

ANALISIS DE DESEMPEÑO DE LA CAMADA DEL BALASTO FERROVIARIO CON
ARENA Y SIN ARENA POR INFILTRACIÓN DE AGUA. (ESTUDIO EN CASO EN
SUELO DE LA UNIVERSIDAD ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP), BRASIL).

SILVIA LORENA SERRANO BRAVO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA

2018

ANALISIS DE DESEMPEÑO DE LA CAMADA DEL BALASTO FERROVIARIO CON
ARENA Y SIN ARENA POR INFILTRACIÓN DE AGUA. (ESTUDIO EN CASO EN
SUELO DE LA UNIVERSIDAD ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP), BRASIL).

SILVIA LORENA SERRANO BRAVO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
Ingeniera Civil

DIRECTOR
WILFREDO DELTORO RODRÍGUEZ
PhD.Ing. Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA

2018

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por el don de la vida, por la salud, paz y sabiduría.

Al profesor Cassio Eduardo Lima de Paiva, orientador en esta investigación, por la orientación dedicada, paciencia, apoyo, incentivo y por sus enseñanzas, absolutamente indispensables para la realización de este trabajo.

Al profesor Wilfredo Deltoro Rodríguez, por la colaboración, auxilio, y apoyo prestados durante las actividades de desarrollo en este trabajo, por la amistad, cariño y respeto.

A mis amados padres, Javier Serrano y Ofelia Bravo, por el amor incondicional, confianza, apoyo y paciencia. Gracias por darme fuerzas para luchar por mis sueños, siempre con mucho cariño, comprensión y dulzura, y por tornar posible viajar a Brasil para la realización de este trabajo.

A toda mi familia, por estar siempre tan presentes y por hacerme sentir tan amada. Mi gracias a todas mis tías y tíos, y en especial a mi abue Hilda por apoyarme, por su gran voto de confianza y ser mediadora en mi intercambio a Brasil, por su inmenso amor, cariño y comprensión.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	19
1.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MATERIAL Y MÉTODOS	20
2.1 SITIO DE LOS ENSAYOS	20
2.2 CARACTERIZACIÓN DE SUELO	21
2.3 ESTUDIOS DE PERMEABILIDAD	22
2.4 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN.....	25
2.5 ENSAYOS DE CARGA	26
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	28
3.1 PORCENTAJE DE HUMEDAD DEL SUELO	28
3.2 CAPACIDAD DRENANTE (INFILTRACIÓN).....	29
3.3 PENETRACIÓN DEL BALASTO EN LA CAPA SUPERIOR DE LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA.....	32
4. CONCLUSIONES.....	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXOS	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Índices físicos del suelo proveniente del campus de la Unicamp (Campinas SP).....	21
Tabla 2. Descripción de las condiciones que presentaba cada agujero.	24
Tabla 3. Porcentaje de humedad del suelo determinado en laboratorio.	28
Tabla 4. Tasa de infiltración para las cuatro condiciones en los dos locales.	30
Tabla 5. Tiempos de infiltración calculado para el registro de lluvia máxima en el Municipio de Campinas en los últimos 20 años.	32
Tabla 6. Índices de Penetración determinador a través del ensayo DCP.	33
Tabla 7. CBR obtenido a través del índice de penetración en el Sitio 1.....	33
Tabla 8. CBR obtenido a través del índice de penetración en el Sitio 2.....	33
Tabla 9. Densidad, G.C y penetración absoluta en milímetros del conjunto balasto - sub-rasante debido al ensayo de carga estática.	35
Tabla 10. Densidad, G.C y penetración absoluta en milímetros del conjunto balasto - sub-rasante debido al ensayo de carga dinámica.	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil transversal de una vía férrea	13
Figura 2. Principales ferrovías en el territorio brasileño	14
Figura 3. Lodos en balasto bajo condiciones deficientes de drenaje.	15
Figura 4. Línea N° 8 - Diamante del CPTM.....	18
Figura 5. Localización de los campos de ensayo de permeabilidad en el campus de la Unicamp.	20
Figura 6. Agujeros en el campo de prueba No 2.....	22
Figura 7. Equipo utilizado para recolectar las muestras de suelo.	23
Figura 8. Moldes de PVC enumerados.	26
Figura 9. . Cuerpo de prueba con suelo saturado después de haber sido sometido al ensayo dinámico (Rodríguez, 2016).....	36

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Curvas de compresión edométrica normalizada del suelo).....	47
ANEXO B. Resultado de tensiones e índices de compresión obtenidos en los ensayos simples.....	47
ANEXO C. Variación de Cv con la tensión aplicada.....	48
ANEXO D. Variación de Cv con la tensión aplicada.....	49
ANEXO E. Coeficientes de permeabilidad de perfil del suelo estudiado.....	49
ANEXO F. Conductividades hidráulicas vertical y horizontal vs profundidad.....	50
ANEXO G. Curvas de Retención: Porcentaje de Humedad gravimétrico vs Succión Matricial.....	51
ANEXO H. Curvas de retención: porcentaje de humedad gravimétrico vs Succión matricial -1.0 m (papel filtro).....	52
ANEXO I. Curvas de retención: porcentaje de humedad gravimétrico vs Succión matricial -2.0 m (papel filtro).....	53
ANEXO J. Perfil medio e índices físicos del suelo estudiado.....	54
ANEXO K. Clasificación unificada propuesta por Casagrande.....	55
ANEXO L. Penetración del cono en centímetros para el ensayo in situ.....	56
ANEXO M. Penetración del cono en centímetros para el ensayo en laboratorio.....	57
ANEXO N. Correlación DN (cm) x CBR (%) para el ensayo realizado in situ.....	58
ANEXO O. Correlación DN (cm) x CBR (%) para el ensayo realizado en el laboratorio del DGCT de la FEC.....	59

ANEXO P. Grados de compactación obtenidos en cada uno de los moldes en la preparación de carga estática.	60
ANEXO Q. Grados de compactación obtenidos en cada uno de los moldes en la preparación de carga dinámica.	61
ANEXO R. Deformación en mm del conjunto Balasto - Sub-rasante en la compactación	62
ANEXO S. Deformación en milímetros del conjunto Balasto - Sub-rasante debido al ensayo de carga estática.	63
ANEXO T. Deformación en milímetros del conjunto Balasto - Sub-rasante debido al ensayo de carga estática dinámica.	63
ANEXO U. Media mensual de Lluvia para el Municipio de Campinas.	64
ANEXO V. Propiedades y utilización de los grupos de suelos MCT.	65

RESUMEN

TITULO:

ANALISIS DE DESEMPEÑO DE LA CAMADA DEL BALASTO FERROVIARIO CON ARENA Y SIN ARENA POR INFILTRACIÓN DE AGUA. (ESTUDIO EN CASO EN SUELO DE LA UNIVERSIDAD ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP), BRASIL).*

AUTOR:

SILVIA LORENA SERRANO BRAVO**

PALABRAS CLAVE: Balasto, Sub-balasto, plataforma ferroviaria, Infiltración, Ferrovía.

DESCRIPCIÓN:

El sistema ferroviario es una importante forma de transporte en Brasil, utilizado principalmente en el desplazamiento de grandes volúmenes de cargas a través del país y gran cantidad de personas en viajes cortos en las áreas metropolitanas. Simultáneamente con las nuevas investigaciones que permiten el desarrollo de nuevas técnicas y materiales, las líneas férreas se ven afectadas positivamente resistiendo mayores cargas por eje y presentando un mejor desempeño ante solicitudes dinámicas cada vez más exigentes, con el fin de conservar la inversión de obras tan onerosas y evitando accidentes durante la circulación del tren debido a desniveles presentados a lo largo de la vía.

El presente artículo estudia el comportamiento de la infraestructura ferroviaria ante la infiltración de agua y cómo este comportamiento afecta la estabilidad y el correcto funcionamiento de la superestructura. Además, se analiza la influencia de la arena actuando como capa de bloqueo entre el balasto y la plataforma, utilizando ensayos de infiltración y de resistencia con el DCP ("Dynamic Cone Penetrometer"), para diferentes condiciones experimentales en campo, simulando los dos tipos de mallas ferroviarias presentes en el Brasil, y realizando un paralelo entre la malla nueva que cuenta con un sub-balasto incorporado aproximadamente hace 40 años y la malla antigua que carece de este.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: DELTORO Rodríguez Wilfredo. Ingeniero Civil, PhD.

ABSTRACT

TITLE:

PERFORMANCE ANALYSIS OF THE LITTER OF THE RAILWAY ROADBED WITH SAND AND WITHOUT SAND BY WATER INFILTRATION. (STUDY IN CASE IN SOIL OF THE UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP), BRAZIL). *

AUTHOR:

SILVIA LORENA SERRANO BRAVO**

KEYWORDS: Ballast, Sub-ballast, Sub-grade, Infiltration, Railway.

DESCRIPCIÓN:

One of the most important transportation means in Brazil is the railway system. It is mainly used for two purposes: to move heavy loads and to transport high quantities of people in short trips through nearby metropolitan areas. By the time new researches allow the development of new techniques and materials, the railway line is also improving its structure in order to withstand larger static and dynamic loads per axis regarding to preserve the major investments claimed and to avoid disasters due to unevenness along the way.

The following paper intends to study the behavior of the main railway line infrastructure after water infiltration and its effects on the structure stability and operation. Furthermore, this study analyzes the results of using the sand as a blocking layer between the ballast and the platform through infiltration and strength tests with DCP (Dynamic Con Penetrometer) taking into account different field conditions, simulating the two existing kinds of railway structures in Brazil and comparing the most recent one which include a sub-ballast layer and the old one which does not.

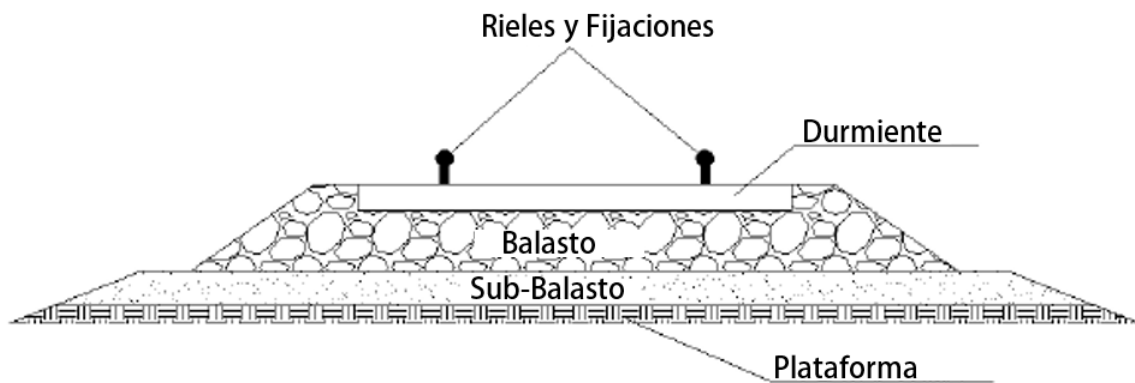
* Bachelor Thesis

** Physical-Mechanical Engineer Faculty. Civil Engineering School. Director: DELTORO Rodríguez Wilfredo. Ingeniero Civil, PhD.

INTRODUCCIÓN

La vía férrea se compone de dos partes principalmente: la superestructura y la infraestructura [15]. La superestructura está formada por rieles, dispositivos de fijación, durmientes y las capas de material granular, el balasto y sub-balasto. Por otra parte, que la infraestructura de la vía está formada básicamente por la plataforma, que soporta los esfuerzos provenientes de la superestructura, a través de capas de suelos bien compactadas y de buena calidad (Figura 1).

Figura 1. Perfil transversal de una vía férrea

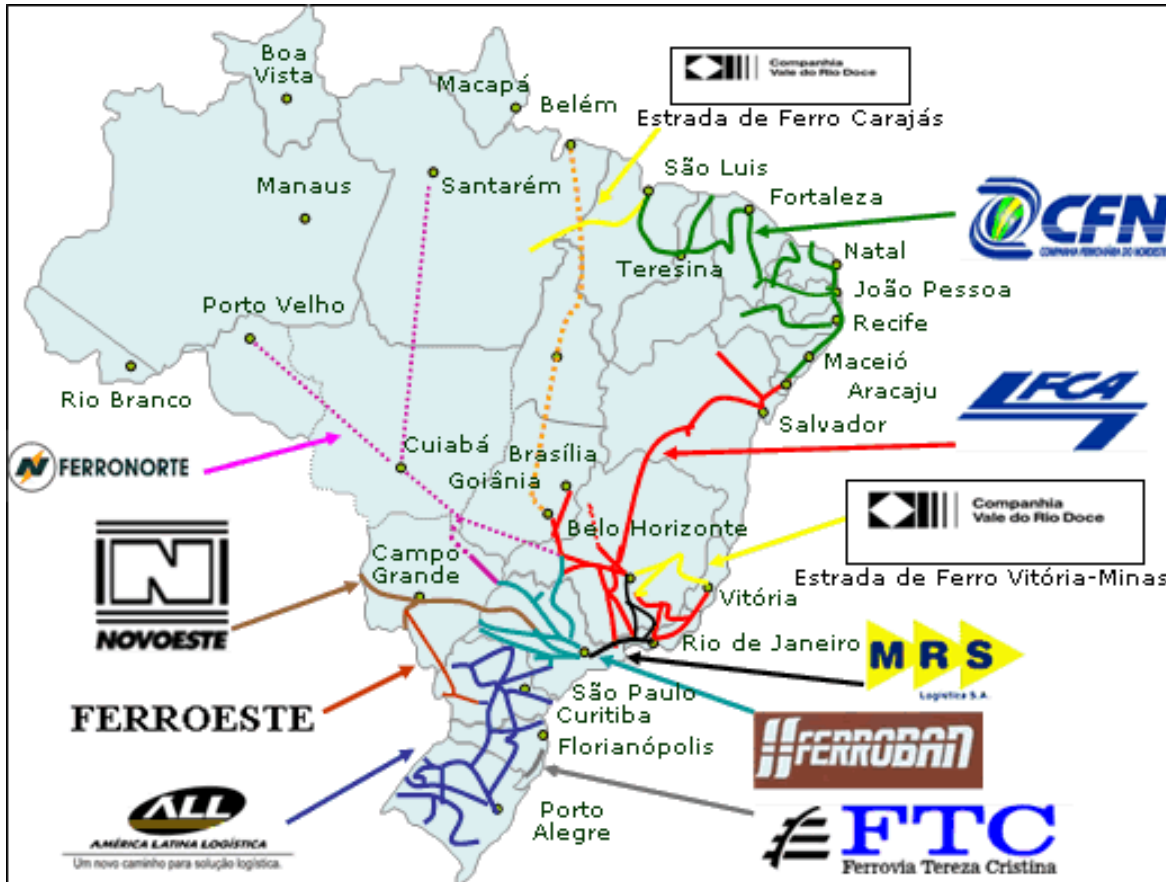


Fuente: Adaptado SILVA, J. *Estudo de via férrea lastreada sobre Placa de concreto de cimento portland*. 2013. 120 p. *Disertação (Mestrado em Engenharia Civil)*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

La malla ferroviaria de Brasil está integrada por aproximadamente 28.000 km de extensión, fuertemente concentrada en las regiones Sur y Sudeste (Figura 2), donde apenas un tercio de estas son productivas y el restante es subutilizado. A pesar del alto desenvolvimiento que ha tenido la red, no alcanzan los niveles de crecimiento que desarrollaron redes ferroviarias como la de los Estados Unidos [10]. No obstante, se observa en Brasil un factor determinante: la división de la vía férrea en dos estándares

de calidad, la red antigua (que cuenta solamente con la sub-rasante y el balasto) y la malla más nueva, que también dispone de una plataforma bien definida y una capa de sub-balasto [17].

Figura 2. Principales ferrovías en el territorio brasileño



Fuente: TELECO, *Inteligência em comunicações*. (2016). *Aplicações Móveis em Ferrovias: Malha Ferroviária*. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialferrovias/pagina_2.asp. > Acesso em: 20 Maio 2017.

El sub-balasto fue incorporado aproximadamente hace 40 años, en función de las crecientes velocidades, del aumento de carga por eje y del mayor deterioro observado en la vía, generando incremento de los costos de mantenimiento y renovación [17]. Esta capa generalmente está formada por materiales granulares, preferiblemente alguna arena u otro material rocoso bien gradado, con cierto porcentaje de elementos finos para que sea compactable y no pierda cohesión sobre el tráfico de las máquinas durante la

obra y proteja la plataforma de la erosión de las agua lluvias. El sub-balasto es construido de materiales menos nobles que los del balasto y de granulometría bien gradada, con la función de disminuir la tensión actuante en la plataforma y evitar el contacto directo del balasto en la plataforma, una vez que el balasto posee partículas 100 veces mayor que las partículas presentes en la sub-rasante [26].

En un suelo pueden ocurrir ciertos procesos erosivos dependiendo del tipo de este y del tratamiento mecánico dado; los diversos factores externos a los que se encuentran expuestas las capas que forman la fundación ferroviaria (balasto, sub-balasto y plataforma) conllevan a la generación de colmatación mineral por la presencia de materiales finos (predominantemente en suelos Limo-arcillosos) y una excesiva penetración de partículas granulares presentes en el balasto en la capa más superficial de la plataforma constituidas de suelos con partículas generalmente de menor tamaño (Figura 3) [21]. Estas anomalías justifican la necesidad de estudiar y evaluar el desempeño de los materiales que constituyen la vía férrea, como también el comportamiento de los materiales granulares y su caracterización.

Figura 3. *Lodos en balasto bajo condiciones deficientes de drenaje.*



Fuente: AIVA, C. E. L. de; PEIXOTO, C. F.; CORREIA, L. F. M.; AGUIAR, P. R.; *Evaluation between Two Brazilian Railway Tracks. Journal of Civil Engineering and Architecture. V. 5, n. 9, pp. 772-778. 2011.*

Los suelos de Brasil pueden ser caracterizados como tradicionales o tropicales. En el presente estudio se tuvo en consideración el suelo de la UNICAMP como sub-rasante, que es un suelo con propiedades peculiares, pues contienen óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, que hacen de este un suelo tropical [5]. Estos suelos limo-arcillosos poseen una característica en su comportamiento de succión, que disminuye la capacidad de resiliencia al tráfico. Para que el suelo sea resiliente, es necesario que este absorba menos agua, de tal forma que consiga disminuir las vibraciones causadas por las fuerzas verticales; diferente de lo que ocurre con las arcillas encontradas en la UNICAMP, pues estas absorben mucha agua y el uso de suelos con estas características conlleva a que se genere la fatiga de los elementos de la superestructura, y se desplacen las capas inferiores (finos) hacia las capas superiores (gravas) acentuando la penetración del balasto. En términos generales, podría afirmarse que el suelo de la Unicamp, no es el más recomendado para la ejecución de obras de infraestructura ferroviaria, razón por la cual se usará este como objeto de estudio, para analizar el desempeño de una infraestructura ejecutada bajo uno de los peores escenarios.

La deformación permanente del suelo de la sub-rasante está sujeta a alteraciones aún después de pequeñas variaciones en el porcentaje de humedad [25]. En el caso de suelos de comportamiento laterítico, presentan bajas deformaciones permanentes cuando son compactados en la humedad óptima [32]. La saturación es la principal causa de la disminución de la capacidad de soporte de la sub-rasante, dando origen a la degradación temprana de la capa [3]. En escenarios con porcentajes de humedad cercanos a la humedad óptima, el agua presenta mayor estado de tensión en los poros del suelo, contribuyendo con el aumento de la resistencia a la deformación; sin embargo, con el aumento del contenido de agua, las fuerzas cohesivas que actúan entre las partículas decrecen, resultando en la pérdida de fricción interna y de la resistencia a la penetración [7].

La diferencia dimensional entre las partículas consecuentemente trae problemas graves a la infraestructura de la vía, se evidencia un mayor enclavamiento del balasto en la sub-

rasante, todo esto causado principalmente por la sollicitación repetitiva de cargas verticales [27]. Para la definición de la granulometría de la sub-rasante se sugieren las siguientes restricciones: siendo $D_{15 SBL}$ el tamaño del tamiz por donde pasan el 15% del material del sub-balasto; $D_{85 SGL}$ el tamaño del tamiz por donde pasa el 85% del material de la sub-rasante; $D_{50 SBL}$ el tamaño del tamiz por donde pasa el 50% del material del sub-balasto; $D_{50 SGL}$ el tamaño del tamiz por donde pasa el 50% del material de la sub-rasante [27].

$$\frac{D_{15 SBL}}{D_{85 SGL}} \leq 5 \quad \frac{D_{50 SBL}}{D_{50 SGL}} \leq 25 \quad \frac{D_{15 SBL}}{D_{15 SGL}} > 4$$

Un ejemplo es la construcción de la Línea Este-Oeste del Metro de São Paulo (Figura 4), que fue construida con una capa de sub-balasto granular (estructural) y de una arena (bloqueo); la línea N° 8 - Diamante del CPTM (“Compañía Paulista de Trenes Metropolitanos”), entre las estaciones Presidente Altino y Itapevi. Esta línea atiende la región metropolitana de la ciudad de São Paulo, transportando cerca de 400 mil pasajeros todos los días, con velocidad promedio de 80 km/h, mostrando un buen desempeño hasta el día de hoy. Su superestructura está compuesta por una capa de balasto de 30 cm y una capa de sub-balasto de arena de 10 cm. No obstante, es importante resaltar que el uso del sub-balasto constituido solamente de arena, sin la presencia de una capa con características estructurales, es indicado solo en los casos de vías con baja carga por eje (hasta 17 ton/eje).

Figura 4. Línea Nº 8 - Diamante del CPTM.



Fuente: CPTM. Portal do Governo do Estado São Paulo. Linhas CPTM. 2017. Disponível em <<http://www.cptm.sp.gov.br/sua-viagem/Pages/Linhas.aspx>> Acesso em: 18 jun. 2017.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar teóricamente en base a resultados experimentales la influencia que tiene el agua en el comportamiento de la camada del balasto ferroviario con arena y sin arena como sub-balasto en un suelo de la Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP), sin sistema de drenaje.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las características y comportamiento de dos puntos diferentes del suelo de la Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP), Campus Zeferino Vaz-Campinas SP, en relación a la no presencia y presencia de arena como sub-balasto.
- Analizar la infiltración de agua en el diseño nuevo y antiguo de las vías férreas de Brasil que no cuentan con sistema de drenaje tomando como capa de forma el suelo de la UNICAMP y sub-balasto una arena bien graduada, con algún porcentaje de elementos finos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 SITIO DE LOS ENSAYOS

La presente investigación fue desarrollada en la UNICAMP, en el campus Zeferino Vaz, en Campinas. El municipio de Campinas se localiza en el estado de São Paulo, se sitúa en el Noreste de la capital, aproximadamente 100 km de distancia.

Se realizaron pruebas en dos locales, conforme lo indicado en el mapa de la Figura 5. El Sitio 1 se localiza en frente del predio de la Facultad de Ingeniería Civil- Arquitectura y Urbanismo, en la Calle Saturnino de Brito, mientras el Sitio 2 está ubicado atrás del predio de la Radio y TV Unicamp (RTV), en la Avenida Albert Einstein, N° 901.

Figura 5. Localización de los campos de ensayo de permeabilidad en el campus de la Unicamp.



Fuente: Adaptado PIZARRO, J. Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE SUELO

Con el fin de simular la sub-rasante de una ferrovía, se utilizó un suelo con características conocidas. El suelo natural de la Unicamp fue estudiado de forma extensiva por GON (2010). El suelo de la Unicamp es del tipo Limo-arcilloso (hasta 1 metro de profundidad) y arena limosa (entre 2 a 8 metros de profundidad) con un alto contenido de óxidos de hierro y aluminio, resultando en un carácter laterítico de color rojizo [13].

La tabla 1 indica valores promedios de los índices físicos conforme lo observado por GON (2011), estos valores son usados de manera conservadora debido a que las propiedades puede variar a lo largo del campus universitario, siendo ellos: peso específico (γ_{nat}), peso específico seco (γ_d), peso específico de los sólidos (γ_s), humedad natural (w), índice de vacíos (e), grado de saturación (S_r) y porosidad (n).

Tabla 1. Índices físicos del suelo proveniente del campus de la Unicamp (Campinas SP).

MATERIAL	γ_{nat} (KN/m ²)	γ_d (KN/m ²)	γ_s (KN/m ²)	w (%)	e	n (%)	S_r (%)
Suelo	14,10	30,40	11,00	28,30	1,77	64,00	48,40

Fuente: Adaptado GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

En los ensayos de granulometría, en la profundidad entre cero y un metro, donde fueron realizados los ensayos de permeabilidad en el presente estudio, el suelo de la Unicamp es compuesto por 47.7% de arena, 26.5% de arcilla y 26.1% de limos [13].

De acuerdo con la clasificación MCT (Miniatura Compactada Tropical) que evalúa criterios de resiliencia, el suelo de la Unicamp sería clasificado como “Tipo III”, o de peor

calidad [23]. Esta clasificación surgió para evidenciar entre otras cosas que el porcentaje de limo en la fracción fina del suelo disminuye sus propiedades resilientes y compromete el desempeño de la capa.

2.3 ESTUDIOS DE PERMEABILIDAD

Para los ensayos de permeabilidad fueron montados dos campos de prueba, cada uno de ellos realizados en los dos locales mencionados anteriormente; En cada Sitio se excavaron cinco agujeros (Figura 6), todos con profundidad final de 20 cm y diámetro de 15 cm. La tabla 2 describe las condiciones que presentaba cada agujero.

Figura 6. *Agujeros en el campo de prueba No 2.*



Fuente: PIZARRO, J. *Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

La tasa de infiltración fue estimada a través de la recolección de muestras en el fondo de todos los agujeros con un anillo metálico para determinar la densidad, y humedad del






suelo en laboratorio (Figura 7). La tasa de infiltración fue estimada a través de lecturas con cinta métrica graduada en milímetros en periodos de 10 minutos, utilizando un punto de referencia en el borde del tubo PVC. Se adicionaron tres litros de agua esperando que las primeras lecturas estuvieran asociadas a la absorción, hasta conseguir la saturación del suelo en el área más próxima sujeta de ensayo, donde se esperaba que las primeras lecturas estuviesen asociadas al proceso de infiltración. En esta etapa del suelo saturado se esperaba que las lecturas mantuviesen una tasa de infiltración constante.

Figura 7. *Equipo utilizado para recolectar las muestras de suelo.*



Fuente: PIZARRO, J. *Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas.* 2016. Em C. Paiva (Presidência), *Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis.* Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Tabla 2. Descripción de las condiciones que presentaba cada agujero.

Agujero	Descripción	Foto
1	Suelo en estado natural a una profundidad de 20 cm.	
2	Las paredes fueron impermeabilizadas con un tubo de PVC, impidiendo el flujo lateral y garantizando la infiltración de 3 litros de agua apenas en el área expuesta del suelo natural, en el fondo del orificio.	
3	Profundidad inicial del agujero de 35 cm. Posteriormente se colocaron tres capas de 5 cm de espesor cada una, utilizando el suelo originalmente retirado. Las capas fueron compactadas con energía Proctor Modificado (Sitio 1) y Proctor Normal (Sitio 2). Las paredes fueron impermeabilizadas con un tubo de PVC, impidiendo el flujo lateral y garantizando la infiltración de 3 litros de agua apenas en el área expuesta del suelo natural, en el fondo del orificio.	
4	Las paredes fueron impermeabilizadas con un tubo de PVC y posteriormente se adicionó una capa de arena de 10 cm de espesor, compactada con una energía Proctor Normal. Se adicionaron 3 litros de agua por etapas, hasta garantizar la infiltración de la totalidad del líquido, apenas en el área expuesta del suelo natural, en el fondo del orificio.	
5	Las paredes fueron impermeabilizadas con un tubo de PVC y posteriormente se adicionó una capa de arena de 10 cm de espesor, compactada con una energía Proctor Modificado. Se adicionaron 3 litros de agua por etapas, hasta garantizar la infiltración de la totalidad del líquido, apenas en el área expuesta del suelo natural, en el fondo del orificio.	

Fuente: Adaptado PIZARRO, J. Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

2.4 EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN

La resistencia del suelo a la penetración fue determinada a través del penetrómetro dinámico de cono DCP (“Dynamic Cone Penetrometer”). La resistencia del suelo a la inserción de una punta cónica es una manera rápida y fácil de medir la resistencia a la penetración a varias profundidades, siendo muy útil para relacionar factores de resistencia, evaluar la capacidad de soporte y compactación del suelo [2].

Durante la ejecución del ensayo con el DCP se consideraron los siguientes cuidados: equipo limpio, cono en buen estado de conservación; por parte del operador se mantuvo una frecuencia controlada en la caída del peso (tiempo entre cada golpe) y el DCP siempre en posición vertical.

La lectura inicial en la regla se realizó después del primer golpe sin levantar totalmente el peso, procurando una pequeña penetración del cono [12]. Se realizaron lecturas de penetración para un total de 15 golpes. Posteriormente los resultados del ensayo se expresaron en índices de penetración. Este índice fue definido a partir de la pendiente de la línea de mejor ajuste, resultante de la relación lineal entre la penetración en milímetros en función del número de golpes. El índice de penetración fue entonces relacionado con la resistencia del suelo a través de ecuaciones que permiten la estimación de forma indirecta del índice de soporte California (CBR).

2.5 ENSAYOS DE CARGA

Para evaluar el comportamiento de la fundación de una ferrovía (Balasto y Sub-rasante) se realizaron ensayos de carga estáticos y dinámicos. Fueron construidos moldes cilíndricos de 200 mm de diámetro y 330 mm de altura con tubos de PVC con espesor de 4 mm (Figura 8). Los moldes contenían material granular simulando el balasto ferroviario y el mismo suelo de la Unicamp simulando la capa superior de la plataforma. Los ensayos se realizaron con muestras de suelo con diferentes porcentajes de humedad, compactadas con energía Proctor Normal al 80%, 90% y 98%.

Figura 8. *Moldes de PVC enumerados.*



Fuente: RODRIGUES, M. *Colmatção de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem.* 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Las muestras de suelo fueron sometidas a ensayos de carga (estáticos y dinámicos), para simular la tensión actuante proveniente del conjunto durmiente-balasto, estimada en 0,412 Mpa, con el fin de observar la penetración de las partículas del balasto en la capa inferior constituida de suelo emulando la plataforma. La carga máxima del ensayo estático fue de 12.258 N y el número máximo de ciclos aplicado en el ensayo dinámico fue de 10.000.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 PORCENTAJE DE HUMEDAD DEL SUELO

El porcentaje de humedad después de la infiltración de los litros de agua es representada en la Tabla 3., con excepción del agujero #1, donde el valor indicado es la humedad natural del suelo a 20 cm de la superficie (Extrayendo la espesura de la grama). Puede observarse que el porcentaje de humedad del suelo inmediatamente después de la infiltración total del agua, muestra un esperado aumento del porcentaje de humedad respecto al porcentaje del suelo en estado natural (agujero #1). Sin embargo, al observar los agujeros #2 y #4 en los dos locales, no se evidencia variación significativa en el porcentaje de humedad de estos, lo que puede llevar a inferir, que a pesar de contar con una capa de arena, esta permite la infiltración del agua sin oponer mayor resistencia, adicional a esto, permite constatar que el suelo presenta un mayor contenido de agua, condición necesaria para estudiar su comportamiento a la resistencia con el ensayo DCP, como se verá más adelante.

Tabla 3. *Porcentaje de humedad del suelo determinado en laboratorio.*

Porcentaje de Humedad (%)					
AGUJERO	#1	#2	#3	#4	#5
SITIO 1	22,9	27,9	24,2	29	-
SITIO 2	16,4	19,5	19,6	19,6	18,9

Fuente: Adaptado PIZARRO, J. *Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

3.2 CAPACIDAD DRENANTE (INFILTRACIÓN)

Los resultados obtenidos en el ensayo de infiltración son presentados en la Tabla 4, donde se caracterizan los valores de infiltración de los agujeros con condiciones de impermeabilización similares (agujeros del n°2 al n°5) para sus paredes y el área del fondo expuesto.

Al mismo tiempo, se puede observar que la presencia de una capa de arena no afectó considerablemente la capacidad drenante en ninguna de las situaciones: ni sobre la energía de compactación de Proctor Normal, ni del Proctor Intermediario, en ninguno de los dos locales. Con esto es posible inferir que en una capa de sub-balasto de arena con 0 cm de espesura no impacta negativamente la drenabilidad de la superestructura ferroviaria.

Es importante resaltar que un suelo que es sometido a modificaciones mecánicas en su estructura, presenta reducción en la capacidad drenante en la tasa de infiltración. La estructura del suelo es una de las características más influyentes en la permeabilidad, en especial cuando se trata de suelos finos [29].

En suelos lateríticos compactados la variación de la permeabilidad a lo largo de la curva de compactación es bastante acentuada; por ejemplo, suelos finos pueden mostrar elevada permeabilidad en el ramo seco y suelos arenosos con fracciones de finos pueden tornarse prácticamente impermeables en las condiciones óptimas de compactación. Los suelos finos compactados presentan mayor permeabilidad en el ramo

seco que en el ramo húmedo, por efecto principalmente de su estructura [24]. Esto debido a que en el ramo seco las partículas de arcilla son ordenadas en una microestructura floculada, mientras que, en el ramo húmedo en una microestructura dispersa con vacíos menores que, a su vez oponen mayor resistencia a la conductividad hidráulica [15].

Tabla 4. Tasa de infiltración para las cuatro condiciones en los dos locales.

Sitio 1			Sitio 2		
Agujero	Condición	Tasa de Infiltración (cm/s)	Agujero	Condición	Tasa de Infiltración (cm/s)
#2	Suelo en estado natural	2,05E-03	#2	Suelo en estado natural	5,31E-03
#3	Tres capas del mismo suelo compactado (PI)	2,47E-05	#3	Tres capas del mismo suelo compactado (PI)	4,14E-04
#4	Capa de arena compactada (PN)	1,20E-03	#4	Capa de arena compactada (PN)	1,73E-03
#5	Capa de arena compactada (PI)	1,30E-03	#5	Capa de arena compactada (PI)	1,11E-03

Fuente: Adaptado PIZARRO, J. Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Las curvas de retención de agua del suelo para el perfil estudiado muestran ser de tipo bimodal, típicas de los suelos tropicales con estructuras macro y microagregadas [13]. Esto significa que los valores de presión de entrada del aire son relativamente bajos, próximos a los valores obtenidos para las arenas, mostrando que el comportamiento de este suelo se asemeja en algunos aspectos, como permeabilidad y granulometría, a un suelo granular.

Como parte del análisis de la capacidad drenante del suelo en estudio, se consideró la clasificación de la calidad de drenaje de los pavimentos adoptada por la AASHTO (“American Association of State Highway and Transportation Officials”). Para esto se

estimó el tiempo de infiltración, según las tasas de infiltración estimadas y el registro de lluvia máxima en un día de 145 mm, de acuerdo con Centro Integrado de Información Agrometeorológicas (CIIAGRO) en los últimos 20 años para el Municipio de Campinas [26]. En la tabla 5, se muestran los tiempos de infiltración, en el hipotético escenario, donde la totalidad del agua llovida es infiltrada por el suelo.

Conforme la clasificación de la calidad de drenaje de los pavimentos de la AASHTO, el suelo de la Unicamp en su estado natural posee una capacidad drenante considerada "Excelente" [1]. Para el suelo con capa de arena compactada sobrepuesta (agujeros #4 y #5); así como el caso del agujero #3 del Sitio 2, su calidad drenante es definida como "Buena"[1]. En tanto, para el suelo con tres capas compactadas con energía de Proctor Intermediario, su propiedad drenante es clasificada apenas como "Razonable".

El orden de tamaño los resultados obtenidos se aplican exclusivamente al caso en cuestión, donde los ensayos fueron realizados sobre esta sub-rasante en particular. Los valores de drenabilidad vertical (kv) y horizontal (kh) encontrados se presentan en un orden de 10^{-3} cm/s [13], valores concordantes con este estudio, lo que indica permeabilidad de arenas finas. Este valor de conductividad hidráulica expresa macroporosidades de las estructuras de suelos finos lateríticos [5].

Es importante resaltar que esta característica se mantiene bajo la condición de que el suelo no sea alterado, como por ejemplo, con procesos de adhesionamiento o compactación. Sin embargo, en toda obra contemporánea de vías o ferrovías, la

compactación del suelo es una práctica esencial y obligatoria. Razón por la cual, la permeabilidad del suelo evidentemente se ve disminuida durante la construcción de la infraestructura ferroviaria.

Tabla 5. *Tiempos de infiltración calculado para el registro de lluvia máxima en el Municipio de Campinas en los últimos 20 años.*

Sitio 1				Sitio 2			
Agujero	Tasa de Infiltración (cm/s)	Tiempo de Infiltración		Agujero	Tasa de Infiltración (cm/s)	Tiempo de Infiltración	
#2	2,05E-03	1,96	Horas	#2	5,31E-03	0,76	Horas
#3	2,47E-05	6,77	Días	#3	4,14E-04	9,71	Horas
#4	1,25E-03	3,22	Horas	#4	1,73E-03	2,32	Horas
#5	1,30E-03	3,09	Horas	#5	1,11E-03	3,61	Horas

Fuente: *Adaptado PIZARRO, J. Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

3.3 PENETRACIÓN DEL BALASTO EN LA CAPA SUPERIOR DE LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

Los resultados de resistencia a la penetración del suelo en términos de índices de penetración (DN) son mostrados en la tabla 6. Tomar en cuenta que cuanto menor el índice de penetración, mayor la resistencia a la penetración. Aunque la resistencia del suelo es una propiedad que depende de varios factores, también se sabe que existe una relación directa con el porcentaje de humedad presente en el suelo.

Tabla 6. Índices de Penetración determinador a través del ensayo DCP.

Índice de Penetración (DN) en (mm/golpes)					
AGUJERO	#1	#2	#3	#4	#5
SITIO 1	15,7	36,0	11,4	24,4	27,2
SITIO 2	18,5	53,4	46,5	73,3	61,6

Fuente: Adaptado PIZARRO, J. Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Con tal de facilitar la interpretación de los índices obtenidos con el ensayo DCP; se presentan en las tablas 7 y 8., los Índice de Soporte California (CBR), así como su correspondiente clasificación en función de la calidad del suelo, determinados indirectamente a partir de los índices de penetración.

Tabla 7. CBR obtenido a través del índice de penetración en el Sitio 1.

AGUJERO	#1	#2	#3	#4	#5
CBR	14,9	5,7	21,6	8,9	7,9
Clasificación	Regular	Pobre o Regular	Bueno	Regular	Regular

Fuente: Adaptado PIZARRO, J. Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Tabla 8. CBR obtenido a través del índice de penetración en el Sitio 2.

AGUJERO	#1	#2	#3	#4	#5
CBR	12,3	3,6	4,2	2,5	3,1
Clasificación	Regular	Pobre o Regular	Pobre o Regular	Muy pobre	Pobre o Regular

Fuente: Adaptado PIZARRO, J. Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

La humedad óptima del suelo de la Unicamp a una profundidad no mayor de un metro es de 24,95% [13]. Nótese que los ensayos de penetración con el DCP en el Sitio 1, se ejecutaron cuando el suelo presentaba porcentajes de humedad cercanas a la humedad óptima; mientras que los porcentajes de humedad en el Sitio 2 se encontraban en el ramo seco de la curva de compactación. Lo antes expuesto, permite explicar parcialmente del porque el suelo en el Sitio 1, en sus diferentes condiciones estudiadas, presenta mayor resistencia a la penetración y consecuentemente del porque las valores CBR muestran una mayor capacidad de soporte; así como una mejor calidad relativa del suelo.

Los datos obtenidos, señalan pérdida de resistencia a la penetración con el aumento significativo de agua en el suelo. La excepción se da en el agujero #3 del Local 1 que, a pesar del incremento en el porcentaje de humedad, su resistencia a la penetración es mayor, debido principalmente a su condicione mecánica de soporte mejorada por la compactación. Cabe resaltar que el suelo tropical laterítico, como el de la Unicamp, tiende naturalmente a formar estructuras adecuadamente bien acomodadas proporcionando resistencia a lo largo del tiempo. Sin embargo, esta estructura puede verse afectada variando su capacidad de resistencia con la presencia del agua.

Tabla 9. Densidad, G.C y penetración absoluta en milímetros del conjunto balasto - sub-rasante debido al ensayo de carga estática.

ESTADO DE LA MUESTRA	MOLDE					
	1	2	3	4	5	6
	SECO	SATURADO	SECO	SATURADO	SECO	SATURADO
DENSIDAD (KN/m ³)	13,10	12,90	14,50	14,60	15,70	15,60
G.C. (%)	81,60	80,90	90,90	91,30	98,40	97,70
PENETRACIÓN (mm)	11,95	13,00	7,60	10,36	3,20	5,07

Fuente: Adaptado RODRIGUES, M. Colmatação de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Tabla 10. Densidad, G.C y penetración absoluta en milímetros del conjunto balasto - sub-rasante debido al ensayo de carga dinámica.

ESTADO DE LA MUESTRA	MOLDE					
	1	2	3	4	5	6
	SECO	SATURADO	SECO	SATURADO	SECO	SATURADO
DENSIDAD (KN/m ³)	12,7	12,7	14,3	14,3	15,7	15,7
G.C. (%)	79,2	79,6	89,3	89,6	98,1	97,9
PENETRACIÓN (mm)	20,17	47,15	10,8	16,5	9,04	10,21

Fuente: Adaptado RODRIGUES, M. Colmatação de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Los resultados obtenidos en las tablas 9 y 10, confirman la excesiva penetración de las partículas del balasto en la capa de suelo. En el caso del cuerpo de prueba con el menor grado de compactación (80%) sometida a carga estática, la penetración del balasto alcanza hasta 13 mm y en el ensayo dinámico con el suelo saturado 47 mm. En el cuerpo de prueba con compactación de 98%, la penetración resultante fue de hasta 5 mm en el ensayo estático y de 10,2 mm en el ensayo dinámico. En la figura 9 se puede observar un cuerpo de prueba con suelo saturado después de haber sido sometido al ensayo dinámico, con la penetración del balasto en la capa de suelo y el ascenso de material (partículas) fino contaminando el balasto.

Paiva et al. (2015), estudiaron específicamente las propiedades de materiales empleados como sub-balasto en las ferrovías brasileñas. Las características de estos materiales fueron comparadas con las características de los materiales definidas en las normas regulatorias vigentes para construcción de ferrovías y metro vías en el país.

Figura 9. . *Cuerpo de prueba con suelo saturado después de haber sido sometido al ensayo dinámico (Rodríguez, 2016).*



Fuente: RODRIGUES, M. *Colmatção de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem.* 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

Además, los investigadores simularon la capa superior de la plataforma ferroviaria utilizando el suelo de la Unicamp y constataron la necesidad de una capa intermedia entre el balasto y la plataforma, que funcionara como capa de bloqueo constituida preferiblemente de arena, como lo recomiendan Selig & Waters (1994). Esa capa de bloqueo tiene como fin proteger la plataforma de la penetración de las partículas del balasto y evitar el fenómeno de colmatación por el ascenso de partículas finas a capas superiores, en aquellos casos en donde el suelo, como el de la Unicamp, presenta partículas de tamaño muy reducido.

4. CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en los ensayos experimentales y los datos abonados que fueron analizados, se puede concluir que:

La ausencia del sub-balasto entre el balasto y la sub-rasante provoca inevitablemente la interpenetración de las capas, tanto en condiciones secas como en condiciones saturadas, bajo situaciones análogas a las de una ferrovía de cargas convencionales. Esto debido a una enorme diferencia dimensional entre las partículas, donde la grava tiene dimensiones de hasta 70 mm mientras los limos pueden ser tan pequeños por el orden de 2×10^{-3} mm.

La presencia de una capa de sub-balasto de material granular de bajo valor agregado, fácil obtención y manejo, podría ayudar a sanar este problema. Adicional de ser uniformemente graduada, la arena actúa como filtro, debido al tamaño de la partícula de esta (en media de 1 a 2 mm de diámetro) impide la penetración de la grava del balasto en la sub-rasante, ayudando a mantener la integridad de la superestructura.

La capa de sub-balasto de arena beneficia a la manutención de las condiciones geométricas de la ferrovía, auxiliando a evitar deformaciones permanentes y consecuentemente defectos que futuramente podrán requerir mantenciones pesadas, siempre y cuando la plataforma sea tratada contra los efectos del agua, contribuyendo en evitar las deformaciones permanentes y consecuentemente los eventuales defectos que demandan de procesos de mantenimiento profundos y normalmente muy onerosos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). Guide for Design of Pavement Structures. Washington, DC: AASHTO, 1993.
- [2] ASSIS, R. L. DE; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.29, n.4, p.558-568, 2009
- [3] AZEVEDO, A. Considerações sobre a drenagem subsuperficial na vida útil dos pavimentos rodoviários. 2007. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil
- [4] CIIAGRO. Média mensal de chuva para o Município de Campinas. 2016. Disponível em <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QChuvaPeriodo.asp>> Acesso em: 14 out. 2016.
- [5] COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. (1993). Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. In: Solos e Rochas, 16. São Paulo/SP, 1993. P. 77-91.
- [6] CPTM. Portal do Governo do Estado São Paulo. Linhas CPTM. 2017. Disponível em <<http://www.cptm.sp.gov.br/sua-viagem/Pages/Linhas.aspx>> Acesso em: 18 jun. 2017.

- [7] CUNHA, A.R.; KLOSOWSKI, E.S.; GALVANI, E.; ESCOBEDO, J.F.; MARTINS, D. Classificação climática para o município de Botucatu - SP, segundo Köppen. SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1., 1999, Botucatu. Anais.... Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 1999. p.487-491.
- [8] DAMÁSIO, D.; LOPES, C. Caracterização laboratorial de agregados para aplicação em camadas de apoio de vias-férreas. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- [9] ESPAÑA, Ministerio de fomento. (2015). Estudios informativos para el desarrollo de la red de alta velocidad en Asturias. Tramo oviedo-gijón/avilés. Anejo 11.
- [10] FRANCA, V. (6 Agosto 2014). Malha ferroviária produtiva do Brasil é a mesma do Império. Estadão. Disponível em <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,malha-ferroviaria-produtiva-do-brasil-e-a-mesma-do-imperio,1539689>. > Acesso em: 17 Maio 2017.
- [11] FREITAS, D. Caracterização de materiais de subestrutura de via-férrea com aplicação de cargas cíclicas. 2015. (Dissertação de Maestria). Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- [12] GARCEZ, A. Contribuição para a melhora do desempenho dos pavimentos urbanos através do controle de qualidade do reaterro de valas de serviços

concessionados. 2010. 228 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

[13] GON, F. Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

[14] GOOGLE. Google Maps. 2017. Disponível em <<https://www.google.com.br/maps/@-22.8163022,-47.066196,1294m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR&authuser=0>> Acesso em: 15 Maio 2017.

[15] LAMBE, T. The structure of compacted clay. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, Ann Arbor, Michigan, v. 84. N. SM 2, paper 1654, 1958. 35 p.

[16] MONACCI, M.D. (2005). Estudo da Colapsibilidade de um Solo do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola- UNICAMP. Dissertação de Mestrado, UNICAMP. Campinas/SP.108p.

[17] PAIVA, C. (2016). Super e infraestruturas de ferrovias: critérios para projeto. Rio de Janeiro, Brasil. Elsevier.

- [18] PAIVA, C. E. L. de; BUCK, A. P.; FERREIRA, A. J. L.; Sub-ballast Performance in Brazilian Railway Infrastructures, 06/2015, Railway Engineering 2015 - 13th International Conference & Exhibition, Vol. único, pp.1-10, Edinburgh, Reino Unido, 2015
- [19] PAIVA, C. E. L. de; PEIXOTO, C. F.; CORREIA, L. F. M.; AGUIAR, P. R.; Evaluation between Two Brazilian Railway Tracks. Journal of Civil Engineering and Architecture. V. 5, n. 9, pp. 772-778. 2011.
- [20] PAIVA, C.; Ferreira, M.; Ferreira, A. (2014). Ballast drainage in Brazilian railway infrastructures. Construction and building materials, 92(1), 58-63.
- [21] PAIVA, C.; PEREIRA, M. (2016). Estudo da contaminação do lastro ferroviário por partículas originárias de abrasão. "aceito" no congresso Railway Engineering 2017, Edimburgh, Reino Unido.
- [22] PIZARRO, J. Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.
- [23] PREUSSLER, E.S.; PINTO, S. – Proposição de método para projeto de reforço de pavimentos flexíveis, e considerando a resiliência. In Anais da 17ª Reunião Anual de Pavimentação da ABPv, 1982.

[24] RAMIRES, M. Estudo dos efeitos da presença do nível d'água no comportamento de dois solos lateríticos utilizados em fundações de rodovias no Rio Grande do Sul. 2010. 261 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

[25] RIBEIRO, M. et al. Estudo do efeito da relação de tensões e da variação de umidade na deformação de um solo. Curitiba: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, 2014. 13 p. Disponível em <<http://www.anpet.org.br/xxviiiianpet/anais/documents/AC369.pdf>> Acesso em: 10 out. 2016.

[26] RODRIGUES, M. Colmatação de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

[27] SADEGHI, J., HASHEMINEZHAD, A. y ESSMAYII, M. (2015). Investigation of the Influences of Track Superstructure Parameters on Ballasted Railway Track Design. Civil Engineering Infrastructures Journal. 48(1), 157-174.

[28] SANTOS, E. Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificações geotécnicas aplicadas aos solos tropicais. 2006. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

[29] SELIG, E.T.; WATERS, J.M. Track geotechnology and substructure management. New York: Thomas Telford, 1994.

[29] SILVA, J. Estudo de via férrea lastreada sobre Placa de concreto de cimento portland. 2013. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

[30] TELECO, Inteligência em comunicações. (2016). Aplicações Móveis em Ferrovias: Malha Ferroviária. Disponível em <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialferrovias/pagina_2.asp. > Acesso em: 20 Maio 2017.

[31] THULER, R. Estudo de Solos do Estado do Rio de Janeiro para Aplicação em Rodovias de Baixo Volume de Tráfego. 2005. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

[32] VAIDAS, R.; AUDRIUS, V.; ALFREDAS, L. y DONATAS, C. (2016). Relationship between lifespan and mechanical performance of railway aggregate. International Conference on Road and Rail Infrastructure, 4(1), 659-665.

BIBLIOGRAFÍA

COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. (1993). Classificação geotécnica MCT para solos tropicais. In: Solos e Rochas, 16. São Paulo/SP, 1993. P. 77-91.

FRANCA, V. (6 Agosto 2014). Malha ferroviária produtiva do Brasil é a mesma do Império. Estadão. Disponível em <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,malha-ferroviaria-produtiva-do-brasil-e-a-mesma-do-imperio,1539689>. > Acesso em: 17 Maio 2017.

GON, F. Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

PAIVA, C. (2016). Super e infraestruturas de ferrovias: critérios para projeto. Rio de Janeiro, Brasil. Elsevier.

PAIVA, C.; PEREIRA, M. (2016). Estudo da contaminação do lastro ferroviário por partículas originárias de abrasão. "aceito" no congresso Railway Engineering 2017, Edimburgh, Reino Unido.

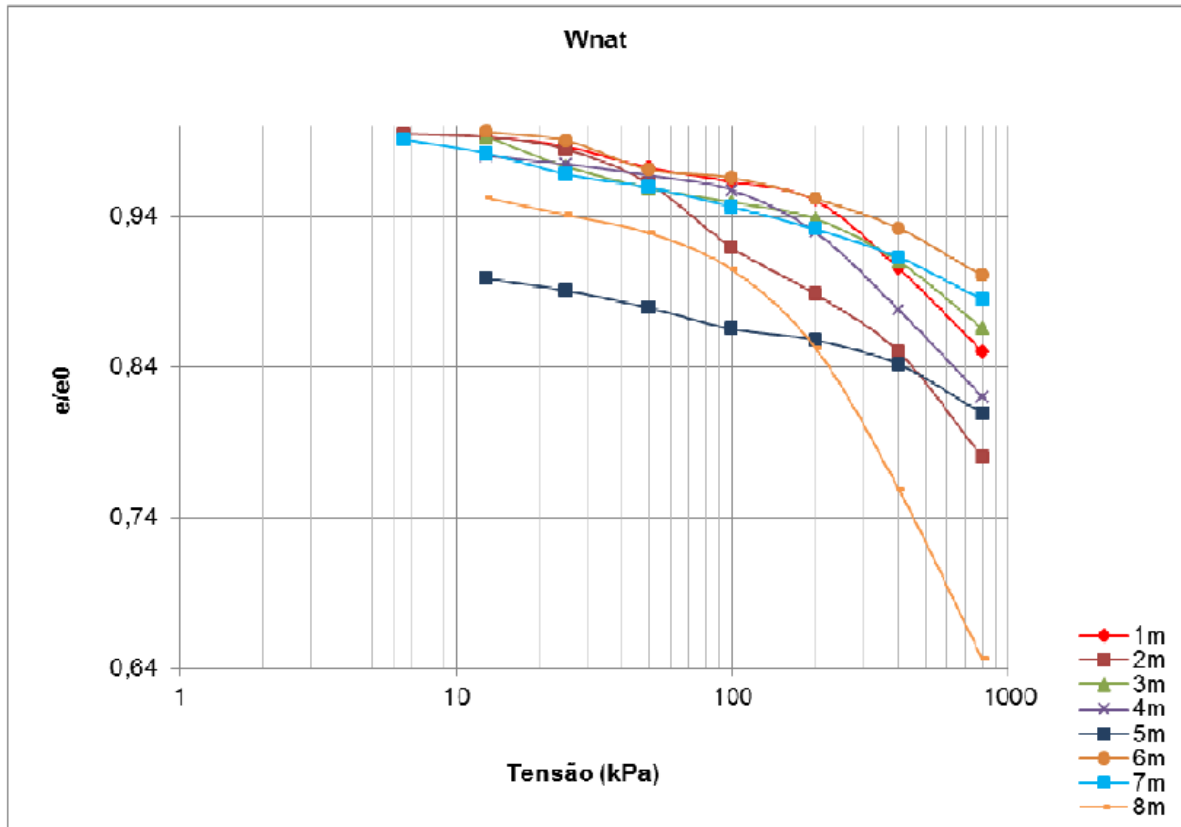
PIZARRO, J. Efeito da água na camada superficial do solo de um pavimento em campinas. 2016. Em C. Paiva (Presidência), Seminário Aula de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

RODRIGUES, M. Colmatação de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

SILVA, J. Estudo de via férrea lastreada sobre Placa de concreto de cimento portland. 2013. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXOS

ANEXO A. Curvas de compresión edométrica normalizada del suelo).



Fuente: GON, F. Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXO B. Resultado de tensiones e índices de compresión obtenidos en los ensayos simples.

Profundidade	σ'_{v0} (kPa)	σ'_a (kPa)	Cr	Cc	OCR
1	10,96	180	0,042	0,332	16,42
2	22,18	178	0,049	0,423	8,02
3	32,70	203	0,045	0,261	6,20
4	46,00	163	0,040	0,294	3,54
5	61,50	178	0,053	0,160	2,89
6	72,30	195	0,094	0,148	2,69
7	84,00	185	0,070	0,152	2,20
8	92,00	183	0,100	0,125	1,99

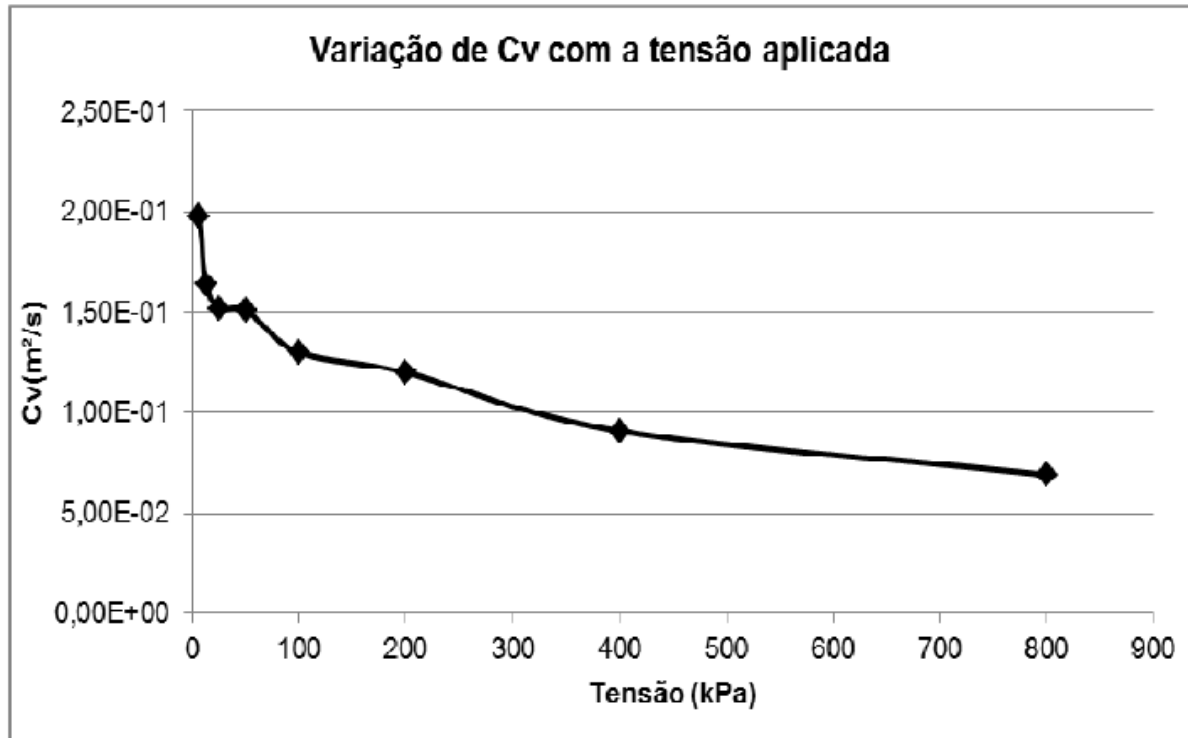
Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO C. *Variación de Cv con la tensión aplicada.*

Tensão (kPa)	C_v (m ² /s)
6,5	1,98E-01
13	1,64E-01
25	1,52E-01
50	1,51E-01
100	1,30E-01
200	1,20E-01
400	9,10E-02
800	6,93E-02

Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO D. Variación de Cv con la tensión aplicada



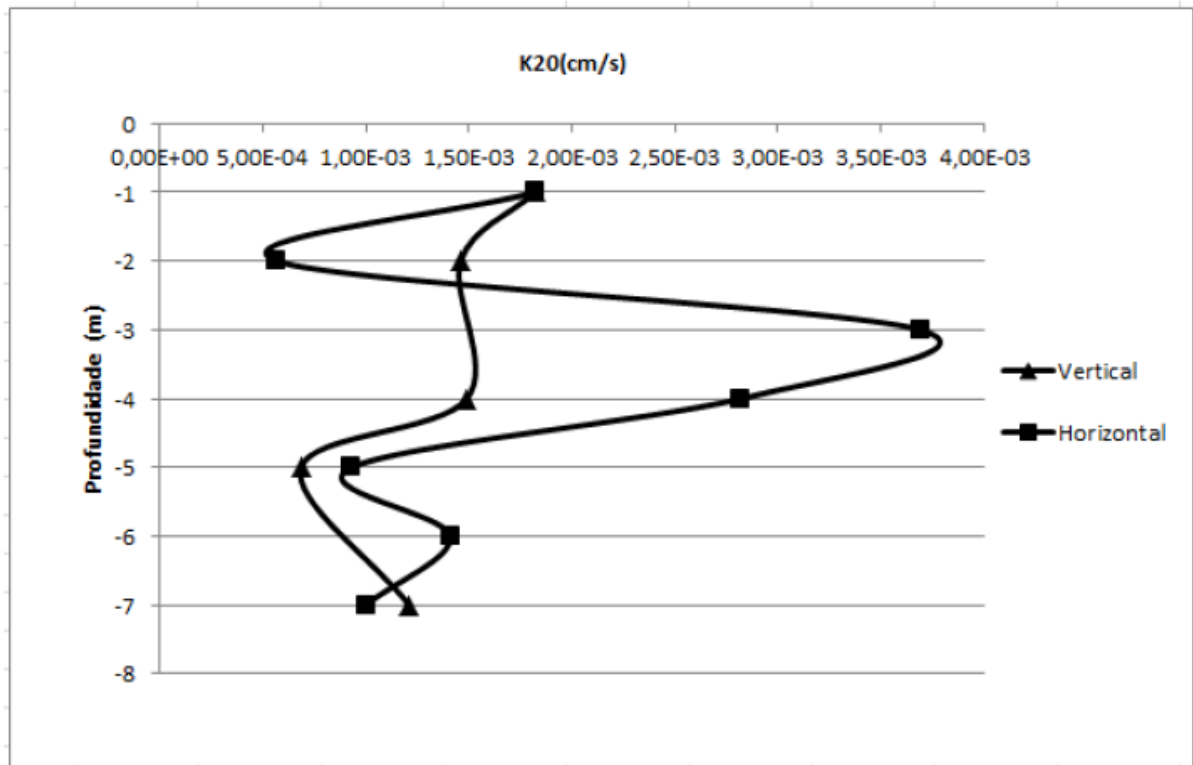
Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO E. Coeficientes de permeabilidad de perfil del suelo estudiado.

Profundidade (m)	K vertical (cm/s)	K horizontal (cm/s)
1	1,82E-03	1,82E-03
2	1,46E-03	5,69E-04
3	x	3,69E-03
4	1,49E-03	2,82E-03
5	6,86E-04	9,30E-04
6	x	1,41E-03
7	1,21E-03	1,00E-03
8	x	x

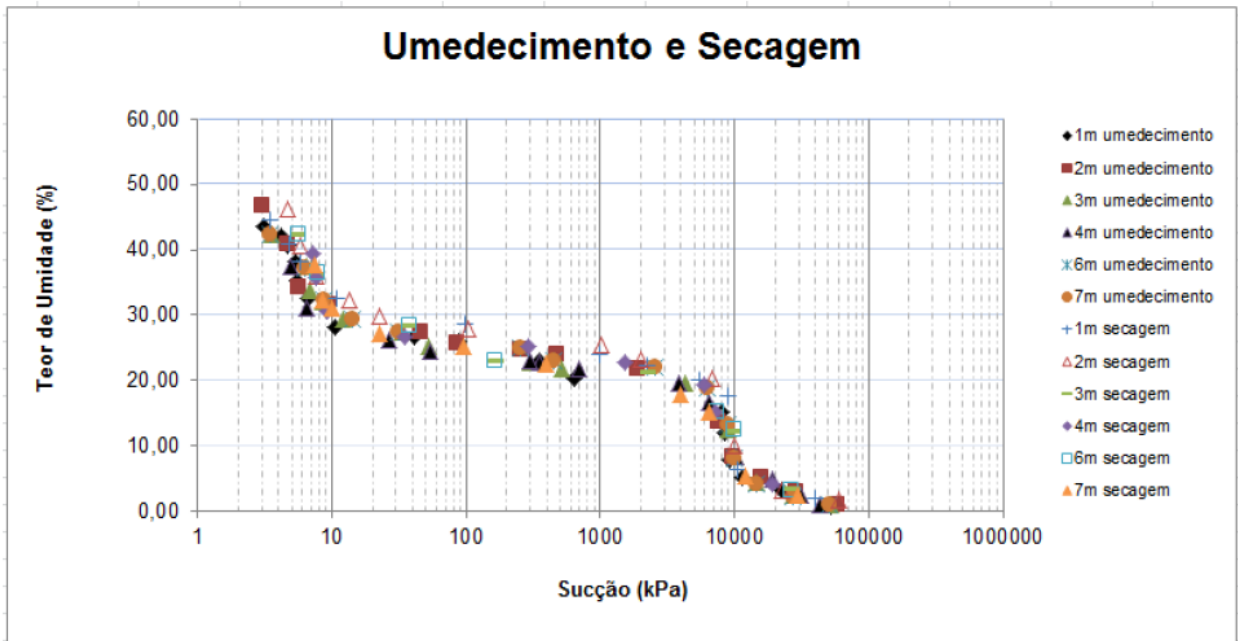
Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO F. Conductividades hidráulicas vertical y horizontal vs profundidad.



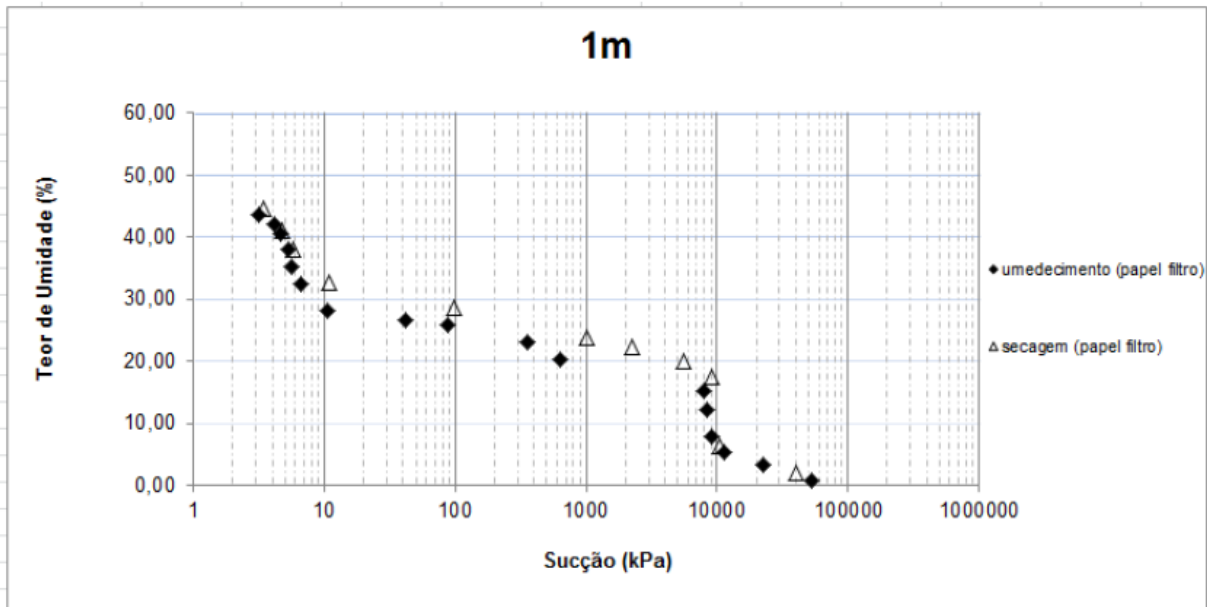
Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO G. Curvas de Retención: Porcentaje de Humedad gravimétrico vs Succión Matricial.



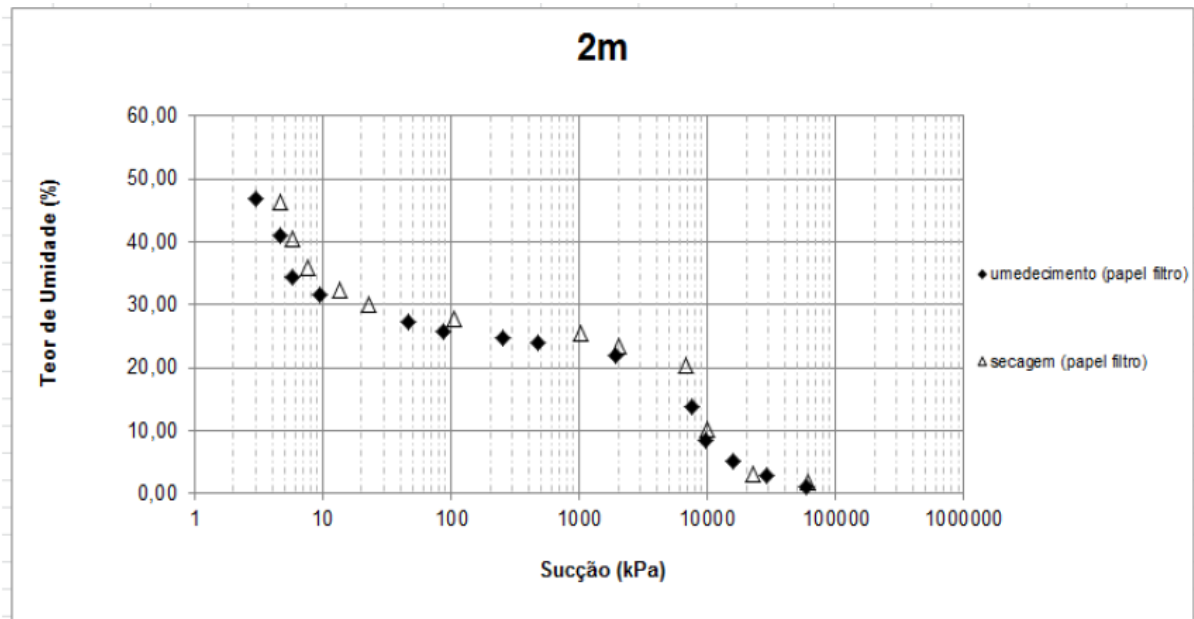
Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO H. Curvas de retención: porcentaje de humedad gravimétrico vs Succión matricial -1.0 m
(papel filtro).



Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO I. Curvas de retenção: porcentaje de humedad gravimétrico vs Succión matricial -2.0 m
(papel filtro).



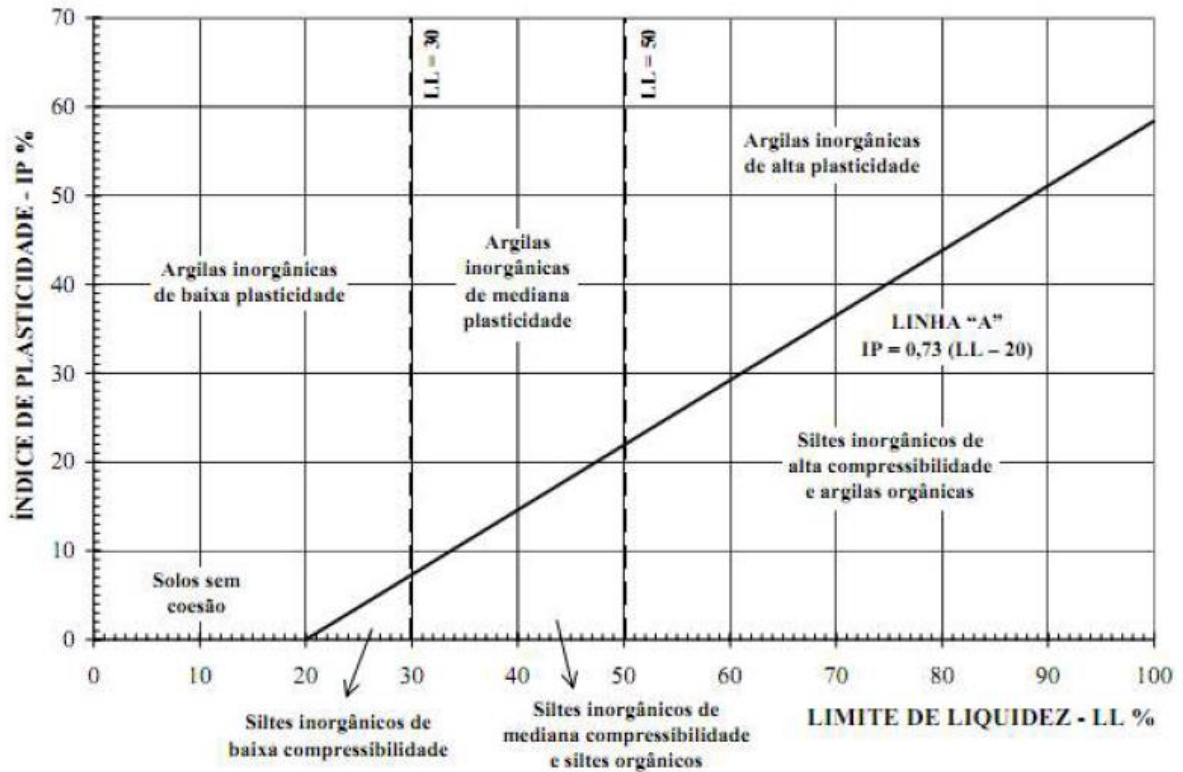
Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO J. Perfil medio e índices físicos del suelo estudiado

Profundidade da Camada (m)	Descrição da Camada	LL (%)	IP (%)	LC (%)	γ_{nat} (KN/m ³)	γ_s (KN/m ³)	e	n (%)	w (%)	c_{oa} (kpa)	$\sigma(n.a)$ (KPA)	$\phi(n.a)$ (°)	$\phi(p.a)$ (°)
1,00	Areia Argilo- siltosa	50,90	20,70	20,60	14,10	30,4	1,77	64	28,30	180	185	5	24
7,00	Areia Siltosa	44,90	10,20	27,20	14,80	30,50	1,63	61,8	27	183,7	122,8	13	27,5
9,00	Silte Arenoso	51,8	10	30	15,2	29,7	1,67	62,5	36,4	183	79,5	15	130

Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO K. *Clasificación unificada propuesta por Casagrande.*



Fuente: GON, F. *Caracterização Geotécnica através de ensaios de laboratório de um solo diabásio da região de Campinas/SP. 2011. (Dissertação de Maestria). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO L. Penetración del cono en centímetros para el ensayo in situ

PONTO	ESTADO DO SUBLEITO	GOLPES (DN)		
		1	2	3
1	SECO	1.3	0.9	0.7
	SATURADO	2.9	1.5	1.3
2	SECO	2.8	1.2	0.9
	SATURADO	5.4	3.5	2.8
3	SECO	1.7	0.9	0.9
	SATURADO	3.7	1.6	1.3

Fuente: RODRIGUES, M. *Colmatação de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.*

ANEXO M. Penetración del cono en centímetros para el en sayo en laboratorio.

G.C. Proctor Normal (%)	ESTADO DO SUBLEITO	GOLPES (DN)			
		1	2	3	4
100	SECO	3.4	2.6	2.5	2.7
	SATURADO	4.0	2.3	2.9	-
98	SECO	3	2.5	2.7	X
	SATURADO	4.6	4.9	X	-
95	SECO	3.4	3.3	3.6	-
	SATURADO	7.1	X	-	-
90	SECO	4.1	3.5	X	-
	SATURADO	X	-	-	-
80	SECO	4.6	2.9	3.1	-
	SATURADO	X	-	-	-

Fuente: RODRIGUES, M. Colmatção de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXO N. Correlación DN (cm) x CBR (%) para el ensayo realizado in situ

PONTO	ESTADO	DN			CBR		
		1	2	3	1	2	3
1	SECO	1.3	0.9	0.7	21	30	40
	SATURADO	2.9	1.5	1.3	8	18	21
2	SECO	2.8	1.2	0.9	9	22	30
	SATURADO	5.4	3.5	2.8	5	7	9
3	SECO	1.7	0.9	0.9	15	30	30
	SATURADO	3.7	1.6	1.3	7	16	21

Fuente: RODRIGUES, M. *Colmatção de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem*. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXO O. *Correlación DN (cm) x CBR (%) para el ensayo realizado en el laboratorio del DGCT de la FEC.*

ENERGIA (%)	ESTADO	GOLPES				CBR			
		1	2	3	4	1	2	3	4
100	SECO	3.4	2.6	2.5	2.7	7	10	10	9
	SATURADO	4.0	2.3	2.9	0.0	6.0	11	9	0.0
98	SECO	3.0	2.5	2.7	X	8.0	10	9	X
	SATURADO	4.6	4.9	X	0.0	5.0	5	X	0.0
95	SECO	3.4	3.3	3.6	0.0	7	8	7	0.0
	SATURADO	7.1	X	0.0	0.0	3.0	X	0.0	0.0
90	SECO	4.1	3.5	X	0.0	6	7	X	0.0
	SATURADO	X	0.0	0.0	0.0	X	0.0	0.0	0.0
80	SECO	4.6	2.9	3.1	0.0	5	9	8	0.0
	SATURADO	X	0.0	0.0	0.0	X	0.0	0.0	0.0

Fuente: RODRIGUES, M. *Colmatção de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem.* 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXO P. Grados de compactación obtenidos en cada uno de los moldes en la preparación de carga estática.

MOLDE	1	2	3	4	5	6
DIÂMETRO (cm)	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2
ÁREA (cm ²)	289.5	289.5	289.5	289.5	289.5	289.5
ALTURA (cm)	20.5	20.5	20.6	20.4	20.2	20.3
VOLUME (cm ³)	5935.3	5935.3	5964.3	5906.4	5848.5	5877.4
TARA (Kg)	1114.0	1160	1180	1120	1150	1080.0
PESO TOTAL (Kg)	10800. 0	10760	12020	11900	12660	12560
SOLO (Kg)	9686.0	9600.0	10840. 0	10780. 0	11510. 0	11480. 0
w _{ót} (%)	24.95	24.95	24.95	24.95	24.95	24.95
γ_d (ton/m ³)	1.31	1.29	1.45	1.46	1.57	1.56
$\gamma_{d,máx}$ (ton/m ³)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
G.C. (%)	81.6	80.9	90.9	91.3	98.4	97.7

Fuente: RODRIGUES, M. Colmatação de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXO Q. Grados de compactación obtenidos en cada uno de los moldes en la preparación de carga
dinámica.

MOLDE	1	2	3	4	5	6
DIÂMETRO (cm)	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2
ÁREA (cm ²)	289.5	289.5	289.5	289.5	289.5	289.5
ALTURA (cm)	20.6	20.1	20.5	20.5	20.3	20.6
VOLUME (cm ³)	5964.3	5819.5	5935.3	5935.3	5877.4	5964.3
TARA (Kg)	1120.0	1180	1160	1114	1150	1080.0
PESO TOTAL (Kg)	10540. 0	10420	11760	11750	12660	12720
SOLO (Kg)	9420.0	9240.0	10600. 0	10636. 0	11510. 0	11640. 0
w _{ót} (%)	24.7	24.7	25.0	25.0	24.8	24.6
γ_d (ton/m ³)	1.27	1.27	1.43	1.43	1.57	1.57
$\gamma_{d,máx}$ (ton/m ³)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
G.C. (%)	79.2	79.6	89.3	89.6	98.1	97.9

Fuente: RODRIGUES, M. Colmatção de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXO R. Deformación en mm del conjunto Balasto - Sub-rasante en la compactación

		MOLDE					
		1	2	3	4	5	6
CARGA (kg)	125	1.15	3.00	2.00	2.20	2.29	1.20
	250	2.24	0.70	0.75	1.25	1.36	1.08
	300	1.04	0.60	0.58	0.45	0.58	0.39
	375	1.01	0.60	0.61	0.85	0.65	0.43
	500	2.11	1.60	0.94	0.85	1.02	0.70
	625	3.83	2.70	0.82	0.90	1.25	0.57
	750	3.82	1.60	1.07	1.03	0.67	0.63

Fuente: RODRIGUES, M. *Colmatção de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem*. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXO S. Deformación en milímetros del conjunto Balasto - Sub-rasante debido al ensayo de carga estática.

		MOLDE					
		1	2	3	4	5	6
CARGA (Kg)	750	3.82	5.20	1.07	6.69	0.67	1.90
	875	3.70	1.90	0.66	0.92	0.65	0.70
	1000	2.55	2.29	1.03	0.85	0.80	0.50
	1125	2.85	2.01	0.74	1.39	0.92	1.50
	1250	2.85	1.60	0.98	0.51	0.83	0.47

Fuente: RODRIGUES, M. Colmatção de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXO T. Deformación en milímetros del conjunto Balasto - Sub-rasante debido al ensayo de carga estática dinámica.

		MOLDE					
		1	2	3	4	5	6
CICLOS	1000	19.22	39.04	10.21	14.7	8.39	9.32
	2000	0.42	2.62	0.20	0.64	0.23	0.35
	3000	0.19	1.67	0.11	0.32	0.15	0.19
	4000	0.12	1.67	0.05	0.17	0.09	0.08
	5000	0.08	1.01	0.07	0.17	0.06	0.08
	6000	0.05	0.62	0.04	0.14	0.03	0.04
	7000	0.02	0.23	0.03	0.12	0.03	0.04
	8000	0.03	0.15	0.04	0.11	0.03	0.04
	9000	0.03	0.10	0.03	0.07	0.02	0.05
	10000	0.01	0.04	0.02	0.06	0.01	0.02

Fuente: RODRIGUES, M. Colmatção de Camadas Granulares por Finos do Subleito em Condições Deficientes de Compactação e Drenagem. 2016. (Trabalho de Formação de Curso). Universidad Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

ANEXO U. Média mensal de Lluvia para el Municipio de Campinas.

CIIAGRO - Dados Mensais no período de 01/10/1996 até 01/10/2016						
Local: Campinas						
Mês	Dias	Dias de Chuva	Chuva Total	Média Mensal da Chuva Total	Chuva Máxima	Chuva Mínima
janeiro	620	365	5.637,8	281,9	138,5	0,1
fevereiro	565	289	3.512,8	175,6	140,4	0,2
março	620	252	3.166,2	158,3	107,9	0,1
abril	600	133	1.208,4	60,4	53,1	0,2
maio	620	115	1.268,3	63,4	139,5	0,2
junho	600	100	1.080,6	54,0	77,7	0,1
julho	620	89	766,9	38,3	45,2	0,1
agosto	620	76	503,5	25,2	33,2	0,1
setembro	600	148	1.204,5	60,2	61,0	0,1
outubro	621	198	2.106,6	105,2	144,7	0,1
novembro	600	258	3.166,8	158,3	72,1	0,1
dezembro	619	303	4.193,5	210,0	123,6	0,1

Fuente: CIIAGRO. Média mensal de chuva para o Município de Campinas. 2016. Disponível em <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QChuvaPeriodo.asp>> Acesso em: 14 out. 2016.

ANEXO V. Propiedades y utilización de los grupos de suelos MCT.

GRANULOMETRIAS TÍPICAS			Argilas, Siltos (q,s)	Areias siltosas	Siltos (k,m), e Siltos arenosos	Argilas, Argilas arenosas, Argilas siltosas, Siltos argilosos	Areias siltosas	Areias argilosas	Argilas, Argilas arenosas, Argilas siltosas, Siltos argilosos	
Designações do T1-71 do DER SP (equivalentes da Mississippi River Commission, USA) k=caolínico; m=micáceo; s=sericítico; q=quartzoso										
COMPORTAMENTO			N = Não Laterítico				L = Laterítico			
GRUPO MCT			NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'	
Propriedades	MINI-CBR (%)	Sem Imersão	M,E	E	M,E	E	E	E,EE	E	
		Perda por imersão	B,M	B	E	E	B	B	B	
	EXPANSÃO		B	B	E	M,E	B	B	B	
	CONTRAÇÃO		B	B,M	M	M,E	B	B,M	M,E	
	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (k)		M,E	B	B,M	B,M	B,M	B	B	
	COEFICIENTE DE SORÇÃO (s)		E	B,M	E	M,E	B	B	B	
	Corpos de prova compactados na massa específica aparente seca máxima de energia normal			EE=Muito elevado (a); E=Elevado (a); M=Médio (a); B=Baixo (a)						
Utilização	Base de pavimento		n	4°	n	n	2°	1°	3°	
	Reforço do subleito compactado		4°	5°	n	n	2°	1°	3°	
	Subleito compactado		4°	5°	7°	6°	2°	1°	3°	
	Aterro (corpo) compactado		4°	5°	6°	7°	2°	1°	3°	
	Proteção à erosão		n	3°	n	n	n	2°	1°	
	Revestimento primário		5°	3°	n	n	4°	1°	2°	
Grupos tradicionais obtidos de amostras que se classificam nos grupos MCT discriminados nos topos das colunas			USCS	SP; SM	MS; SC; ML	SM; CL; ML; MH	MH; CH	SP; SC	SC	MH; ML; CH
			AASHO	A-2	A-2; A-4; A-7	A-4; A-5; A-7-5	A-6; A-7-5	A-2	A-2; A-4	A-6; A-7-5

Fuente: COZZOLINO, V. M. N.; NOGAMI, J. S. (1993). *Classificação geotécnica MCT para solos tropicais*. In: *Solos e Rochas*, 16. São Paulo/SP, 1993. P. 77-91.