



**XVII CONGRESO ARGENTINO
DE VIALIDAD Y TRÁNSITO**
9º EXPOVIAL ARGENTINA



“Análisis comparativo de Resistencia a la Compresión Inconfinada (RCI) entre distintas formas de curado como parámetro de diseño de estabilización de pavimentos alternativos de bajo volumen de



tránsito”

Autores:

Ing. Federica María Selves (fselves@fing.edu.uy)

Dr. Leonardo Behak (lbehak@fing.edu.uy)

Bach. Bruno Telechea (btelechea@fing.edu.uy)

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

Dirección: Av. Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay CP: 11300

Teléfono: 27110524

Análisis comparativo de Resistencia a la Compresión Inconfinada por Distintas formas de curado como parámetro de diseño de estabilización de pavimentos alternativos de bajo volumen de tránsito

Federica Selves, Leonardo Behak y Bruno Telechea

Departamento de Ingeniería Geotécnica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

Resumen. En la actualidad se buscan nuevas alternativas de pavimentación que optimicen los recursos disponibles y mejoren el desempeño funcional y estructural de la infraestructura vial. La estabilización y/o modificación de suelos locales o agregados existentes (reciclados) proporciona una alternativa viable al uso de agregados de calidad. Las diversas técnicas de estabilización existentes se pueden dividir en métodos mecánicos y físico-químicos donde la cal y el cemento son los más usados. En el marco de un proyecto de construcción de tramos de pavimentos alternativos de bajo volumen de tránsito en conjunto con la Intendencia de Treinta y Tres a ejecutar en dicho departamento, se analizaron variantes de la metodología para la determinación del diseño de la mezcla óptima de suelo y cal. El método adaptado (Thompson) define como tenor óptimo de cal para estabilizar un suelo aquél que produce una resistencia a la compresión inconfinada (RCI) de 345 kPa a los 28 días o después de 48 h de cura a 49,5°C. El estudio fue a lo largo de los caminos Arrozal 33 y Paso del Peludo, donde se identificaron suelos existentes en la zona con potencial de estabilización con cal. Los suelos muestreados fueron caracterizados (distribución granulométrica y límites de Atterberg) y clasificados según SUCS. En este trabajo se expone un análisis comparativo realizado entre la RCI de probetas de mezclas de suelo con diferentes contenidos de cal (entre 3% y 7%) contrastando variantes de tiempo y forma de curado (desde 2 días a temperatura controlada hasta 28 días en cámara húmeda), efectuando ensayos RCI de suelo sin tratar como control. El objetivo es reducir para determinados tipos de suelos la duración de los ensayos, al tratarse de una tarea crítica en los estudios previos de proyecto y de diseño del pavimento disminuyendo plazos de rehabilitación de la caminería rural

Palabras Clave. Estabilización con cal, Modificación de Suelos, Resistencia Compresión Inconfinada Pavimentos Alternativos

1. Introducción

La red vial departamental bajo jurisdicción de la Intendencia Municipal de Treinta y Tres (IMTyT) está compuesta en su gran mayoría por pavimentos cuyas capas de rodadura no poseen revestimiento bituminoso o de hormigón. Un caso particular es la red de caminos de la cuenca arrocerá de la Laguna Merín donde el tránsito promedio anual es bajo, aunque intenso en las épocas zafrales. Esta red vial debe ser mantenida o mejorada, procurando estándares mínimos estructurales y de servicio buscando optimizar los recursos disponibles. *Ver figura 1*

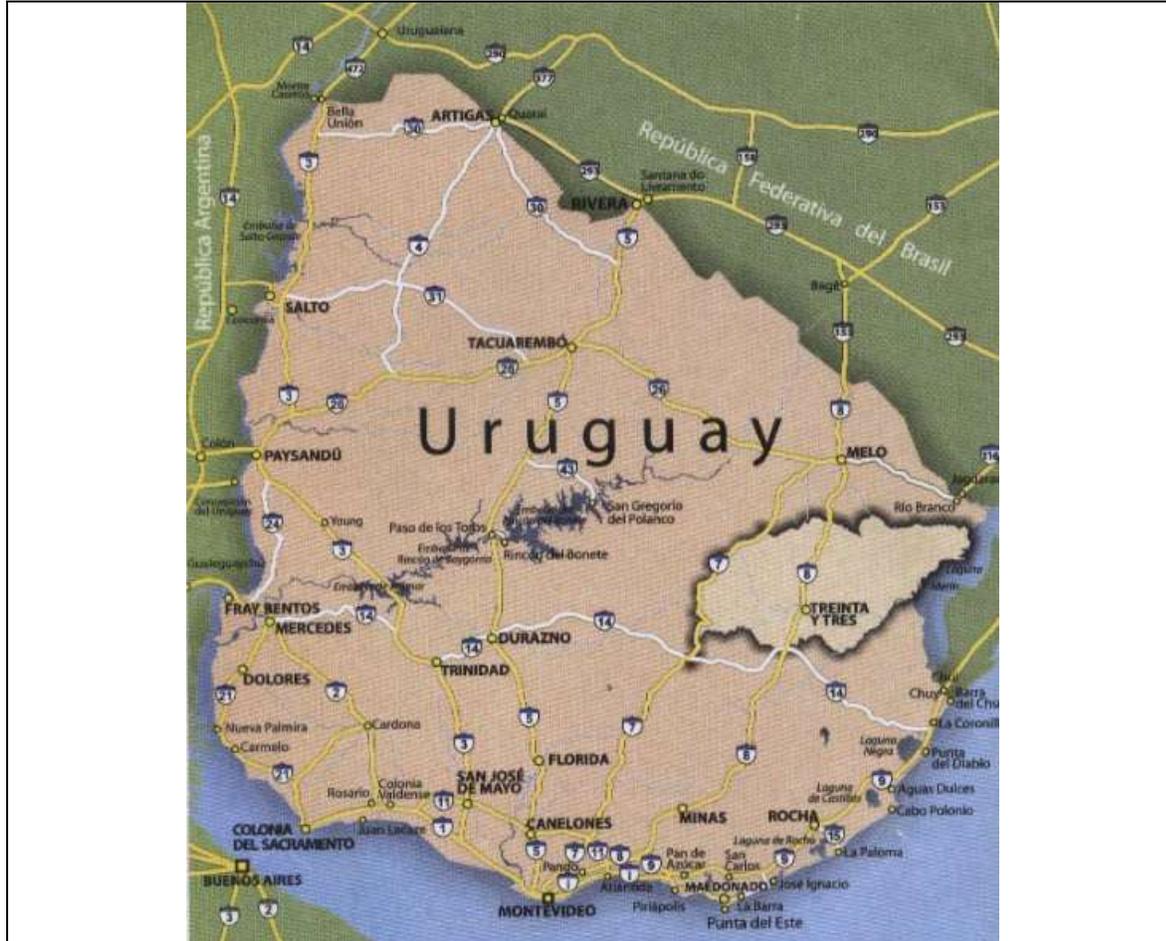


Figura 1 – Mapa de Uruguay con ubicación de Treinta y Tres y Laguna Merín

Los materiales y suelos de mayor abundancia en la cuenca arrocera de la Laguna Merín no siempre satisfacen las exigencias impuestas por las cargas de tránsito y las condiciones ambientales para su utilización. Durante el año, gran parte del tiempo, los suelos de las subrasantes de los pavimentos están saturados, tratándose de la peor condición de capacidad soporte. La saturación puede alcanzar la capa de base tanto por capilaridad como por ocasionales inundaciones, las cuales erosionan parte del material de la base, comprometiendo aún más el desempeño del pavimento.

La IMTyT recurre rutinariamente para la rehabilitación y reconstrucción de las bases de los pavimentos de la cuenca arrocera de la Laguna Merín a materiales de relativo buen desempeño extraídos de canteras o préstamos ubicados a grandes distancias. Los costos de transporte tienen un significativo peso en las intervenciones, resultando en restricciones presupuestales

para la comuna. [6] De forma de atender la mayor extensión posible de la red vial, se reducen tanto los costos como los estudios previos necesarios para dichos proyectos adoptando soluciones con bases de espesores insuficientes para el tránsito promedio anual proyectado. El nivel de tensiones que soportan las subrasantes es relativamente alto para su grado de deformabilidad y para las condiciones casi saturadas en que son solicitadas. A su vez, estos espesores no permiten alcanzar las cotas de pavimentos necesarias para evitar los efectos de las inundaciones.

Como resultado es necesario intervenir anualmente en mantenimiento rutinario, rehabilitaciones y reconstrucciones, antes del inicio o al finalizar la zafra, sobre buena parte de la extensión de la red de caminos de la cuenca arrocerá, con inversiones relativamente altas.

Resulta necesario procurar alternativas más económicas, de mayor desempeño estructural y funcional, y de rápida implementación que permitan abordar la totalidad de la red vial de la IMTyT en especial durante el período de zafra. Ello requiere el estudio sistemático de la potencialidad técnica y económica de aplicación de cada alternativa. Teniendo el transporte de materiales un gran peso específico en los costos de intervención, una primera solución sería recurrir al uso de materiales locales. Complementariamente se debería procurar la mejora de las condiciones de drenaje y elevar la cota de la superficie de rodadura del pavimento. Sin embargo, cabe destacar que la estabilización y/o modificación de suelos locales o agregados existentes (reciclados) proporciona una alternativa viable al uso de agregados de calidad. Las diversas técnicas de estabilización existentes se pueden dividir en métodos mecánicos y físico-químicos donde la cal y el cemento son los más usados.

En el marco de un proyecto de construcción de tramos de pavimentos alternativos de bajo volumen de tránsito en conjunto con la Intendencia de Treinta y Tres a ejecutar en dicho departamento, se analizaron variantes de la metodología para la determinación del diseño de la mezcla óptima de suelo y cal. El objetivo es buscar reducir para determinados tipos de suelos la duración de los ensayos, al tratarse de una tarea crítica en los estudios previos de proyecto y de diseño del pavimento disminuyendo así plazos y costos de rehabilitación de la caminería rural.

2. Antecedentes

La estabilización de suelos resulta en pavimentos de buen desempeño y durabilidad; existiendo varias técnicas, las que se pueden dividir en métodos mecánicos (compactación, corrección

granulométrica) y métodos físico-químicos, a través de la utilización de aditivos. La cal y el cemento Portland son los estabilizadores más ampliamente usados [7].

Existen esencialmente dos formas de mejorar las propiedades de suelos tratados con aditivos: modificación o estabilización (Little, 1999) [3]. Se denomina estabilización cuando al adicionar al suelo una cantidad adecuada de aditivo se produce un aumento significativo de resistencia mecánica y módulos de deformabilidad (módulo resiliente) y durabilidad de largo plazo.

Según Little (1999) [3], se entiende por modificación la alteración de las propiedades físicas del suelo, tales como reducción de la plasticidad, cambio de textura, reducción de variación volumétrica (expansión y retracción) y mejora de trabajabilidad. Sin embargo, la modificación puede producir mejoras estructurales muy importantes tales como capacidad de soporte (CBR) y aumento de resistencia y módulos de deformabilidad, aunque en menor magnitud que la estabilización.

Thompson (1966) [2] define como reactivo un suelo que presenta un aumento de resistencia a la compresión simple de por lo menos 345 kPa cuando se estabiliza con cal.

Los criterios para definir un material como modificado o estabilizado para capa estructural de pavimento varían de agencia en agencia (Little, 1999) [3]. Thompson (1970), apud Little (1999), definió como admisible para base estructural mezclas suelo-cal con una resistencia a la compresión confinada (RCI) superior a 1050 kPa. Un criterio de RCI mínimo típicamente usado por las diferentes agencias de transporte de los Estados Unidos para uso como capa de base o subbase está entre 700 kPa y 1400 kPa [3, 4, 5].

La Austroads Guide to Pavement Technology de 2002 sugiere para materiales modificados una RCI a los 7 días de 1 MPa y un máximo de RCI a los 28 días entre 1,3 MPa y 1,4 MPa (Jameson, 2013) [4]. Mientras que para el proceso de diseño del tenor de cal necesario para capas de pavimento modificadas se recomienda valores de RCI entre 0,5 MPa y 1,5 MPa.

La cal es un aglomerante resultante de la calcinación de calcáreos triturados a temperatura de 850°C - 900°C. El resultado de la calcinación de los carbonatos de calcio y de calcio-magnesio es la cal viva, de la cual por hidratación se obtiene la cal hidratada (Guimarães, 2002) [8].

Las reacciones alcalinas (reacciones químicas que se desarrollan entre la sílice y la alúmina y el hidróxido de calcio, en presencia de agua) pueden ser explicadas por el proceso de

estabilización de suelos arcillosos con cal. Los minerales arcillosos del suelo están básicamente compuestos por sílice y alúmina [7].

Cuando se adiciona cal a un suelo arcilloso, en presencia de agua, se desarrollan las reacciones alcalinas que pueden dividirse en dos fases: rápida y lenta. La fase rápida se debe a los procesos de intercambio catiónico, a la floculación y a la adsorción de moléculas de hidróxido de calcio. El intercambio catiónico inicia el proceso de estabilización instantáneamente y es seguido por la floculación y aglomeración (Prusinski y Battacharja, 1999) [9].

Las reacciones puzolánicas, responsables del continuo aumento de la resistencia mecánica de las mezclas de suelo con cal, se producen durante la fase lenta. Este aumento se debe a que la sílice, el aluminio y el hierro reaccionan con la cal y el agua formando diversos productos cementantes.

Estas reacciones fueron resumidas por Ingles y Metcalf (1972) [12]. Cuando una cantidad significativa de cal se adiciona al suelo, el pH de la mezcla se eleva hasta 12,4; que es el pH del agua saturada con cal. El sustancial aumento del pH, causa la disolución de la sílice y el aluminio de los minerales arcillosos del suelo que, combinándose con los cationes libres de calcio producen silicatos hidratados de calcio (CSH), aluminatos hidratados de calcio (CAH) y sílicoaluminatos hidratados de calcio (CASH). Estos productos forman un gel que tienden a cementar las partículas del suelo y continúan generándose mientras haya cal y sílice disponibles en el suelo.

La carbonatación es otra reacción dependiente del tiempo que ocurre cuando la cal reacciona con el dióxido de carbono (anhídrido carbónico) de la atmósfera produciendo carbonato de calcio (Little, 1996) [3]. El carbonato de calcio es un mineral que se entrelaza con los demás productos de la mezcla suelo-cal.

La carbonatación reduce la cal disponible para las reacciones puzolánicas y el intercambio catiónico siendo, por tanto, una reacción que debe ser evitada en lo posible (Little, 1996) [3]. La cantidad de carbonato de calcio que se formará en suelos tratados con cal depende de la cal disponible durante el proceso de cura (Guimarães, 2002) [8].

Existen diversos métodos de diseño de mezclas suelo-cal, cuyo objetivo es establecer tenores mínimos necesarios para la estabilización del suelo, siendo los más utilizados el método del pH (Eades y Grim, 1966) [10, 11] y el método de Thompson (1966) [2].

El método del pH se basa en el principio que para asegurar la estabilización del suelo con cal es necesario un pH superior a 12,4 (Eades, 1962) [10]. Por lo tanto, el valor óptimo de cal será el que produzca un aumento del pH del medio a 12,4. El método de Thompson define como tenor óptimo de cal para estabilizar un suelo aquél que produce una RCI de 345 kPa a los 28 días o después de 48 h de cura a temperatura de 49,5°C.

La temperatura de cura influye en las reacciones puzolánicas y, consecuentemente, en la velocidad de ganancia de resistencia (Bhattacharja et al., 2003) [13]. A mayor temperatura de cura más aceleradas son las reacciones y la tasa de ganancia de resistencia, aunque no garantiza un aumento en la resistencia máxima, pudiendo hasta reducir su valor.

3. Investigación de sitio y selección de materiales

El criterio de selección y muestreo de unidades geológicas para la caracterización de materiales, fue una combinación entre la disponibilidad de material suficiente para los tramos experimentales que se iban a construir en el marco del proyecto con la IMTyT y posibilidad de escalas mayores (básicamente canteras existentes), distancia de transporte, e información de los antecedentes bibliográficos de las características necesarias para obtener un comportamiento satisfactorio de mejoramiento cuando se adiciona cal. [6]

3.1 Ubicación de muestreo:

Se definieron dos sitios de préstamo donde se extrajeron muestras representativas para la realización de ensayos de laboratorio. Ambos sitios se ubican en el siguiente mapa, donde se observa la localización semidetallada sobre una imagen satelital de ambos muestreos (1 y 2) y una vista general satelital con referencia de la ubicación de los mismos en Uruguay.



3.2 Metodología de Extracción de Muestras:

La extracción de ambas muestras se realizó a pala, removiendo el tapiz vegetal superficial y extrayendo el material subyacente a profundidad de entre 10 y 40 cm. En ambos casos el

material es una mezcla del horizonte A (orgánico) y B(bastante arcilloso) correspondientes a los horizontes del suelo natural removidos por la construcción de canales. Los acopios se corresponden en la muestra 1 al acopio de un canal de ladera y en la muestra 2 a acopios de canal de planicie.

En general, los suelos de la zona son asociados por la Carta Geológica [1] a la Formación Dolores, lodolitas limo arcillosas de sedimentación continental, relacionada a fenómenos eólicos y de coluviación con formación de flujos de barro. Según la Carta de Suelos, se identifican dos tipos de suelos, planosoles y suelos halomórficos. La diferenciación visual de estos suelos, está dada en sus tonalidades más claras u oscuras.

De forma de facilitar el desarrollo del estudio, análisis y la nomenclatura, y a partir de la caracterización de dichos materiales desarrollada en el punto 4 de este trabajo, en adelante a la muestra 1 se le denominará “Suelo Arcilloso” y a la muestra 2 “Suelo Limoso”.

4. Caracterización de Materiales

4.1 Suelo

El material analizado correspondiente a cada muestreo fue caracterizado en laboratorio mediante análisis de distribución granulométrica y ensayos de Límites de Atterberg, siendo los resultados resumidos en la Tabla 1.

Dichos ensayos consistieron en:

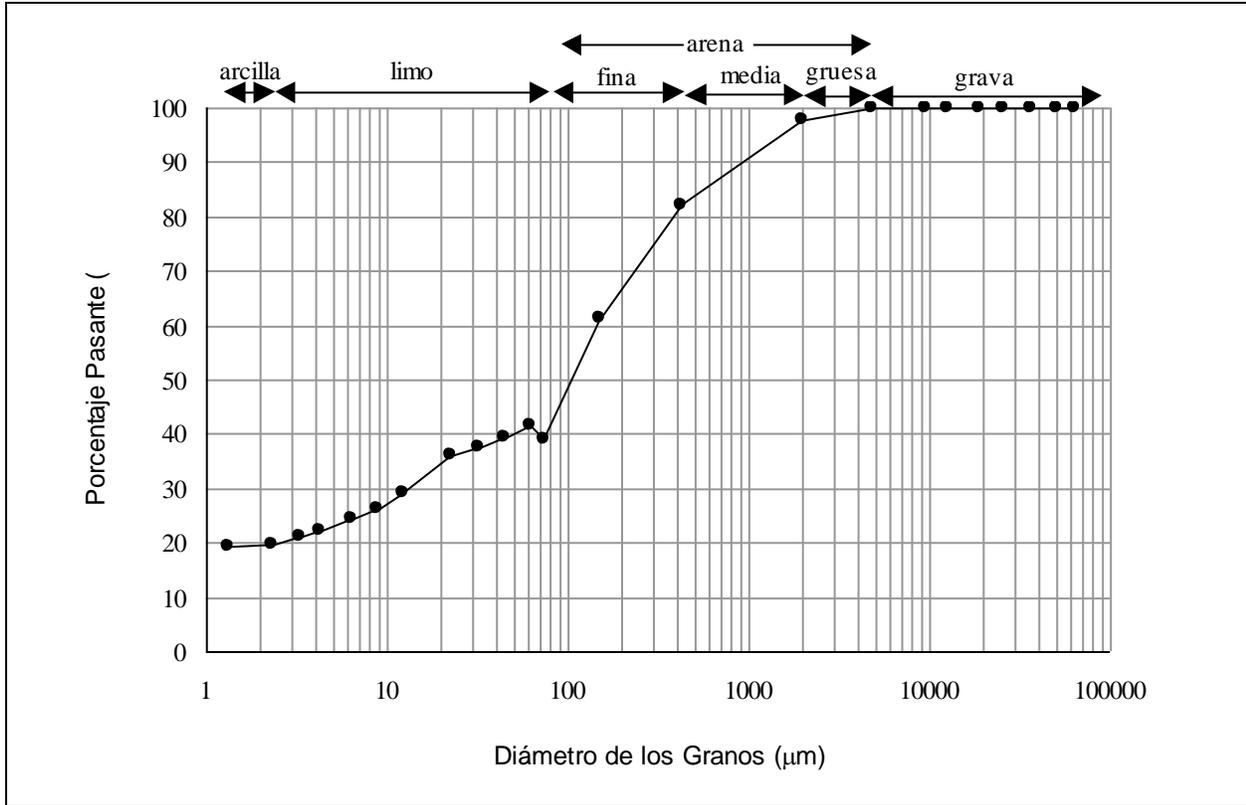
- Distribución Granulométrica (Norma ASTM D422). La distribución granulométrica de las fracciones mayores a 74 μm (retenido en el tamiz #200) se determinó por tamizado y la de las fracciones menores a 74 μm (pasante por el tamiz #200) mediante sedimentación.
- Límite Líquido y Límite Plástico ((Norma ASTM D4318).
- Gravedad Específica (Norma ASTM D854). Se realizaron en los materiales granulares con tamaño máximo inferior a 4,76 μm (100% pasante tamiz #4).

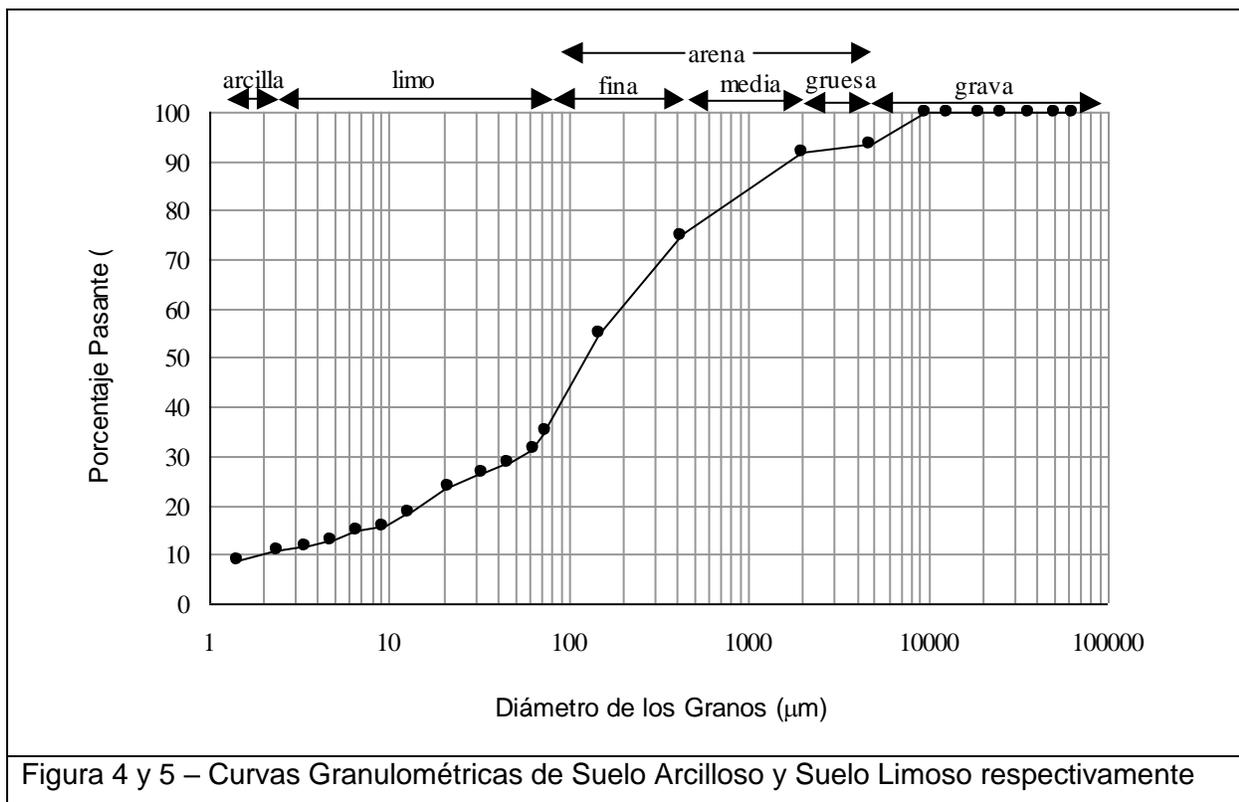
Se clasificó por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), según Norma ASTM D2487 y el Sistema AASHTO (Norma ASTM D3282).

Propiedad	Tipo de Suelo	
	Suelo Arcilloso	Suelo Limoso
Fracción Grava (%)	0,2	6,4
Fracción Arena (%)	60,7	58,4
Fracción Limo (%)	19,5	25,2
Fracción Arcilla (%)	19,6	10
Limite Liquido	24	35
Limite Plastico	18	21
Indice Plastico	7	14
SUCS	SC	SC
AASHTO	A-6	A-6

Tabla 1 – Caracterización de Suelo Arcilloso y Suelo Limoso

De acuerdo con el Sistema Único de Clasificación de Suelos (SUCS), ambas muestras de suelo pueden clasificarse como Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla. Es de destacar que la fracción pasante por el tamiz #200 (< 0,075 mm) es relativamente alta en ambos casos (35-40%). Como se puede observar en ambas curvas granulométricas (ver figuras 4 y 5), aproximadamente la mitad de la fracción arena es fina.





4.2 Cal

Una cal comercial fue usada en la investigación. Se trata de una cal cálcica compuesta en un 66% por óxido de calcio, un 5% de óxido de magnesio oxide y trazas de sílice y óxido férrico. La cal es fina con 100% pasante por el tamiz #10 y 93% el tamiz #200. La fracción limo constituye el 91% de la masa seca total.

5. Resistencia a la Compresión Inconfinada

Dentro del marco de diseño de mezcla óptima de suelo y cal para los tramos del proyecto en conjunto con la IMTyT, se realizó un análisis comparativo entre la Resistencia a Compresión Inconfinada de probetas de mezclas de suelo con diferentes contenidos de cal (entre 3% y 7%) contrastando variantes de tiempo y forma de curado (desde 2 días a temperatura controlada hasta 28 días en cámara húmeda).



Figura 6 – Probeta de mezcla suelo y 3%Cal

Para los distintos casos de estudio fueron adoptadas combinaciones de tres porcentajes en peso seco de cal (3%, 5% y 7%), además de ser ensayado el suelo sin tratar como control. Todas las probetas fueron compactadas 1 hora después de culminada la mezcla de los materiales con agua destilada, y, al poseer los materiales granulares con 100% pasante por el tamiz #4 (4,76 mm), en un molde metálico cilíndrico de 7,65 cm de altura y 3,72 cm de

diámetro interno mediante el sistema de amasado Mini-Harvard de modo de alcanzarse el PUSM del Proctor modificado (ver Figura 6).

Los materiales modificados fueron compactados al peso unitario seco máximo (PUSM) y humedad óptima de compactación (HOC) del ensayo Proctor modificado correspondiente a cada mezcla de suelo y cal. El suelo lo fue a su correspondiente PUSM y HOC del Proctor modificado. En las figuras 7, 8 y 9 se observan gráficas resumen de los distintos valores de los proctor para ambas muestras de suelos y las distintas modificaciones.

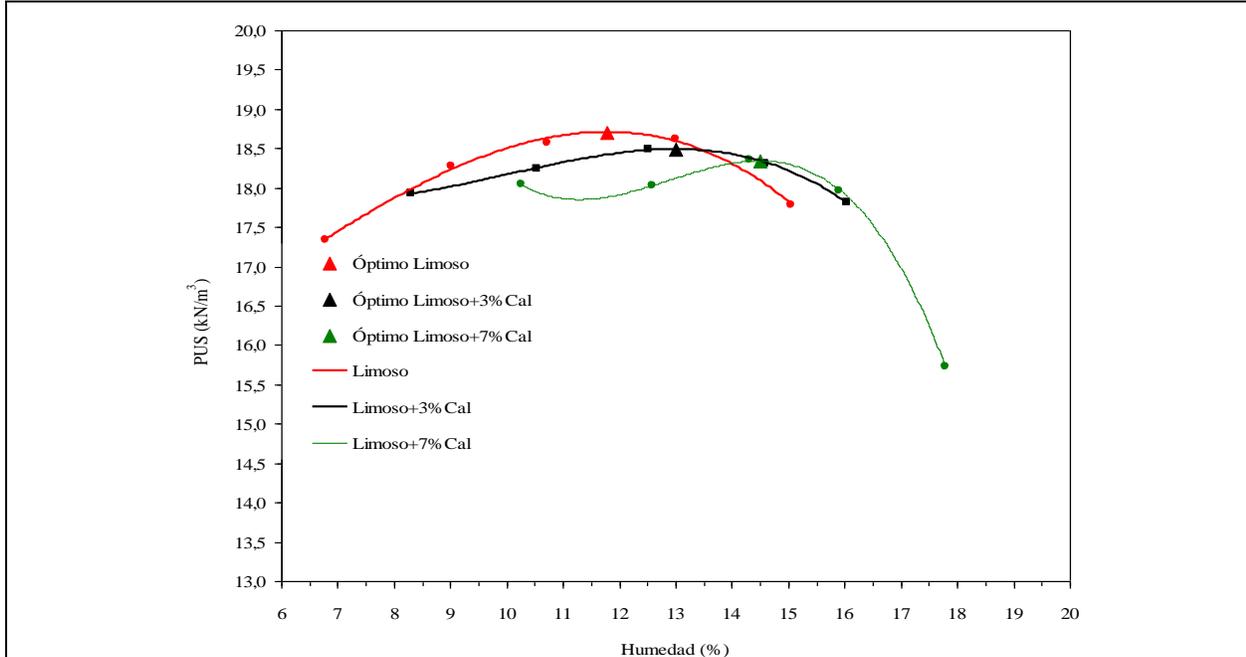


Figura 7 – Grafica Comparación Proctor Suelo Limoso con distintos tenores de Cal

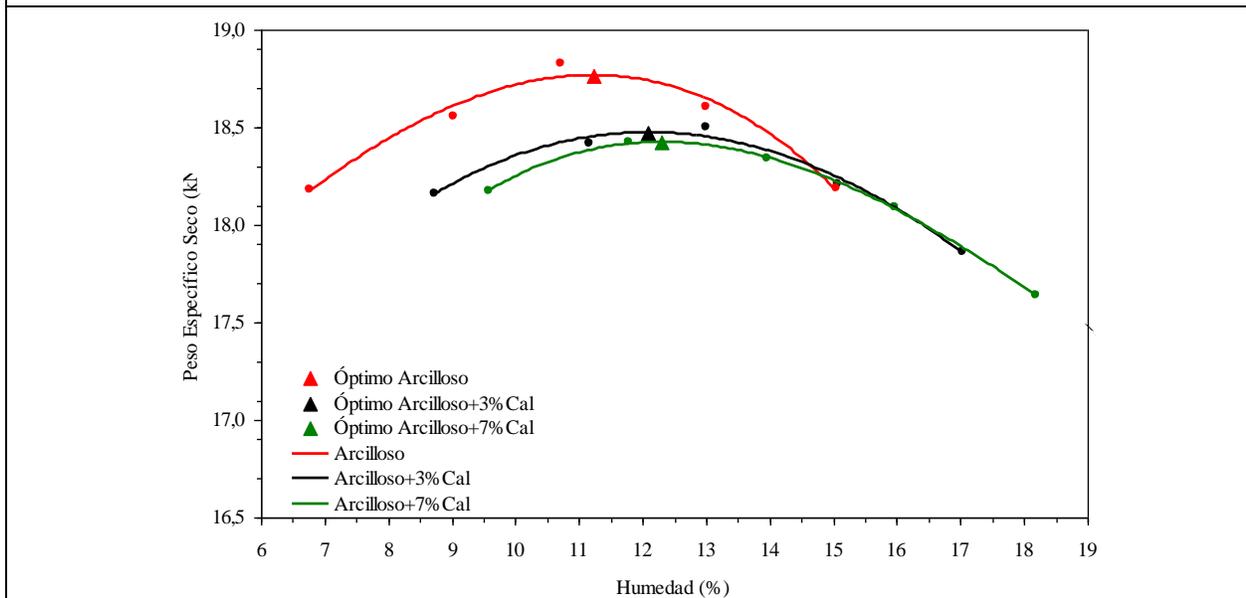
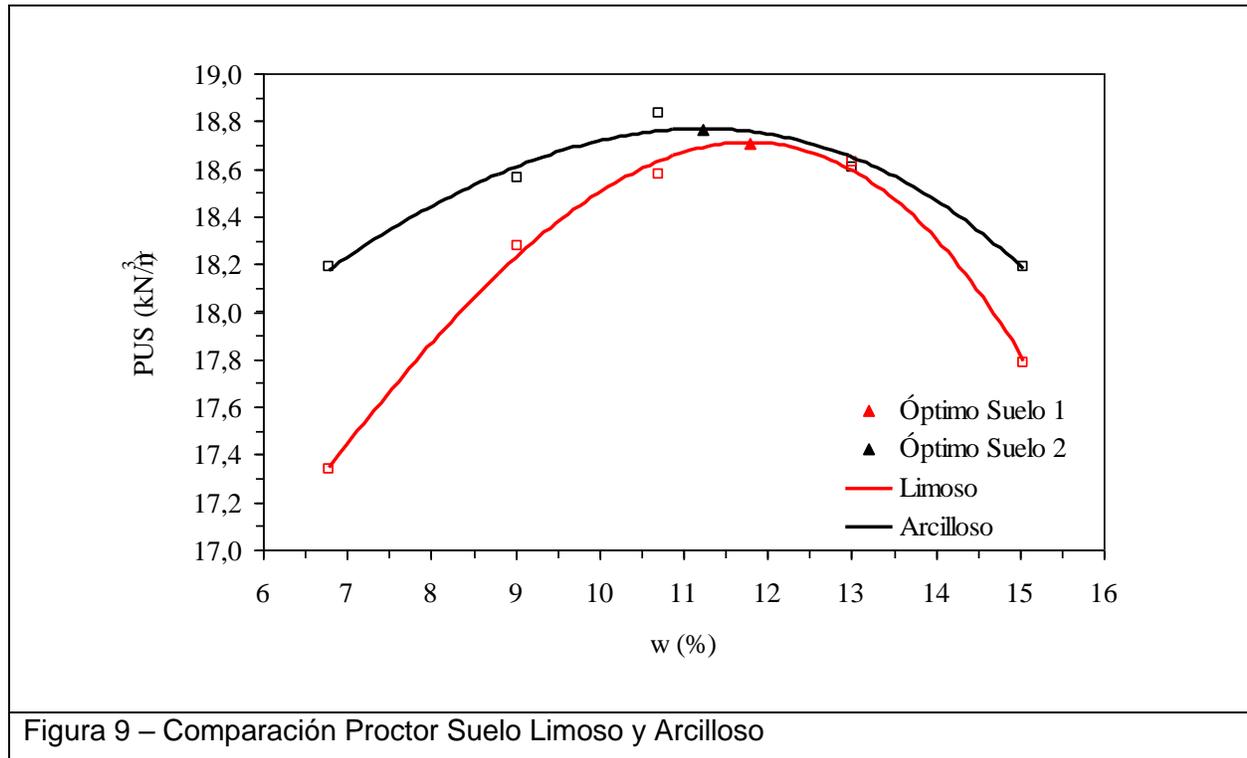


Figura 8 – Grafica Comparación Proctor Suelo Arcilloso con distintos tenores de Cal



Una vez compactadas, las probetas de material modificado fueron retiradas del molde, envueltas en PVC y se procedió a someterlas a distintas condiciones de curado variando el tiempo y la forma que se resumen a continuación:

- Suelo Arcilloso:
 - Suelo + 0% Cal, ensayado después de permanecer 24 horas en cámara húmeda a temperatura ambiente
 - Suelo + 3% Cal, curadas 28 días en cámara húmeda a temperatura ambiente
 - Suelo + 5% Cal, curadas 28 días en cámara húmeda a temperatura ambiente
 - Suelo + 7% Cal, curadas 28 días en cámara húmeda a temperatura ambiente
 - Suelo + 3% Cal, 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C
 - Suelo + 5% Cal, 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C
 - Suelo + 7% Cal, 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C
 - Suelo + 3% Cal, curadas 24 horas en cámara húmeda y 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C
 - Suelo + 3% Cal, 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C con capa de filme

- Suelo Limoso:

- Suelo + 0% Cal, ensayado a 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C
- Suelo + 3% Cal, curadas 28 días en cámara húmeda a temperatura ambiente
- Suelo + 5% Cal, curadas 28 días en cámara húmeda a temperatura ambiente
- Suelo + 7% Cal, curadas 28 días en cámara húmeda a temperatura ambiente



Figura 10 – Horno Controlador de Temperatura (Mufla)

- Suelo + 3% Cal, 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C
- Suelo + 5% Cal, 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C
- Suelo + 7% Cal, 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C
- Suelo + 3% Cal, 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C con dos capa de filme

El horno mufla utilizado para las distintas variantes del curado acelerado fue NOVUS N1040.

5.1 Resumen de resultados RCI



Figura 11 y 12 – Prensa Triaxial

Los ensayos de RCI se realizaron siguiendo la Norma AASHTO T208 a velocidad de deformación controlada de 0,9 mm/min. Las probetas de 3,72 cm de diámetros fueron ensayadas en una prensa triaxial, como se puede observar en las figuras 11 y 12.

Asimismo, se resume en las siguientes tablas los resultados RCI promedios obtenidos para cada caso. Cabe destacar que a su vez fueron calculadas las desviaciones estándar para el análisis de datos así como la varianza. Entre las figuras 13 - 29 se exponen los resultados obtenidos de manera gráfica para las distintas condiciones de curado en función del contenido cal, donde se expresa en cada ensayo de carga de RCI la evolución de la tensión o esfuerzo (kPa) en función de la deformación.

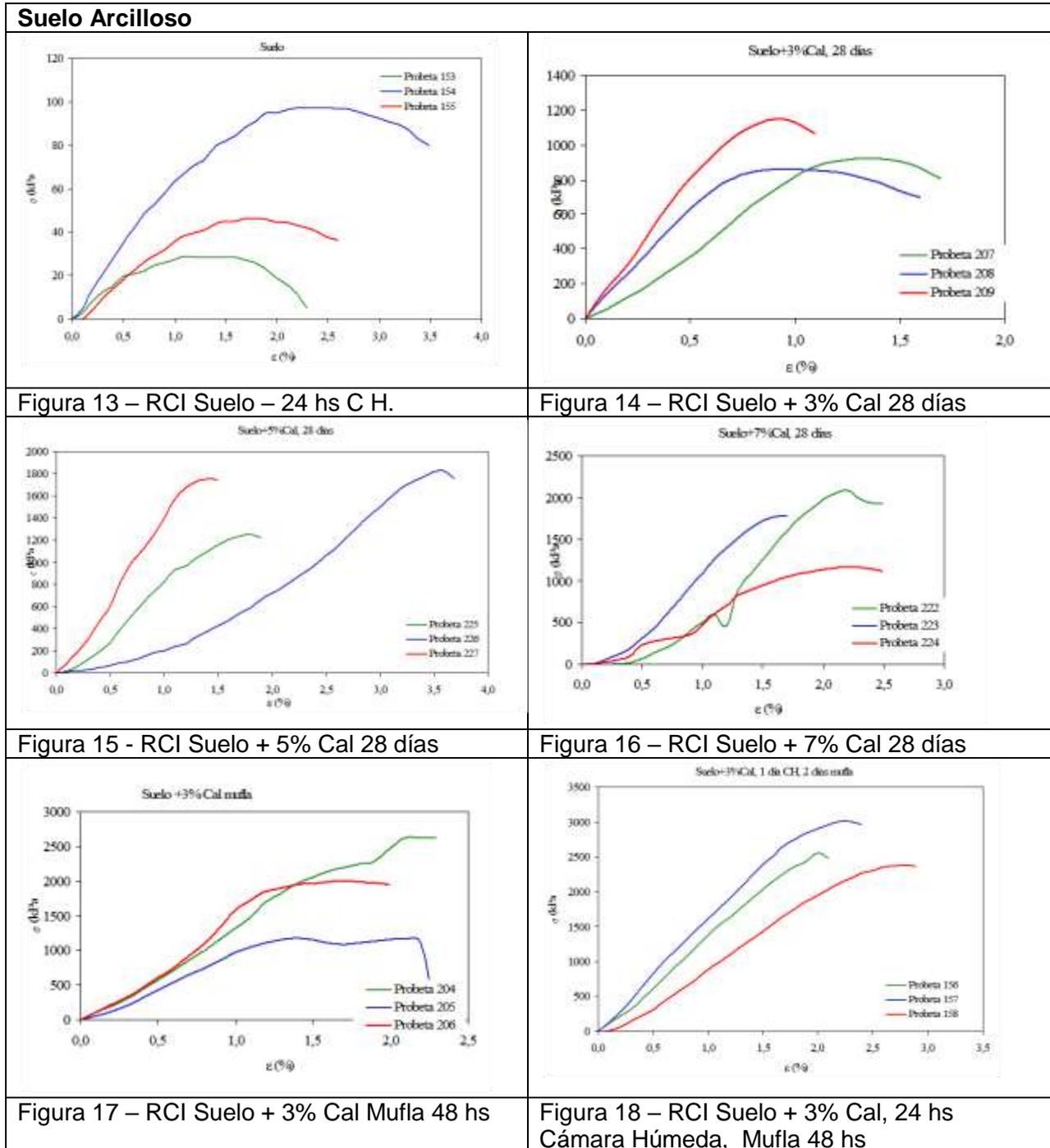
Además, en la figura 30, se muestra a modo de ejemplo, una comparación entre las curvas de RCI de la muestra de suelo limoso con distintos contenidos de cal, ensayado tras un curado a 48 horas a temperatura controlada en Mufla versus curado a los 28 días.

Suelo Arcilloso – Tabla 2:

		RCI (kPa)					
Arcilloso	Cal (%)	24 h CH	28 días	1 día CH + 48 h Mufla	48 h Mufla	48 h Mufla + filme	48 h Mufla + 20 hs Saturacion
	0	57,4	-	-	-	-	-
	3	-	978,1	2.647,00	1.933,26	1.137,46	4,73
	5	-	1.611,2	1.440,00	-	-	-
	7	-	1.675,9	1.781,00	-	-	-

Suelo Limoso - Tabla 3:

		RCI (kPa)		
Limoso	Cal (%)	48 h Mufla	28 días	48 h Mufla + filme
	0	45,1	-	-
	3	639	65,8	604,80
	5	488,3	614,8	
	7	505,6	589,5	



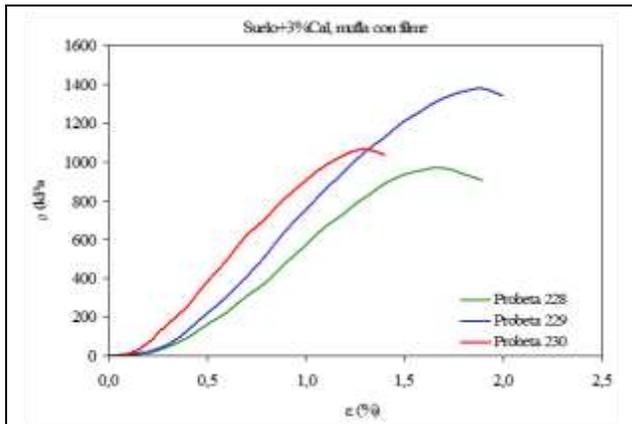


Figura 19 – RCI Suelo + 3% Cal - Mufla 48 hs con capa de filme PVC

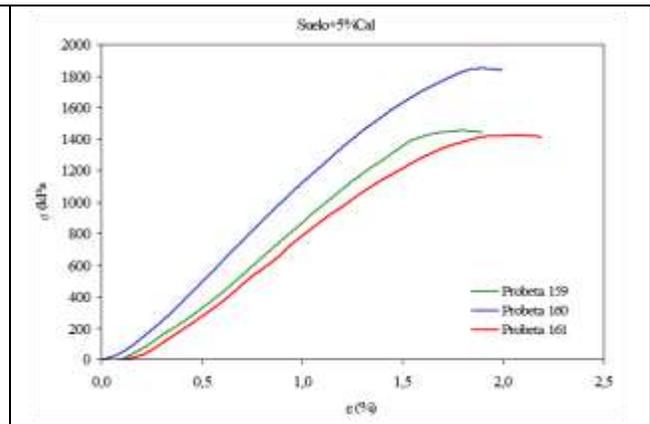


Figura 20 – RCI Suelo + 5% Cal - Mufla 48 hs

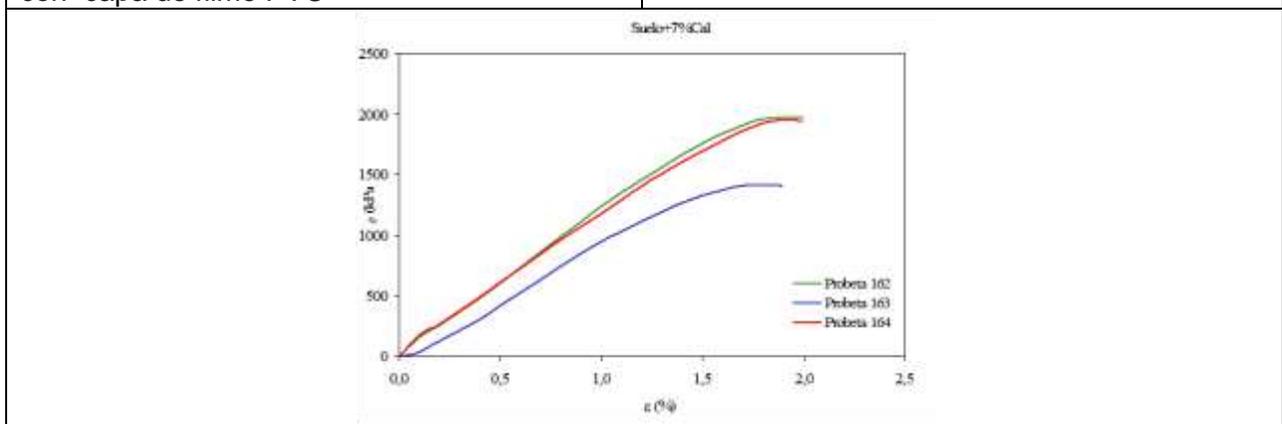


Figura 21 – RCI Suelo + 7% Cal - Mufla 48 hs

Suelo Limoso

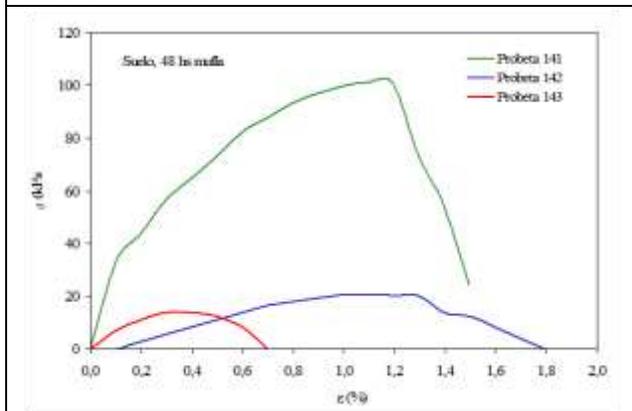


Figura 22 – RCI Suelo – 48 horas Mufla

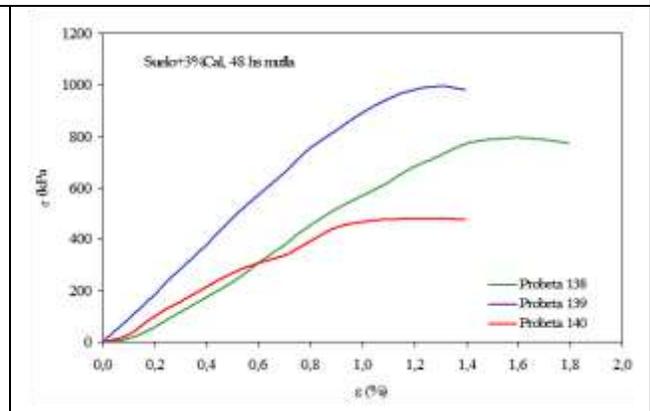


Figura 23 – RCI Suelo + 3% Cal - Mufla 48 hs

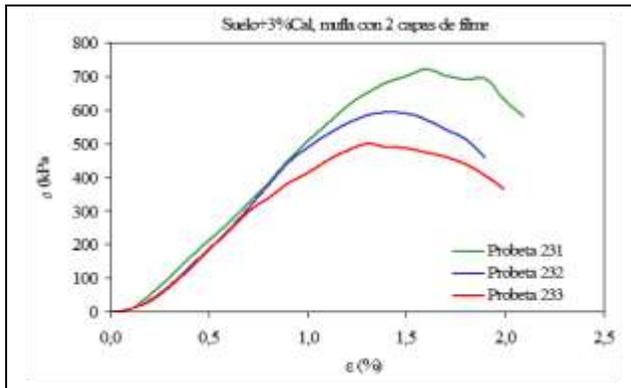


Figura 24 – RCI Suelo + 3% Cal - Mufla 48 hs con 2 capas de filme PVC

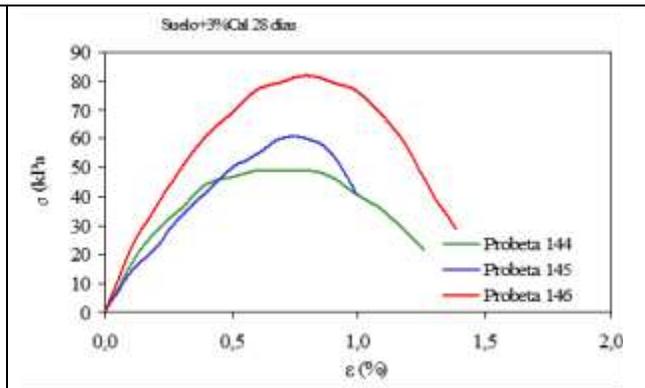


Figura 25 – RCI Suelo + 3% Cal 28 días

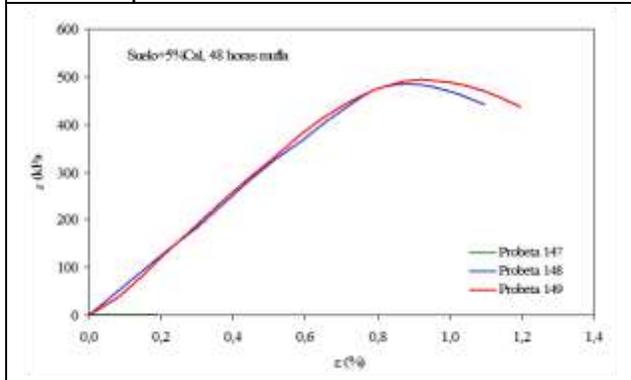


Figura 26 – RCI Suelo + 5% Cal - Mufla 48 hs

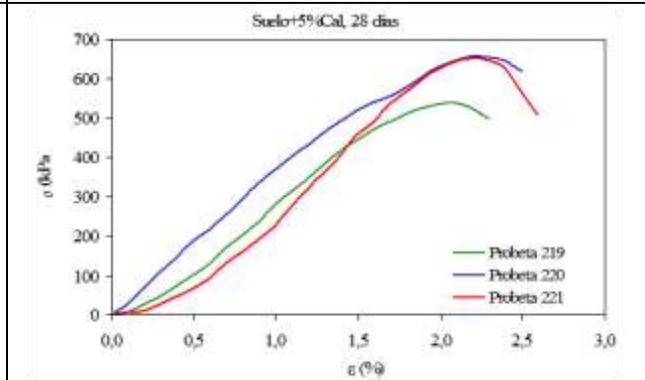


Figura 27 – RCI Suelo + 5% Cal 28 días

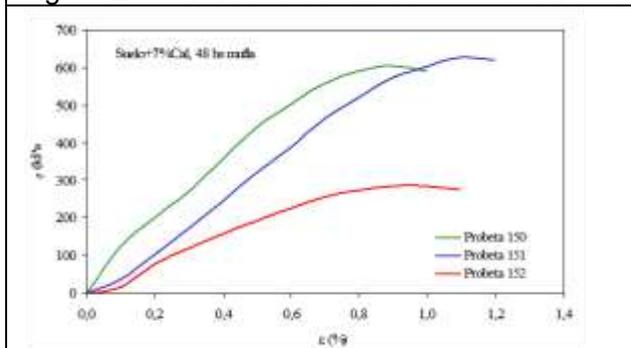


Figura 28 – RCI Suelo + 7% Cal - Mufla 48 hs

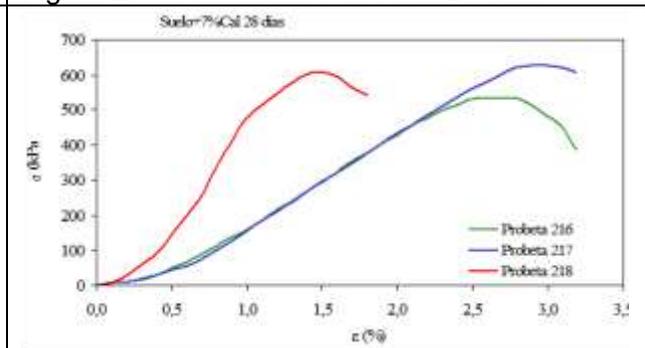
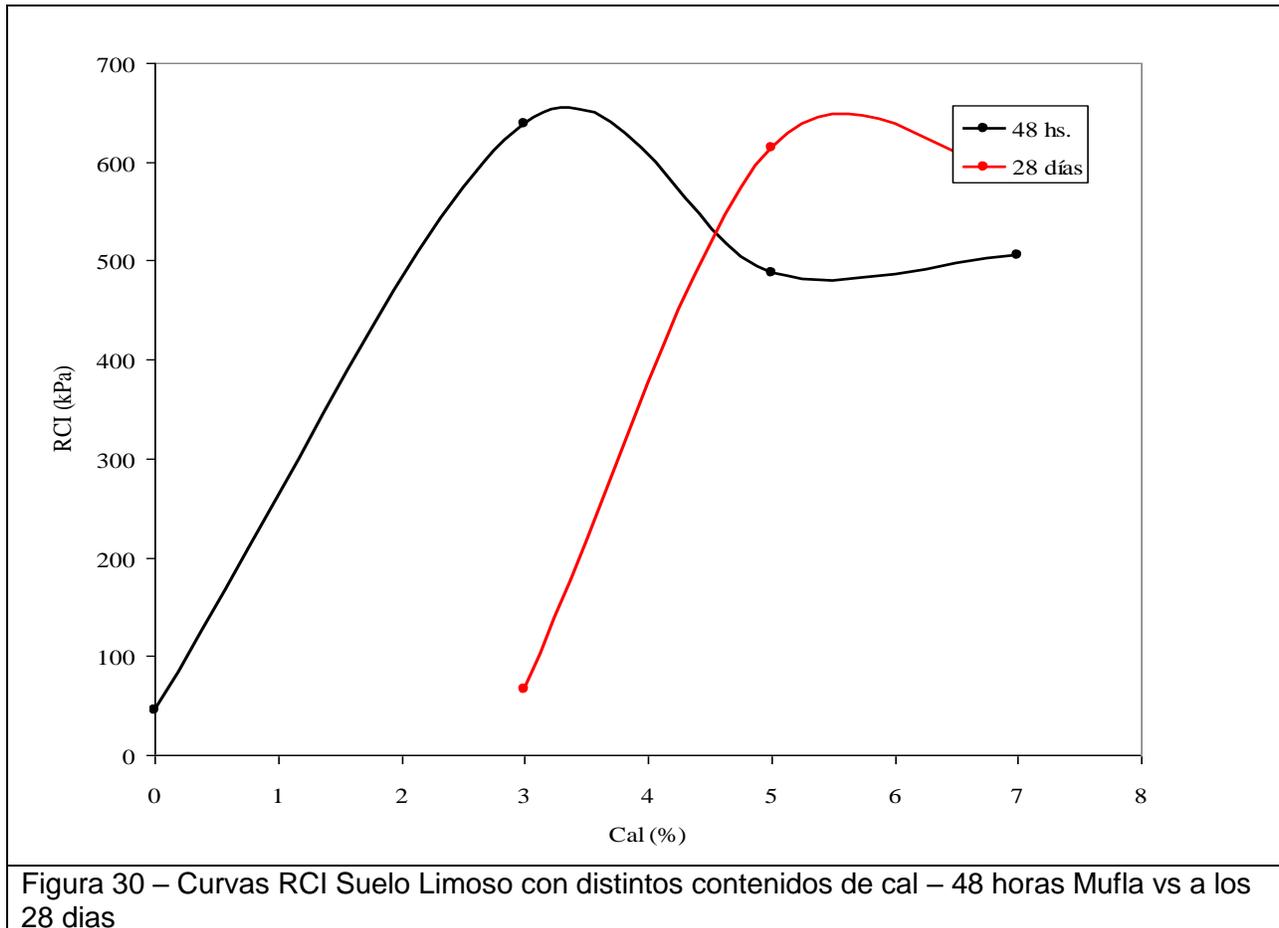


Figura 29 – RCI Suelo + 7% Cal 28 días



5.3 Análisis de resultados obtenidos

Existe una dispersión en los valores de RCI obtenidos para ambos materiales modificados con distintos contenidos de cal, debido al tamaño inconstante de las fracciones más gruesas del suelo que ofrece variable resistencia a la compresión del pistón de carga y a la dispersión de la humedad de compactación verificada en cada probeta.

La RCI de todas las mezclas es mayor que la del suelo, y tanto cuando se estabiliza suelo arcilloso como suelo limoso con cal, se concluye que adoptando lo verificado por Thompson (1966) se tratan en ambos casos de suelos reactivos al presentar un aumento de resistencia a la compresión simple de más 345 kPa. La diferencia mínima entre el valor de la RCI entre suelo y mezcla suelo – cal es de aproximadamente 560 kPa que es comparando con los valores de RCI alcanzados mediante curado a 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 °C manteniendo la probeta recubierta con dos capas de PVC.

Respecto a los resultados obtenidos para la muestra de suelo arcilloso, se observa que las condiciones de curado a temperatura controlada mediante Mufla que más se asemejan a la resistencia RCI para el diseño de la mezcla óptima alcanzada mediante curado a los 28 días a temperatura ambiente es 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C manteniendo la probeta recubierta con PVC. Esto se debe a que dicha cobertura evita grandes pérdidas de humedad acelerada en la misma durante dicho proceso.

A su vez esta misma situación se confirma en el suelo limoso donde los valores de RCI alcanzados mediante curado a los 28 días a temperatura ambiente son similares a los recabados a 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C manteniendo la probeta recubierta con dos capas de PVC. Incluso, al utilizar una segunda capa de filme, se llegaron a resultados cuya diferencia es relativamente insignificante (34 kPa, es decir del orden del 5% del valor de RCI).

Además se registra que se alcanzan mayores resistencias mediante curado en mufla a 49 ° C verificándose que a mayor temperatura de cura más aceleradas son las reacciones puzolánicas y la tasa de ganancia de resistencia.

La evolución de la RCI en función del contenido de cal se puede observar en la Figura 30 para suelo limoso, contrastando variantes de tiempo y forma de curado (48 horas en Mufla y 28 días en Cámara Húmeda). El punto en el origen representa la RCI del suelo sin tratar. Se verifica un aumento de resistencia con el contenido de cal, fundamentalmente cuando se añade 3% en el curado mediante mufla y 5% en el caso de los 28 días. En principio este fenómeno se puede explicar debido a que mayor temperatura de cura, más aceleradas son las reacciones puzolánicas y la tasa de ganancia de resistencia, por lo que el valor óptimo de diseño de mezcla se alcanzaría con menor tenor de cal.

Por otro lado, debido a las situación particular a las cuales están solicitados los caminos de la Red Vial departamental de Treinta y Tres, por tratarse de una cuenca arrocerá, se quiso verificar la influencia en la resistencia al saturar la mezcla de suelo arcilloso y 3% de cal durante 20 horas, después de someterse a un curado acelerado en Mufla por 48 horas a temperatura controlada a 49 ° C previo al ensayo de RCI. Como se ve expresado en la última columna de la tabla 2 resumen correspondiente a suelo arcilloso, se produce una abrupta pérdida de RCI.

6. Conclusiones

En este trabajo se expuso un análisis comparativo realizado entre la RCI de probetas de mezclas de suelo caracterizados como arenas arcillosas con diferentes contenidos de cal (entre 3% y 7%) contrastando variantes de tiempo y forma de curado (desde 2 días a temperatura controlada hasta 28 días en cámara húmeda).

Los valores de RCI obtenidos permiten clasificar como suelo estabilizado tanto el tratamiento del suelo arcilloso como suelo limoso con cal, al adoptar lo verificado por Thompson (1966) [2] tratándose de esta forma en ambos casos de suelos reactivos al presentar un aumento de resistencia a la compresión simple de más 345 kPa.

Se observó que las condiciones de curado a temperatura controlada mediante Mufla que más se asemejan a la resistencia RCI para el diseño de la mezcla óptima alcanzada mediante curado a los 28 días a temperatura ambiente es 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C manteniendo la probeta recubierta con PVC.

También se alcanzan mayores resistencias mediante curado en mufla a 49 ° C verificándose que a mayor temperatura de cura más aceleradas son las reacciones puzolánicas y la tasa de ganancia de resistencia.

Al contrastar la evolución de la RCI en función del contenido de cal comparando variantes de tiempo y forma de curado (48 horas en Mufla y 28 días en Cámara Húmeda) se verifica un aumento de resistencia con el contenido de cal, fundamentalmente cuando se añade 3% en el curado mediante mufla y 5% en el caso de los 28 días. En principio este fenómeno de “corrimiento” se puede explicar debido a que mayor temperatura de cura, más aceleradas son las reacciones puzolánicas y la tasa de ganancia de resistencia, por lo que el valor óptimo de diseño de mezcla se alcanzaría con menor tenor de cal en el curado acelerado.

En la búsqueda de reducir para determinados tipos de suelos (arenas arcillosas) la duración de los ensayos, al tratarse de una tarea crítica en los estudios previos de proyecto y de diseño del pavimento de forma disminuyendo plazos de rehabilitación de la caminería rural, cabe resaltar que se comprobó que acelerar el curado a 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C se trata de una opción viable para identificar de manera temprana si es reactivo o no a la estabilización con cal.

Respecto a si el cambio de la metodología de curado frente a la convencional para el diseño de mezcla, el valor óptimo se alcanzaría con menor tenor de cal en el curado acelerado, por lo que en un principio no se podría utilizar de manera directa los resultados obtenidos de RCI en el diseño, requiriendo de alguna corrección o aumento de contenido de cal en dos puntos en este caso.

Es importante resaltar la influencia en el ensayo de RCI de mantener en el curado la envoltura de filme de PVC, ya que los valores de RCI alcanzados mediante curado a los 28 días a temperatura ambiente son similares a los recabados a 48 horas a temperatura controlada en Mufla a 49 ° C manteniendo la probeta recubierta. Incluso al utilizar la segunda capa de filme la diferencia fue prácticamente despreciable. Esto se explicaría debido a que dicha cobertura evita grandes pérdidas de humedad acelerada en la probeta durante el proceso acelerado de curado.

Por otro lado, cabe señalar algunas limitantes encontradas durante el desarrollo de este estudio. En primer lugar el límite “físico” en cantidad de probetas a curar simultáneamente en la Mufla, el cual se limita a 6. Si se requiere una rápida implementación que permitan abordar la totalidad de la red vial de la IMTyT en especial durante el período de zafra se necesita el estudio de la potencialidad técnica y económica de aplicación de cada alternativa y si la misma significaría un real ahorro de tiempo.

De igual forma existe la interrogante si dicho ensayo de RCI se aproxima a un buen modelo para simular la realidad y las condiciones a las cuales se encuentra el pavimento estabilizado. El RCI de por si no simula la realidad ya que la presión lateral de dicho ensayo es igual a cero. Sin embargo, aunque esto pueda significar un desvío de la realidad, pues no reproduce las condiciones en el terreno, se obtiene un resultado más conservador, ya que la presión lateral de confinamiento ayuda al suelo a resistir la carga, y al no existir ésta el valor obtenido sería inferior al real, lo que brinda un margen de seguridad adicional al diseñar.

7. Agradecimientos

El proyecto pudo ser realizado por la financiación otorgada por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) de Uruguay y por el interés y el apoyo dado en la Intendencia Departamental de Treinta y Tres. A ellos nuestro reconocimiento y agradecimiento. Así mismo, nuestro agradecimiento a Juan Álvarez, técnico de laboratorio del Departamento de Ingeniería Geotécnica de la Universidad de la República, por su colaboración en los ensayos de laboratorio y tareas de campo.

8. Bibliografía:

- [1] Preciozzi, F; Spoturno, J; Heinzen, W; Rossi, P. Memoria Explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a Escala 1:500.000. Dirección Nacional de Minería y Geología, Ministerio de Industria, Energía y Minería, Montevideo, 1985.
- [2] Thompson, M. R. Soil-Lime Mixtures for Construction of Low-Volume Roads. Transportation Research Board Special Report, 160 (1975), Washington D.C., 149-165.
- Thompson, M.R. Lime Reactivity of Illinois Soils. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, v. 92, n. SM5, p. 67 – 92, 1966.
- Thompson, M.R.; EADES, J.L. Evaluation of Quick Test for Lime Stabilization. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, n. 96, SM2, pp. 795-800, New York, 1970.
- [3] Little, D.N. Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates. Volume 1: Summary of Findings. National Lime Association, 1999.
- Little, D. N. Assessment of In Situ Structural Properties of Lime-Stabilized Clay Subgrade. Transportation Research Record, n. 1546, p. 13-23, Washington D.C., 1996.
- [4] Jameson, G.W. Review of Definition of Modified Granular Materials and Bound Materials. Austroads Research Report AP-R343-13, Austroads Ltd., Sydney, 2013.
- [5] Theyse, H.L.; De Beer, M.; Rust, F.C. Overview of South African Mechanistic Pavement Design Method. Transportation Research Record, 1539 (1996), Washington D.C, 6 – 17.
- [6] Informe Solución Alternativa de material de Suelo-Cal para caminos rurales del Departamento de Treinta y Tres - El estudio fue realizado por el Profesor Adjunto Leonardo Behak (Responsable), Profesor Adjunto Marcos Musso, Asistente. Gustavo Piñeiro, Ayudante Federica Selves, Ayudante Verónica Aguilar y Técnico Juan Álvez.
- [7] Behak, L.; Musso, M.; Piñeiro, G.; Selves, F.; Telechea, B. Uso de Residuos Agroindustriales para Materiales Alternativos de Pavimentos. Informe Técnico, Laboratorio de Geotécnica de Pavimentos, Facultad de Ingeniería, UdelaR, pp. 88, 2015.
- [8] GUIMARÃES, J. E. P. A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 2ª Ed. PINI, San Pablo, 2002.
- [9] PRUSINSKI, J.R.; BHATTACHARJA, S. Effectiveness of Portland Cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. Transportation Research Record, n. 1652, p. 215-227, Washington D.C., 1999
- [10] EADES, J.L. Reactions of Ca(OH)₂ with Clay Minerals in Soil Stabilization. University of Illinois, Urbana, 1962.
- [11] EADES, J.L.; GRIM, R.E. A Quick Test to Determine Lime Requirement for Lime Stabilization. Highway Research Record, n. 139, p. 61 - 72, Washington, D.C., 1966.
- [12] INGLES, O.G.; METCALF, J.B. Soil Stabilization. Principles and Practice. Butterworths, Melbourne, 1972.

[13] BHATTACHARJA, S.; BHATTY, J.I.; TODRES, H.A. Stabilization of Clay Soils by Portland Cement or Lime – A Critical Review of Literature. PCA R&D Serial No. 2066, Portland Cement Association, 60 p., Skokie, Illinois, USA, 2003.

Índice

1. Introducción	2
2. Antecedentes	4
3. Investigación de sitio y selección de materiales	7
3.1 Ubicación de muestreo:	7
3.2 Metodología de Extracción de Muestras:	8
4. Caracterización de Materiales	9
4.1 Suelo	9
4.2 Cal	11
5. Resistencia a la Compresión Inconfinada	11
5.1 Resumen de resultados RCI	15
5.3 Análisis de resultados obtenidos	20
6. Conclusiones	22
7. Agradecimientos	23
8. Bibliografía:	24