de los antecedentes empleados en el proyecto de la ruta, así como hipótesis de comportamiento del suelo que pueden haber desencadenado el deterioro de la ruta en el sector a estudiar.

Por otro lado, en la segunda parte del presente informe, se describe y explican las tareas y ensayos desarrollados por la alumna en el Centro de Vinculación "Laboratorio de Geotecnia". Los trabajos consistieron en la ejecución de ensayos de caracterización, identificación, expansión y consolidación de muestras de suelo.

Por último, se exponen las principales conclusiones a las que se arribó luego de la experiencia laboral durante la Práctica Profesional Supervisada.

CAPÍTULO 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

CAPÍTULO 2 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 INTRODUCCIÓN

Bajo la jurisdicción de la Dirección Provincial de Vialidad de San Juan se ha construido reciente la multitrocha en Ruta Provincial 14 y Ruta Provincial 60, Tramo: R.P.68 – Presa Dique de Ullúm, Sección IV, Acceso a Dique J.I. de la Roza – Presa de Dique de Ullúm. El tramo tiene una longitud de poco más de 3.300 metros.

La Figura 2.1 muestra la posición de la traza de interés.



Figura 2.1: Ubicación de la zona de estudio.

La obra comprende una vía con una sección transversal formada por una doble calzada, con dos trochas de circulación cada una, un separador central formado por un new jersey, espacios laterales destinados a la localización de una bicisenda. La mayor parte de la traza muestra una dirección sur – norte.

Poco después de la habilitación del tramo se han observado procesos de deterioro a nivel de la superficie de la calzada. Los mismos se manifiestan en forma de ondulaciones superficiales, con dirección dominante en sentido transversal al eje de la calzada. Estas direcciones, con el paso del tiempo, han incrementado su intensidad al punto conformar situaciones de complejidad para la propia circulación de los distintos tipos de vehículos.

La caracterización de esta situación, y la formación de potenciales acciones de mitigación, han demandado la consulta por parte de la Dirección de Vialidad de San Juan, a este Centro de Vinculación de la Universidad Nacional de Córdoba.

Como parte de este requerimiento se presenta el este Informe Inicial. El mismo tiene como objetivo la descripción global de la situación observada durante la visita a la obra, así como la formulación de potenciales situaciones que pueden considerarse desencadenantes de la actual condición de deterioro apreciada en el sector.

2.2 ANTECEDENTES EMPLEADOS EN EL ESTUDIO

En relación con los antecedentes que han sido empleados para la realización de este informe se deben indicar:

- Estudios de caracterización de suelos a lo largo de la traza. Realizados por el Instituto de Materiales y Suelos de la Universidad Nacional de San Juan. Designados como informe 111/13, efectuados para el solicitante Federico Hnos, y recibido de parte de personal técnico de la Dirección Provincial de Vialidad. El mismo establece valores de caracterización y calificación de suelos, así como su comportamiento resistente según ensayos de valor soporte.
- Diseño Estructural Vial, Ruta del Sol, RP60. Sección IV. Informe correspondiente a un diseño estructural vial, siguiendo los lineamientos del método de diseño AASHTO'93. El análisis se establece sobre la base de un valor soporte medio de subrasante a lo largo de la traza del orden del 2% (este valor se estima en la media de los resultados obtenidos). EL diseño concluye con la conformación de un paquete estructural vial ligeramente superior a 100 cm.
- Planialtimetría General del Proyecto de Obra. Comprende la información gráfica del proyecto de obra para el tramo en cuestión.
- Información de estado de la calzada y registros topográficos de rasante. Se ha recibido información respecto del estado actual de deformación de algunos sectores de la calzada. El personal técnico de la DPV de San Juan manifiesta que la vía ha sufrido, luego de su construcción, un proceso de variación volumétrica significativa de su estructura componente o de su función sobre los suelos limo arcillosos antes descriptos.

Junto con los elementos específicos, se han empleados referencias bibliográficas generales de la región, las cuales han sido empleadas para una mejor comprensión del ambiente en el cual se implanta la obra.

Adicionalmente, en julio de 2017, personal técnico del Centro de Vinculación efectuó un relevamiento general de estado de la calzada.

2.3 AMBIENTE DE LOCALIZACIÓN DE LA OBRA

El tramo de la ruta bajo estudio se encuentra dentro del sector caracterizado, geomorfológicamente, como las estribaciones de la Sierra de Marquesado. Está formada por rocas sedimentarias que constituyeron un sector de la plataforma carbonática cámbrica de la Precordillera Oriental. Una esquematización de la zona de implantación de la obra se muestra en la Figura 2.2.

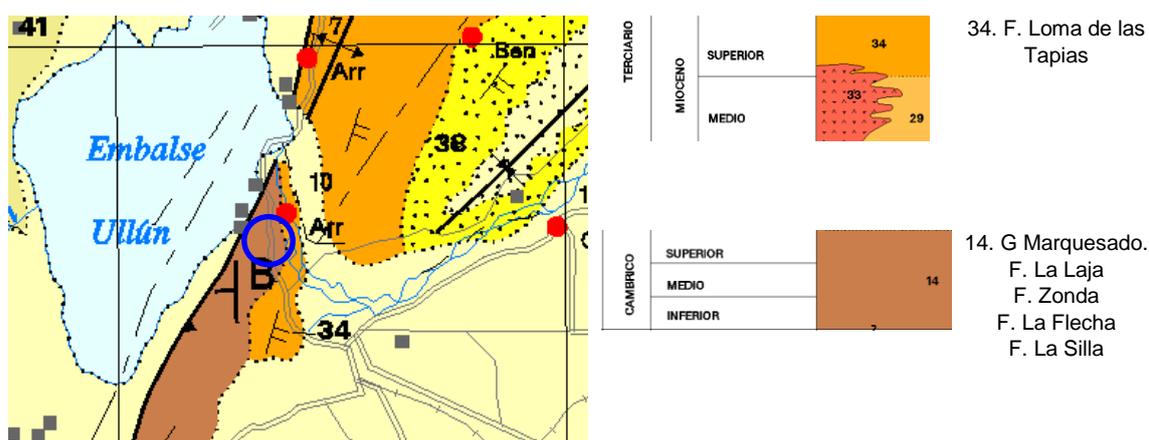


Figura 2.2: Formaciones presentes en la zona de estudio, circulado (Ramos 2000)¹

En relación a la caracterización de esta formación se indica que las rocas predominantes son calizas, calizas arcillosas y margas, con estructuras sedimentarias de poca profundidad. Se han reconocido ciclos somerizantes originados en un ambiente hipersalino intermareal medio a superior con evidencias de exposición subaérea.

Se presentan con estructuras sedimentarias de poca profundidad (grietas de desecación, bird eyes, conglomerados de clastos planos, cristales pseudomorfs de yeso, estratificación entrecruzada) laminación criptoalgal y estromatolitos. **La presencia de evidencias yesíferas indica baja calidad para ser consideradas como yacimiento, pero pueden contribuir a explicar en parte el fenómeno de expansión observado.**

En la zona de la presa Ullum, aparecen estratos continentales terciarios. Consisten en arcilitas, limolitas, areniscas rojas, areniscas grises y conglomerados.

Se han detectado algunos casos de tubificación (piping) alrededor de la presa. (Yacante et al 1997)².

¹ Ramos, V.A. y G.I. Vujovich, 2000. Hoja Geológica 3169-IV, San Juan, Provincia de San Juan. Boletín 243, Subsec. Minería Nación, Servicio Geológico Minero Argentino, 82 pgs, Buenos Aires.

² Yacante, G., Suvires, G. y Pereyra, B. 1997. Procesos de sufosión (piping) en dos sitios de la Precordillera, San Juan, Argentina. II Jornadas de Geología de Precordillera, San Juan: 184-189.

Con respecto a los depósitos cuaternarios, se subdividen en sedimentos lacustres y por sedimentos gruesos, resultante de procesos de coluviación de los materiales provenientes de las montañas vecinas (Suvires y Luna 2008)³.

2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS DETERIOROS OBSERVADOS

Los deterioros que se han observados en los relevamientos efectuados comprenden:

- Antecedentes de los materiales locales, según estudios efectuados para el diseño de la calzada.
- Relevamientos derivados de inspección de campo.
- Reconocimientos topográficos efectuados por la Dirección Provincial de Vialidad.

Los resultados obtenidos se comentan a continuación.

2.4.1 Antecedentes de Materiales e Interpretación para el Diseño.

Los estudios que se han recibido por parte de la Dirección Provincial de Vialidad de San Juan, ya citados con anterioridad, hacen referencia a materiales de caracterización de la subrasante con algunos aspectos singulares:

- Desde el punto de vista de la identificación de los suelos, tomando 6 muestras como referencia, los suelos han sido identificados como A-4, en su gran mayoría. Sólo una de las muestras corresponde a la calificación de A-6, según los sistemas viales. Desde el punto de vista del Sistema de Clasificación Unificada de los Suelos, se trata de limos y arcillas de baja plasticidad (ML y CL).
- A nivel del grado de compacidad que desarrollan las muestras de referencia, se han establecido densidades máximas de entre 17,0 y 18,5 kN/m³, con humedades óptimas de entre 13 y 18%.
- A través de la realización de ensayos de caracterización de la resistencia y deformabilidad, se han obtenido los resultados mostrados en la Tabla 2.1.

³ Suvires G.M. y Luna P.I. (2008) Unidades geomorfológicas ambientales del sur del oasis del Tulum, Andes centrales de argentina. *Multequina* 17: 109-128.

Tabla 2.1: Datos de ensayos de suelos característicos de subrasante. Fuente: Información provista por la Dirección Provincial de Vialidad de San Juan.

Identificación		Compacidad		Comportamiento a 95% a 97% de Dmax		
Muestra	Clasif	Den Max (kN/m ³)	Humedad (%)	Hincha (%)	CBR ₁ (%)	CBR ₂ (%)
1	ML	17.30	16.2	2.32	3.54	3.44
2	ML	17.29	16.8	4.89	1.25	1.48
3	CL	17.15	17.7	6.35	0.89	0.84
4	ML	17.07	14.9	4.46	2.21	2.21
5	CL	17.78	13.4	2.02	3.10	3.80
6	CL	18.75	13.5	2.92	3.00	3.00

Los resultados obtenidos permiten efectuar algunas observaciones complementarias:

- En los ensayos de Valor Soporte antecedentes, se aprecia una magnitud de hinchamiento de significativa importancia en varias muestras. En este punto, es conveniente recordar que el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la Dirección Nacional de Vialidad recomienda no superar la expansión del 2% en este tipo de ensayos.
- A nivel del valor soporte de referencia, se encuentran valores sensiblemente inferiores al 3%, valor igualmente caracterizado como mínimo recomendado por el Pliego de la DNV.
- El reconocimiento efectuado en forma previa a la ejecución de los estudios de diseño de la obra, permiten considerar que se trata de suelos con un comportamiento singular en un doble aspecto: por una parte, a nivel del hinchamiento del suelo, por otra parte en lo vinculado con la capacidad resistente específica del material.

En el caso del hinchamiento, se indica que los valores señalados, a margen de su magnitud han sido reconocidos para tiempos de embebimiento de 4 días, sin indicarse para este tiempo se ha alcanzado la estabilidad volumétrica correspondiente.

A nivel de la resistencia, se aprecia que una fracción importante de las la muestras reconocidas presentan valores soporte de diseño inferior al 2%. En los estudios de diseño del pavimento se ha adoptado un valor medio del 2%, lo cual significa que una fracción importante de los suelos presentará una condición resistente inferior a la de diseño.

- En consecuencia, puede asumirse que se trata de *suelos con características singulares de comportamiento*, con propiedades que los hacen parecer a materiales de baja actividad (en función de su plasticidad media – baja), pero una tendencia a la variación volumétrica de alta importancia. Adicionalmente a esta condición, la resistencia general del material es significativamente baja.

- Se interpreta que parte de estos suelos conforman el cimiento de las estructuras viales, han sido empleados en la conformación de las bases de asiento y en los correspondientes terraplenes de la estructura vial.

2.4.2 Inspección de campo

Los reconocimientos sobre los efectos de deterioro han sido efectuados en el mes de julio de 2017. Durante la visita se ha efectuado un recorrido por ambos márgenes de la calzada, visualizando las características generales del emplazamiento de la obra.

Confirmando la información antecedente se aprecia que la obra, en general, se encuentra implantada en un ambiente geológico en el que resulta característico una alternancia de capas de materiales de tipo sedimentarios. Los componentes observados parecen corresponder a arcilitas, lutitas, areniscas y lumolitas. Una vista general del acomodamiento de los materiales se muestra en la Figura 2.3.

Los deterioros observados muestran diversas intensidades en ciertos sectores del trazado. A nivel de los elementos que se aprecian con cierta sistematicidad, se destacan los siguientes:

- Los deterioros se evidencian con mayor nivel de intensidad sobre los espacios dispuestos como bicisendas. En los sectores de mayor nivel de afectación se puede detectar un efecto de deformación, a manera de ondulaciones en la superficie de las calzadas. En la parte de alta de estas ondulaciones se evidencian fisuras de tracción. Este tipo de deterioro se muestra en la Figura 2.4.

Sobre la calzada la generación de fisuras tiende a reducirse, aun cuando se aprecian deformaciones transversales de varios centímetros. Varios de estos sectores con deformaciones, generan condiciones de una marcada complejidad en la circulación local.

En el sector central de la calzada, el efecto se evidencia en deficiencia a nivel del apoyo continuo pretendido para el separador tipo New Jersey.

- Los procesos de fisuración que se han observado muestran un patrón de comportamiento dominante.

En primer término, se aprecia que a nivel de superficie se muestran con una orientación predominante en sentido SW-NE. Esta orientación muestra una importante consistencia con la disposición de las capas de las formaciones rocosas en el sector. Esta situación puede ser observada en la Figura 2.5.

- A nivel de la caracterización de los materiales de la zona se han extraído muestras representativas de las formaciones en la zona. La Figura 2.6 muestra una vista de estas muestras. Las mismas muestran características típicas de formaciones sedimentarias del tipo lutíticas.
- La mayor parte de los procesos de deformación y deterioro se ha registrado en sectores en los cuales se han efectuado excavaciones para la materialización del tramo. Sobre este punto se efectúa una revisión con mayor nivel de detalle más adelante.



Figura 2.3: Ambiente general de implantación de la obra. Alternancia de lutitas y limolitas.



Figura 2.4: Fisuración con un patrón frecuente en dirección SW-NE.



Figura 2.5: Vista de deterioros en margen izquierda. Al fondo contratalud con presencia alternante de materiales.



Figura 2.6: Muestras de material tipo lutitas.

2.4.3 Deterioros medidos

La Dirección Provincial de Vialidad de San Juan ha realizado, con anterioridad a estos reconocimientos, un relevamiento topográfico de los sectores con mayor nivel de afectación. La Tabla 2.2 muestra un resumen de los sectores con mayor afectación.

Tabla 2.2: Resumen de sectores con mayor nivel de afectación del deterioro.

Progresivas		Longitud (m)	Lado
Inicial	Final		
660	880	220	Derecho
880	970	90	Izquierdo
1030	1130	100	Izquierdo
1225	1260	35	Derecho
1380	1535	155	Izquierdo
1700	1780	80	Derecho
Longitud total (m)		680	

Los relevamientos efectuados han sido representados gráficamente en las Figuras 2.6 a 2.10 muestran los resultados de estas mediciones. En varias de estas Figuras se ha representado igualmente la posición estimada de la cota de calzada en la línea sobre la cual se ha efectuado la medición.

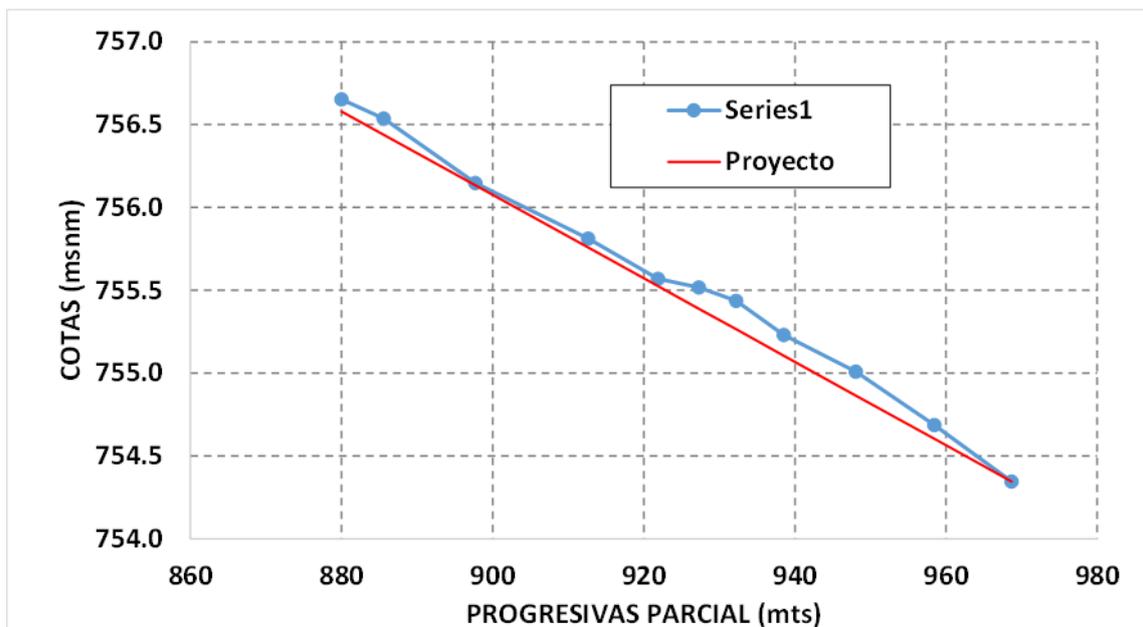


Figura 2.7: Relevamiento topográfico en borde de calzada. Lado izquierdo. Fuente: Dirección Provincial de Vialidad de San Juan.

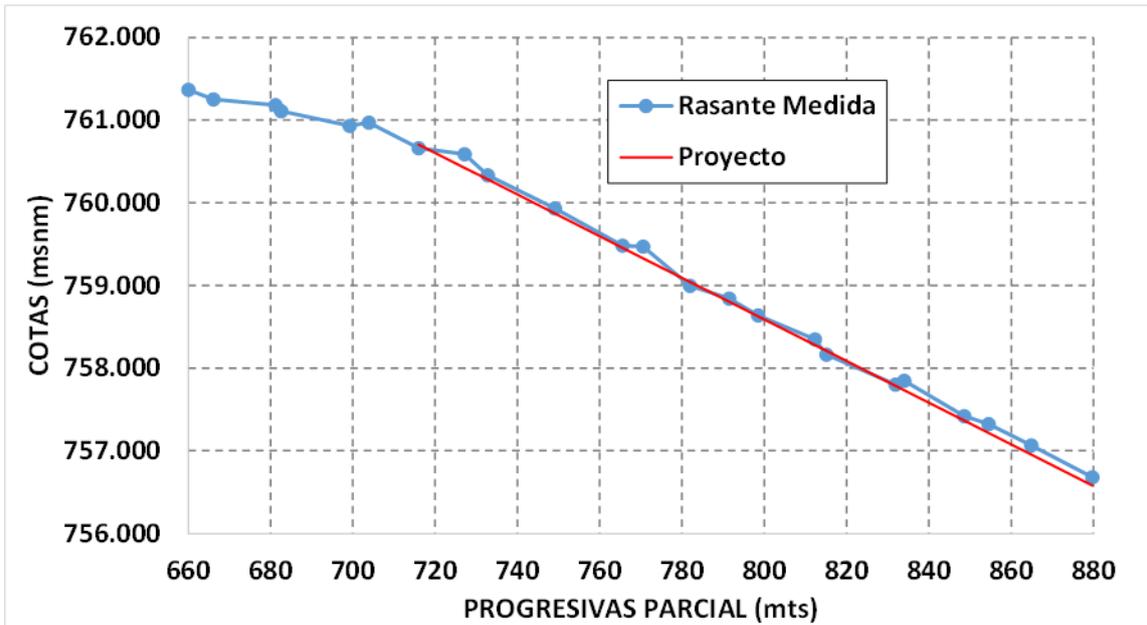


Figura 2.8: Relevamiento topográfico en borde de calzada. Lado derecho. Fuente: Dirección Provincial de Vialidad de San Juan.

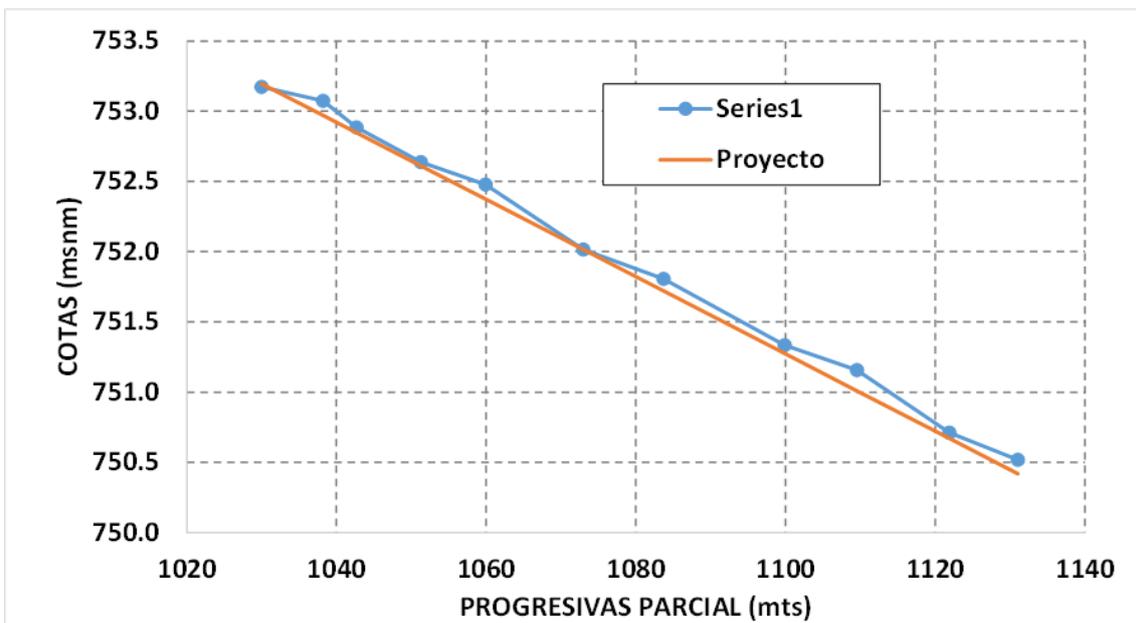


Figura 2.9: Relevamiento topográfico en borde de calzada. Lado Izquierdo. Fuente: Dirección Provincial de Vialidad de San Juan.

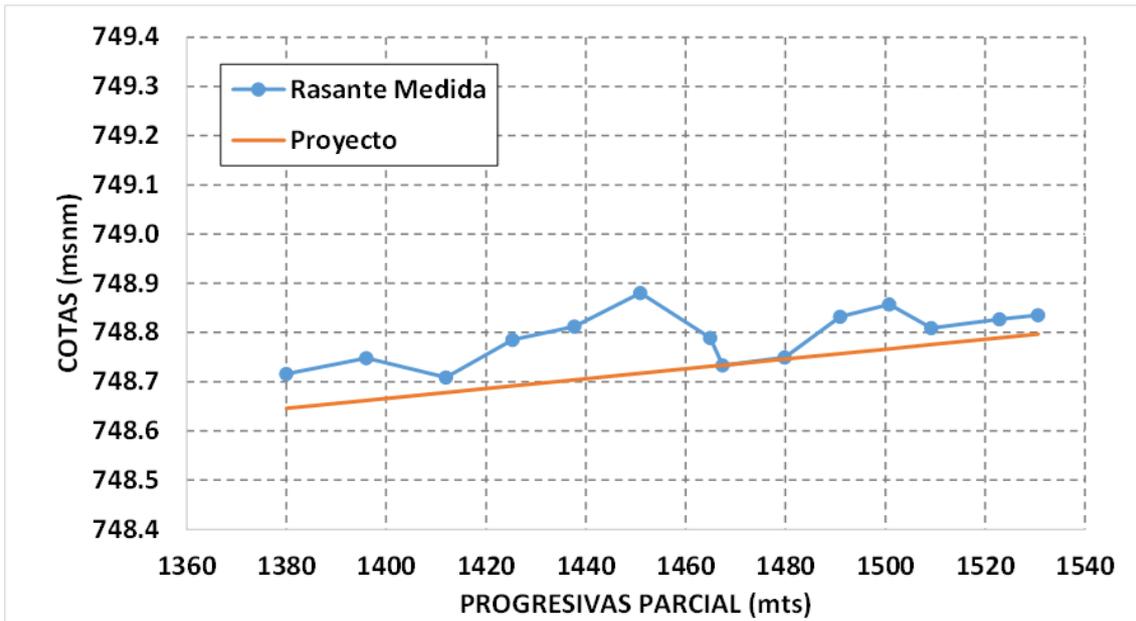


Figura 2.10: Relevamiento topográfico en borde de calzada. Lado Izquierdo. Fuente: Dirección Provincial de Vialidad de San Juan.

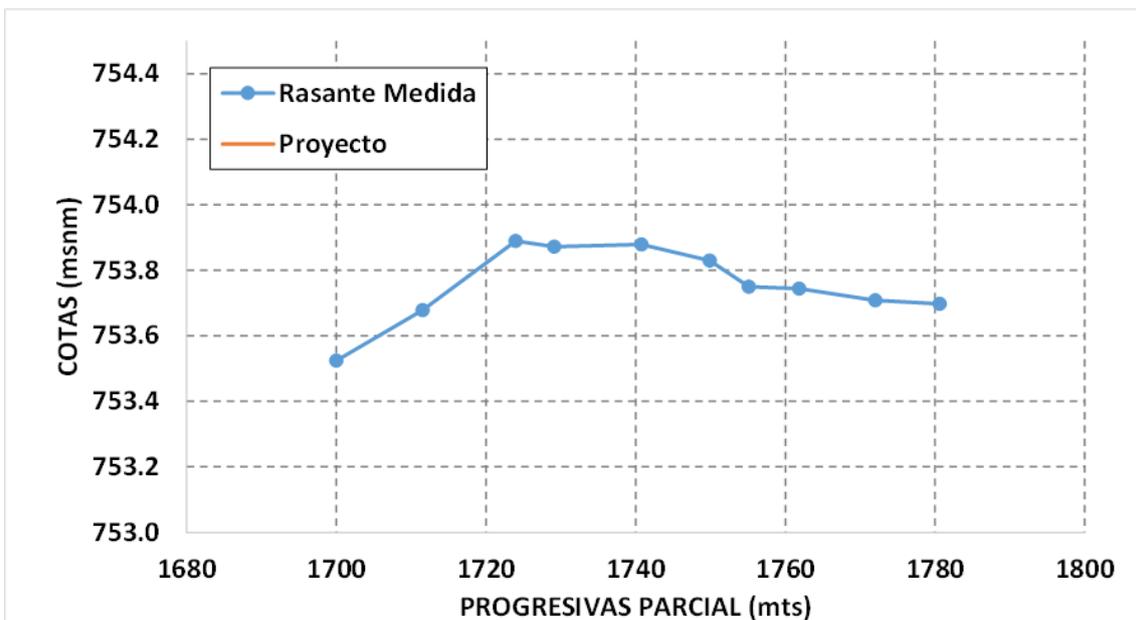


Figura 2.11: Relevamiento topográfico en borde de calzada. Lado Derecho. Fuente: Dirección Provincial de Vialidad de San Juan.

Los resultados obtenidos permiten formular las siguientes observaciones:

- Se muestra un nivel de irregularidad longitudinal de la calzada, el cual resulta no apto para el mantenimiento adecuado de condiciones de operación.
- Tomando como referencia la posición estimada para la cota de calzada en la línea de medición, se aprecian levantamientos (hinchamientos) del orden de hasta 150 mm.

2.4.4 Ubicación de los efectos de deterioro

Un reconocimiento complementario ha sido efectuado sobre la base de la ubicación de los sectores con mayor nivel deterioro, en relación con el ambiente sobre el cual fue construida la nueva calzada.

Al respecto resulta altamente significativo el hecho de que gran parte de los deterioros apreciados se localizan en sectores en los cuales la obra se ubica sobre excavaciones del macizo rocoso. A modo de ejemplo de estas situaciones se muestran los perfiles transversales de las Figura 2.11 y 2.12.

El hecho de localización de los fenómenos de deterioro en un ambiente de excavación, permite establecer algunos elementos de interés para la mejor interpretación del proceso:

- La ejecución de la excavación del macizo rocoso produce una “liberación” de tensiones de confinamiento sobre el material que sirve de cimiento para la calzada conformada.
- El proceso de reducción de las tensiones de confinamiento, puede traer aparejado un doble efecto. Por una parte, permite un incremento de las relaciones de vacío, lo cual colabora a la tendencia de incremento de la humedad de los componentes arcillosos. Estos componentes pueden contener tipos mineralógicos para los cuales resulta típico el desarrollo de procesos de expansión. Por otra parte, la reducción de confinamiento, mecánicamente genera procesos de expansión volumétrica, el cual en muchos elementos inertes se manifiesta durante el proceso de construcción de la obra.

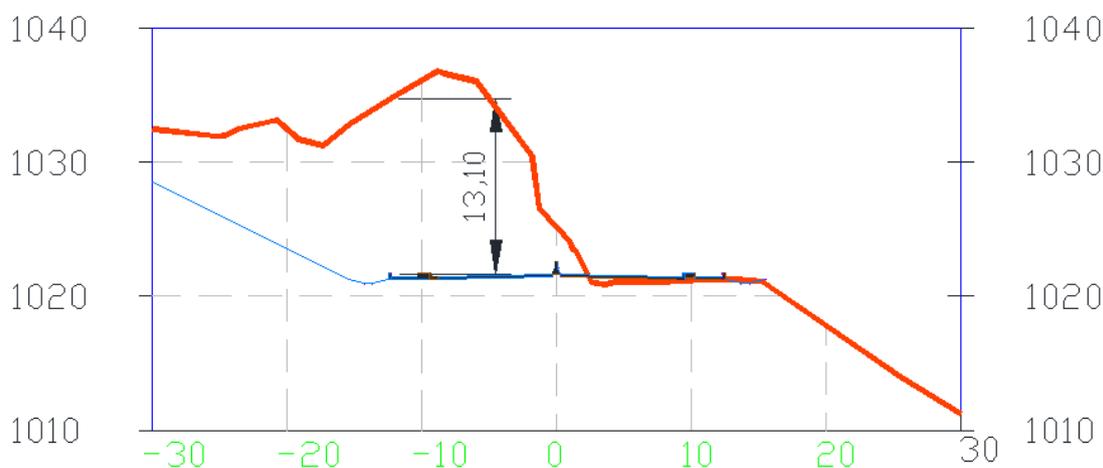


Figura 2.12: Perfil transversal en progresiva 00+930.

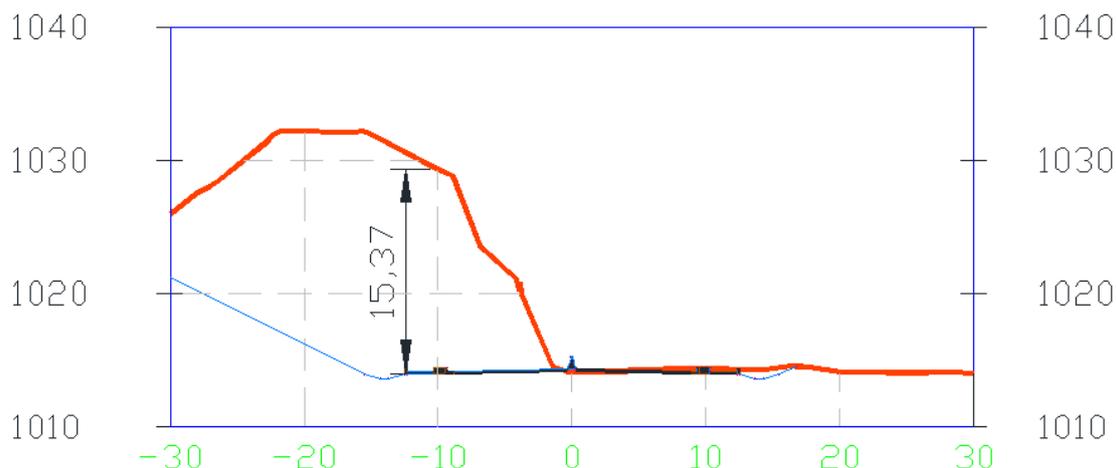


Figura 2.13: Perfil transversal en progresiva 1+420.

A las observaciones anteriores, es necesario tomar en consideración la posibilidad de presencia en los materiales componentes del tramo de materiales yesíferos anhidros, los cuales, ante esta reducción tensional pueden derivar en fenómenos de expansión por hidratación progresiva.

2.5 ANTECEDENTES GENERALES DE LA GEOTECNIA DEL FENÓMENO.

En este nivel inicial de desarrollo de los estudios, se ha pretendido con este informe la realización de algunas especulaciones generales en relación con el comportamiento de deterioro observado.

Se ha apreciado con los fenómenos evaluados muestran características típicas de procesos de expansión. Este fenómeno es analizado en sus conceptos generales a continuación.

Comentarios derivados de la bibliografía recolectada.

2.5.1 Características de la expansión

Se ha propuesto en párrafos anteriores que una fracción importante de la expansión puede ser atribuida a procesos de liberación de tensiones en un macizo rocoso.

Los elementos característicos de esta explicación han sido tomados de Butscher, et al, (2016)⁴.

Este tipo de fenómeno ha sido observado en varias obras de infraestructura por lo que se puede hipotetizar sobre las posibles causas que la generan.

La expansión es un conjunto de mecanismos que están relacionados con la hidratación de los terrenos. Algunos suelos arcillosos se expanden debido a la incorporación de

⁴ Butscher, C., Mutschler, T., Blum, P., 2016. Swelling of clay-sulfate rocks: a review of processes and controls. Rock Mech. Rock. Eng. 49, 1533–1549.

agua en su estructura molecular. También existen casos donde hay un cambio mineralógico debido a la introducción de agua en algunos minerales. El más conocido es el cambio de anhidrita a yeso.

Para encontrar soluciones de ingeniería para el problema de expansión, se deben estudiar las relaciones tiempo-tensión-deformación para cada caso en particular debido a que las magnitudes varían de acuerdo a la composición real de los terrenos. Los factores que influyen están controlados por procesos hidráulicos, químicos y mecánicos acoplados que difícilmente pueden ser reflejados por una ley general de expansión.

2.5.2 Procesos generales de expansión de rocas

La expansión de las rocas puede implicar tanto "expansión de arcillas" como "expansión de sulfatos", esto se muestra en la Figura 2.13.

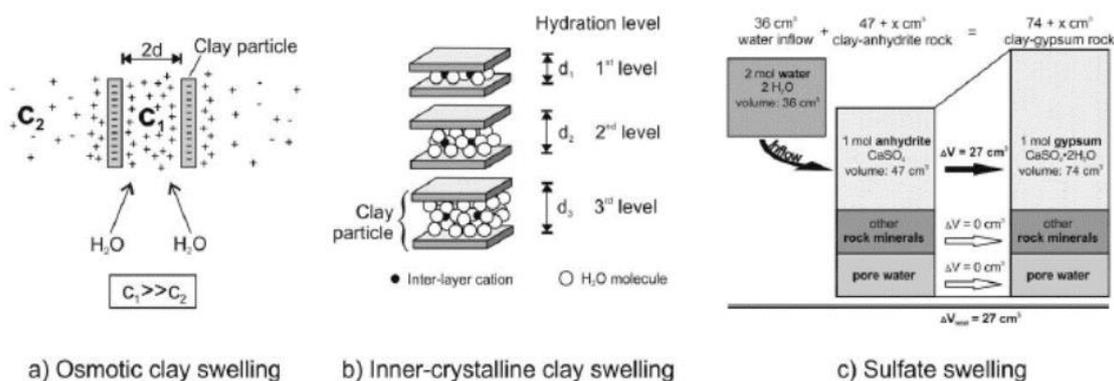


Fig. 1 Swelling mechanisms. a): Osmotic clay swelling (after Madsen and Müller-Vonmoos 1989). b) Inner-crystalline clay swelling (after Krähenbühl et al. 1987). c) Sulfate swelling (from Butscher et al. 2011a)

Figura 2.14: Expansión de arcillas y sulfatos.

La expansión de la arcilla resulta como consecuencia a la entrada de agua osmótica entre las superficies de minerales arcillosos vecinos, aumentando la distancia entre ellos. La entrada de agua osmótica es impulsada por diferencias de concentración cerca de las superficies de arcilla y en el agua porosa (expansión osmótica).

Además, la expansión de la arcilla puede resultar de la hidratación de los minerales de arcilla, lo que significa que el agua se incorpora en la red cristalina entre las capas de silicato de los minerales de arcilla (expansión inter-cristalina). Los minerales de arcilla que tienen un gran potencial de expansión inter-cristalina incluyen esmectitas, tales como montmorillonita y corrensitita.

De forma similar a la expansión de la arcilla inter-cristalina, la expansión de sulfatos es causada por la hidratación de sulfatos ($CaSO_4 + 2 H_2O = CaSO_4 \cdot 2 H_2O$). Esta transformación de anhidrita en yeso no tiene lugar directamente, sino indirectamente vía disolución de anhidrita y precipitación de yeso.

En un sistema abierto, es decir, cuando se añade agua de fuera del sistema a anhidrita, la reacción va acompañada de un aumento de volumen del 61%. Este aumento de volumen puede calcularse a partir del equilibrio de los volúmenes molares de anhidrita y yeso. Debe tenerse en cuenta que el aumento de volumen de la roca total (arcilla y sulfato) es menor, ya que sólo una parte de la roca consiste en minerales sulfatados (véase Figura 2.13).

Si se evita la deformación volumétrica, se desarrollan considerables presiones de expansión. Las presiones de expansión documentadas de las rocas arcillosas anhidritas muestran una gran variación. Las presiones máximas de hinchado oscilan entre 1,7 MPa y 16 MPa.

Se puede reconocer una diferencia entre las mediciones in situ y de laboratorio: mientras que las presiones de hinchamiento máximo in situ apenas superan los 5 MPa en algunas formaciones, las pruebas de laboratorio revelaron presiones de hinchazón de hasta 16 MPa. La conclusión de que las presiones de hinchamiento en el campo siguen siendo inferiores a las medidas en el laboratorio, sin embargo, es precaria, porque las presiones de hinchazón a largo plazo en el campo son en su mayoría desconocidas.

2.5.3 Controles geológicos

Los fenómenos de hinchamiento están directamente relacionados con ciertas formaciones geológicas.

Una explicación de la relación entre la posición estratigráfica y la expansión está dada por la composición mineralógica típica de las unidades estratigráficas. Sólo las formaciones que contienen arcilla y anhidrita están sujetas a un hinchamiento. También la textura de la roca puede ser importante. Debido a la mayor superficie de cristal que puede ponerse en contacto con el agua, la anhidrita finamente dispersa tiene un mayor potencial de hinchamiento que las vetas y nódulos de anhidrita; y los lechos masivos de anhidrita apenas se hinchan.

La configuración de las unidades geológicas también determina la distribución de las propiedades hidráulicas en el subsuelo y, por lo tanto, controla el acceso del agua a las rocas expandibles. Las fallas pueden afectar aún más las rutas de flujo, ya que pueden contener zonas altamente fracturadas como rutas preferenciales para el flujo de agua subterránea.

2.5.4 Controles mineralógicos

El potencial de hinchamiento de la anhidrita pura depende del tamaño de los granos minerales de la anhidrita y, por tanto, de la capa de roca anterior. Sin embargo, no está claro hasta qué punto los resultados obtenidos de los ensayos de hinchamiento de polvo de anhidrita pueden transferirse al comportamiento de hinchamiento de las rocas de arcilla-sulfato.

Es una observación general que las capas masivas de anhidrita pura (sin arcilla presente) no desarrollan hinchazón considerable. Esto se explica con el área relativamente pequeña de la anhidrita casi impermeable que puede estar expuesta al agua, permitiendo el acceso al agua sólo en la superficie y en fisuras. Un proceso adicional que dificulta la hinchazón de la anhidrita masiva es la formación de un recubrimiento protector de yeso de la anhidrita de reacción a yeso, evitando una transformación adicional.

El papel de la hinchazón de la arcilla en las rocas de arcilla-sulfato aún no se entiende completamente. Se ha observado que las rocas de arcilla-sulfato desarrollan presiones de hinchamiento entre 2 y 10 veces más altas que las rocas de arcilla puras.

Se le asigna un papel importante de la expansión de la arcilla en el hinchamiento de las rocas arcillosas-sulfatada. El potencial de hinchamiento de las rocas arcillosas-sulfatadas depende del contenido de arcilla de la roca. Mientras que las rocas anhidritas puras no se hinchan, el potencial de hinchamiento de las rocas de arcilla-sulfato aumenta con el contenido de arcilla.

Sólo con un contenido de arcilla superior al 15%, el potencial de hinchamiento disminuye de nuevo. El aumento del potencial de hinchamiento con el contenido de arcilla se explica por el acceso limitado al agua a la anhidrita muy baja permeable. En contraste con la anhidrita, los minerales arcillosos permiten el acceso al agua por procesos osmóticos. Este acceso al agua permite la hinchazón de la arcilla, acompañada por la desintegración de la roca. Como resultado de la desintegración de la roca, el agua puede acceder a la anhidrita, dando lugar a la hinchazón de la anhidrita. Esta interpretación significa que la hinchazón de la arcilla es un requisito previo para la hinchazón de la anhidrita. La disminución del potencial de hinchamiento a un mayor contenido de arcilla se explica por un menor contenido de anhidrita que viene junto con un alto contenido de arcilla.

Teniendo en cuenta el mayor potencial de hinchamiento de la anhidrita en comparación con la arcilla, y el hecho de que un mayor contenido de arcilla reduce la rigidez de la roca, la disminución del potencial de hinchamiento a alto contenido de arcilla es plausible.

Las hipótesis se pueden resumir de la siguiente manera:

1. La expansión de la arcilla, precede a la expansión del sulfato, desintegra la roca y crea caminos de agua a la anhidrita.
2. Los minerales de arcilla entregan agua (agua cristalina o agua unida / adsorbida) a la anhidrita.
3. Las capas de arcilla actúan como "acuífero micro" porque son más permeables que las capas de anhidrita pura.
4. Los minerales arcillosos adsorben el agua, dificultando la circulación del agua y permitiendo un aumento de las concentraciones hasta alcanzar la saturación de yeso.
5. Los minerales de arcilla absorben agua y, al hacerlo, aumentan las concentraciones de sulfato en el agua de poro restante hasta alcanzar la saturación de yeso.
6. Los minerales de arcilla actúan como catalizadores químicos.

2.5.5 Controles químicos

Se ha demostrado que la transformación de la anhidrita en yeso no tiene lugar directamente, sino indirectamente a través de la disolución de anhidrita y la precipitación de yeso. Las condiciones que controlan la disolución y la precipitación de los minerales sulfatados, por supuesto, dependen fuertemente de la geoquímica del agua porosa.

El análisis combinado de las condiciones de presión y la geoquímica del agua porosa permitiría evaluar si se cumplen las condiciones para disolver la anhidrita y, al mismo tiempo, precipitar el yeso como requisito previo para la hinchazón de las rocas. Tal análisis también podría indicar las aguas de formación que son críticas con respecto a la hinchazón de las rocas, si entran en rocas de arcilla-sulfato después de cambios hidráulicos inducidos bajo condiciones de temperatura y presión dadas.

Algunos modelos conceptuales de hinchamiento están basados en el proceso geoquímico del crecimiento del cristal de yeso en las fracturas. Debido a que la anhidrita es más soluble que el yeso a las temperaturas típicas del agua subterránea, el agua porosa en contacto con la anhidrita disuelve la anhidrita hasta que se sobresatura con respecto al yeso. Como resultado, el yeso precipita. La precipitación se facilita cuando se dispone de espacios abiertos, como fracturas (abiertas).

2.5.6 Controles hidráulicos

El flujo de agua subterránea en las rocas de arcilla-sulfato es una combinación de flujo a lo largo de discontinuidades (planos de lecho, fracturas, juntas) y flujo dentro de la matriz de roca porosa entre las discontinuidades. Así, bajo condiciones naturales, las rocas de arcilla-sulfato pueden encontrarse inicialmente "secas" debido a la baja permeabilidad de la roca (conductividad hidráulica del orden de $5E-14$ m/s).

Por lo tanto, los procesos hidrogeológicos deben desempeñar un papel dominante en el hinchamiento de las rocas de arcilla-sulfato

Una ley de hinchamiento que establezca una relación de presión-tiempo para las rocas de arcilla-sulfato permitiría predicciones sobre el comportamiento mecánico de la roca expandida. Para las rocas de arcilla puras, existe una relación lineal entre las presiones de expansión y el logaritmo de la presión, dicha relación se ilustra en la Figura 2.14.

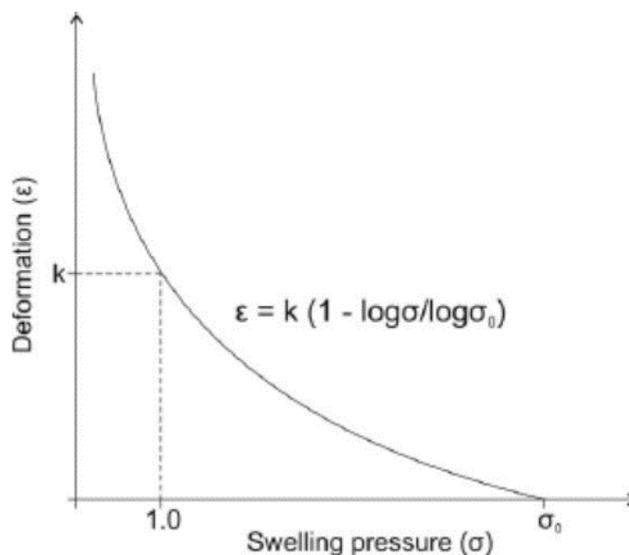


Figura 2.15: Relación lineal entre presión de expansión y logaritmo de presión.

2.5.7 Procesos acoplados

La interacción física entre procesos hidráulicos y mecánicos se conoce como acoplamiento hidro-mecánico (HM). Los procesos acoplados a HM se complican aún más por los procesos químicos y los efectos de la temperatura. Para entender los procesos de hinchamiento de manera integral, el acoplamiento de procesos hidráulicos, mecánicos y químicos (HMC) debe ser considerado.

2.5 INTERPRETACIÓN PRELIMINAR DEL PROBLEMA

En función de la información analizada en este Informe Inicial se ha efectuado una interpretación expeditiva de los potenciales factores que determinan el comportamiento observado. Estos elementos permiten fijar la línea de acción para los trabajos futuros en el marco del presente estudio. Los aspectos dominantes a consideración son los siguientes:

- Un comportamiento de *alta sensibilidad del cimiento de la calzada* aplicable especialmente en los sectores en los cuales la trazada se localiza en sectores de excavación.
- Se han registrado fenómenos de expansividad en materiales que tiene algún nivel de composición arcillosa. Estos fenómenos pueden verse incrementados en la medida en que la matriz de la formación presenta componentes yesíferos. En este punto, los antecedentes relavados muestran que las expansiones generadas por estos componentes ocurren con una velocidad de evolución sensiblemente inferior a la que generan los componentes arcillosos.
- El material de la subrasante se encuentra afectado por variaciones del contenido de humedad a lo largo del año, las cuales no pueden ser atenuadas por la superestructura vial colocada. En este punto es de interés considerar que gran parte de los fenómenos de inestabilidad se han observado en sectores de desmonte de la traza, por lo que el fenómeno de variación volumétrica podría estar afectando a parte de los componentes del terreno natural.
- *Deficiencia en la conformación estructural vial superior*, respecto de la original previsión de diseño. Esta situación puede motivarse por baja calidad local en la disposición de los materiales, o condiciones localmente de mayor “debilidad” de la subrasante respecto de la media de diseño originalmente considerada.

2.6 CONTINUIDAD DE LOS TRABAJOS

La continuidad propuesta para los estudios, en función de los análisis efectuados hasta el momento, mantienen los lineamientos originalmente propuestos. Al respecto, se prevé:

- Ejecución de ensayos mecánicos de control de expansión y presión de hinchamiento para muestras inalteradas de la formación rocosa sobre la que se localiza la obra.

- Ejecución de ensayos mecánicos de control de expansión y presión de hinchamiento sobre muestras remoldeadas del material local, recompactadas a la condición de colocación en obra.
- Reconocimiento de la composición mineralógica de los materiales obtenidos como muestras representativas del tramo.
- Formulación de modelos de representación del potencial comportamiento mecánico de los fenómenos observados.
- Propuestas de acción a corto y mediano plazo sobre los sectores con mayor nivel de deterioro. Formulación de acciones de control de los resultados obtenidos para validación de las hipótesis formuladas y/o revisión de las acciones de mitigación propuestas.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS

CAPÍTULO 3 | DESCRIPCIÓN DE ENSAYOS REALIZADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente Capítulo se describen y explican los ensayos realizados en el Laboratorio de Geotecnia, durante los meses de octubre 2017 a febrero 2018. Las tareas desarrolladas corresponden a ensayos de expansión y consolidación en muestras inalteradas y recompactadas, y ensayos de identificación y caracterización, entre los que se cuentan: determinación de la humedad natural, límites de Atterberg, lavado por tamiz N° 200, método del hidrómetro y determinación de la gravedad específica. El objetivo de los ensayos realizados es determinar el porcentaje de hinchamiento de las muestras de suelo, presión de expansión y dar una clasificación del tipo de suelo.

3.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL

3.2.1 Introducción

Se describe el ensayo para la determinación del contenido de humedad en suelos, según norma ASTM D 2216-98.

3.2.2 Concepto

Se denomina humedad del suelo a la relación, expresada como porcentaje, entre el peso del agua de una masa de suelo y el peso del suelo seco.

$$W\% = \frac{W_w}{W_d} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde W_w es el peso del agua y W_d el peso del suelo seco.

Para los fines prácticos, es la determinación del peso del agua extraída de un suelo por secado a estufa a una temperatura constante de 110 ± 5 °C, refiriéndola al peso del suelo remanente luego del secado.

3.2.3 Procedimiento

1. Se toma un pesafiltro vacío de tamaño adecuado y se lo pesa, W_c .
2. Se agrega el suelo en el pesafiltro y se lo pesa, W_1 .
3. Se coloca el pesafiltro en estufa hasta obtener peso constante.
4. Se saca de la estufa el pesafiltro con el suelo seco y se lo pesa, obteniéndose W_2 .

3.2.4 Cálculos

$$\text{Peso del agua: } W_w = W_1 - W_2 \quad (2)$$

$$\text{Peso del suelo seco: } W_d = W_2 - W_c \quad (3)$$

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{W_w}{W_d} \times 100 = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \quad (4)$$

3.3 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

3.3.1 Introducción

Se describe el ensayo para la determinación del límite líquido en suelos, según norma ASTM D 4318-00.

3.3.2 Concepto

Límite líquido es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico, y está a punto de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso. Recordar que plasticidad es la propiedad de un suelo por la cual se deforma rápidamente, sin rebote elástico, sin variar de volumen, desmoronarse ni agrietarse.

Es una medida de la resistencia al corte de un suelo para un determinado contenido de humedad. Pero el objetivo principal del ensayo, es poder identificar y clasificar los suelos.

Se propuso que el límite líquido se definiera arbitrariamente como el contenido de humedad al cual una masa de suelo húmedo colocada en un recipiente en forma de cazuela de bronce, separada en dos por la acción de una herramienta para hacer la ranura patrón, y dejada caer desde una altura de 1 cm, sufra después de dejarla caer 25 veces un cierre de la ranura en una longitud de 12,7 mm.

3.3.3 Procedimiento

1. Pulverizar una cantidad suficiente de suelo secado al aire. Se debe asegurar, mediante el uso del mortero, la destrucción de los grumos presentes.
2. Tamizar a través del tamiz N° 40, a efectos de obtener aproximadamente 200 gramos del suelo pasante.
3. Colocar el suelo en un recipiente de porcelana, añadir una pequeña cantidad de agua y mezclar cuidadosamente hasta obtener un color uniforme. Una vez que la masa es homogénea se coloca parte de ella en la cazuela del aparato de Casagrande.
4. Se debe emparejar la superficie de la pasta de suelo con una espátula, y mediante el uso de la herramienta ranuradora, cortar una ranura clara, recata, que separe completamente la masa de suelo en dos partes. La mayor profundidad del suelo en la pasta deberá ser aproximadamente igual a la altura de la cabeza de la herramienta patrón.
5. Se monta la cazuela en el aparato y se da vuelta la manivela a razón de dos golpes por segundo, hasta que las paredes del surco se unan en su base en una longitud de media pulgada (12 mm).
6. Si el número de golpes es mayor de 40 o menor de 10 se desecha la muestra y se añade suelo seco o agua a la masa y se comienza con el punto 3 otra vez.
7. Cuando el número de golpes es válido, se toma una muestra de suelo en la zona en donde se cerró la ranura para determinar el contenido de humedad.
8. Cuando se haya tomado al menos una muestra de más de 25 golpes y otra con menos de 25 golpes se da por terminado el ensayo. No deben descartarse otras determinaciones intermedias que hubieran sido necesarias realizar.
9. Después de dejar las muestras 24 horas secando, se volverán a pesar, se determinarán sus pesos secos y se calcularán sus humedades.

3.3.4 Cálculos

Se calcula la humedad como: $H\% = \frac{P_{fsh} - P_{fss}}{P_{fss} - P_f} \cdot 100$ (5)

Siendo P_{fsh} el peso del pesafiltro con suelo húmedo, P_{fss} el peso del pesafiltro con suelo seco y P_f el peso del pesafiltro.

Luego el límite líquido es:

$$LL = H\% \cdot \left(\frac{N}{25}\right)^{0,121} \quad (6)$$

Donde N es el número de golpes.

Para una misma muestra de suelo, el límite líquido se debe calcular como un promedio del límite líquido para cada número de golpes.

3.4 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO

3.4.1 Introducción

Se describe el ensayo para la determinación del límite plástico en suelos, según norma ASTM D 4318-00.

3.4.2 Concepto

El límite plástico se ha definido arbitrariamente como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro o bastoncito se rompe o resquebraja, cuando se enrolla a un diámetro de 3 mm o aproximadamente 3 mm.

3.4.3 Procedimiento

1. Tomar 20 g aproximadamente de suelo (preferiblemente de la masa sobrante del límite líquido).
2. Amasar hasta que se pueda formar una bola o elipsoide de suelo sin que se pegue demasiado a los dedos.
3. Rolar el suelo con los dedos sobre una placa de vidrio o sobre un pedazo de papel, colocado a su vez sobre una superficie lisa, con presión suficiente para modelarlo en forma de cilindro o hilo de diámetro uniforme.
4. Si al llegar, el cilindro, al diámetro de unos 3 mm no se ha agrietado, se vuelve a hacer una bola de suelo y se repite el proceso hasta que se desmorone o agriete, con el diámetro requerido.
Los suelos de muy baja plasticidad son una excepción, debido a la dificultad de construir la bola inicial o posterior.
5. Colocar los cilindros así obtenidos en un pesafiltro, continuando el procedimiento hasta obtener una cantidad suficiente de bastoncitos (10 g). El pesafiltro se mantendrá cerrado mientras se preparan los cilindritos, a fin de conservar la humedad de la muestra.
6. Llevar el pesafiltro destapado a estufa y dejar secar el suelo durante 24 horas y luego pesar.

3.4.4 Cálculos

Se calcula el límite plástico como:

$$LP = \frac{P_{fsh} - P_{fss}}{P_{fss} - P_f} \cdot 100 \quad (7)$$

Siendo P_{fsh} el peso del pesafiltro con suelo húmedo, P_{fss} el peso del pesafiltro con suelo seco y P_f el peso del pesafiltro.

Luego el índice de plasticidad es la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico:

$$IP = LL - LP \quad (8)$$

3.5 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

3.5.1 Introducción

Se describe el ensayo para la determinación del porcentaje retenido y pasante del tamiz IRAM N° 200, según norma ASTM D1140-00.

3.5.2 Concepto

El análisis granulométrico es una manera de determinar las proporciones (todas son relativas al total) de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa dada.

3.5.3 Procedimiento

El tamizado consiste en pasar una cantidad de suelo a través de una serie de tamices de abertura de malla progresivamente más pequeña desde arriba hacia el fondo. La cantidad de suelo retenido en un tamiz dado de la serie se denomina: peso retenido en el tamiz N° (n). El porcentaje referido al peso total de suelo, será igual a la relación entre la suma de los retenidos por él y los tamices de mayor abertura, dividido por el peso total.

$$\% \text{ retenido } TN^{\circ}(n) = \frac{\text{Peso retenido en tamices de malla superior a } (n)}{\text{Peso total}} \cdot 100 \quad (9)$$

$$\% \text{ pasante} = 100 - \% \text{ retenido } TN^{\circ}(n) \quad (10)$$

$$\% \text{ de tamaño inferior} = \frac{\text{Peso de partículas de diám.inferior}}{\text{Peso Total}} \cdot 100 \quad (11)$$

En el caso del tamiz N° 200, se debe lavar el suelo en el tamiz hasta que el agua salga limpia. Verter cuidadosamente el suelo retenido, con ayuda de agua, en una cápsula y permitirle sedimentar por un período de tiempo suficiente hasta lograr que el agua en la parte superior sea transparente. Retirar esta agua y colocar la cápsula con el suelo en la estufa. Al día siguiente pesar el residuo y esto será el suelo retenido por el tamiz N° 200.

3.6 MÉTODO DEL HIDRÓMETRO

3.6.1 Introducción

Se describe el ensayo método del hidrómetro en suelos, según norma ASTM D 422-63.

3.6.2 Concepto

El análisis de hidrómetro es un método ampliamente utilizado para obtener una estimación de la distribución granulométrica de suelos cuyas partículas se encuentran desde el tamiz N° 200 (0,075 mm) hasta alrededor de 0,001 mm. El principal objetivo del análisis de hidrómetro es obtener el porcentaje de arcilla (porcentaje más fino que 0,002 mm). El problema a resolver en este método es: calcular diámetro de las partículas y porcentaje de partículas inferiores a los diferentes diámetros.

3.6.2.1 Cálculo de los diámetros

El análisis de hidrómetro utiliza la relación entre la velocidad 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, expresado en la Ley de Stokes como:

$$v = \frac{2(\gamma_s - \gamma_w)}{9\eta} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (12)$$

Donde v es la velocidad de caída de la esfera, γ_s el peso específico de la esfera, γ_w el peso específico del fluido, η la viscosidad absoluta o dinámica del fluido, D el diámetro de la esfera.

Al Resolver la ecuación (11) para D utilizando el peso específico del agua, se obtiene:

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot v}{\gamma_s - \gamma_w}} \quad (13)$$

El rango de los diámetros D de partículas de suelo para los cuales esta ecuación es válida, es aproximadamente: $0,0002 \text{ mm} \leq D \leq 0,2 \text{ mm}$

Pues los granos mayores causan excesiva turbulencia en el fluido y los granos muy pequeños están sujetos a movimientos de tipo Browniano. Como el peso específico del agua y su viscosidad varían con la temperatura, es evidente que esta variable también debe ser considerada.

Al mezclar una cantidad de suelo con agua y un pequeño contenido de un agente dispersante hasta formar una solución de 1000 cm^3 , se obtiene una solución con una gravedad específica ligeramente mayor que 1 (ya que G del agua destilada es 1 a $4 \text{ }^\circ\text{C}$). El agente dispersante añade a la solución para neutralizar las cargas sobre las partículas más pequeñas de suelo, que a menudo tienen carga negativa.

El hexa-metafosfato de sodio, también llamado metafosfato (NaPO_3), y el silicato de sodio (Na_3SiO_3), son dos materiales usados muy a menudo como agentes dispersantes para neutralizar la carga eléctrica de las partículas de suelo. Una cantidad de 125 cm^3 de solución al 4% de hexa-metafosfato de sodio en los 1000 cm^3 de suspensión de agua-suelo se han considerado en general adecuados. Si la suspensión agua-suelo se aclara en un tiempo muy corto —en 2 o 3 horas por ejemplo— la cantidad de agente dispersante deberá ser mayor o utilizarse un tipo diferente, pues un suelo con cantidad apreciable de partículas de tamaño de arcillas permanecería muy turbio por varios días.

El hidrómetro usado más comúnmente es el tipo 152H (según ASTM) y está calibrado para leer: gramos 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. La lectura por consiguiente 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 (ver Figura 3.1). Todas las partículas de mayor tamaño que aquellas que se encuentran aún en suspensión en la zona entre el centro de volumen del bulbo y la superficie del agua habrán caído por debajo de la profundidad del centro de volumen del hidrómetro. Además es obvio que como el hidrómetro tiene un peso constante, a medida que disminuye la gravedad específica de la suspensión, el hidrómetro se hundirá más dentro de la suspensión aumentando así la distancia entre la superficie del agua y el centro de volumen del bulbo (distancia L).

Como L representa la distancia de caída de las partículas en un intervalo de tiempo dado t, y la velocidad se puede definir en la ecuación (12) como la distancia dividida por el tiempo, es evidente que la velocidad de caída de las partículas es:

$$v = \frac{L}{t} \quad (14)$$

Por consiguiente es necesario encontrar la profundidad L correspondiente a algún tiempo transcurrido t de forma que se pueda determinar la velocidad necesaria para utilizar en la ecuación de Stokes. Para encontrar L es necesario medir la distancia L_2 y varios valores de la distancia variable L_1 (ver Figura 3.1) utilizando una regla graduada. A continuación se puede calcular la longitud L, de la siguiente forma:

$$L = L_1 + \frac{1}{2}L_2 \quad (15)$$

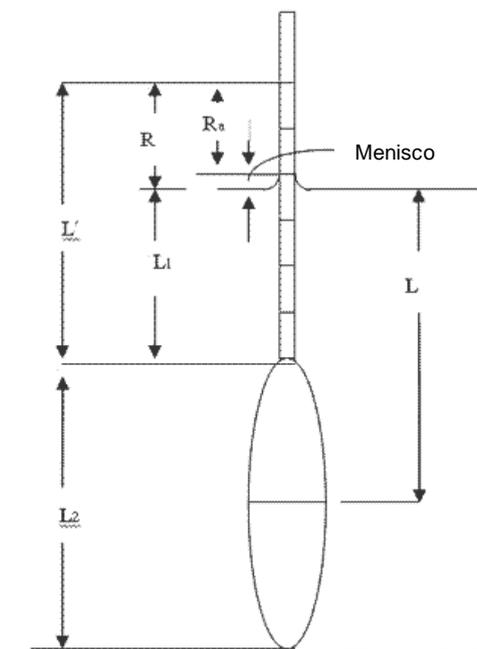


Figura 3.1: Hidrómetro 152H.

Como el hidrómetro 152H tiene dimensiones razonablemente estandarizadas, los valores de L pueden obtenerse una sola vez y de tabla se tiene el valor de la profundidad efectiva.

La lectura del hidrómetro debe ser corregida para su utilización en la ecuación (14) por el error de menisco (en una suspensión turbia, es necesario leer en la parte superior del menisco). La razón para sólo tener en cuenta esta corrección en la determinación de la velocidad de caída consiste, en que, la lectura real de la distancia L, que las partículas han recorrido, es independiente de la temperatura, gravedad específica de la solución, o cualquier otro tipo de variable.

Cuando se trata de realizar cálculos, la ecuación (12) se reescribe utilizando L en cm y t en minutos para obtener D en mm como sigue:

$$D = K \cdot \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (16)$$

Como todas las variables, menos L/t son independientes del problema excepto por la temperatura de la suspensión y la gravedad específica de las partículas, es posible evaluar $K = f(T, G_s)$ de una sola vez.

3.6.2.2 Cálculo del porcentaje de partículas más finas que un tamaño dado

El porcentaje más fino o tamaño inferior a diámetro dado, se relaciona directamente con la lectura del hidrómetro de tipo 152H, ya que la lectura proporciona los gramos de suelo que aún se encuentran en suspensión, si la gravedad específica del suelo es de 2,65 g/cm³ y el agua se encuentra a una densidad de 1,00 g/cm³. El agente dispersante tendrá algún efecto sobre el agua y, adicionalmente la temperatura del ensayo deberá ser cercana a 20°C y la G_s de los granos de suelo seguramente no será 2,65; por consiguiente se necesita corregir la lectura real del hidrómetro para obtener la "lectura" correcta de los gramos de suelo todavía en suspensión en cualquier instante del ensayo.

- a. Corrección de cero: impurezas del agua dispersante (C_0).
El efecto de las impurezas en el agua y del agente dispersor sobre las lecturas del hidrómetro se puede 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 y así 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 cilindro 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 como el que contiene la suspensión de agua-suelo.
- b. Corrección por temperatura: cuando es mayor o menor que 20°C (C_T).
Si la temperatura es demasiado alta en ambos cilindros, la densidad del agua será igualmente menor y el hundimiento del hidrómetro será el mismo por ese concepto. Si ambos cilindros tienen la misma temperatura el efecto será igual, por consiguiente, es posible obtener de tabla una corrección única de temperatura para utilizar en la suspensión agua-suelo.

La lectura corregida del hidrómetro para granos de suelo en suspensión se calcula como:

$$R_C = R_{real} \pm C_0 \pm C_T \quad (17)$$

c. Corrección por gravedad específica (a).

Una vez corregida la lectura del hidrómetro, el porcentaje de material más fino puede calcularse por simple proporción (si $G_s = 2,65$) como:

$$\% \text{ de tamaño inferior} = \frac{\text{Peso de partículas de diám.inferior}}{\text{Peso Total}} \cdot 100 = \frac{R_c}{W_d} \cdot 100 \quad (18)$$

Donde R_c son los gramos de suelo en suspensión en un tiempo t dado (lectura corregida según ecuación 17), y W_d el peso original de suelo colocado en la suspensión.

Si G_s no es igual a 2,65 es posible obtener de tabla una constante a que tenga en cuenta la distinta gravedad específica, de modo que 18, cuando $G_s \neq 2,65$, se calcula como:

$$\% \text{ de tamaño inferior} = \frac{R_c \cdot a}{W_d} \cdot 100 \quad (19)$$

3.6.3 Procedimiento

Se utiliza el siguiente procedimiento, siempre que la muestra de suelo tenga entre 80 y 90% del material menos que el diámetro correspondiente al tamiz N° 200.

1. Tomar exactamente 50 g de suelo y mezclarlo con 125 ml de solución al 4% de NaPO_3 . La solución debe ser siempre fresca y en ningún caso haber sido preparada con más de un mes de anterioridad.
2. Dejar asentar la muestra de suelo cerca de una hora. Transferir la mezcla al vaso de una máquina batidora y añadir agua común hasta llenar 2/3 del vaso. Mezclarlo entre 3 y 5 minutos.
3. Transferir el contenido del vaso de la batidora a un cilindro de sedimentación. Añadir agua común hasta completar la marca de 1000 ml del cilindro. Preparar el cilindro patrón con agua común y 125 ml de la solución de dispersante al 4%. Verificar que la temperatura del agua común sea igual en ambos cilindros.
4. Tomar un tapón de caucho, o usar la palma de la mano, para tapar la boca del cilindro donde se encuentra la suspensión de suelo y agitarla cuidadosamente por cerca de un minuto. Poner sobre la mesa el cilindro, remover el tapón, inmediatamente insertar el hidrómetro y tomar lecturas con los siguientes intervalos de tiempo:
 - 1, 2, 3 y 4 minutos.
 - Tomar igualmente lectura del termómetro.

Tomar una lectura para corrección de menisco en el hidrómetro dentro del cilindro de control.

Es usual dejar el hidrómetro dentro de la solución de suelo durante las primeras mediciones, y luego removerlo y volverlo a colocar para cada una de las siguientes dos mediciones. Sin embargo, el error que se introduce al dejar el hidrómetro metido entre la suspensión durante las cuatro mediciones es mínimo. Es necesario evitar, en lo posible, la agitación de la suspensión cuando se coloca el hidrómetro dentro de ella, colocándolo tan suavemente como para requerir alrededor de 10 segundos en realizar dicha operación.

5. Volver a agitar la suspensión y volver a tomar otra serie de medidas a 1, 2, 3 y 4 minutos. Repetir tantas veces como se necesite, con el fin de obtener dos juegos de mediciones que concuerden a la unidad, en cada una de las cuatro mediciones.

6. Una vez que se haya logrado acuerdo en las medidas (hasta la unidad), se deben tomar medidas adicionales a los siguientes intervalos de tiempo: 8,15, 30, 60 minutos, y 2, 4, 8, 16, 32, 64, 96 horas.
Registrar la temperatura de la suspensión suelo-agua con una precisión de 1°C para cada medición del hidrómetro. Si no se han dado instrucciones especiales para la terminación, el experimento debe continuarse hasta que el tamaño de las partículas D que se encuentran en suspensión sea del orden de 0,001 mm.
7. Una vez concluidas las lecturas hidrométricas, todo el contenido de la probeta se lava por el tamiz N° 200 a fin de separar por tamaño las partículas retenidas por este tamiz. Esta operación se ejecuta utilizando agua común hasta tanto el agua que pasa a través del tamiz mantenga su transparencia.
8. Verter cuidadosamente el residuo, con ayuda de agua, en una cápsula y permitirle sedimentar por un período de tiempo suficiente hasta lograr que el agua en la parte superior sea transparente. Retirar esta agua y colocar la cápsula con el suelo en la estufa.
9. Al día siguiente pesar el residuo y tamizar por los tamices N° 40, 60, 100 y 200, determinando por pesadas la cantidad retenida en cada uno de ellos.

3.6.4 Cálculos

1. Cálculo de diámetro

Aplicar la corrección de menisco a las lecturas de hidrómetro y entrar en la tabla de profundidad efectiva L, según lectura original del hidrómetro, para obtener la misma. Si G_s es desconocido, suponer un valor razonable entre 2,68 y 2,74. Hacer una selección tal que impida interpolaciones innecesarias en cualquier suposición. Con G_s y la temperatura del ensayo para cualquier lectura del hidrómetro, se obtiene de tabla el valor correspondiente a K. Con los valores de K, L y el tiempo transcurrido t, para dichas lecturas, calcular los valores para D utilizando la ecuación:

$$D = K \cdot \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (20)$$

2. Cálculo de porcentajes.

Para calcular el porcentaje, la lectura real en el hidrómetro debe ser corregida de la siguiente manera:

$$R_C = R_{real} \pm C_O \pm C_T \quad (21)$$

Donde R_C es la lectura corregida, R_{real} es la lectura real, C_O es la corrección de cero y C_T es la corrección por temperatura.

Luego:

$$\% \text{ de tamaño inferior} = \frac{R_C \cdot a}{W_d} \cdot 100 \quad (22)$$

Donde a es el factor de corrección para el peso unitario de sólidos y W_d el peso del suelo seco.

3. Aplicar la ecuación (10) de modo:

$$\% \text{ de tamaño inferior } (x) = \frac{\text{Peso de partículas de diám.inferior}}{\text{Peso total}} \cdot 100 = \frac{\text{Peso total} - \text{Peso de partículas retenidas por el tamiz N}^\circ (n) \text{ y tamices sup.}}{\text{Peso total}} \cdot 100 \quad (23)$$

3.7 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA

3.7.1 Introducción

Se describe el ensayo para la determinación de la gravedad específica en suelos, según norma ASTM D 854-02.

3.7.2 Concepto

La gravedad específica es la relación entre el peso de un determinado volumen de partículas de suelo y el peso de un volumen igual de agua destilada a 4°C.

$$G_s = \frac{W_d/V}{W_w/V} = \frac{W_d}{W_w} \quad (24)$$

Siendo W_d peso del suelo seco, W_w peso del agua, y V volumen.

También se lo puede expresar como el peso unitario de los granos del suelo dividido por el peso unitario del agua destilada a 4°C.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_d}{V_s \gamma_w} \quad (25)$$

Siendo γ_s el peso unitario de las partículas y γ_w peso unitario del agua a 4°C.

Esta es una propiedad de las partículas de suelo y por lo tanto depende de la composición mineralógica. De modo que en las mediciones se excluye el aire y el agua que las rodea. Hay que tener en cuenta que es una expresión adimensional.

3.7.3 Procedimiento

El problema consiste en obtener el volumen de un peso conocido de granos de suelo y dividirlo por el peso del mismo volumen de agua destilada a 4°C.

El volumen de las partículas se conoce mediante la utilización de un recipiente aforado y del principio de Arquímedes, según el cual un cuerpo sumergido dentro de una masa de agua desplaza un volumen de agua igual al del cuerpo sumergido. Para que esto sea correcto es necesario que no quede aire atrapado entre los granos o disuelto en el agua.

Se siguen los siguientes pasos:

1. Se pesa un matraz aforado de 100 cm³, W_m .
2. Se toma suelo secado a estufa y se lo tamiza por el tamiz N° 10. Del pasante se separan 30 gramos aproximadamente, W_d .
3. Se introduce el suelo en el matraz y se lo pesa, obteniéndose $W_{md} = W_m + W_d$.
4. Se agrega agua destilada hasta cubrir el suelo. Se procede a desairarlo con la aplicación de vacío, mediante una bomba, durante unos 10 minutos o hasta que no se observen más burbujas de aire. En todo momento se debe cuidar que no haya pérdida de partículas por arrastre de la corriente producida por la bomba.
5. Seguidamente se agrega agua destilada hasta el enrase y se pesa, denominándose al valor W_{mdw} .
6. Se limpia el matraz y se enrasa con agua destilada. Su peso se lo llama W_{mw} .
7. Es necesario tomar la temperatura del agua (T) durante el ensayo.

3.7.4 Cálculos

El peso del suelo es igual a: $W_d = W_{md} - W_m$ (26)

El peso del volumen de agua a la temperatura T, que es desplazado por las partículas de suelo es: $W_{wt} = W_{mw} + W_d - W_{mwd}$ (27)

Como la gravedad específica se refiere a agua a temperatura de 4°C se debe realizar una corrección.

La gravedad específica del agua a la temperatura T será:

$$G_{wt} = \frac{\gamma_{wt}}{\gamma_w^{4^{\circ}C}} = \frac{W_{wt}/V}{W_w/V} = \frac{W_{wt}}{W_w^{4^{\circ}C}} \quad (28)$$

Entonces:

$$W_w = \frac{W_{wt}}{G_{wt}} \quad (29)$$

Los valores de la gravedad específica del agua a la temperatura T están tabulados y se obtienen en función de la temperatura T.

Entonces, la gravedad específica del suelo es:

$$G_s = \frac{W_d}{W_w} = \frac{W_d \cdot G_{wt}}{W_{wt}} \quad (30)$$

3.8 ENSAYO DE EXPANSIÓN

3.8.1 Introducción

Se describen los métodos de evaluación estándar para hinchamiento unidimensional o asentamiento potencial de suelos cohesivos según norma ASTM D 4546-03.

3.8.2 Alcance

Estos métodos cubren tres alternativas de métodos de laboratorio para determinar la magnitud de hinchamiento y/o asentamiento de suelos cohesivos relativamente inalterados o compactados.

Los métodos pueden ser usados para determinar:

- La magnitud de hinchamiento o asentamiento bajo presión vertical (axial) conocida
- La magnitud de la presión vertical necesaria para que no se produzca ningún cambio volumétrico en especímenes restringidos lateralmente, axialmente cargados.

3.8.3 Resumen de los métodos

Las siguientes tres alternativas del método requieren que una probeta de suelo esté restringida lateralmente y cargada axialmente en un consolidómetro sumergido en agua.

3.8.3.1 Método A

La probeta es inundada y se le permite expandir verticalmente bajo una presión de asiento (presión de al menos 1 kPa aplicada a través del plato de carga y piedra porosa sobre la probeta de suelo) hasta que la expansión primaria se haya completado. La probeta es cargada, luego de que se completó la expansión primaria, hasta que se obtiene la relación de vacíos/altura inicial.

3.8.3.2 Método B

Una presión vertical que excede la presión de asiento se aplica a la probeta antes del ingreso de agua al consolidómetro. La magnitud de la presión vertical normalmente es equivalente a la presión vertical de sobrecarga in situ o a la carga estructural. Se le agrega agua a la probeta. Esto puede resultar en expansión, expansión luego asentamiento, o asentamiento y luego expansión. La cantidad de expansión o asentamiento se mide a la presión aplicada después de que el movimiento es despreciable.

3.8.3.3 Método C

La probeta se mantiene a altura constante mediante ajustes en la presión vertical luego de que se la inunda con agua, para obtener la presión de expansión. Luego se debe realizar un ensayo de consolidación.

3.8.4 Significado y uso

El contenido de humedad y el porcentaje de humedad deben ser representativos del suelo in situ previo a la construcción. La selección del método, carga y secuencias de inundación deben simular, lo más cercano posible, cualquier secuencia de humedecimiento y secado y cambios en las condiciones de carga durante la construcción de la obra y después de realizada la misma.

La preparación de las probetas deben imitar las condiciones del suelo in situ o compactado en la obra lo mejor posible.

Estos métodos son aplicables en muestras inalteradas, muestras remoldeadas, o ambas, como sigue:

3.8.4.1 Método A

Este método mide:

- a. La expansión libre,
- b. Porcentaje de aumento de las presiones de confinamiento vertical hasta la presión de hinchamiento, y
- c. La presión de expansión.

3.8.4.2 Método B

Este método mide:

- a. El porcentaje de aumento o asentamiento para una presión vertical generalmente equivalente a la sobrecarga vertical in situ estimada y otra presión vertical hasta la presión de hinchamiento, y
- b. La presión de hinchamiento.

3.8.4.3 Método C

Este método mide:

- a. La presión de hinchamiento,
- b. Presión de preconsolidación, y
- c. Porcentaje de aumento o asentamiento dentro del rango de las presiones verticales aplicadas.

3.8.5 Procedimiento

1. Ensamblar el anillo con la probeta dentro del mismo y con anillos suplementarios, y piedras porosas en la parte superior e inferior del anillo.
2. Aplicar una presión de asiento, σ_{se} dé por lo menos 1 kPa (1 kg/cm²). Luego de 5 minutos de la aplicación de σ_{se} ajustar el flexímetro para la lectura inicial en cero.

3.8.5.1 Método A

Luego de tomada la lectura de la deformación inicial con la presión de asiento, se inunda la probeta y se toma lectura después de varios períodos de tiempo transcurridos. Las lecturas continúan hasta que se completa la expansión primaria. Luego de completada, se aplica una presión vertical de aproximadamente 5, 10, 20, 40, 80, etc., kPa, manteniendo constante cada presión. Mantener la presión hasta que la probeta recupere su relación de vacíos inicial. La duración de cada incremento de carga debe ser equivalente a una duración que asegure el 100% de la consolidación primaria.

3.8.5.2 Método B

Se aplica una presión vertical que exceda la presión de asiento luego de 5 minutos de aplicada la presión de asiento. La probeta se inunda luego de tomada la lectura de la deformación en intervalos de tiempo similares a los del método A, hasta que se completa la expansión primaria. Se continúa el ensayo como en el método A.

3.8.5.3 Método C

Se aplica una carga inicial σ_1 , equivalente a la presión vertical in situ o a la presión de expansión luego de 5 minutos de aplicada la presión de asiento. Se toma lectura de la deformación luego de 5 minutos de aplicar σ_1 , e inmediatamente se inunda la probeta con agua. Se aplican incrementos de carga vertical, los necesarios para impedir la expansión. Se carga la probeta según el método A, hasta que no haya más tendencia a expandirse. Los incrementos de carga deben ser suficientes para definir el máximo

punto de curvatura en la curva de consolidación y para determinar la pendiente del tramo virgen de la curva de compresión.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

CAPÍTULO 4 | RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados, descriptos en el Capítulo 3.

Las muestras para la ejecución de los ensayos fueron provistas por el Dr. Ing. Marcelo Zeballos, quien las obtuvo de pozos a cielo abierto y calicatas de escasa profundidad realizados a lo largo de la traza de la obra. Las muestras llegaron al Laboratorio de Geotecnia en condición inalterada, manteniendo su estructura y humedad original.

4.2 PUNTOS DE EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS

A continuación, en la Figura 4.1 se ilustra la ubicación de donde se obtuvieron las muestras de suelo en la Ruta Provincial 60.



Figura 4.1: Ubicación de la extracción de muestras.

En la Tabla 4.1 se indica la ubicación sobre la traza de donde se tomaron las muestras de suelo para ensayar. Se especifica el número de progresiva, costado y profundidad.

Tabla 4.1: Ubicación de la extracción de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	Progresiva	Costado	Profundidad
1	1400	Izquierdo (-)	0,50 m
3	1100	Derecho (+)	3,00 m
4	700	Derecho (+)	2,50 m
5	1100	Izquierdo (-)	0,60 m

4.3 CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL

En la Tabla 4.2 se presentan los contenidos de humedad natural determinados en las cuatro muestras inalteradas provenientes de la traza de la Ruta Provincial 14-60. El ensayo se realizó según norma ASTM D 2216-98.

Tabla 4.2: Contenido de humedad natural de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	Pf [gr]	Pfsh [gr]	Pfss [gr]	Humedad %
1	4,11	57,29	56,45	1,60%
3	4,13	59,37	57,62	3,27%
4	4,12	64,02	62,11	3,29%
5	4,07	56,57	55,40	2,28%

Referencias

Pf: peso pesafiltro

Pfsh: peso pesafiltro con suelo húmedo

Pfss: peso pesafiltro con suelo seco

4.4 LÍMITES DE ATTERBERG

En las Tablas 4.3 y 4.4 se presentan los valores de Límite Líquido y Límite Plástico determinados en las cuatro muestras inalteradas provenientes de la traza de la Ruta Provincial 14-60. El ensayo se realizó según norma ASTM D4318-00.

Tabla 4.3: Límite Líquido de la fracción pasante Tamiz IRAM N° 40 (0.425 mm) de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

	Muestra 1		Muestra 3		Muestra 4		Muestra 5	
Punto	1	2	1	2	1	2	1	2
N	33	13	38	17	30	18	30	21
Pf	3,17	3,12	4,18	3,15	3,30	2,40	3,25	2,51
Pfsh	20,72	20,92	25,58	20,25	20,90	22,20	25,27	25,36
Pfss	14,73	14,28	19,08	14,61	14,44	14,51	21,35	18,97
H%	51,82	59,50	43,62	49,21	57,99	63,50	21,66	38,82
L.L.	53,59	54,97	45,89	46,97	59,28	61,03	22,14	38,01
L.L. prom	54,28		46,43		60,15		30,08	

Referencias

N: número de golpes

H%: porcentaje de humedad

Pf: peso pesafiltro

L.L.: límite líquido

Pfsh: peso pesafiltro con suelo húmedo

L.L. prom: límite líquido promedio

Pfss: peso pesafiltro con suelo seco

Tabla 4.4: Límite Plástico de la fracción pasante Tamiz IRAM N° 40 (0.425 mm) de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	Pf [gr]	Pfsh [gr]	Pfss [gr]	L.P.
1	3,16	10,96	9,05	32,43
3	3,26	9,84	8,51	25,33
4	4,10	10,50	9,01	30,35
5	4,15	10,40	9,34	20,42

Referencias

Pf: peso pesafiltro

Pfsh: peso pesafiltro con suelo húmedo

Pfss: peso pesafiltro con suelo seco

L.P.: límite plástico

En la Tabla 4.5 se presentan los índices de plasticidad (IP) obtenidos.

Tabla 4.5: Índice de Plasticidad de la fracción pasante Tamiz IRAM N° 40 (0.425 mm) de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	L.L.	L.P.	IP
1	54,28	32,43	21,85
3	46,43	25,33	21,10
4	60,15	30,35	29,81
5	30,08	20,42	9,65

4.5 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

En la Tabla 4.6 se presentan los porcentajes de suelo retenido y pasante como resultado del lavado a través del tamiz IRAM N° 200 (0,075 mm), determinados en las cuatro muestras inalteradas provenientes de la traza de la Ruta Provincial 14-60. El ensayo se realizó según la norma ASTM D 1140-00.

Tabla 4.6: Porcentaje retenido y pasante por tamiz IRAM N° 200 de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	Pss [gr]	Retenido [gr]	Pasante [gr]	Retenido [%]	Pasante [%]
1	52,3	6,0	46,4	11,4%	88,6%
3	53,5	10,0	43,5	18,7%	81,3%
4	58,0	4,7	53,3	8,1%	91,9%
5	51,3	19,2	32,2	37,3%	62,7%

Referencia

Pss: peso suelo seco

4.6 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.) Y CLASIFICACIÓN SEGÚN H.R.B.

A partir de los límites de Atterberg y el análisis granulométrico se arribó a una clasificación para los suelos provenientes de la traza de la Ruta Provincial 14-60. En la Tabla 4.7 se muestra la clasificación obtenida para las cuatro muestras inalteradas.

Tabla 4.7: Clasificación de suelos según S.U.C.S y H.R.B. de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	Clasific. Unificada	H.R.B.	IG
1	CH	A-7-5	19,5
3	CL	A-7-6	16,6
4	CH	A-7-5	26,7
5	CL	A-4	5,3

En la Tabla 4.8 se presenta una breve descripción de cada muestra.

Tabla 4.8: Descripción de los tipos de suelo obtenidos para las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	Clasificación	Características
1	CH / A-7-5	Limo arcilloso de plasticidad media a elevada. Expansiva con un grado de litificación medio. Predominan en ellos la arcilla. Se deforman rápidamente frente a la acción de las cargas y tienen mucho rebote elástico. Posee altos cambios volumétricos al humedecerse y baja capacidad portante. No se recomienda su uso como subrasante.
3	CL / A-7-6	Limo arcilloso de plasticidad baja a media. Muy expansiva, medianamente litificada. Predominan en ellos la arcilla. Se deforman rápidamente frente a la acción de las cargas y tienen mucho rebote elástico. Posee altos cambios volumétricos al humedecerse y baja capacidad portante. No se recomienda su uso como subrasante.
4	CH / A-7-5	Limo arcilloso de plasticidad media a elevada. Muy expansiva con un grado de litificación medio. Predominan en ellos la arcilla. Se deforman rápidamente frente a la acción de las cargas y tienen mucho rebote elástico. Posee altos cambios volumétricos al humedecerse y baja capacidad portante. No se recomienda su uso como subrasante.

5	CL / A-4	Limo arcilloso de plasticidad baja a media. Expansiva, medianamente litificada. Suelos compuestos esencialmente por limos, con poco material grueso y un poco de arcilla. Secos son buenos para superficie de rodamiento y presentan rebote. Sin embargo, al absorber agua. Se expanden o pierden capacidad y estabilidad sin manipularlos. Son inestables con cualquier contenido de humedad, y cuando ésta es grande tienen muy poca capacidad portante. Son difíciles de compactar porque el contenido de humedad óptimo está dentro de límites muy estrechos.
---	----------	---

4.7 MÉTODO DEL HIDRÓMETRO

En la Figura 4.2 a 4.5 se presentan las curvas de distribución granulométricas para la fracción fina (pasante tamiz IRAM N° 200), obtenidas mediante el método del hidrómetro en las cuatro muestras provenientes de la traza de la Ruta Provincial 14-60. El ensayo se realizó según norma ASTM D 422-63.

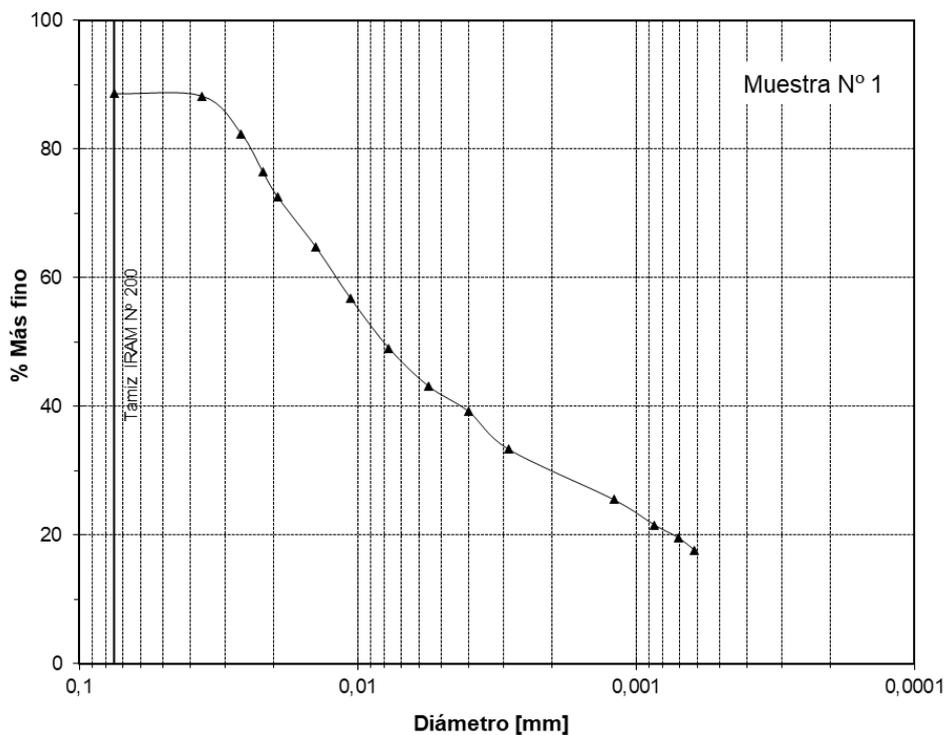


Figura 4.2: Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro para muestra N°1, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

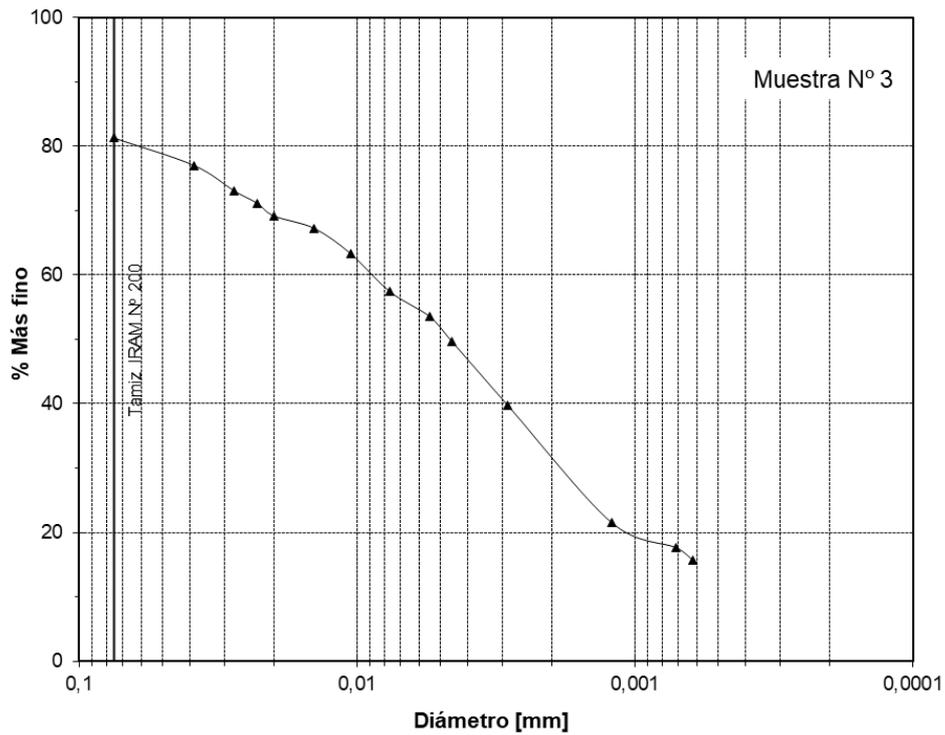


Figura 4.3: Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro para muestra N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

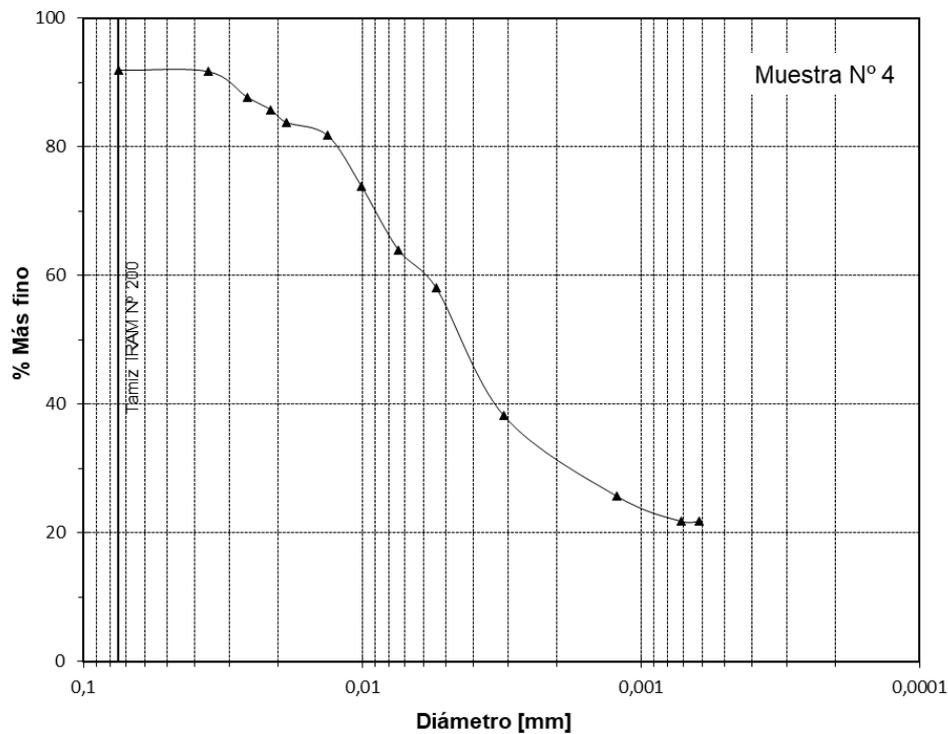


Figura 4.4: Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro para muestra N°4, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

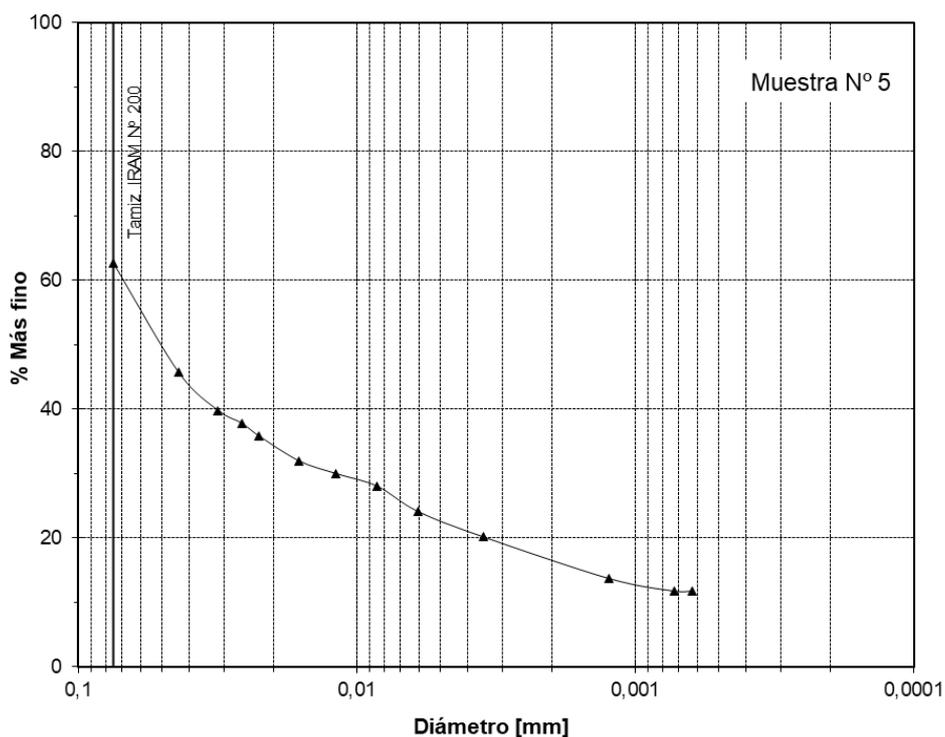


Figura 4.5: Curva granulométrica obtenida por el método del hidrómetro para muestra N°5, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

De la observación de las curvas granulométricas, se aprecia que las muestras tienen contenidos de arcilla variables entre el 15% y 50%.

4.8 DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA

En la Tabla 4.9 se presentan los valores de gravedad específica determinados en las cuatro muestras inalteradas provenientes de la traza de la Ruta Provincial 14-60. El ensayo se realizó según norma ASTM D 854-02.

Tabla 4.9: Gravedad específica de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	Temp. agua °C	G_{wt}	W_d [gr]	W_{wt} [gr]	G_s
1	27	0,9965	30,40	11,06	2,74
3	27	0,9965	30,43	10,91	2,78
4	27	0,9965	30,50	11,18	2,72
5	26	0,9968	30,03	10,90	2,75

Referencias

G_{wt} : gravedad específica del agua a determinada temperatura

W_d : peso del suelo

W_{wt} : peso del volumen de agua

G_s : gravedad específica del suelo

4.9 PESO UNITARIO

En la Tabla 4.10 se presentan los valores obtenidos para la determinación del peso unitario en estado seco y estado húmedo, determinados en las cuatro muestras inalteradas provenientes de la traza de la Ruta Provincial 14-60.

Tabla 4.10: Peso unitario seco y húmedo en muestra inalterada.

Muestra N°	γ_d [g/cm ³]	γ_h [g/cm ³]
1	2,35	2,39
3	2,36	2,44
4	2,46	2,54
5	2,26	2,31

Con los valores de γ_d y G_s se determinaron las relaciones de vacíos que se presentan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Relación de vacíos de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	Relación de vacíos e
1	0,167
3	0,176
4	0,107
5	0,216

De las Tablas 4.10 y 4.11 se observa que se trata de materiales con elevado peso unitario y muy baja relación de vacíos.

4.10 ENSAYO DE EXPANSIÓN Y COMPRESIÓN

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de expansión y compresión realizados en las cuatro muestras provenientes de la traza de la Ruta Provincial 14-60. Los ensayos se ejecutaron con las muestras en estado inalterado y recompactadas, con la humedad óptima del Próctor y seca. En las Figuras 4.6 a 4.14 se muestran las curvas de compresibilidad para las cuatro muestras en estado inalterado, recompactado con la humedad Próctor y sin humedad. En las Figuras 4.15 a 4.23 se muestran las curvas de expansión para las cuatro muestras. Y finalmente en las Figuras 4.24 a 4.32 se muestran las curvas de consolidación para las mismas muestras. El ensayo se realizó según norma ASTM D 4546-03.

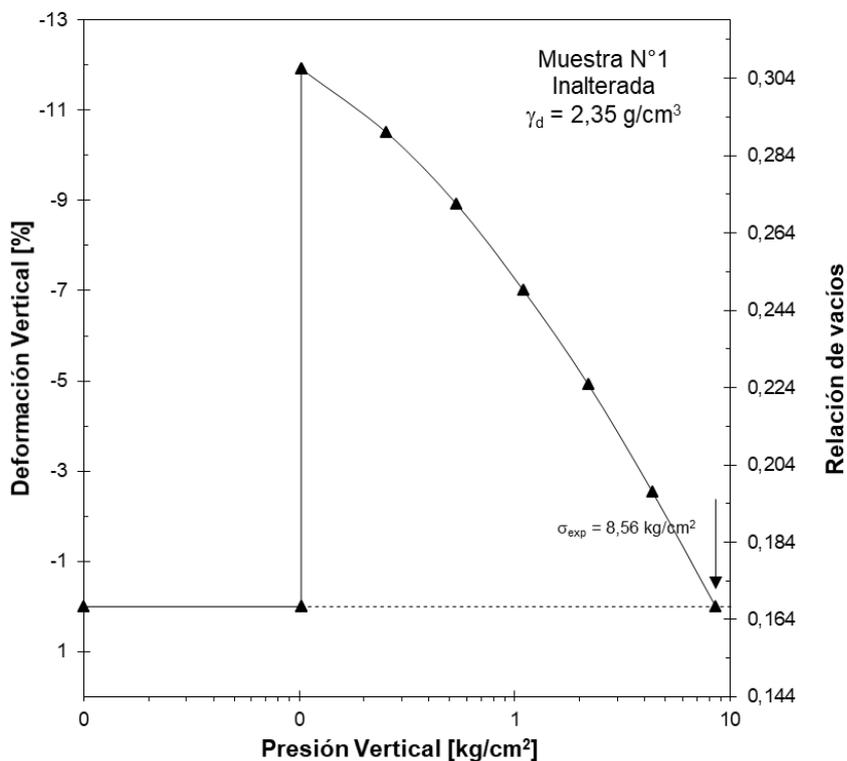


Figura 4.6: Curva de compresibilidad para muestra inalterada N°1, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

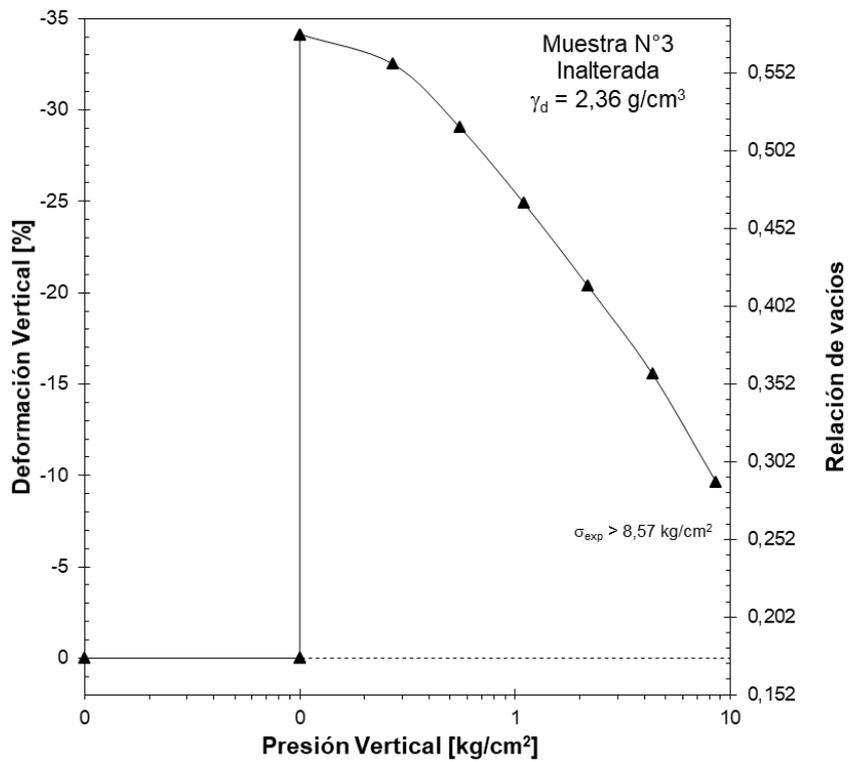


Figura 4.7: Curva de compresibilidad para muestra inalterada N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

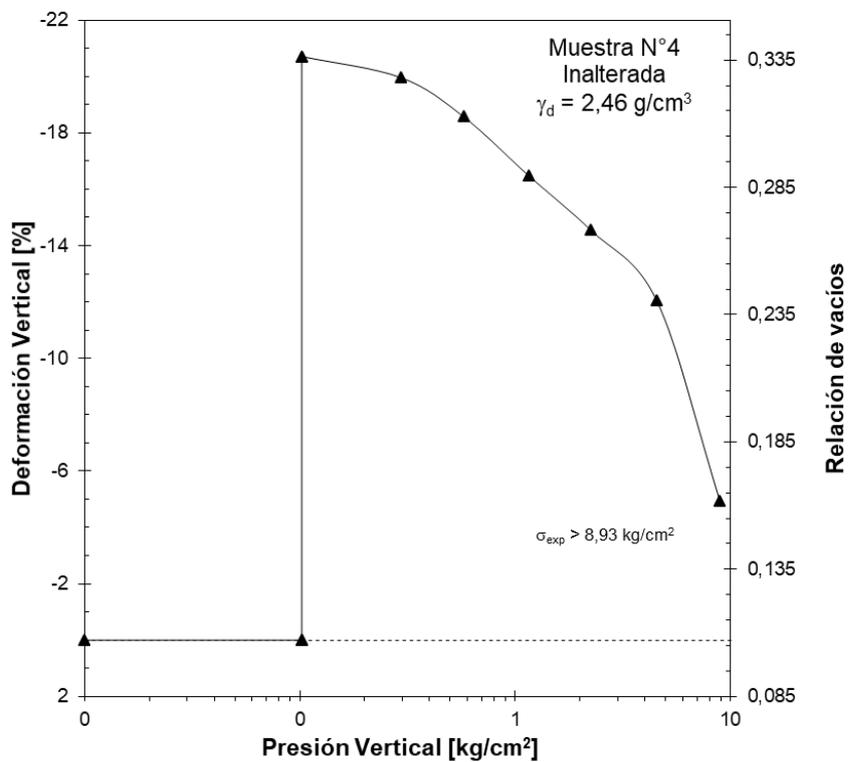


Figura 4.8: Curva de compresibilidad para muestra inalterada N°4, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

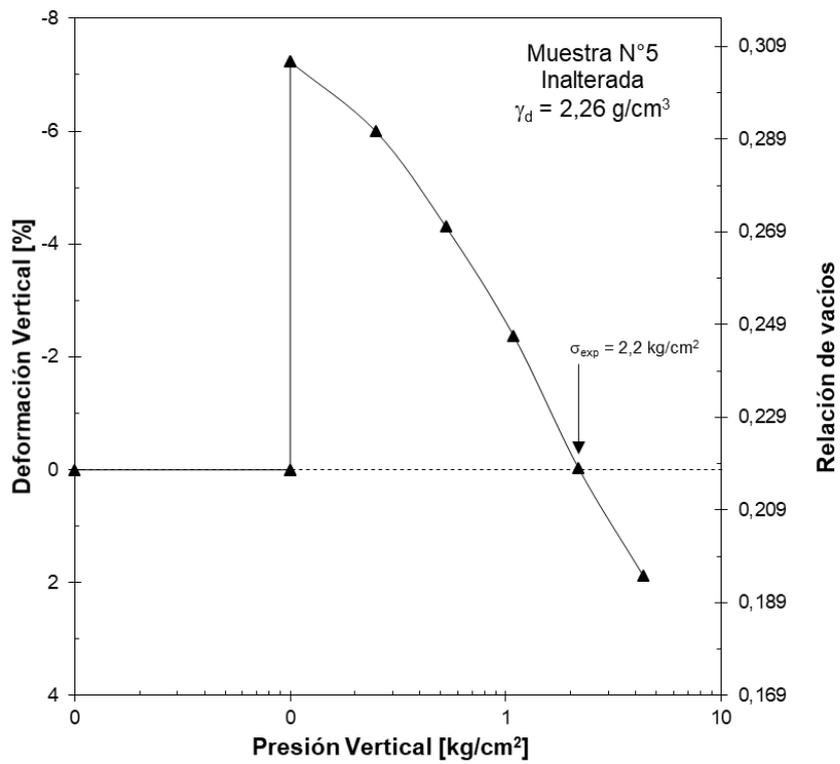


Figura 4.9: Curva de compresibilidad para muestra inalterada N°5, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

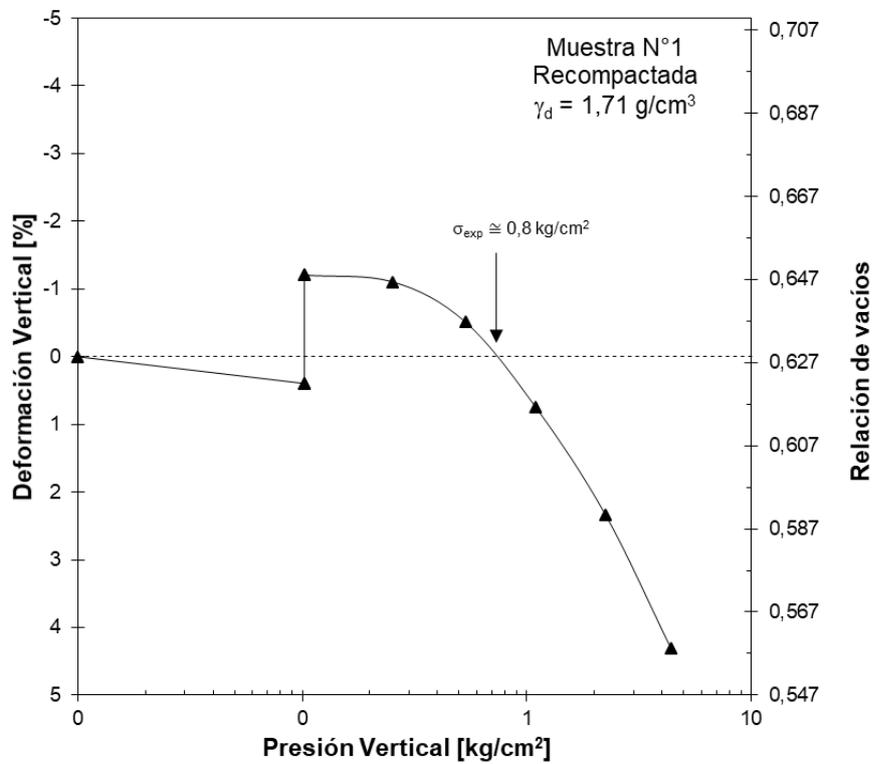


Figura 4.10: Curva de compresibilidad para muestra recompactada con humedad óptima N°1, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

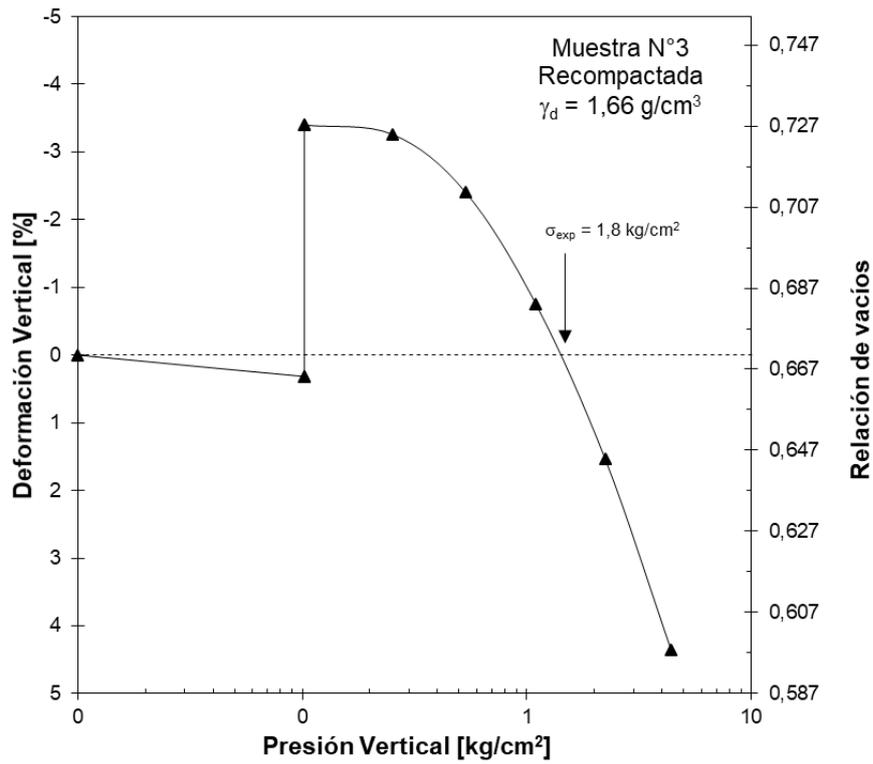


Figura 4.11: Curva de compresibilidad para muestra recompactada con humedad óptima N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

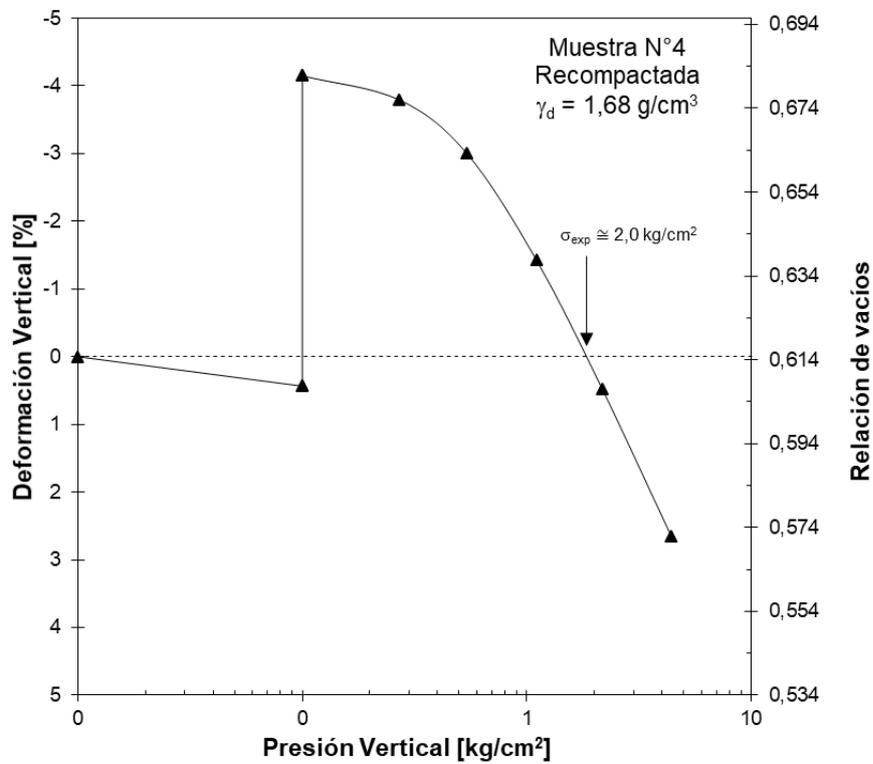


Figura 4.12: Curva de compresibilidad para muestra recompactada con humedad óptima N°4, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

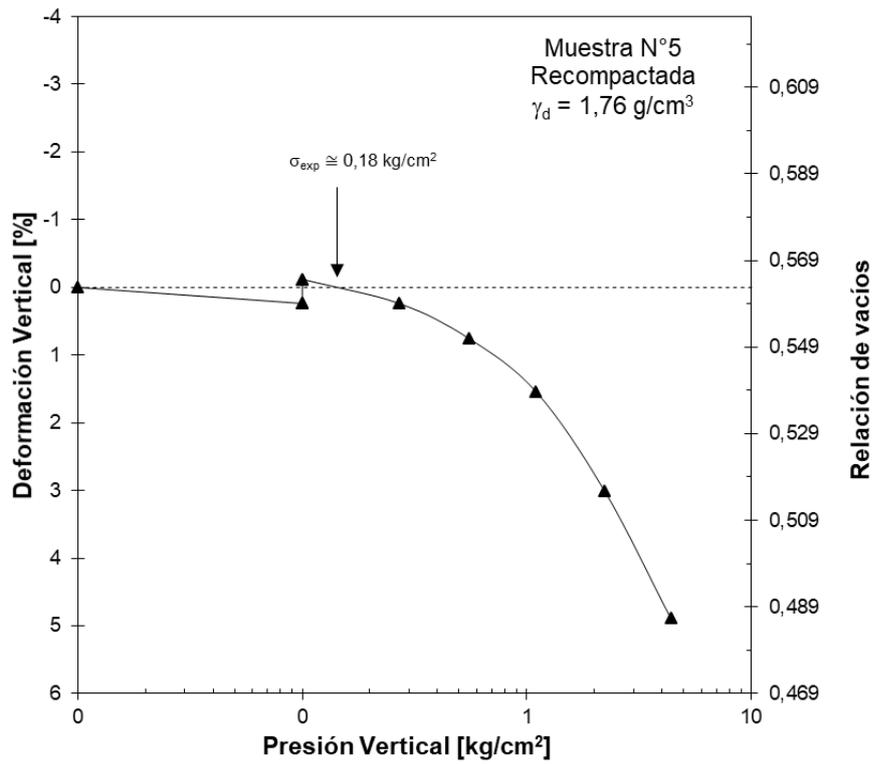


Figura 4.13: Curva de compresibilidad para muestra recompactada con humedad óptima N°5, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

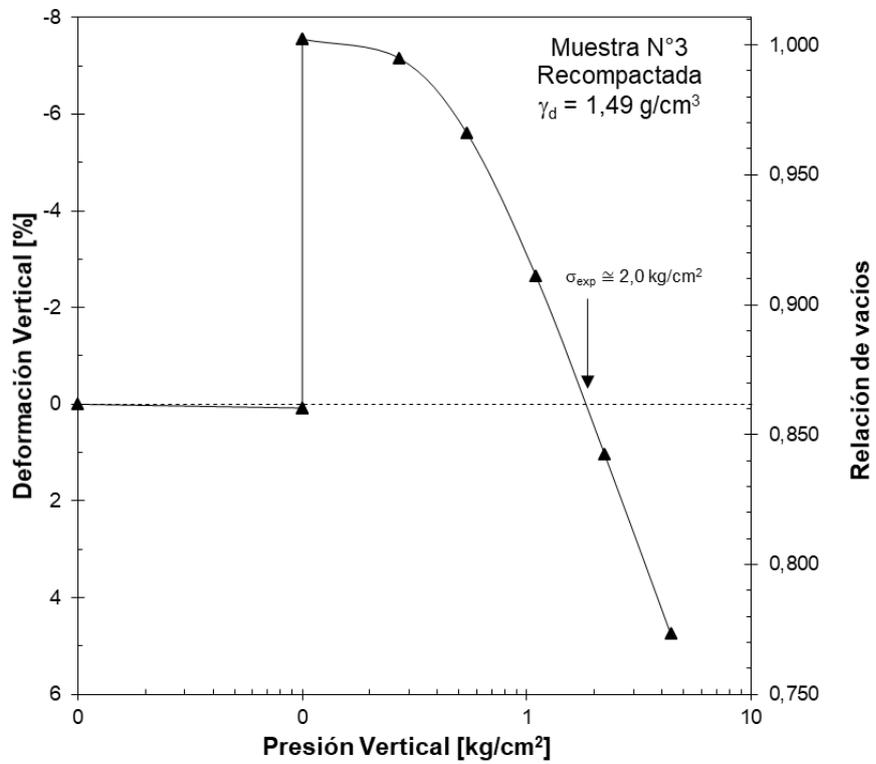


Figura 4.14: Curva de compresibilidad para muestra recompactada en seco N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

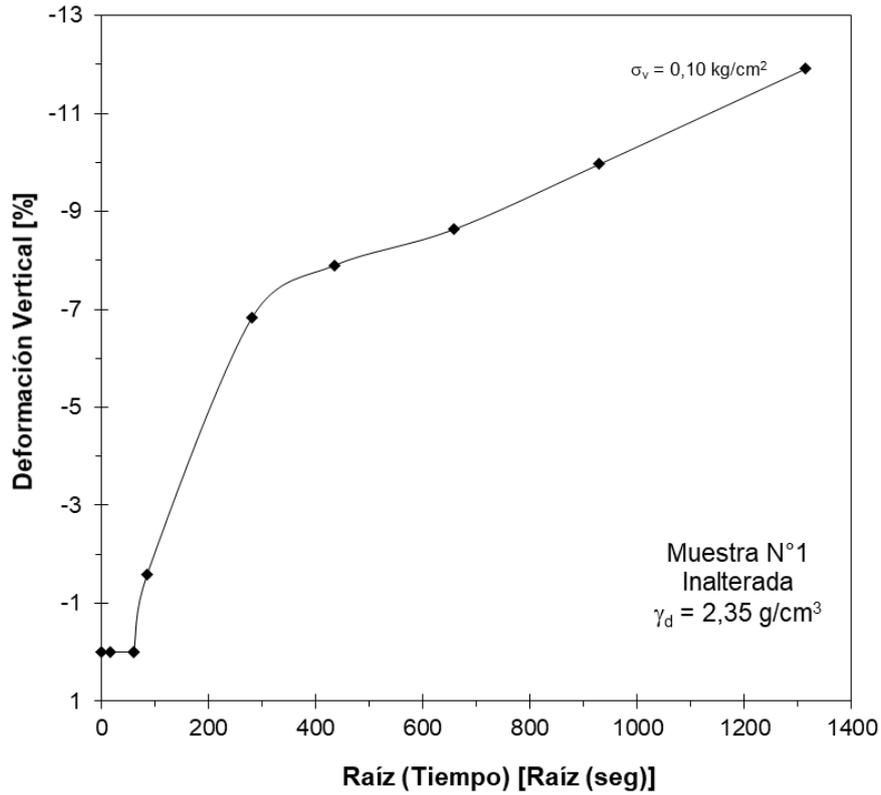


Figura 4.15: Curva de expansión para muestra inalterada N°1, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

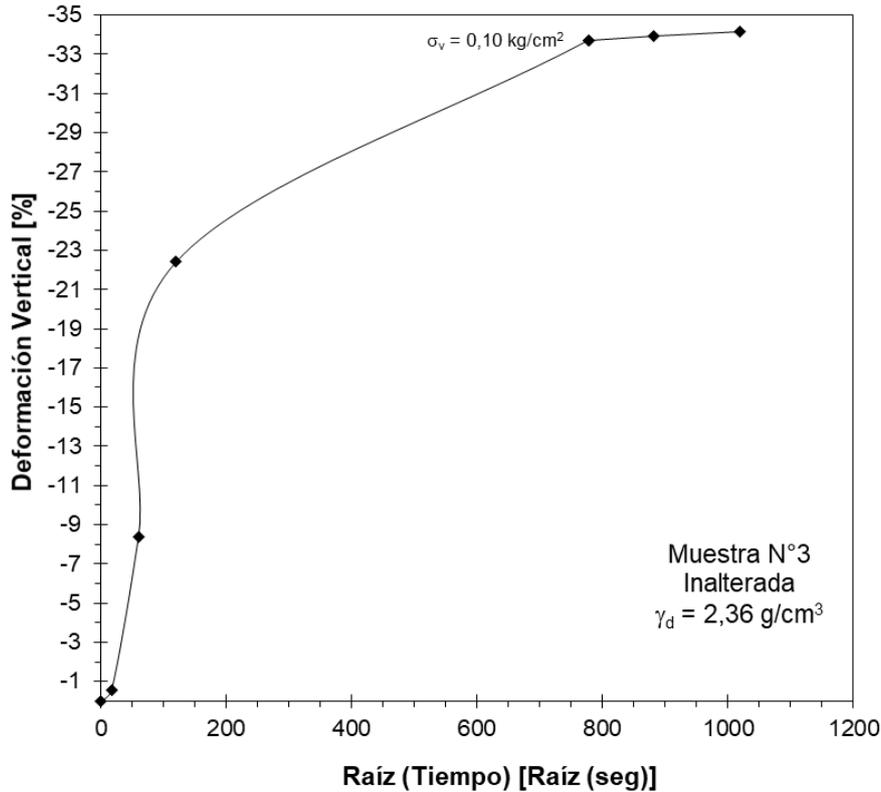


Figura 4.16: Curva de expansión para muestra inalterada N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

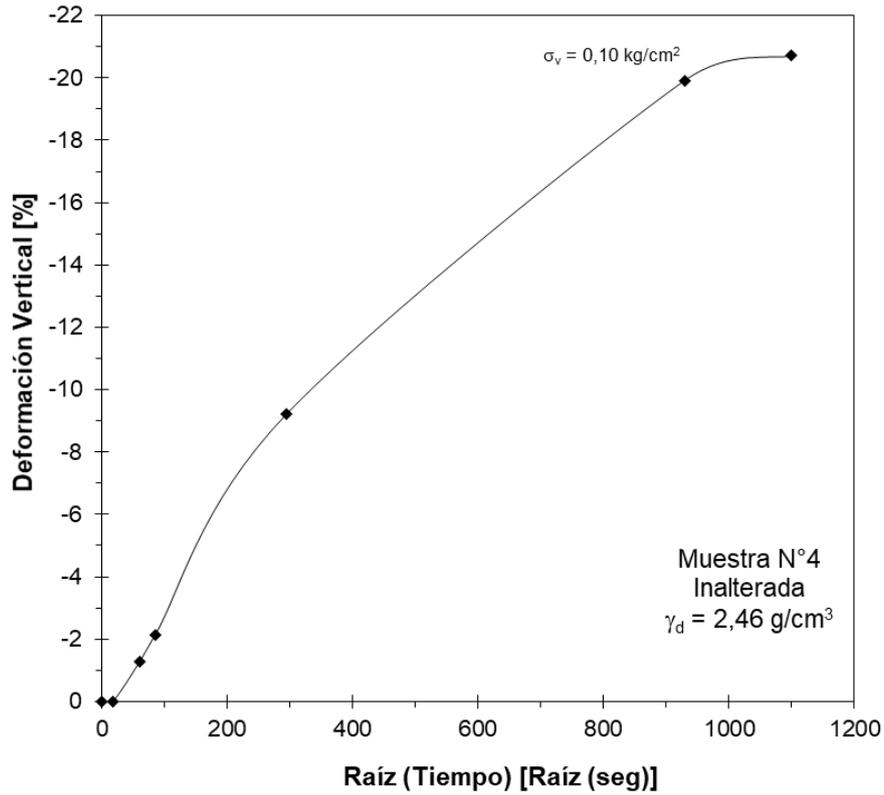


Figura 4.17: Curva de expansión para muestra inalterada N°4, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

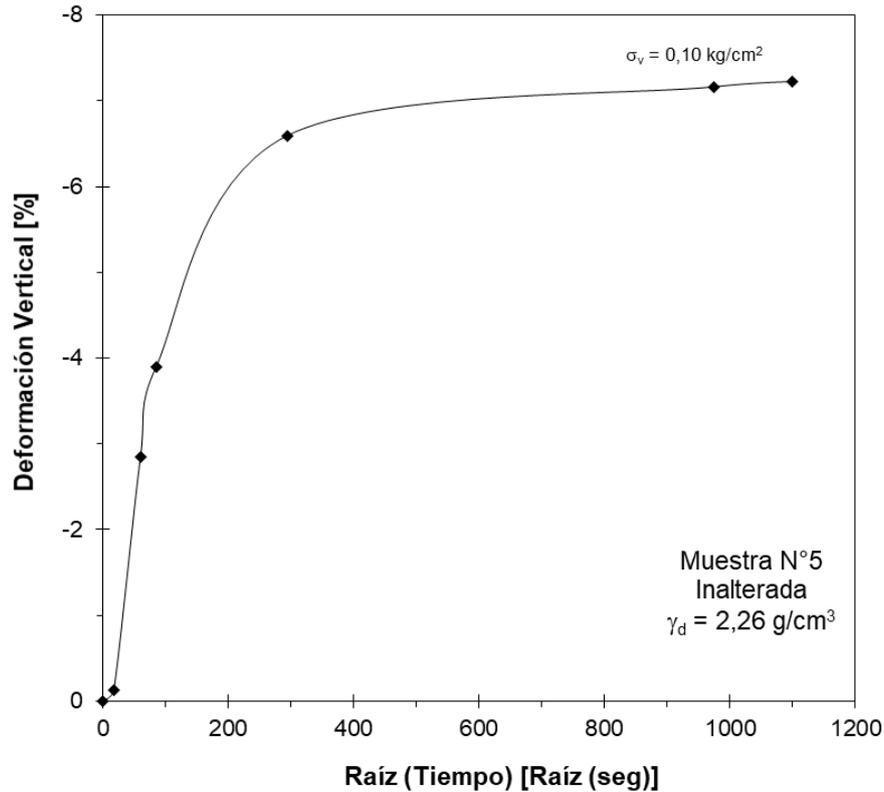


Figura 4.18: Curva de expansión para muestra inalterada N°5, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

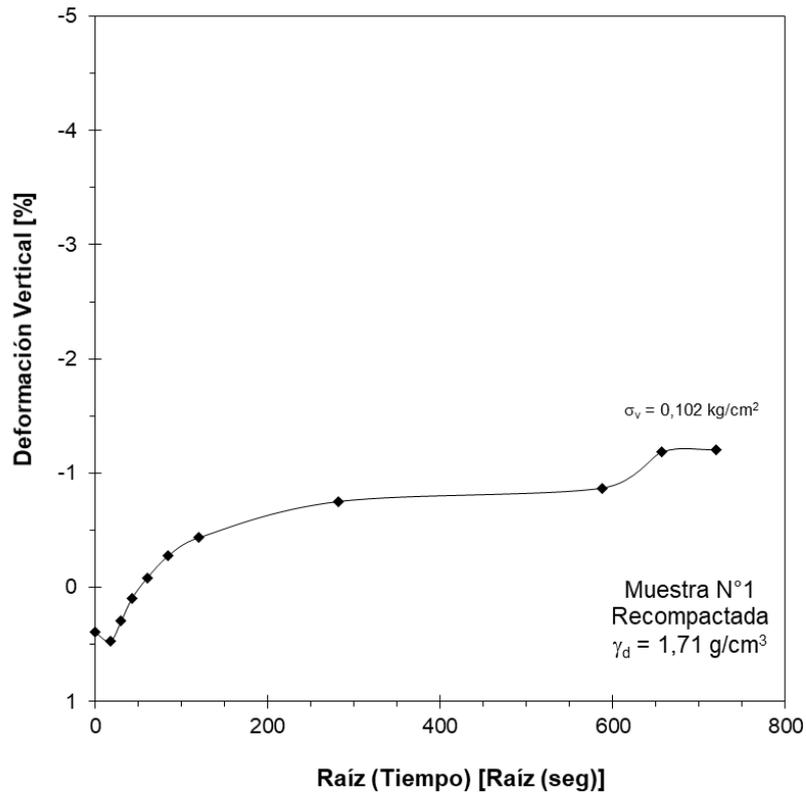


Figura 4.19: Curva de expansión para muestra recompactada con humedad óptima N°1, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

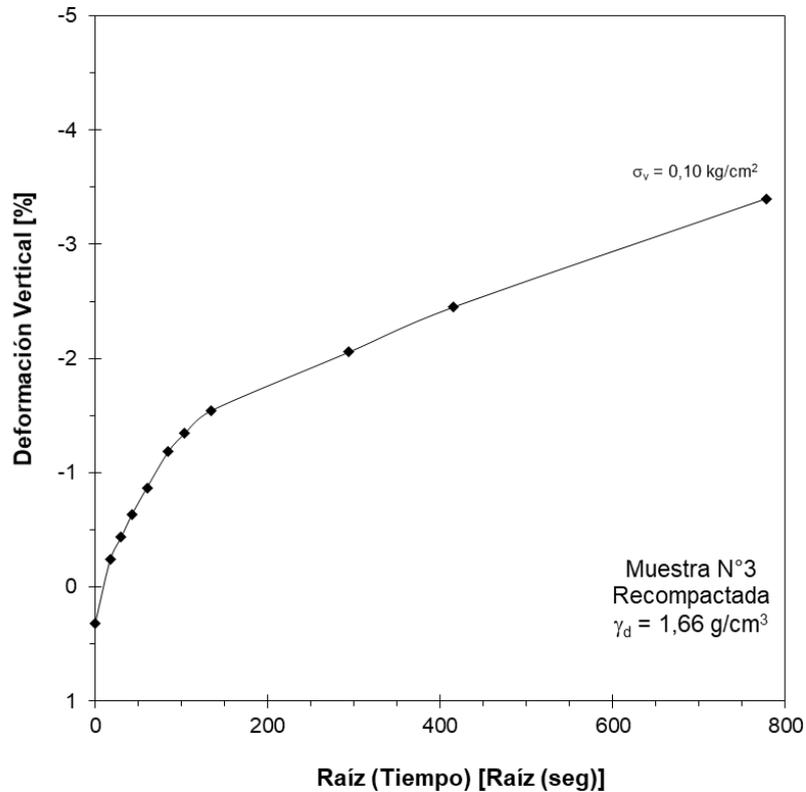


Figura 4.20: Curva de expansión para muestra recompactada con humedad óptima N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

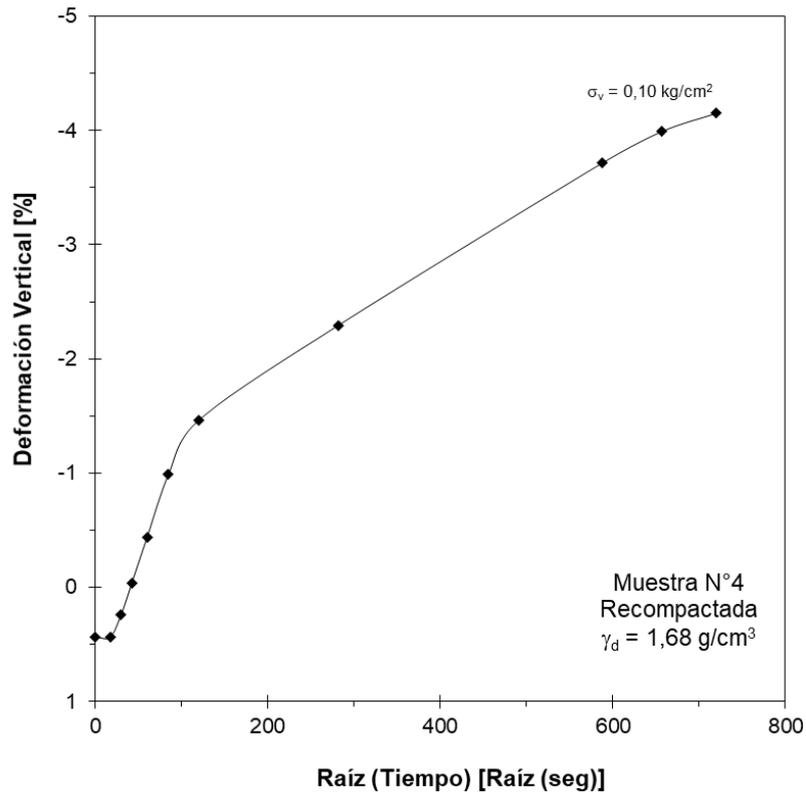


Figura 4.21: Curva de expansión para muestra recompactada con humedad óptima N°4, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

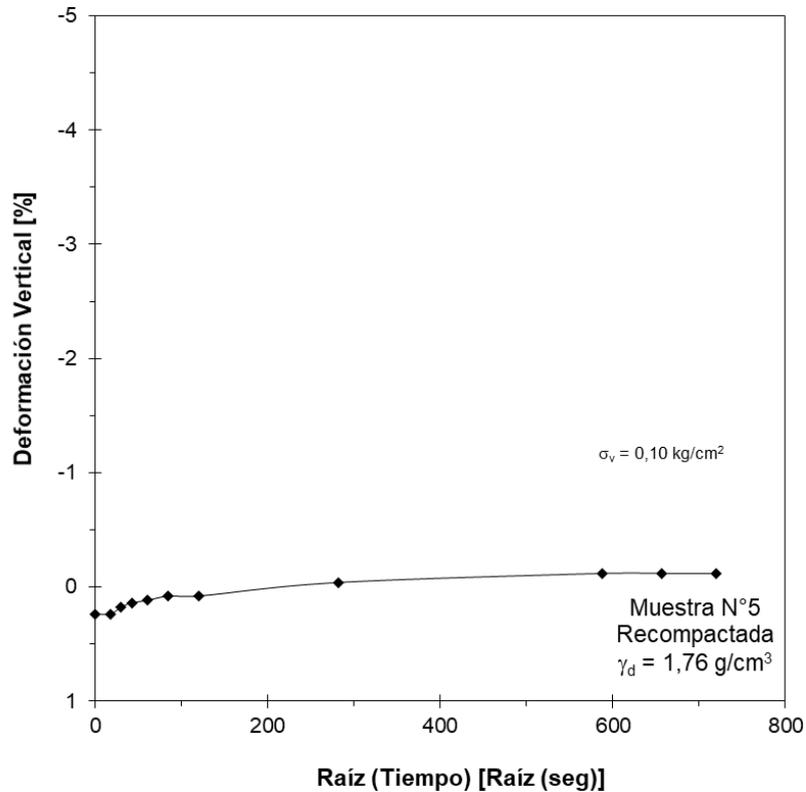


Figura 4.22: Curva de expansión para muestra recompactada con humedad óptima N°5, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

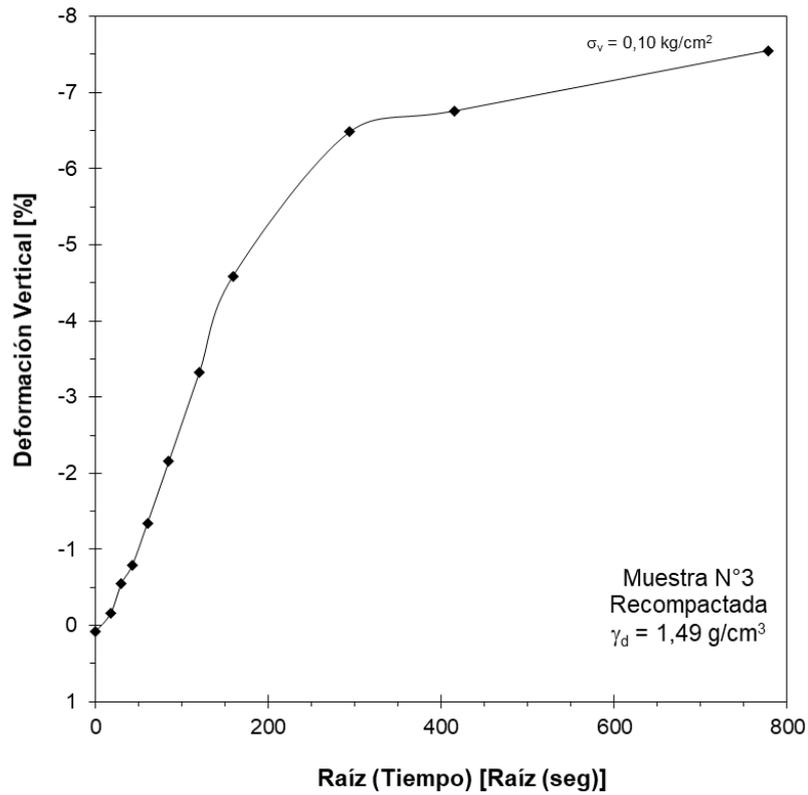


Figura 4.23: Curva de expansión para muestra recompactada en seco N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

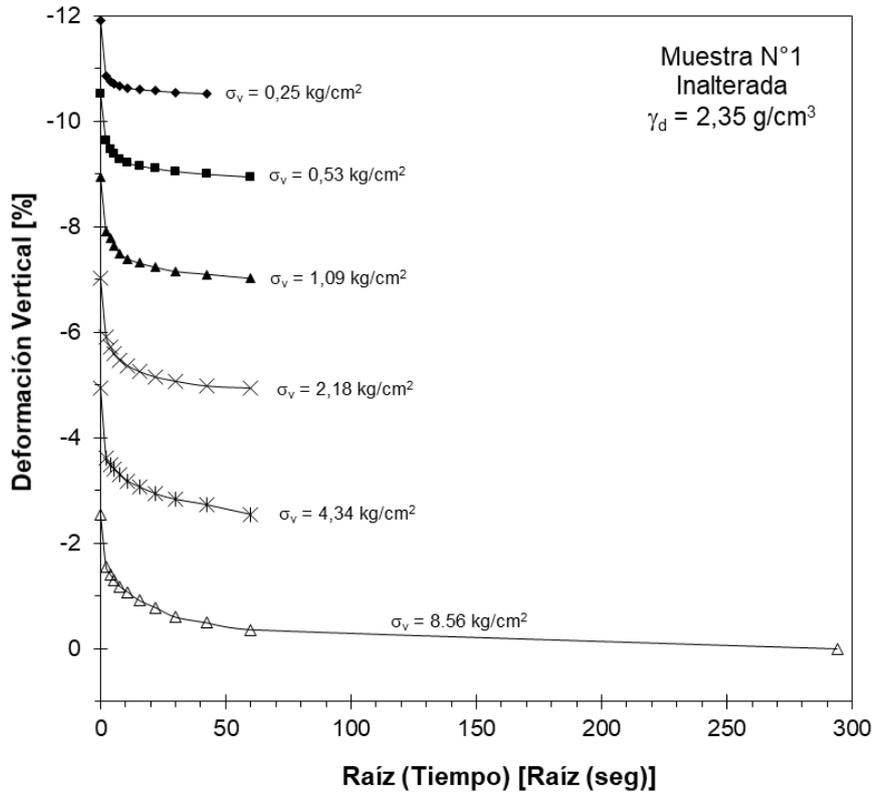


Figura 4.24: Curva de consolidación para muestra inalterada N°1, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

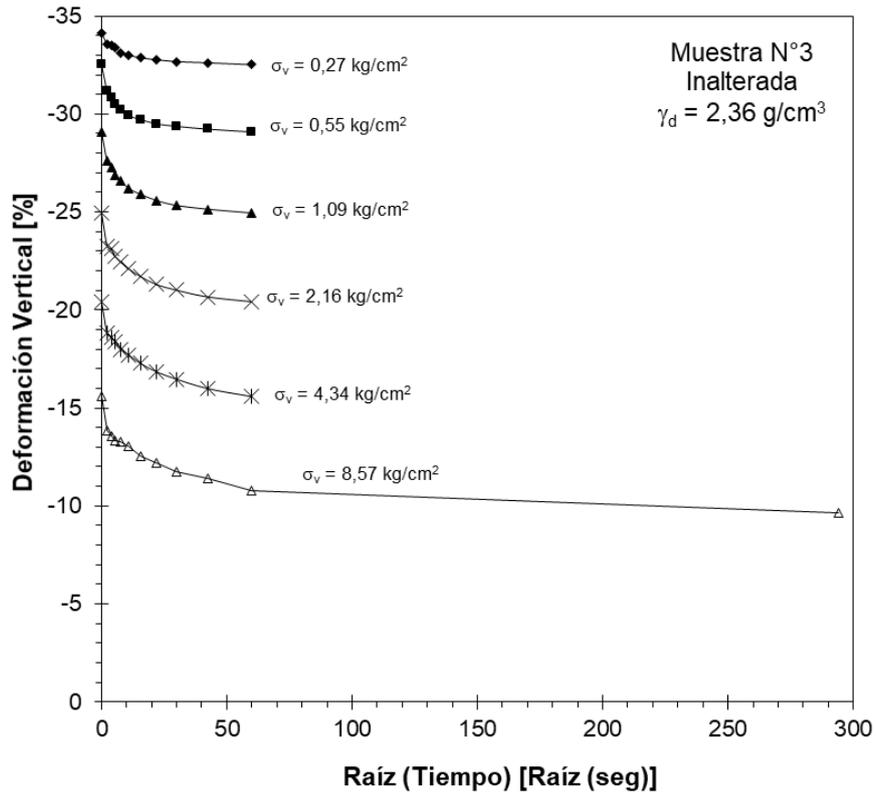


Figura 4.25: Curva de consolidación para muestra inalterada N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

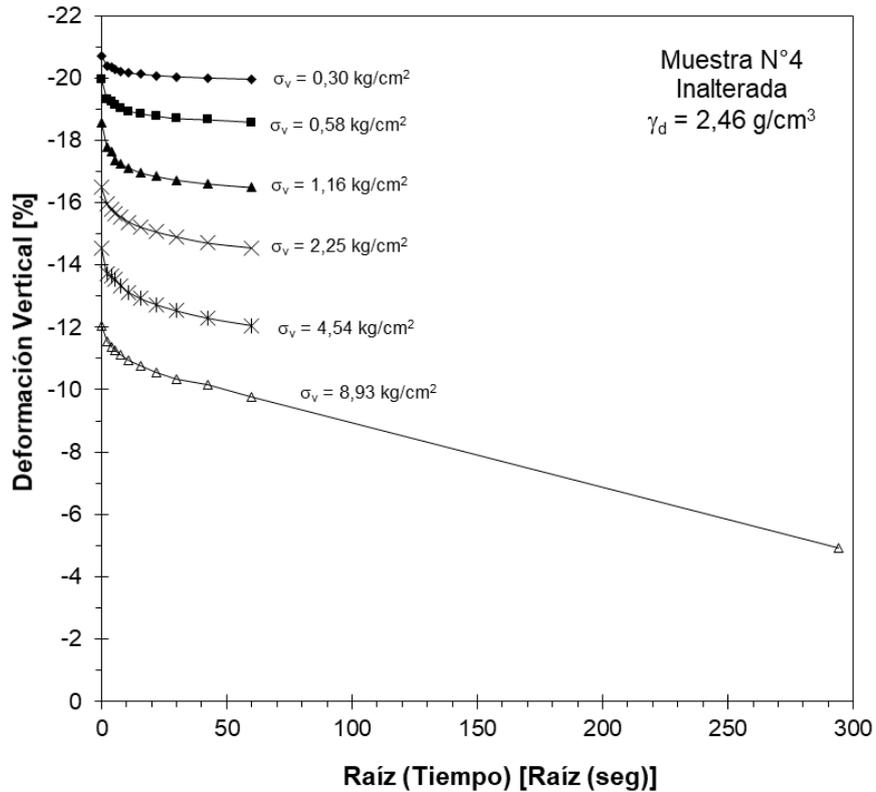


Figura 4.26: Curva de consolidación para muestra inalterada N°4, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

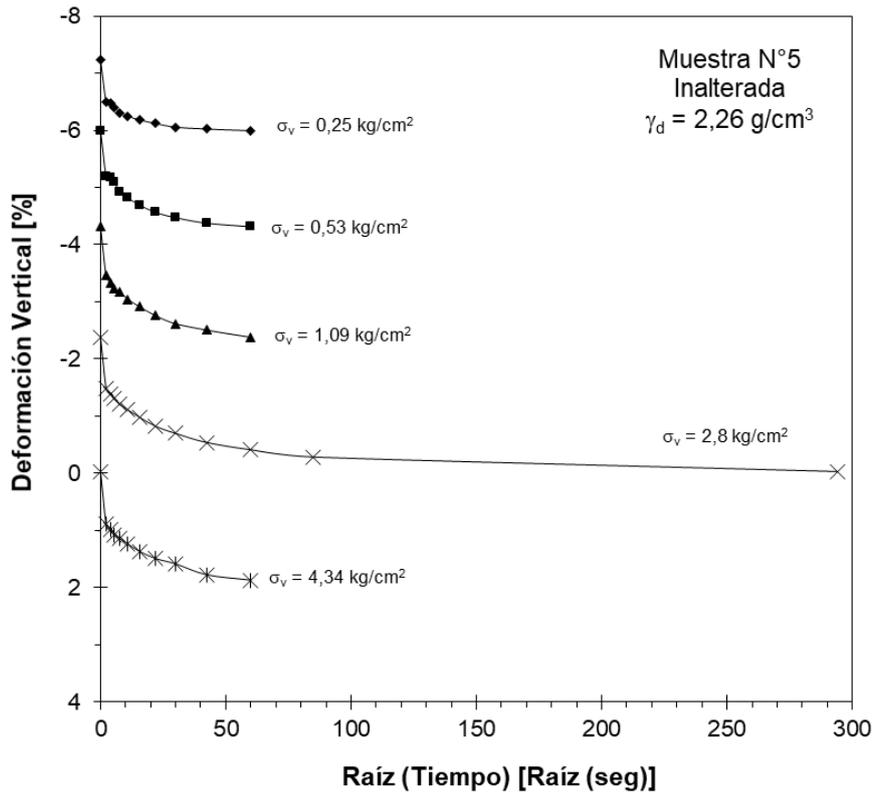


Figura 4.27: Curva de consolidación para muestra inalterada N°5, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

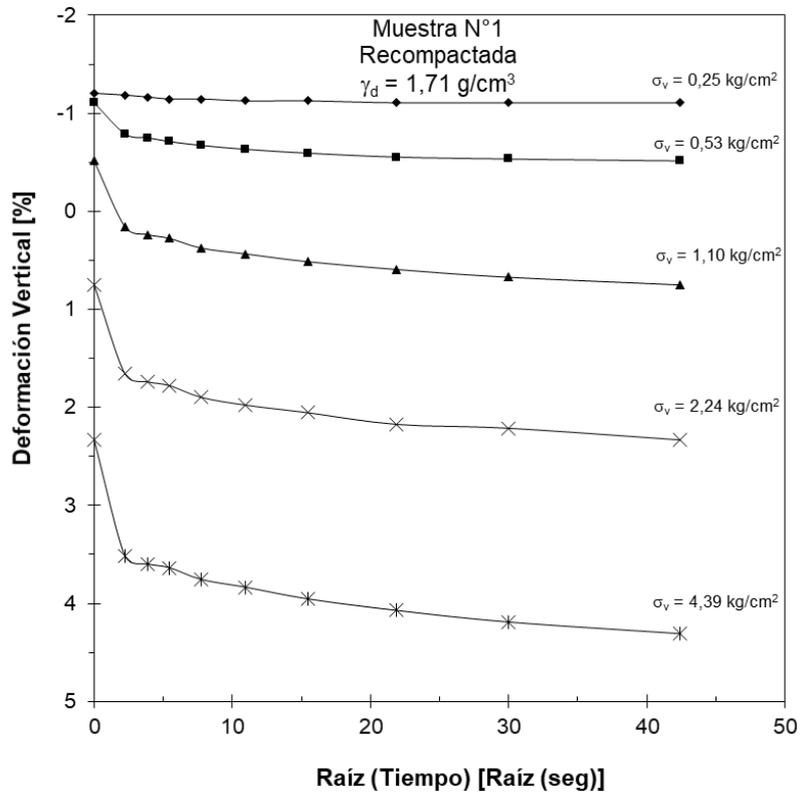


Figura 4.28: Curva de consolidación para muestra recompactada con humedad óptima N°1, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

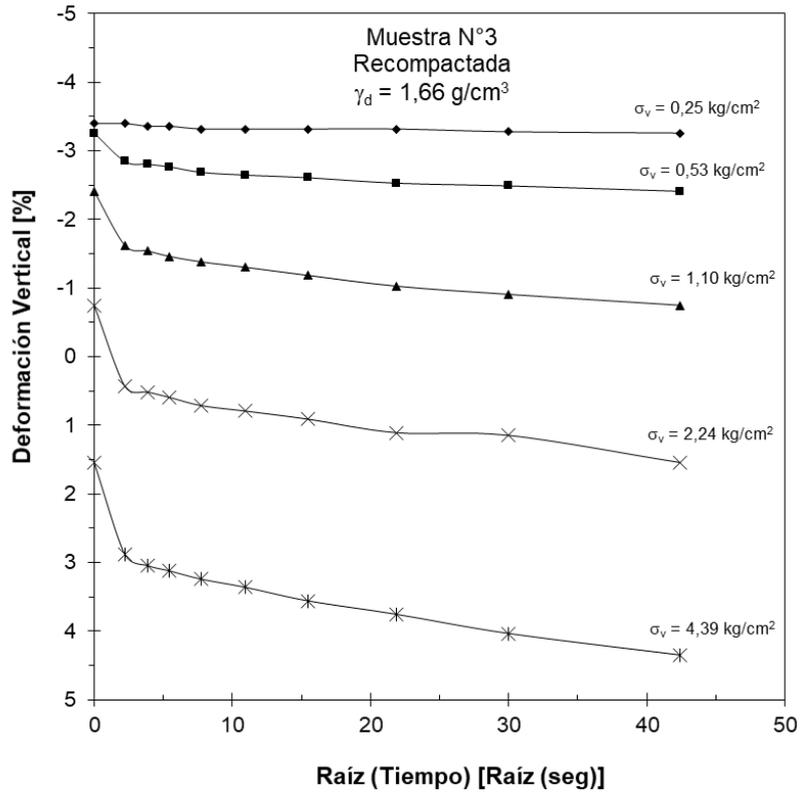


Figura 4.29: Curva de consolidación para muestra recompactada con humedad óptima N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

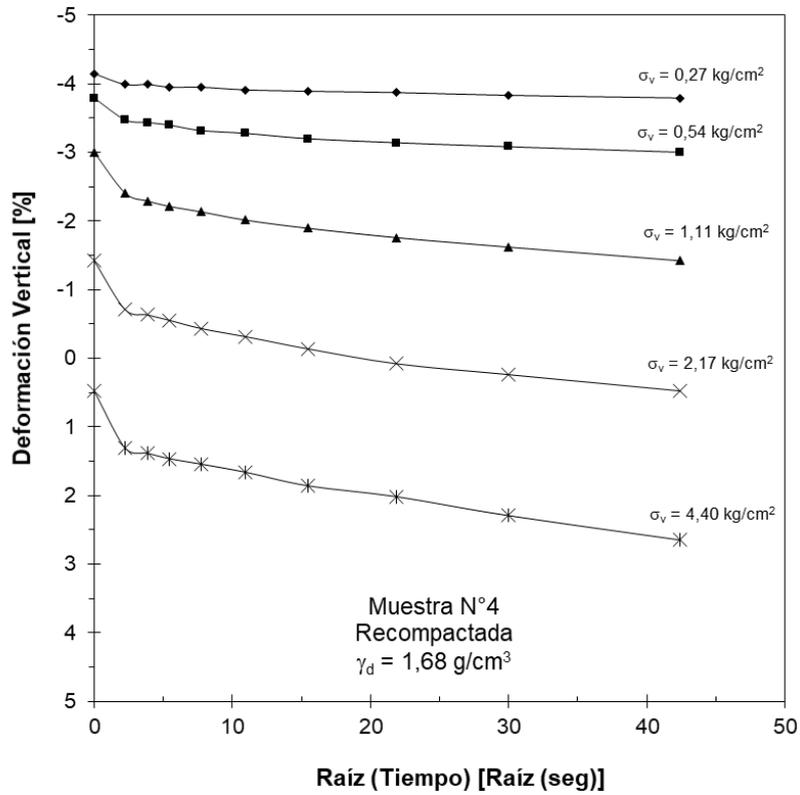


Figura 4.30: Curva de consolidación para muestra recompactada con humedad óptima N°4, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

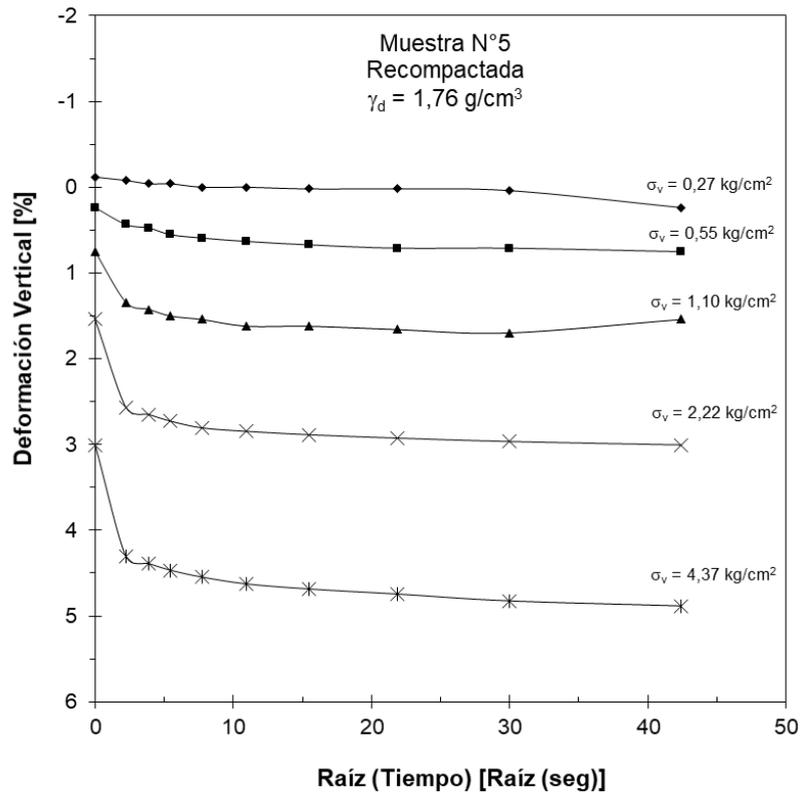


Figura 4.31: Curva de consolidación para muestra recompactada con humedad óptima N°5, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

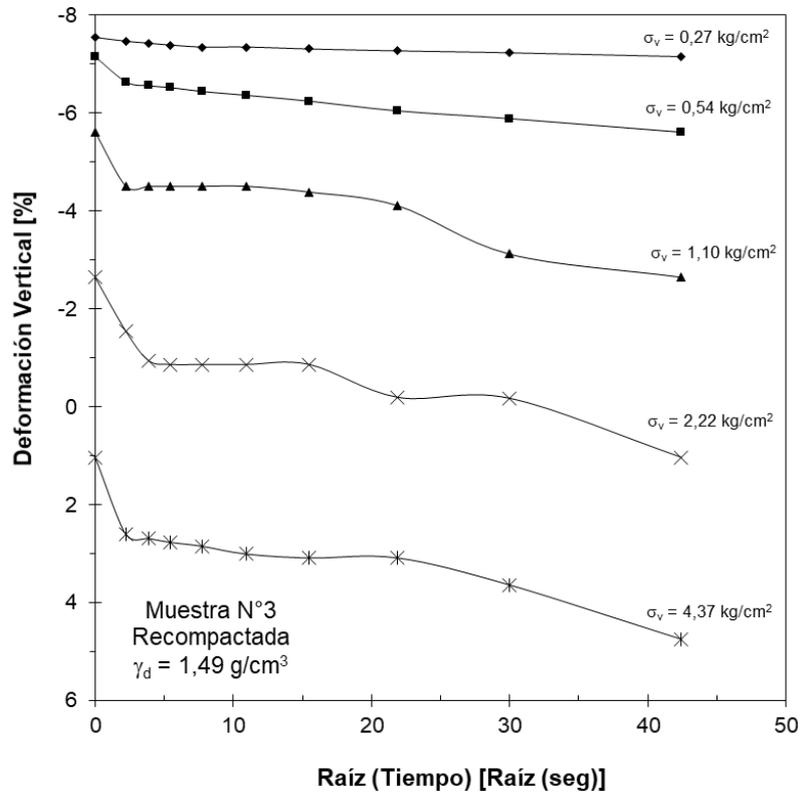


Figura 4.32: Curva de consolidación para muestra recompactada en seco N°3, proveniente de la Ruta Provincial 14-60.

A modo de resumen, en la Tabla 4.12 se presenta la presión de expansión en las diferentes muestras para distintas condiciones de ensayo.

Tabla 4.12: Presión de expansión de las muestras provenientes de la Ruta Provincial 14-60.

Muestra N°	Condición de la muestra	σ_{exp} [kg/cm ²]
1	Inalterada	8,6
	Recomp. húmeda	0,8
3	Inalterada	> 8,6
	Recomp. húmeda	1,8
	Recomp. seco	2,0
4	Inalterada	> 8,9
	Recomp. húmeda	2,0
5	Inalterada	2,2
	Recomp. húmeda	0,2

4.11 CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos puede concluirse que se trata de sedimentos litificados transformados en rocas débiles que al disgregarse se transforman en materiales tipo limo areno arcillosos, de plasticidad media, correspondientes a los grupos A-4, A-7-5, A-7-6 del sistema de clasificación de la Highway Research Board (H.R.B.), o bien a los grupos CH y CL del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. Estos materiales no son recomendables para su uso como subrasante de vías de comunicación. Asimismo, de los ensayos de expansión, se deduce que se trata de materiales de un elevado potencial de expansión, y que se evidencian presiones de expansión también de alto valor.

Del análisis mineralógico de estos materiales, presentado en el Capítulo 2, se estima que se trata de materiales con presencia de anhidrita y que por lo tanto no sería eficiente su tratamiento mediante el agregado de cal, o al menos no sería tan eficiente como lo es en el tratamiento de otros suelos expansivos.

El potencial de hinchamiento de la anhidrita depende del tamaño de los granos minerales de la anhidrita y, por tanto, de la capa de roca que la contiene. Sin embargo, no está claro hasta qué punto los resultados obtenidos de los ensayos de hinchamiento de polvo de anhidrita pueden transferirse al comportamiento de hinchamiento de las rocas de arcilla-sulfato.

Es una observación general que las capas masivas de anhidrita pura (sin arcilla presente) no desarrollan hinchazón considerable. Esto se explica con el área relativamente pequeña de la anhidrita casi impermeable que puede estar expuesta al agua, permitiendo el acceso al agua sólo en la superficie y en fisuras. Un proceso

adicional que dificulta la hinchazón de la anhidrita masiva es la formación de un recubrimiento protector de yeso, evitando una transformación adicional.

El papel de la hinchazón de la arcilla en las rocas de arcilla-sulfato aún no se entiende completamente. Se ha observado que las rocas de arcilla-sulfato desarrollan presiones de hinchamiento entre 2 y 10 veces más altas que las rocas de arcilla puras.

Se le asigna un papel importante de la expansión de la arcilla en el hinchamiento de las rocas arcillosas-sulfatada. El potencial de hinchamiento de las rocas arcillosas-sulfatadas depende del contenido de arcilla de la roca. Mientras que las rocas anhidritas puras no se hinchan, el potencial de hinchamiento de las rocas de arcilla-sulfato aumenta con el contenido de arcilla.

La hipótesis de hinchamiento en estos suelos se puede resumir según la siguiente secuencia simplificada:

7. La expansión de la arcilla, precede a la expansión del sulfato, desintegra la roca y crea caminos de agua a la anhidrita.
8. Los minerales de arcilla entregan agua (agua cristalina o agua unida / adsorbida) a la anhidrita.
9. Las capas de arcilla actúan como "acuífero micro" porque son más permeables que las capas de anhidrita pura.
10. Los minerales arcillosos adsorben el agua, dificultando la circulación del agua y permitiendo un aumento de las concentraciones hasta alcanzar la saturación de yeso.
11. Los minerales de arcilla absorben agua y, al hacerlo, aumentan las concentraciones de sulfato en el agua de poro restante hasta alcanzar la saturación de yeso.
12. Los minerales de arcilla actúan como catalizadores químicos.

Estas hipótesis serán confirmadas mediante análisis mineralógicos ejecutados con microscopio con focal y difracción de rayos X.

Frente a este escenario las propuestas de remediación para la Ruta Provincial 14-60 de la Provincia de San Juan deberán estar orientadas a:

- a. Evitar el ingreso de agua al suelo ubicado por debajo del pavimento. Esto se puede lograr con adecuadas obras de drenaje y control de escurrimiento superficial.
- b. Impermeabilización de subrasante y paquete estructural del pavimento mediante geosintéticos del tipo geomembrana.
- c. Aislamiento del paquete estructural del pavimento de los suelos expansivos, por medio de pilotes o losas nervuradas.
- d. Remover el suelo natural, el cual se asemeja más a una roca que a un suelo y es altamente expansivo, y colocarlo nuevamente en estado compactado, a densidades lo más próximas posibles al 100% del Próctor, con lo cual el potencial de expansión se reduce notablemente.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

CAPÍTULO 5 | CONCLUSIONES

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen las principales conclusiones a las que se arribó de la experiencia laboral durante el desarrollo de la Práctica Profesional Supervisada.

Cabe desatacar que más allá de las conclusiones de carácter técnico que surgieron del trabajo realizado en la Práctica Supervisada, el ejercicio de las tareas asignadas y desarrolladas en el Centro de Vinculación “Laboratorio de Geotecnia” permitieron lograr una experiencia de trabajo en equipo como también individual y la interacción permanente con un grupo de profesionales en el entorno de un laboratorio que brinda servicios de ingeniería.

La experiencia laboral permitió afianzar y aplicar conceptos adquiridos en las distintas materias cursadas a lo largo de la carrera, como también sumar nuevos conocimientos a medida que se avanzaba con el trabajo y resolver dificultades que se presentaban sobre la marcha. Esta experiencia además permitió desarrollar las tareas en un ámbito en el cual la alumna pudo relacionarse con profesionales de la Ingeniería Civil experimentados, los cuales fueron de gran ayuda y brindaron una visión integral relativa a las organizaciones laborales.

5.2 CONCLUSIONES DE LAS TAREAS DESARROLLADAS

El objetivo principal asignado fue la caracterización geotécnica de los suelos y rocas presentes a lo largo de la traza de la Ruta Provincial 14-60 de la Provincia de San Juan, los cuales fueron empleados como subrasante de la misma. Los estudios de caracterización geotécnica se enfocaron fundamentalmente en la evaluación del potencial de expansión y presión de hinchamiento de los mismos, en estado natural y compactado.

Respecto a la caracterización de los suelos se observó que los mismos se encuentran en los grupos CH y CL del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, que son suelos predominantemente arcillosos. Según la clasificación de la Highway Research Board estamos en presencia de suelos del tipo A-4, A-6 y A-7, los cuales son suelos limo arcillosos, inestables y con poca capacidad portante en presencia de agua, su uso no es recomendado en subrasantes de vías de comunicación. También se observó que los suelos en estudio son materiales con elevado peso unitario y muy baja relación de vacíos.

Por otro lado, de los ensayos de expansión, se deduce que se trata de materiales de un elevado potencial de expansión, y que evidencian presiones de expansión también de alto valor. Tanto el potencial de expansión libre como la presión de expansión disminuyen drásticamente cuando los suelos son recompactados.

En función de la caracterización geotécnica, las propuestas de remediación para la Ruta Provincial 14-60 de la Provincia de San Juan deberán estar orientadas a:

- a. Evitar el ingreso de agua al suelo ubicado por debajo del pavimento. Esto se puede lograr con adecuadas obras de drenaje y control de escurrimiento superficial.

- b. Impermeabilización de subrasante y paquete estructural del pavimento mediante geosintéticos del tipo geomembrana.
- c. Aislamiento del paquete estructural del pavimento de los suelos expansivos, por medio de pilotes o losas nervuradas.
- d. Remover el suelo natural, el cual se asemeja más a una roca que a un suelo y es altamente expansivo, y colocarlo nuevamente en estado compactado, a densidades lo más próximas posibles al 100% del Próctor, con lo cual el potencial de expansión se reduce notablemente.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

Braja M. Das (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*, Thomson Learning.

Cátedra de Geotecnia II, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales,
Universidad Nacional de Córdoba (2010). *Guía de trabajos Prácticos de Laboratorio*.

American Society for Testing and Materials, ASTM D 2216-98 (1998). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water Content of Soil and Rocks*.

American Society for Testing and Materials, ASTM D 4318-00 (2000). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.

American Society for Testing and Materials, ASTM D1140-00 (2000). *Standard Test Methods for Amount of Material in Soils Finer Than the No. 200 (75 µm) Sieve*.

American Society for Testing and Materials, ASTM 2787-00 (2000). *Standard Practice for Classification for Engineering Purpose (Unifies Soil Classification System)*.

Dirección Nacional de Vialidad. *Normas de Ensayo VN-E4-84, Clasificación de Suelos*.

American Society for Testing and Materials, ASTM D 422-63 (2002). *Standard Test Methods for Particle-Size Analysis of Soils*.

American Society for Testing and Materials, ASTM D 854-02 (2002). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*.

American Society for Testing and Materials, ASTM D 4546-03 (2003). *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils*.

ANEXOS

ANEXO 1. PLANILLAS DE CÁLCULO MÉTODO DEL HIDRÓMETRO.

Muestra N°1

Agente Dispersante: NaPO₃

Corrección de cero = 2

Cantidad: 125 ml de solución al 4%

Corrección por menisco = 1

Peso del suelo seco [gr] = 50

G_s = 2,74

a = 0,98

Fecha	Tiempo [min]	Temp. [°C]	C _T	R _{real}	R _c	% más fino	R _{menis}	L [cm]	K	Diámetro [mm]
18 / 12	1	27,0	2,0	45	45,0	88,2	46	8,8	0,0122	0,0362
18 / 12	2	27,0	2,0	42	42,0	82,3	43	9,2	0,0122	0,0262
18 / 12	3	27,0	2,0	39	39,0	76,4	40	9,7	0,0122	0,0219
18 / 12	4	27,0	2,0	37	37,0	72,5	38	10,1	0,0122	0,0194
18 / 12	8	27,0	2,0	33	33,0	64,7	34	10,7	0,0122	0,0141
18 / 12	15	27,0	2,0	29	29,0	56,8	30	11,4	0,0122	0,0106
18 / 12	30	27,0	2,0	25	25,0	49,0	26	12,0	0,0122	0,0077
18 / 12	60	27,0	2,0	22	22,0	43,1	23	12,5	0,0122	0,0056
18 / 12	120	27,0	2,0	20	20,0	39,2	21	12,9	0,0122	0,0040
18 / 12	240	27,0	2,0	17	17,0	33,3	18	13,3	0,0122	0,0029
19 / 12	1440	27,0	2,0	13	13,0	25,5	14	14,0	0,0122	0,0012
20 / 12	2880	27,0	2,0	11	11,0	21,6	12	14,3	0,0122	0,0009
21 / 12	4320	27,0	2,0	10	10,0	19,6	11	14,5	0,0122	0,0007
22 / 12	5760	27,0	2,0	9	9,0	17,6	10	14,7	0,0122	0,0006

Referencias

G_s: gravedad específica

a: factor de corrección para el peso unitario de sólidos

C_T: corrección por temperatura

R_{real}: lectura real del hidrómetro

R_c: lectura corregida del hidrómetro

R_{menis}: hidrómetro corregido por menisco

L: profundidad efectiva

K: valor en f (T, G_s)

Muestra N°3

Agente Dispersante: NaPO_3

Corrección de cero = 2

Cantidad: 125 ml de solución al 4%

Corrección por menisco = 1

Peso del suelo seco [gr] = 50

$G_s = 2,78$

$a = 0,98$

Fecha	Tiempo [min]	Temp. [°C]	C_T	R_{real}	R_c	% más fino	R_{menis}	L [cm]	K	Diámetro [mm]
15 / 12	1	25,0	1,3	40	39,3	77,0	41	9,6	0,0125	0,0387
15 / 12	2	25,0	1,3	38	37,3	73,1	39	9,9	0,0125	0,0278
15 / 12	3	25,0	1,3	37	36,3	71,1	38	10,1	0,0125	0,0229
15 / 12	4	25,0	1,3	36	35,3	69,2	37	10,2	0,0125	0,0200
15 / 12	8	25,0	1,3	35	34,3	67,2	36	10,4	0,0125	0,0143
15 / 12	15	25,0	1,3	33	32,3	63,3	34	10,7	0,0125	0,0106
15 / 12	30	25,0	1,3	30	29,3	57,4	31	11,2	0,0125	0,0076
15 / 12	60	25,0	1,3	28	27,3	53,5	29	11,5	0,0125	0,0055
15 / 12	90	25,0	1,3	26	25,3	49,6	27	11,9	0,0125	0,0045
15 / 12	240	25,0	1,3	21	20,3	39,8	22	12,7	0,0125	0,0029
16 / 12	1440	27,0	2,0	11	11,0	21,6	12	14,3	0,0122	0,0012
18 / 12	4320	27,0	2,0	9	9,0	17,6	10	14,7	0,0122	0,0007
19 / 12	5760	27,0	2,0	8	8,0	15,7	9	14,8	0,0122	0,0006

Referencias

G_s : gravedad específica

a : factor de corrección para el peso unitario de sólidos

C_T : corrección por temperatura

R_{real} : lectura real del hidrómetro

R_c : lectura corregida del hidrómetro

R_{menis} : hidrómetro corregido por menisco

L: profundidad efectiva

K: valor en f (T, G_s)

Muestra N°4

Agente Dispersante: NaPO₃

Corrección de cero = 2

Cantidad: 125 ml de solución al 4%

Corrección por menisco = 1

Peso del suelo seco [gr] = 50

G_s = 2,72

a = 0,99

Fecha	Tiempo [min]	Temp. [°C]	C _T	R _{real}	R _c	% más fino	R _{menis}	L [cm]	K	Diámetro [mm]
15 / 12	1	25,0	1,3	47	46,3	91,7	48	7,9	0,0127	0,0357
15 / 12	2	25,0	1,3	45	44,3	87,7	46	8,3	0,0127	0,0259
15 / 12	3	25,0	1,3	44	43,3	85,7	45	8,4	0,0127	0,0213
15 / 12	4	25,0	1,3	43	42,3	83,8	44	8,6	0,0127	0,0186
15 / 12	8	25,0	1,3	42	41,3	81,8	43	8,8	0,0127	0,0133
15 / 12	15	25,0	1,3	38	37,3	73,9	39	9,4	0,0127	0,0101
15 / 12	30	25,0	1,3	33	32,3	64,0	34	10,2	0,0127	0,0074
15 / 12	60	25,0	1,3	30	29,3	58,0	31	10,9	0,0127	0,0054
15 / 12	210	25,0	1,3	20	19,3	38,2	21	12,5	0,0127	0,0031
16 / 12	1440	27,0	2,0	13	13,0	25,7	14	14,0	0,0124	0,0012
18 / 12	4320	27,0	2,0	11	11,0	21,8	12	14,3	0,0124	0,0007
19 / 12	5760	27,0	2,0	11	11,0	21,8	12	14,3	0,0124	0,0006

Referencias

G_s: gravedad específica

a: factor de corrección para el peso unitario de sólidos

C_T: corrección por temperatura

R_{real}: lectura real del hidrómetro

R_c: lectura corregida del hidrómetro

R_{menis}: hidrómetro corregido por menisco

L: profundidad efectiva

K: valor en f (T, G_s)

Muestra N°5

Agente Dispersante: NaPO₃

Corrección de cero = 2

Cantidad: 125 ml de solución al 4%

Corrección por menisco = 1

Peso del suelo seco [gr] = 50

G_s = 2,75

a = 0,98

Fecha	Tiempo [min]	Temp. [°C]	C _T	R _{real}	R _c	% más fino	R _{menis}	L [cm]	K	Diámetro [mm]
15 / 12	1	25,0	1,3	24	23,3	45,7	25	12,2	0,0125	0,0437
15 / 12	2	25,0	1,3	21	20,3	39,8	22	12,7	0,0125	0,0315
15 / 12	3	25,0	1,3	20	19,3	37,8	21	12,9	0,0125	0,0259
15 / 12	4	25,0	1,3	19	18,3	35,9	20	13,0	0,0125	0,0225
15 / 12	8	25,0	1,3	17	16,3	31,9	18	13,3	0,0125	0,0161
15 / 12	15	25,0	1,3	16	15,3	30,0	17	13,5	0,0125	0,0119
15 / 12	30	25,0	1,3	15	14,3	28,0	16	13,7	0,0125	0,0084
15 / 12	60	25,0	1,3	13	12,3	24,1	14	14,0	0,0125	0,0060
15 / 12	180	25,0	1,3	11	10,3	20,2	12	14,3	0,0125	0,0035
16 / 12	1440	27,0	2,0	7	7,0	13,7	8	15,0	0,0122	0,0012
18 / 12	4320	27,0	2,0	6	6,0	11,8	7	15,2	0,0122	0,0007
19 / 12	5760	27,0	2,0	6	6,0	11,8	7	15,2	0,0122	0,0006

Referencias

G_s: gravedad específica

a: factor de corrección para el peso unitario de sólidos

C_T: corrección por temperatura

R_{real}: lectura real del hidrómetro

R_c: lectura corregida del hidrómetro

R_{menis}: hidrómetro corregido por menisco

L: profundidad efectiva

K: valor en f (T, G_s)

ANEXO 2. PLANILLA DE CÁLCULO DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA.

Muestra N°	W_m [gr]	W_{md} [gr]	W_{mdw} [gr]	W_{mw} [gr]
1	48,11	78,51	166,84	147,50
3	48,11	78,54	167,02	147,50
4	48,11	78,61	166,82	147,50
5	65,56	95,59	184,02	164,89

Referencias

W_m : peso del matraz

W_{md} : peso del matraz con suelo

W_{mdw} : peso del matraz con suelo y agua

W_{mw} : peso del matraz con agua

ANEXO 3. PLANILLAS DE CÁLCULO ENSAYO DE EXPANSIÓN Y COMPRESIÓN EN MUESTRAS INALTERADAS.

Datos probeta:

Muestra N°: 1	Peso muestra [gr] = 285,61
Altura [mm] = 38,00	γ_d [g/cm ³] = 2,35
Diámetro [mm] = 63,34	%W _{nat} = 1,6
Sección [cm ²] = 31,51	e _o = 0,167
Volumen [cm ³] = 119,74	S% = 26,2
	G _s = 2,74
	γ_h [g/cm ³] = 2,39

Salto N°1

Muestra sin inundar

Incremento [kg/cm²] = 0,10
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	27,53	0,00	0,00
300	17,3	27,53	0,00	0,00
3600	60,0	27,53	0,00	0,00

Salto N°2 (expansión libre)

Muestra inundada

Incremento [kg/cm²] = 0,00
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	27,53	0,00	0,00
300	17,3	27,53	0,00	0,00
3600	60,0	27,53	0,00	0,00
7200	84,9	26,93	-0,60	-1,58
79200	281,4	24,93	-2,60	-6,84
188400	434,1	24,53	-3,00	-7,89
432000	657,3	24,25	-3,28	-8,63
864000	929,5	23,74	-3,79	-9,97
1728000	1314,5	23,00	-4,53	-11,91

Comienza el ensayo de compresión

Salto N°3

Incremento [kg/cm^2] = 0,15

Presión Total [kg/cm^2] = 0,25

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	23,00	-4,53	-11,91
5	2,2	23,40	-4,13	-10,86
15	3,9	23,44	-4,09	-10,76
30	5,5	23,46	-4,07	-10,70
60	7,7	23,48	-4,05	-10,66
120	11,0	23,49	-4,04	-10,62
240	15,5	23,50	-4,03	-10,60
480	21,9	23,51	-4,02	-10,57
900	30,0	23,52	-4,01	-10,54
1800	42,4	23,53	-4,00	-10,52

Salto N°4

Incremento [kg/cm^2] = 0,28

Presión Total [kg/cm^2] = 0,53

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	23,53	-4,00	-10,52
5	2,2	23,87	-3,66	-9,62
15	3,9	23,93	-3,60	-9,47
30	5,5	23,96	-3,57	-9,39
60	7,7	24,00	-3,53	-9,28
120	11,0	24,03	-3,50	-9,20
240	15,5	24,05	-3,48	-9,15
480	21,9	24,07	-3,46	-9,10
900	30,0	24,09	-3,44	-9,04
1800	42,4	24,11	-3,42	-8,99
3600	60,0	24,13	-3,40	-8,94

Salto N°5

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,56$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,09$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	24,13	-3,40	-8,94
5	2,2	24,52	-3,01	-7,91
15	3,9	24,57	-2,96	-7,78
30	5,5	24,63	-2,90	-7,62
60	7,7	24,68	-2,85	-7,49
120	11,0	24,72	-2,81	-7,39
240	15,5	24,75	-2,78	-7,31
480	21,9	24,78	-2,75	-7,23
900	30,0	24,81	-2,72	-7,15
1800	42,4	24,83	-2,70	-7,10
3600	60,0	24,86	-2,67	-7,02

Salto N°6

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,09$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,18$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	24,86	-2,67	-7,02
5	2,2	25,28	-2,25	-5,91
15	3,9	25,35	-2,18	-5,73
30	5,5	25,40	-2,13	-5,60
60	7,7	25,45	-2,08	-5,47
120	11,0	25,49	-2,04	-5,36
240	15,5	25,53	-2,00	-5,26
480	21,9	25,57	-1,96	-5,15
900	30,0	25,60	-1,93	-5,07
1800	42,4	25,64	-1,89	-4,98
3600	60,0	25,65	-1,88	-4,94

Salto N°7

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,16$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 4,35$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	25,65	-1,88	-4,94
5	2,2	26,15	-1,38	-3,62
15	3,9	26,20	-1,33	-3,49
30	5,5	26,23	-1,30	-3,41
60	7,7	26,27	-1,26	-3,31
120	11,0	26,32	-1,21	-3,18
240	15,5	26,36	-1,17	-3,07
480	21,9	26,41	-1,12	-2,94
900	30,0	26,45	-1,08	-2,83
1800	42,4	26,49	-1,04	-2,73
3600	60,0	26,56	-0,97	-2,54

Salto N°8

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 4,21$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 8,56$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	26,56	-0,97	-2,54
5	2,2	26,94	-0,59	-1,54
15	3,9	26,99	-0,54	-1,41
30	5,5	27,03	-0,50	-1,31
60	7,7	27,08	-0,45	-1,18
120	11,0	27,12	-0,41	-1,07
240	15,5	27,18	-0,35	-0,91
480	21,9	27,23	-0,30	-0,78
900	30,0	27,30	-0,23	-0,60
1800	42,4	27,34	-0,19	-0,49
3600	60,0	27,39	-0,14	-0,36
86400	293,9	27,53	0,00	0,00

Tabla resumen para curva de compresibilidad:

Salto N°	Incremento (pesa) [kg]	Incremento (presión) [kg/cm ²]	Presión Total [kg/cm ²]	Deformación Vertical [%]	Relacion Vacíos e
0	0	0,01	0,01	0,00	0,167
1	0	0,10	0,10	0,00	0,167
2	0	0,00	0,10	-11,91	0,306
3	1,00	0,15	0,25	-10,52	0,290
4	1,00	0,28	0,53	-8,94	0,271
5	2,00	0,56	1,09	-7,02	0,249
6	4,00	1,09	2,18	-4,94	0,225
7	8,00	2,16	4,35	-2,54	0,197
8	16,00	4,21	8,56	0,00	0,167

Datos probeta:

Muestra N°: 3	Peso muestra [gr] = 240,98
Altura [mm] = 31,46	γ_d [g/cm ³] = 2,36
Diámetro [mm] = 63,20	%w _{nat} = 3,27
Sección [cm ²] = 31,37	e _o = 0,176
Volumen [cm ³] = 98,69	S% = 51,7
	G _s = 2,78
	γ_h [g/cm ³] = 2,44

Salto N°1

Muestra sin inundar

Incremento [kg/cm²] = 0,10
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,00	0,00	0,00
300	17,3	15,00	0,00	0,00
1800	42,4	15,00	0,00	0,00

Salto N°2 (expansión libre)

Muestra inundada

Incremento [kg/cm²] = 0,00
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,00	0,00	0,00
300	17,3	14,82	-0,18	-0,57
3600	60,0	12,36	-2,64	-8,39
14400	120,0	7,95	-7,05	-22,41
604800	777,7	4,39	-10,61	-33,73
777600	881,8	4,32	-10,68	-33,95
1036800	1018,2	4,26	-10,74	-34,14

Comienza el ensayo de compresión

Salto N°3

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,17$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,27$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	4,26	-10,74	-34,14
5	2,2	4,44	-10,56	-33,57
15	3,9	4,46	-10,54	-33,50
30	5,5	4,49	-10,51	-33,41
60	7,7	4,58	-10,42	-33,12
120	11,0	4,62	-10,38	-32,99
240	15,5	4,66	-10,34	-32,87
480	21,9	4,69	-10,31	-32,77
900	30,0	4,72	-10,28	-32,68
1800	42,4	4,74	-10,26	-32,61
3600	60,0	4,77	-10,23	-32,52

Salto N°4

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,28$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,55$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	4,77	-10,23	-32,52
5	2,2	5,19	-9,81	-31,18
15	3,9	5,29	-9,71	-30,86
30	5,5	5,41	-9,59	-30,48
60	7,7	5,50	-9,50	-30,20
120	11,0	5,59	-9,41	-29,91
240	15,5	5,65	-9,35	-29,72
480	21,9	5,72	-9,28	-29,50
900	30,0	5,76	-9,24	-29,37
1800	42,4	5,81	-9,20	-29,23
3600	60,0	5,85	-9,15	-29,08

Salto N°5

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,54$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,09$

Tiempo trans- currido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	5,85	-9,15	-29,08
5	2,2	6,32	-8,68	-27,59
15	3,9	6,42	-8,58	-27,27
30	5,5	6,55	-8,45	-26,86
60	7,7	6,64	-8,36	-26,57
120	11,0	6,76	-8,24	-26,19
240	15,5	6,85	-8,15	-25,91
480	21,9	6,95	-8,05	-25,59
900	30,0	7,03	-7,97	-25,33
1800	42,4	7,09	-7,91	-25,14
3600	60,0	7,15	-7,85	-24,95

Salto N°6

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,07$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,16$

Tiempo trans- currido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	7,15	-7,85	-24,95
5	2,2	7,68	-7,32	-23,27
15	3,9	7,73	-7,27	-23,11
30	5,5	7,85	-7,15	-22,73
60	7,7	7,94	-7,06	-22,44
120	11,0	8,05	-6,95	-22,09
240	15,5	8,17	-6,83	-21,71
480	21,9	8,30	-6,70	-21,30
900	30,0	8,39	-6,61	-21,01
1800	42,4	8,50	-6,50	-20,66
3600	60,0	8,58	-6,43	-20,42

Salto N°7

Incremento [kg/cm^2] = 2,18

Presión Total [kg/cm^2] = 4,34

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	8,58	-6,43	-20,42
5	2,2	9,08	-5,92	-18,82
15	3,9	9,14	-5,86	-18,63
30	5,5	9,22	-5,78	-18,37
60	7,7	9,34	-5,66	-17,99
120	11,0	9,43	-5,57	-17,71
240	15,5	9,57	-5,44	-17,28
480	21,9	9,70	-5,30	-16,85
900	30,0	9,82	-5,18	-16,47
1800	42,4	9,97	-5,03	-15,99
3600	60,0	10,10	-4,90	-15,58

Salto N°8

Incremento [kg/cm^2] = 4,23

Presión Total [kg/cm^2] = 8,57

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	10,10	-4,90	-15,58
5	2,2	10,65	-4,35	-13,83
15	3,9	10,74	-4,26	-13,54
30	5,5	10,80	-4,20	-13,35
60	7,7	10,82	-4,18	-13,29
120	11,0	10,90	-4,10	-13,03
240	15,5	11,05	-3,95	-12,56
480	21,9	11,17	-3,83	-12,17
900	30,0	11,31	-3,70	-11,75
1800	42,4	11,42	-3,58	-11,38
3600	60,0	11,61	-3,39	-10,78
86400	293,9	11,96	-3,04	-9,66

Tabla resumen para curva de compresibilidad:

Salto N°	Incremento (pesa) [kg]	Incremento (presión) [kg/cm ²]	Presión Total [kg/cm ²]	Deformación Vertical [%]	Relacion Vacíos e
0	0	0,01	0,01	0,00	0,176
1	0	0,10	0,10	0,00	0,176
2	0	0,00	0,10	-34,14	0,577
3	1,00	0,17	0,27	-32,52	0,558
4	1,00	0,28	0,55	-29,08	0,518
5	2,00	0,54	1,09	-24,95	0,469
6	4,00	1,07	2,16	-20,42	0,416
7	8,00	2,18	4,34	-15,58	0,359
8	8,00	4,34	8,57	-9,66	0,289

Datos probeta:

Muestra N°: 4	Peso muestra [gr] = 194,45
Altura [mm] = 25,30	γ_d [g/cm ³] = 2,46
Diámetro [mm] = 62,10	%w _{nat} = 3,29
Sección [cm ²] = 30,29	e _o = 0,107
Volumen [cm ³] = 76,63	S% = 83,5
	G _s = 2,72
	γ_h [g/cm ³] = 2,54

Salto N°1

Muestra sin inundar

Incremento [kg/cm²] = 0,10
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	27,74	0,00	0,00
300	17,3	27,74	0,00	0,00
1800	42,4	27,74	0,00	0,00

Salto N°2 (expansión libre)

Muestra inundada

Incremento [kg/cm²] = 0,00
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	27,74	0,00	0,00
300	17,3	27,74	0,00	0,00
3600	60,0	27,42	-0,32	-1,26
7200	84,9	27,20	-0,54	-2,13
86400	293,9	25,41	-2,33	-9,21
864000	929,5	22,70	-5,04	-19,92
1209600	1099,8	22,50	-5,24	-20,71

Comienza el ensayo de compresión

Salto N°3

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,19$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,30$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	22,50	-5,24	-20,71
5	2,2	22,58	-5,16	-20,40
15	3,9	22,59	-5,15	-20,36
30	5,5	22,61	-5,13	-20,28
60	7,7	22,63	-5,11	-20,20
120	11,0	22,64	-5,10	-20,16
240	15,5	22,65	-5,09	-20,12
480	21,9	22,66	-5,08	-20,08
900	30,0	22,67	-5,07	-20,04
1800	42,4	22,68	-5,06	-20,00
3600	60,0	22,69	-5,05	-19,96

Salto N°4

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,28$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,58$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	22,69	-5,05	-19,96
5	2,2	22,85	-4,89	-19,33
15	3,9	22,87	-4,87	-19,25
30	5,5	22,90	-4,84	-19,13
60	7,7	22,93	-4,81	-19,01
120	11,0	22,95	-4,79	-18,93
240	15,5	22,97	-4,77	-18,85
480	21,9	22,99	-4,75	-18,77
900	30,0	23,01	-4,73	-18,70
1800	42,4	23,02	-4,72	-18,66
3600	60,0	23,04	-4,70	-18,58

Salto N°5

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,58$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,16$

Tiempo trans- currido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	23,04	-4,70	-18,58
5	2,2	23,24	-4,50	-17,79
15	3,9	23,28	-4,46	-17,63
30	5,5	23,35	-4,39	-17,35
60	7,7	23,38	-4,36	-17,23
120	11,0	23,41	-4,33	-17,11
240	15,5	23,45	-4,29	-16,96
480	21,9	23,48	-4,26	-16,84
900	30,0	23,51	-4,23	-16,72
1800	42,4	23,54	-4,20	-16,60
3600	60,0	23,57	-4,17	-16,48

Salto N°6

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,09$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,25$

Tiempo trans- currido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	23,57	-4,17	-16,48
5	2,2	23,70	-4,04	-15,97
15	3,9	23,75	-3,99	-15,77
30	5,5	23,78	-3,96	-15,65
60	7,7	23,81	-3,93	-15,53
120	11,0	23,85	-3,89	-15,38
240	15,5	23,89	-3,85	-15,22
480	21,9	23,93	-3,81	-15,06
900	30,0	23,97	-3,77	-14,90
1800	42,4	24,02	-3,72	-14,70
3600	60,0	24,06	-3,68	-14,55

Salto N°7

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,30$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 4,54$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	24,06	-3,68	-14,55
5	2,2	24,27	-3,47	-13,72
15	3,9	24,29	-3,45	-13,64
30	5,5	24,31	-3,43	-13,56
60	7,7	24,37	-3,37	-13,32
120	11,0	24,42	-3,32	-13,12
240	15,5	24,47	-3,27	-12,92
480	21,9	24,52	-3,22	-12,73
900	30,0	24,57	-3,17	-12,53
1800	42,4	24,63	-3,11	-12,29
3600	60,0	24,69	-3,05	-12,06

Salto N°8

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 4,39$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 8,93$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	24,69	-3,05	-12,06
5	2,2	24,82	-2,92	-11,54
15	3,9	24,86	-2,88	-11,38
30	5,5	24,89	-2,85	-11,26
60	7,7	24,93	-2,81	-11,11
120	11,0	24,97	-2,77	-10,95
240	15,5	25,02	-2,72	-10,75
480	21,9	25,07	-2,67	-10,55
900	30,0	25,13	-2,62	-10,34
1800	42,4	25,17	-2,57	-10,16
3600	60,0	25,27	-2,47	-9,76
86400	293,9	26,49	-1,25	-4,94

Tabla resumen para curva de compresibilidad:

Salto N°	Incremento (pesa) [kg]	Incremento (presión) [kg/cm ²]	Presión Total [kg/cm ²]	Deformación Vertical [%]	Relacion Vacíos e
0	0	0,01	0,01	0,00	0,107
1	0	0,10	0,10	0,00	0,107
2	0	0,00	0,10	-20,71	0,336
3	1,00	0,19	0,30	-19,96	0,328
4	1,00	0,28	0,58	-18,58	0,313
5	2,00	0,58	1,16	-16,48	0,290
6	4,00	1,09	2,25	-14,55	0,268
7	8,00	2,30	4,54	-12,06	0,241
8	8,00	4,54	8,93	-4,94	0,162

Datos probeta:

Muestra N°: 5	Peso muestra [gr] = 230,73
Altura [mm] = 31,54	γ_d [g/cm ³] = 2,26
Diámetro [mm] = 63,50	%w _{nat} = 2,3
Sección [cm ²] = 31,67	e _o = 0,218
Volumen [cm ³] = 99,88	S% = 28,8
	G _s = 2,75
	γ_h [g/cm ³] = 2,31

Salto N°1

Muestra sin inundar

Incremento [kg/cm²] = 0,10
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	26,09	0,00	0,00
300	17,3	26,09	0,00	0,00
1800	42,4	26,09	0,00	0,00

Salto N°2 (expansión libre)

Muestra inundada

Incremento [kg/cm²] = 0,00
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	26,09	0,00	0,00
300	17,3	26,05	-0,04	-0,13
3600	60,0	25,19	-0,90	-2,85
7200	84,9	24,86	-1,23	-3,90
86400	293,9	24,01	-2,08	-6,59
950400	974,9	23,83	-2,26	-7,17
1209600	1099,8	23,81	-2,28	-7,23

Comienza el ensayo de compresión

Salto N°3

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,15$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,25$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	23,81	-2,28	-7,23
5	2,2	24,04	-2,05	-6,50
15	3,9	24,05	-2,04	-6,47
30	5,5	24,07	-2,02	-6,40
60	7,7	24,10	-1,99	-6,31
120	11,0	24,12	-1,97	-6,25
240	15,5	24,14	-1,95	-6,18
480	21,9	24,16	-1,93	-6,12
900	30,0	24,18	-1,91	-6,06
1800	42,4	24,19	-1,90	-6,02
3600	60,0	24,20	-1,89	-5,99

Salto N°4

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,28$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,53$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	24,20	-1,89	-5,99
5	2,2	24,45	-1,64	-5,20
15	3,9	24,46	-1,63	-5,17
30	5,5	24,48	-1,61	-5,10
60	7,7	24,54	-1,55	-4,91
120	11,0	24,57	-1,52	-4,82
240	15,5	24,61	-1,48	-4,69
480	21,9	24,65	-1,44	-4,57
900	30,0	24,68	-1,41	-4,47
1800	42,4	24,71	-1,38	-4,38
3600	60,0	24,73	-1,36	-4,31

Salto N°5

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,56$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,09$

Tiempo trans- currido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	24,73	-1,36	-4,31
5	2,2	25,00	-1,09	-3,46
15	3,9	25,04	-1,05	-3,33
30	5,5	25,07	-1,02	-3,23
60	7,7	25,09	-1,00	-3,17
120	11,0	25,13	-0,96	-3,04
240	15,5	25,17	-0,92	-2,92
480	21,9	25,22	-0,87	-2,76
900	30,0	25,27	-0,82	-2,62
1800	42,4	25,30	-0,79	-2,50
3600	60,0	25,34	-0,75	-2,38

Salto N°6

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,09$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,17$

Tiempo trans- currido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	25,34	-0,75	-2,38
5	2,2	25,62	-0,47	-1,49
15	3,9	25,65	-0,44	-1,40
30	5,5	25,68	-0,41	-1,30
60	7,7	25,71	-0,38	-1,20
120	11,0	25,74	-0,35	-1,11
240	15,5	25,78	-0,31	-0,98
480	21,9	25,83	-0,26	-0,82
900	30,0	25,87	-0,22	-0,70
1800	42,4	25,92	-0,17	-0,54
3600	60,0	25,96	-0,13	-0,41
7200	84,9	26,00	-0,09	-0,29
86400	293,9	26,08	-0,01	-0,03

Salto N°7

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,16$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 4,33$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	26,08	-0,01	-0,03
5	2,2	26,37	0,28	0,89
15	3,9	26,40	0,31	0,98
30	5,5	26,43	0,34	1,08
60	7,7	26,45	0,36	1,14
120	11,0	26,48	0,39	1,24
240	15,5	26,52	0,43	1,36
480	21,9	26,56	0,47	1,49
900	30,0	26,59	0,50	1,59
1800	42,4	26,65	0,56	1,78
3600	60,0	26,68	0,59	1,87

Tabla resumen para curva de compresibilidad:

Salto N°	Incremento (pesa) [kg]	Incremento (presión) [kg/cm ²]	Presión Total [kg/cm ²]	Deformación Vertical [%]	Relacion Vacíos e
0	0	0,01	0,01	0,00	0,218
1	0	0,10	0,10	0,00	0,218
2	0	0,00	0,10	-7,23	0,306
3	1,00	0,15	0,25	-5,99	0,291
4	1,00	0,28	0,53	-4,31	0,270
5	2,00	0,56	1,09	-2,38	0,247
6	4,00	1,09	2,17	-0,03	0,218
7	8,00	2,16	4,33	1,87	0,195

ANEXO 4. PLANILLAS DE CÁLCULO ENSAYO DE EXPANSIÓN Y COMPRESIÓN EN MUESTRAS RECOMPACTADAS CON HUMEDAD PRÓCTOR.

Datos probeta:

Muestra N°: 1	Peso muestra [gr] = 156,41
Altura [mm] = 25,30	γ_h [g/cm ³] = 1,98
Diámetro [mm] = 63,00	%w _{comp} = 16,2
Sección [cm ²] = 31,17	γ_d [g/cm ³] = 1,71
Volumen [cm ³] = 78,87	e _o = 0,629
	S% = 71,6
	G _s = 2,78

Salto N°1

Muestra sin inundar

Incremento [kg/cm²] = 0,102
Presión Total [kg/cm²] = 0,102

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	3,90	0,00	0,00
300	17,3	3,84	0,06	0,26
900	30,0	3,82	0,08	0,32
1800	42,4	3,80	0,10	0,40

Salto N°2 (expansión libre)

Muestra inundada

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,00$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,102$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	3,80	0,10	0,40
300	17,3	3,78	0,12	0,47
900	30,0	3,83	0,07	0,30
1800	42,4	3,88	0,02	0,10
3600	60,0	3,92	-0,02	-0,08
7200	84,9	3,97	-0,07	-0,28
14400	120,0	4,01	-0,11	-0,43
79200	281,4	4,09	-0,19	-0,75
345600	587,9	4,12	-0,22	-0,87
432000	657,3	4,20	-0,30	-1,19
518400	720,0	4,21	-0,31	-1,21

Ensayo de compresión

Salto N°3

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,15$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,25$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	4,21	-0,31	-1,21
5	2,2	4,20	-0,30	-1,19
15	3,9	4,20	-0,30	-1,17
30	5,5	4,19	-0,29	-1,15
60	7,7	4,19	-0,29	-1,15
120	11,0	4,19	-0,29	-1,13
240	15,5	4,19	-0,29	-1,13
480	21,9	4,18	-0,28	-1,11
900	30,0	4,18	-0,28	-1,11
1800	42,4	4,18	-0,28	-1,11

Salto N°4

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,28$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,53$

Tiempo trans- currido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	4,18	-0,28	-1,11
5	2,2	4,10	-0,20	-0,79
15	3,9	4,09	-0,19	-0,75
30	5,5	4,08	-0,18	-0,71
60	7,7	4,07	-0,17	-0,67
120	11,0	4,06	-0,16	-0,63
240	15,5	4,05	-0,15	-0,59
480	21,9	4,04	-0,14	-0,55
900	30,0	4,04	-0,14	-0,53
1800	42,4	4,03	-0,13	-0,51

Salto N°5

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,57$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,10$

Tiempo trans- currido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	4,03	-0,13	-0,51
5	2,2	3,86	0,04	0,16
15	3,9	3,84	0,06	0,24
30	5,5	3,83	0,07	0,28
60	7,7	3,81	0,09	0,38
120	11,0	3,79	0,11	0,43
240	15,5	3,77	0,13	0,51
480	21,9	3,75	0,15	0,59
900	30,0	3,73	0,17	0,67
1800	42,4	3,71	0,19	0,75

Salto N°6

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,14$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,24$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	3,71	0,19	0,75
5	2,2	3,48	0,42	1,66
15	3,9	3,46	0,44	1,74
30	5,5	3,45	0,45	1,78
60	7,7	3,42	0,48	1,90
120	11,0	3,40	0,50	1,98
240	15,5	3,38	0,52	2,06
480	21,9	3,35	0,55	2,17
900	30,0	3,34	0,56	2,21
1800	42,4	3,31	0,59	2,33

Salto N°7

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,15$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 4,39$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	3,31	0,59	2,33
5	2,2	3,01	0,89	3,52
15	3,9	2,99	0,91	3,60
30	5,5	2,98	0,92	3,64
60	7,7	2,95	0,95	3,75
120	11,0	2,93	0,97	3,83
240	15,5	2,90	1,00	3,95
480	21,9	2,87	1,03	4,07
900	30,0	2,84	1,06	4,19
1800	42,4	2,81	1,09	4,31

Tabla resumen para curva de compresibilidad:

Salto N°	Incremento (pesa) [kg]	Incremento (presión) [kg/cm ²]	Presión Total [kg/cm ²]	Deformación Vertical [%]	Relacion Vacíos e
0	0	0,01	0,01	0,00	0,629
1	0	0,10	0,10	0,40	0,622
2	0	0,00	0,10	-1,21	0,648
3	1,00	0,15	0,25	-1,11	0,647
4	1,00	0,28	0,53	-0,51	0,637
5	2,00	0,57	1,10	0,75	0,617
6	4,00	1,14	2,24	2,33	0,591
7	8,00	2,15	4,39	4,31	0,559

Datos probeta:

Muestra N°: 3	Peso muestra [gr] = 154,47
Altura [mm] = 25,30	γ_h [g/cm ³] = 1,96
Diámetro [mm] = 63,00	%w _{comp} = 17,7
Sección [cm ²] = 31,17	γ_d [g/cm ³] = 1,66
Volumen [cm ³] = 78,87	e_o = 0,671
	S% = 73,4
	G_s = 2,78

Salto N°1

Muestra sin inundar

Incremento [kg/cm²] = 0,102
Presión Total [kg/cm²] = 0,102

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	4,68	0,00	0,00
300	17,3	4,63	0,05	0,20
900	30,0	4,61	0,07	0,28
1800	42,4	4,60	0,08	0,32

Salto N°2 (expansión libre)

Muestra inundada

Incremento [kg/cm²] = 0,00
Presión Total [kg/cm²] = 0,102

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	4,60	0,08	0,32
300	17,3	4,74	-0,06	-0,24
900	30,0	4,79	-0,11	-0,43
1800	42,4	4,84	-0,16	-0,63
3600	60,0	4,90	-0,22	-0,87
7200	84,9	4,98	-0,30	-1,19
10800	103,9	5,02	-0,34	-1,34
18000	134,2	5,07	-0,39	-1,54
86400	293,9	5,20	-0,52	-2,06
172800	415,7	5,30	-0,62	-2,45
604800	777,7	5,54	-0,86	-3,40

Ensayo de compresión

Salto N°3

Incremento [kg/cm^2] = 0,15

Presión Total [kg/cm^2] = 0,25

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	5,54	-0,86	-3,40
5	2,2	5,54	-0,86	-3,40
15	3,9	5,53	-0,85	-3,36
30	5,5	5,53	-0,85	-3,36
60	7,7	5,52	-0,84	-3,32
120	11,0	5,52	-0,84	-3,32
240	15,5	5,52	-0,84	-3,32
480	21,9	5,52	-0,84	-3,32
900	30,0	5,51	-0,83	-3,28
1800	42,4	5,51	-0,83	-3,26

Salto N°4

Incremento [kg/cm^2] = 0,28

Presión Total [kg/cm^2] = 0,53

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	5,51	-0,83	-3,26
5	2,2	5,40	-0,72	-2,85
15	3,9	5,39	-0,71	-2,81
30	5,5	5,38	-0,70	-2,77
60	7,7	5,36	-0,68	-2,69
120	11,0	5,35	-0,67	-2,65
240	15,5	5,34	-0,66	-2,61
480	21,9	5,32	-0,64	-2,53
900	30,0	5,31	-0,63	-2,49
1800	42,4	5,29	-0,61	-2,41

Salto N°5

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,57$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,10$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	5,29	-0,61	-2,41
5	2,2	5,09	-0,41	-1,62
15	3,9	5,07	-0,39	-1,54
30	5,5	5,05	-0,37	-1,46
60	7,7	5,03	-0,35	-1,38
120	11,0	5,01	-0,33	-1,30
240	15,5	4,98	-0,30	-1,19
480	21,9	4,94	-0,26	-1,03
900	30,0	4,91	-0,23	-0,91
1800	42,4	4,87	-0,19	-0,75

Salto N°6

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,14$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,24$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	4,87	-0,19	-0,75
5	2,2	4,57	0,11	0,43
15	3,9	4,55	0,13	0,51
30	5,5	4,53	0,15	0,59
60	7,7	4,50	0,18	0,71
120	11,0	4,48	0,20	0,79
240	15,5	4,45	0,23	0,91
480	21,9	4,40	0,28	1,11
900	30,0	4,39	0,29	1,15
1800	42,4	4,29	0,39	1,54

Salto N°7

Incremento $[kg/cm^2] = 2,15$

Presión Total $[kg/cm^2] = 4,39$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	4,29	0,39	1,54
5	2,2	3,95	0,73	2,89
15	3,9	3,91	0,77	3,04
30	5,5	3,89	0,79	3,12
60	7,7	3,86	0,82	3,24
120	11,0	3,83	0,85	3,36
240	15,5	3,78	0,90	3,56
480	21,9	3,73	0,95	3,75
900	30,0	3,66	1,02	4,03
1800	42,4	3,58	1,10	4,35

Tabla resumen para curva de compresibilidad:

Salto N°	Incremento (pesa) [kg]	Incremento (presión) [kg/cm ²]	Presión Total [kg/cm ²]	Deformación Vertical [%]	Relacion Vacíos e
0	0	0,01	0,01	0,00	0,671
1	0	0,10	0,10	0,32	0,665
2	0	0,00	0,10	-3,40	0,727
3	1,00	0,15	0,25	-3,26	0,725
4	1,00	0,28	0,53	-2,41	0,711
5	2,00	0,57	1,10	-0,75	0,683
6	4,00	1,14	2,24	1,54	0,645
7	8,00	2,15	4,39	4,35	0,598

Datos probeta:

Muestra N°: 4	Peso muestra [gr] = 152,62
Altura [mm] = 25,30	γ_h [g/cm ³] = 1,94
Diámetro [mm] = 63,00	%w _{comp} = 14,9
Sección [cm ²] = 31,17	γ_d [g/cm ³] = 1,68
Volumen [cm ³] = 78,87	e_o = 0,615
	S% = 65,9
	G_s = 2,72

Salto N°1

Muestra sin inundar

Incremento [kg/cm²] = 0,10
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,46	0,00	0,00
300	17,3	15,54	0,08	0,32
900	30,0	15,56	0,10	0,40
1800	42,4	15,57	0,11	0,43

Salto N°2 (expansión libre)

Muestra inundada

Incremento [kg/cm²] = 0,00
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,57	0,11	0,43
300	17,3	15,57	0,11	0,43
900	30,0	15,52	0,06	0,24
1800	42,4	15,45	-0,01	-0,04
3600	60,0	15,35	-0,11	-0,43
7200	84,9	15,21	-0,25	-0,99
14400	120,0	15,09	-0,37	-1,46
79200	281,4	14,88	-0,58	-2,29
345600	587,9	14,52	-0,94	-3,72
432000	657,3	14,45	-1,01	-3,99
518400	720,0	14,41	-1,05	-4,15

Ensayo de compresión

Salto N°3

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,17$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,27$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	14,41	-1,05	-4,15
5	2,2	14,45	-1,01	-3,99
15	3,9	14,45	-1,01	-3,99
30	5,5	14,46	-1,00	-3,95
60	7,7	14,46	-1,00	-3,95
120	11,0	14,47	-0,99	-3,91
240	15,5	14,48	-0,99	-3,89
480	21,9	14,48	-0,98	-3,87
900	30,0	14,49	-0,97	-3,83
1800	42,4	14,50	-0,96	-3,79

Salto N°4

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,27$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,54$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	14,50	-0,96	-3,79
5	2,2	14,58	-0,88	-3,48
15	3,9	14,59	-0,87	-3,44
30	5,5	14,60	-0,86	-3,40
60	7,7	14,62	-0,84	-3,32
120	11,0	14,63	-0,83	-3,28
240	15,5	14,65	-0,81	-3,20
480	21,9	14,67	-0,80	-3,14
900	30,0	14,68	-0,78	-3,08
1800	42,4	14,70	-0,76	-3,00

Salto N°5

Incremento $[kg/cm^2] = 0,57$
Presión Total $[kg/cm^2] = 1,11$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	14,70	-0,76	-3,00
5	2,2	14,85	-0,61	-2,41
15	3,9	14,88	-0,58	-2,29
30	5,5	14,90	-0,56	-2,21
60	7,7	14,92	-0,54	-2,13
120	11,0	14,95	-0,51	-2,02
240	15,5	14,98	-0,48	-1,90
480	21,9	15,02	-0,45	-1,76
900	30,0	15,05	-0,41	-1,62
1800	42,4	15,10	-0,36	-1,42

Salto N°6

Incremento $[kg/cm^2] = 1,06$
Presión Total $[kg/cm^2] = 2,17$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,10	-0,36	-1,42
5	2,2	15,28	-0,18	-0,71
15	3,9	15,30	-0,16	-0,63
30	5,5	15,32	-0,14	-0,55
60	7,7	15,35	-0,11	-0,43
120	11,0	15,38	-0,08	-0,32
240	15,5	15,43	-0,04	-0,14
480	21,9	15,48	0,02	0,08
900	30,0	15,52	0,06	0,24
1800	42,4	15,58	0,12	0,47

Salto N°7

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,23$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 4,40$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,58	0,12	0,47
5	2,2	15,79	0,33	1,30
15	3,9	15,81	0,35	1,38
30	5,5	15,83	0,37	1,46
60	7,7	15,85	0,39	1,54
120	11,0	15,88	0,42	1,66
240	15,5	15,93	0,47	1,86
480	21,9	15,97	0,51	2,02
900	30,0	16,04	0,58	2,29
1800	42,4	16,13	0,67	2,65

Tabla resumen para curva de compresibilidad:

Salto N°	Incremento (pesa) [kg]	Incremento (presión) [kg/cm ²]	Presión Total [kg/cm ²]	Deformación Vertical [%]	Relacion Vacíos e
0	0	0,01	0,01	0,00	0,615
1	0	0,10	0,10	0,43	0,608
2	0	0,00	0,10	-4,15	0,682
3	1,00	0,17	0,27	-3,79	0,676
4	1,00	0,27	0,54	-3,00	0,664
5	2,00	0,57	1,11	-1,42	0,638
6	4,00	1,06	2,17	0,47	0,607
7	8,00	2,23	4,40	2,65	0,572

Datos probeta:

Muestra N°: 5	Peso muestra [gr] = 157,36
Altura [mm] = 25,30	γ_h [g/cm ³] = 2,00
Diámetro [mm] = 63,00	%w _{comp} = 13,4
Sección [cm ²] = 31,17	γ_d [g/cm ³] = 1,76
Volumen [cm ³] = 78,87	e_o = 0,563
	S% = 65,5
	G_s = 2,75

Salto N°1

Muestra sin inundar

Incremento [kg/cm²] = 0,10
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,44	0,00	0,00
300	17,3	15,48	0,04	0,16
900	30,0	15,49	0,05	0,20
1800	42,4	15,50	0,06	0,24

Salto N°2 (expansión libre)

Muestra inundada

Incremento [kg/cm²] = 0,00
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,50	0,06	0,24
300	17,3	15,50	0,06	0,24
900	30,0	15,49	0,04	0,18
1800	42,4	15,48	0,04	0,14
3600	60,0	15,47	0,03	0,12
7200	84,9	15,46	0,02	0,08
14400	120,0	15,46	0,02	0,08
79200	281,4	15,43	-0,01	-0,04
345600	587,9	15,41	-0,03	-0,12
432000	657,3	15,41	-0,03	-0,12
518400	720,0	15,41	-0,03	-0,12

Ensayo de compresión

Salto N°3

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,17$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,27$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,41	-0,03	-0,12
5	2,2	15,42	-0,02	-0,08
15	3,9	15,43	-0,01	-0,04
30	5,5	15,43	-0,01	-0,04
60	7,7	15,44	0,00	0,00
120	11,0	15,44	0,00	0,00
240	15,5	15,45	0,01	0,02
480	21,9	15,45	0,01	0,02
900	30,0	15,45	0,01	0,04
1800	42,4	15,50	0,06	0,24

Salto N°4

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,28$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,55$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,50	0,06	0,24
5	2,2	15,55	0,11	0,43
15	3,9	15,56	0,12	0,47
30	5,5	15,58	0,14	0,55
60	7,7	15,59	0,15	0,59
120	11,0	15,60	0,16	0,63
240	15,5	15,61	0,17	0,67
480	21,9	15,62	0,18	0,71
900	30,0	15,62	0,18	0,71
1800	42,4	15,63	0,19	0,75

Salto N°5

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,55$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,10$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,63	0,19	0,75
5	2,2	15,78	0,34	1,34
15	3,9	15,80	0,36	1,42
30	5,5	15,82	0,38	1,50
60	7,7	15,83	0,39	1,54
120	11,0	15,85	0,41	1,62
240	15,5	15,85	0,41	1,62
480	21,9	15,86	0,42	1,66
900	30,0	15,87	0,43	1,70
1800	42,4	15,83	0,39	1,54

Salto N°6

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,12$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,22$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	15,83	0,39	1,54
5	2,2	16,09	0,65	2,57
15	3,9	16,11	0,67	2,65
30	5,5	16,13	0,69	2,73
60	7,7	16,15	0,71	2,81
120	11,0	16,16	0,72	2,85
240	15,5	16,17	0,73	2,89
480	21,9	16,18	0,74	2,92
900	30,0	16,19	0,75	2,96
1800	42,4	16,20	0,76	3,00

Salto N°7

Incremento [kg/cm²] = 2,15

Presión Total [kg/cm²] = 4,37

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	16,20	0,76	3,00
5	2,2	16,53	1,09	4,31
15	3,9	16,55	1,11	4,39
30	5,5	16,57	1,13	4,47
60	7,7	16,59	1,15	4,55
120	11,0	16,61	1,17	4,62
240	15,5	16,63	1,19	4,68
480	21,9	16,64	1,20	4,74
900	30,0	16,66	1,22	4,82
1800	42,4	16,68	1,24	4,88

Tabla resumen para curva de compresibilidad:

Salto N°	Incremento (pesa) [kg]	Incremento (presión) [kg/cm ²]	Presión Total [kg/cm ²]	Deformación Vertical [%]	Relacion Vacíos e
0	0	0,01	0,01	0,00	0,563
1	0	0,10	0,10	0,24	0,559
2	0	0,00	0,10	-0,12	0,565
3	1,00	0,17	0,27	0,24	0,559
4	1,00	0,28	0,55	0,75	0,551
5	2,00	0,55	1,10	1,54	0,539
6	4,00	1,12	2,22	3,00	0,516
7	8,00	2,15	4,37	4,88	0,487

ANEXO 5. PLANILLAS DE CÁLCULO ENSAYO DE EXPANSIÓN Y COMPRESIÓN EN MUESTRA RECOMPACTADA EN SECO.

Datos probeta:

Muestra N°: 3	Peso muestra [gr] = 121,6
Altura [mm] = 25,30	%W _{nat} = 3,27
Diámetro [mm] = 63,00	γ_d [g/cm ³] = 1,49
Sección [cm ²] = 31,17	e _o = 0,862
Volumen [cm ³] = 78,87	S% = 10,5
	G _s = 2,78

Salto N°1

Muestra sin inundar

Incremento [kg/cm²] = 0,10
Presión Total [kg/cm²] = 0,10

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	17,16	0,00	0,00
300	17,3	17,14	0,02	0,08
900	30,0	17,14	0,02	0,08
1800	42,4	17,14	0,02	0,08

Salto N°2 (expansión libre)

Muestra inundada

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,00$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,10$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	17,14	0,02	0,08
300	17,3	17,20	-0,04	-0,16
900	30,0	17,30	-0,14	-0,55
1800	42,4	17,36	-0,20	-0,79
3600	60,0	17,50	-0,34	-1,34
7200	84,9	17,71	-0,54	-2,15
14400	120,0	18,00	-0,84	-3,32
25200	158,7	18,32	-1,16	-4,58
86400	293,9	18,80	-1,64	-6,48
172800	415,7	18,87	-1,71	-6,76
604800	777,7	19,07	-1,91	-7,55

Ensayo de compresión

Salto N°3

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,17$

Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,27$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	19,07	-1,91	-7,55
5	2,2	19,05	-1,89	-7,47
15	3,9	19,04	-1,88	-7,43
30	5,5	19,03	-1,87	-7,39
60	7,7	19,02	-1,86	-7,35
120	11,0	19,02	-1,86	-7,35
240	15,5	19,01	-1,85	-7,31
480	21,9	19,00	-1,84	-7,27
900	30,0	18,99	-1,83	-7,23
1800	42,4	18,97	-1,81	-7,15

Salto N°4

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,27$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,54$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	18,97	-1,81	-7,15
5	2,2	18,84	-1,68	-6,64
15	3,9	18,82	-1,66	-6,56
30	5,5	18,81	-1,65	-6,52
60	7,7	18,79	-1,63	-6,44
120	11,0	18,77	-1,61	-6,36
240	15,5	18,74	-1,58	-6,25
480	21,9	18,69	-1,53	-6,05
900	30,0	18,65	-1,49	-5,89
1800	42,4	18,58	-1,42	-5,61

Salto N°5

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 0,56$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,10$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	18,58	-1,42	-5,61
5	2,2	18,30	-1,14	-4,51
15	3,9	18,30	-1,14	-4,51
30	5,5	18,30	-1,14	-4,51
60	7,7	18,30	-1,14	-4,51
120	11,0	18,30	-1,14	-4,51
240	15,5	18,27	-1,11	-4,39
480	21,9	18,20	-1,04	-4,11
900	30,0	17,95	-0,79	-3,12
1800	42,4	17,83	-0,67	-2,65

Salto N°6

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 1,12$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,22$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	17,83	-0,67	-2,65
5	2,2	17,55	-0,39	-1,54
15	3,9	17,40	-0,24	-0,95
30	5,5	17,38	-0,22	-0,87
60	7,7	17,38	-0,22	-0,87
120	11,0	17,38	-0,22	-0,87
240	15,5	17,38	-0,22	-0,87
480	21,9	17,21	-0,05	-0,20
900	30,0	17,21	-0,04	-0,18
1800	42,4	16,90	0,26	1,03

Salto N°7

Incremento $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 2,15$
Presión Total $[\text{kg}/\text{cm}^2] = 4,37$

Tiempo transcurrido [seg]	Raíz (Tiempo) [Raíz (seg)]	Lectura flexímetro [mm]	Asentam [mm]	Deform. vertical [%]
0	0,0	16,90	0,26	1,03
5	2,2	16,50	0,66	2,61
15	3,9	16,48	0,68	2,69
30	5,5	16,46	0,70	2,77
60	7,7	16,44	0,72	2,85
120	11,0	16,40	0,76	3,00
240	15,5	16,38	0,78	3,08
480	21,9	16,38	0,78	3,08
900	30,0	16,24	0,92	3,64
1800	42,4	15,96	1,20	4,74

Tabla resumen para curva de compresibilidad:

Salto N°	Incremento (pesa) [kg]	Incremento (presión) [kg/cm ²]	Presión Total [kg/cm ²]	Deformación Vertical [%]	Relacion Vacíos e
0	0	0,01	0,01	0,00	0,862
1	0	0,10	0,10	0,08	0,861
2	0	0,00	0,10	-7,55	1,003
3	1,00	0,17	0,27	-7,15	0,995
4	1,00	0,27	0,54	-5,61	0,966
5	2,00	0,56	1,10	-2,65	0,911
6	4,00	1,12	2,22	1,03	0,843
7	8,00	2,15	4,37	4,74	0,774