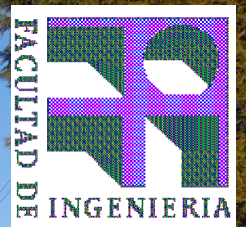




Agencia Nacional de  
Investigación e Innovación



**Proyecto Fondo María Viñas  
FMV\_2\_2011\_1\_6706**

**Uso de Residuos Agroindustriales para Materiales Alternativos  
de Pavimentos**

<b>Uso de Residuos Agroindustriales para Materiales Alternativos de Pavimentos</b>	
Unidad Ejecutora	Laboratorio de Geotécnica de Pavimentos - Departamento de Ingeniería Geotécnica – Instituto de Estructuras y Transporte – Facultad de Ingeniería – Universidad de la República
Unidad Financiadora	Fondo María Viñas Agencia Nacional de Investigación e Innovación
Unidad de Apoyo	Dirección de Infraestructura Vial Intendencia Departamental de Artigas
Responsable Científico	Leonardo Behak
Investigadores	Marcos Musso Gustavo Piñeiro Federica Selves Bruno Telechea
Técnicos de Apoyo	Juan Álvez
<p><b>Sumario</b></p> <p>Este informe técnico documenta una investigación para validar el desempeño de materiales de suelo modificado con cenizas de cáscara de arroz o de bagazo de caña de azúcar y cal como capas de pavimentos de bajo volumen de tránsito. Se trata de dar un uso a estas cenizas que son residuos de la producción de azúcar y etanol en la planta de ALUR S.A. en Bella Unión y del proceso de secado de arroz en los molinos de la Ciudad de Artigas, donde el bagazo de caña de azúcar y la cáscara de arroz son usados como combustible de calderas, con beneficios ambientales por sustitución de deposición de las cenizas en rellenos sanitarios. Un tramo experimental de pavimento a escala completa con capa de base de grava limosa modificada con ceniza de bagazo de caña de azúcar y cal fue construido en una calle de Bella Unión, mientras que dos tramos experimentales con capa de base de arena limosa modificada con ceniza de cáscara de arroz y cal fueron construidos en el Camino a la Piedra Pintada, próximo a la Ciudad de Artigas. Previamente se hizo una selección y caracterización de los materiales granulares a ser utilizados y un estudio de laboratorio de diseño de las mezclas óptimas de suelo-ceniza-cal. El desempeño de los tramos experimentales fue evaluado mediante monitoreos periódicos de la condición estructural y funcional.</p>	
<p><b>Palabras Clave</b></p> <p>pavimentos; modificación de suelos; cenizas agroindustriales; desempeño de tramos experimentales</p>	

## RESUMEN

Una investigación con el objetivo de validar el desempeño de materiales de suelo modificado con cenizas de cáscara de arroz o de bagazo de caña de azúcar y cal como capas de pavimentos de bajo volumen de tránsito fue realizada en el Departamento de Artigas. Se trata de dar un uso a estas cenizas que son residuos de la producción de azúcar y etanol en la planta de ALUR S.A. en Bella Unión y del proceso de secado de arroz en los molinos de la Ciudad de Artigas, donde el bagazo de caña de azúcar y la cáscara de arroz son usados como combustible de calderas, con beneficios ambientales por sustitución de deposición de las cenizas en rellenos sanitarios. Un tramo experimental de pavimento a escala completa con capa de base de grava limosa modificada con ceniza de bagazo de caña de azúcar y cal fue construido en una calle de Bella Unión, mientras que dos tramos experimentales con capa de base de arena limosa modificada con ceniza de cáscara de arroz y cal fueron construidos en el Camino a la Piedra Pintada, próximo a la Ciudad de Artigas. Los materiales granulares utilizados en cada tramo experimental fueron seleccionados mediante investigación de sitio y ensayos de caracterización. Las cenizas utilizadas también fueron caracterizadas en laboratorio. El diseño de los tramos fue realizado determinando las mezclas óptimas de los materiales granulares con las cenizas y la cal mediante el Método de Thompson. El desempeño de los tramos experimentales fue evaluado mediante monitoreos periódicos de la condición estructural con medidas de deflexión con Viga Benkelman y de la condición funcional por observación. Se verificó que en condiciones de servicio y de campo se han desarrollado reacciones alcalinas entre las cenizas y la cal, con cementación de las capas de base de suelo modificado construidas y aumento de su rigidez. Con más de un año de servicio, los pavimentos experimentados han presentado un buen desempeño estructural y funcional, no observándose formación de fisuras ni ahuellamiento. Se concluye que los materiales de suelo modificado con cenizas de bagazo de caña de azúcar o de cáscara de arroz y cal son adecuados para capas de base de pavimentos de bajo volumen de tránsito como los experimentados con beneficios económicos y ambientales. El conocimiento de la vida útil de este tipo de pavimentos podrá ser alcanzado mediante la continuidad del seguimiento de los tramos experimentales.

## LISTA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABLAS .....	viii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN .....	1
1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO .....	4
1.3. ESTRUCTURA DEL INFORME .....	5
2. ANTECEDENTES .....	6
2.1. ESTABILIZACIÓN Y MODIFICACIÓN DE SUELOS .....	6
2.2. REACCIONES ALCALINAS .....	8
2.3. REACTIVIDAD DE LAS CENIZAS .....	10
2.4. SUELOS APROPIADOS PARA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS .....	13
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	18
3.1. INVESTIGACIÓN DE SITIO .....	19
3.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	21
3.2.1. Materiales Granulares .....	21
3.2.2. Cenizas .....	22
3.3. DISEÑO DE TRAMOS EXPERIMENTALES .....	23
3.3.1. Ensayos de Compactación .....	23
3.3.2. Diseño de Material Suelo-Ceniza-Cal .....	23
3.4. CONSTRUCCIÓN DE TRAMOS EXPERIMENTALES .....	25
3.4.1. Procedimiento .....	25
3.4.2. Control de Obra .....	25
3.5. DESEMPEÑO DE TRAMOS EXPERIMENTALES .....	26

3.5.1. Medidas de Deflexión .....	26
3.5.2. Ensayos de Penetración Dinámica de Cono .....	27
4. TRAMO EXPERIMENTAL CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE CALLE MELO - BELLA UNIÓN .....	28
4.1. INVESTIGACIÓN DE SITIO .....	29
4.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	30
4.2.1. Material de la Cantera Franquía .....	30
4.2.2. Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar .....	32
4.3. DISEÑO .....	33
4.3.1. Material Suelo-Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar-Cal .....	33
4.3.2. Parámetros de Compactación .....	35
4.3.3. Estructura de Pavimento .....	37
4.4. CONSTRUCCIÓN .....	38
4.5. DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO DEL TRAMO EXPERIMENTAL.....	41
4.5.1. Condición Funcional.....	41
4.5.2 Condición Estructural .....	45
5. TRAMOS EXPERIMENTALES CON CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ DE CAMINO A PIEDRA PINTADA – ARTIGAS .....	50
5.1. INVESTIGACIÓN DE SITIO .....	51
5.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	52
5.2.1 Material de la Cantera de Arenisca de Fm Tacuarembó .....	52
5.2.2 Ceniza de Cáscara de Arroz .....	54
5.3. DISEÑO .....	55
5.3.1. Material Suelo-Ceniza de Cáscara de Arroz-Cal .....	55
5.3.2. Parámetros de Compactación .....	57
5.3.3. Estructura de Pavimentos .....	59

5.3.3.1. Tramo Unicapa .....	60
5.3.3.2. Tramo con Capa de Recargo .....	60
5.4. CONSTRUCCIÓN DE TRAMOS EXPERIMENTALES .....	61
5.4.1. Tramo Unicapa .....	61
5.4.2. Tramo con Capa de Recargo .....	64
5.5. DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS .....	66
5.5.1. Condición Funcional .....	67
5.5.1.1. Tramo Unicapa .....	67
5.5.1.2. Tramo con Capa de Recargo .....	69
5.5.2. Condición Estructural .....	71
5.5.2.1. Tramo Unicapa .....	71
5.5.2.2. Tramo con Capa de Recargo .....	73
6. CONCLUSIONES .....	77
6.1. EXPERIENCIA CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN BELLA UNIÓN .....	78
6.2. EXPERIENCIA CON CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ EN ARTIGAS .	79
6.3. CONCLUSIONES GENERALES .....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Imagen de Sensores Remotos con Puntos de Observación- Artigas .....	20
Figura 3.2. Imagen de Sensores Remotos con Puntos de Observación- Bella Unión ...	21
Figura 4.1. Localización del Tramo Experimental de Pavimento de Bella Unión .....	28
Figura 4.2. Localización de la Planta de ALUR y la Cantera Franquía .....	29
Figura 4.3 Geología y Puntos de Observación de la Región de Bella Unión .....	30
Figura 4.4. Distribución Granulométrica del Material de la Cantera Franquía .....	31
Figura 4.5. Evolución de la Resistencia a la Compresión Inconfinada en Función del Contenido de CBCA para Cada Contenido de Cal .....	34
Figura 4.6. Relación PUS-Humedad Resultantes de los Ensayos Proctor Modificado del Suelo de Cantera Franquía y de Materiales de Suelo Modificado con CBCA y Cal ....	36
Figura 4.7. Pavimento del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	38
Figura 4.8. Etapas de Construcción del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	39
Figura 4.9. Condición al Final de Obra del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	40
Figura 4.10. Condición Funcional del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión Inmediatamente Después de su Construcción .....	42
Figura 4.11. Condición Funcional del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión en los Monitoreos Posteriores a su Construcción .....	43
Figura 4.12. Condición Funcional Comparativa del Tramo Experimental de la Calle Melo y el Pavimento de la Calle San José .....	44
Figura 4.13. Localización de Puntos Fijos del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	45
Figura 4.14. Variación en el Tiempo de las Deflexiones del Pavimento del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	47

Figura 4.15. Penetración DCP en los Puntos Fijos del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión en Cada Monitoreo .....	48
Figura 5.1. Localización de los Tramos Experimentales de Pavimento con Capa de Base de Material Granular Modificado con CCA y Cal, de la Cantera de Arenisca y del Vertedero de Cenizas de Demelfor .....	50
Figura 5.2. Tramos Experimentales del Camino a la Piedra Pintada de Artigas .....	51
Figura 5.3. Geología y Puntos de Observación de la Zona de Artigas .....	52
Figura 5.4. Distribución Granulométrica del Suelo de la Cantera de Arenisca de la Fm Tacuarembó .....	53
Figura 5.5. Evolución de la Resistencia a la Compresión Inconfinada en Función del Contenido de CCA para Cada Contenido de Cal .....	56
Figura 5.6. Relación PUS-Humedad Resultantes de los Ensayos Proctor Modificado del Suelo de la Cantera de Arenisca y del Suelo Modificado con 20% de CCA y 5% de Cal .....	58
Figura 5.7. Pavimento del Camino a la Piedra Pintada Original en el Sitio de Implantación de los Tramos Experimentales .....	59
Figura 5.8. Pavimento del Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada .....	60
Figura 5.9. Pavimento del Tramo Experimental con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada .....	61
Figura 5.10. Etapas de Construcción del Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada .....	62
Figura 5.11. Condición del Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada al Finalizar la Obra de Construcción .....	63
Figura 5.12. Etapas de Construcción del Tramo Experimental con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada .....	64
Figura 5.13. Condición del Tramo Experimental con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada al Finalizar la Obra de Construcción .....	65



Figura 5.14. Condición Funcional del Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada Inmediatamente Después y a 104 Días de su Construcción .....	67
Figura 5.15. Marcas Dejadas por el Neumático del Camión en la Superficie del Pavimento en Condiciones Húmedas .....	68
Figura 5.16. Condición Funcional del Tramo Experimental con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada a 0 día y 104 Días de su Construcción .....	70
Figura 5.17. Deformación Comparativa del Pavimento Experimental y el Pavimento Tradicional .....	70
Figura 5.18. Localización de Puntos Fijos del Tramo Unicapa del Camino a la Piedra Pintada .....	71
Figura 5.19. Variación en el Tiempo de las Deflexiones del Pavimento del Tramo Unicapa del Camino a la Piedra Pintada .....	72
Figura 5.20. Localización de Puntos Fijos del Tramo con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada .....	74
Figura 5.21. Variación en el Tiempo de las Deflexiones del Pavimento del Tramo con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada .....	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Combinaciones de mezclas de suelo con ceniza y cal consideradas para el diseño de materiales suelo-ceniza-cal .....	24
Tabla 4.1. Propiedades Físicas del Material de la Cantera Franquía .....	31
Tabla 4.2. Pérdidas de Orgánico por Ignición de la CBCA de ALUR .....	32
Tabla 4.3. Resistencia a la Compresión Inconfinada de las Probetas de Suelo y Suelo Modificado con CBCA y Cal con 28 días .....	33
Tabla 4.4. Parámetros Óptimos de Compactación del Material de Suelo Modificado con CBCA y Cal Diseñado para el Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	37
Tabla 4.5. Resultado de Ensayos de Densidad in Situ por el Método del Cono de Arena Realizados en el Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	40
Tabla 4.6. Monitoreos del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	41
Tabla 4.7. Lecturas de Deflexión con Viga Benkelman en los Puntos Fijos del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	46
Tabla 4.8. Espesor e Índices de Penetración DCP de la Capa de Suelo Modificado con 15% de CBCA y 5% de Cal del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	49
Tabla 5.1. Propiedades Físicas del Suelo de la Cantera de Arenisca de Fm Tacuarembó .....	53
Tabla 5.2. Pérdidas de Orgánico por Ignición de la CCA de Demelfor .....	54
Tabla 5.3. Resistencia a la Compresión Inconfinada de las Probetas de Suelo y Suelo Modificado con CCA y Cal con 28 días .....	55
Tabla 5.4. Parámetros Óptimos de Compactación del Material de Suelo Modificado con CCA y Cal Diseñado para los Tramos Experimentales del Camino a la Piedra Pintada .....	59

Tabla 5.5. Resultados de los Ensayos de Densidad in Situ por el Método del Cono de Arena Realizados en el Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada	63
Tabla 5.6. Resultados de los Ensayos de Densidad in Situ por el Método del Cono de Arena Realizados en el Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión .....	66
Tabla 5.7. Monitoreos de los Tramos Experimentales del Camino a la Piedra Pintada.	66
Tabla 5.8. Lecturas de Deflexión con Viga Benkelman en los Puntos Fijos del Tramo Unicapa del Camino a la Piedra Pintada .....	72
Tabla 5.9. Lecturas de Deflexión con Viga Benkelman en los Puntos Fijos del Tramo con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada .....	74



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. RELEVANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La producción de arroz ha evolucionado en Uruguay en las últimas décadas, pasando de 391.188 ton en la zafra 1987/88 a 1:657.500 ton en la zafra 2010/11 (ACA, 2012). Considerando que de cada 4 ton de arroz producidas, 1 ton es cáscara de arroz (Hadji Ali et al. 1992), puede estimarse que en Uruguay se habrían acumulado 5:824.000 ton de cáscara de arroz entre 1988 y 2011, correspondiendo 414.000 ton sólo a la zafra 2011. La cáscara de arroz es usada como combustible de calderas para el secado del arroz o de fabricación de cemento Portland y en turbinas termoeléctricas. Durante la quema son volatilizados el orgánico y el agua de constitución resultando la ceniza como material residual. La ceniza es aproximadamente un 20% en peso de la cáscara de arroz (Juliano, 1985), por lo que de haberse quemado todo el volumen disponible se habrían acumulado en Uruguay 1:164.800 ton de CCA entre 1988 y 2011; 82.800 ton tan sólo en la zafra 2011.

El impulso de la industria sucro-alcoholera uruguaya, con la creación de ALUR S.A. en 2006, ha aumentado la producción de caña de azúcar en la región de Bella Unión; estimándose que ésta alcanzó las 440.000 ton anuales en la zafra 2011/12. El bagazo de la caña de azúcar es utilizado en la planta de ALUR como combustible de las calderas para la producción de azúcar, biocombustibles y energía eléctrica. De la quema resulta como residuo la CBCA. Una vez que cerca del 25% de la masa de caña de azúcar es bagazo (Silva, 2010) y que la CBCA es un 20% en peso del bagazo, puede afirmarse que se estarían generando 22.000 ton anuales de CBCA.

La deposición final de estas cenizas es un problema ambiental, social y económico. La deposición se está haciendo en terrenos sin los recaudos para evitar la voladura de las cenizas, poluyendo el medio ambiente y limitando el uso productivo de estos terrenos. La polución ambiental afecta negativamente la salud de la población, toda vez que la aspiración permanente del polvo de ceniza produce enfermedades como la silicosis. Las empresas arroceras y sucro-alcoholeras asumen costos pasivos de la renta o adquisición de los terrenos para la deposición y de transporte de las cenizas desde las plantas hasta los depósitos, los que son trasladados a los precios de los

productos, afectando su competitividad. La problemática generó el interés de la Intendencia Departamental de Artigas (IDA) de encontrar alternativas de uso de las cenizas agroindustriales; vinculándose con el Laboratorio de Geotécnica de Pavimentos (LGP) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) en junio de 2010, a través del Director de Infraestructura Vial Lidio Paniagua.

Las cenizas son puzolanas, es decir materiales silicosos y/o aluminosos que por sí solos poseen poca o ninguna capacidad de cementación, pero finamente molidos y en presencia de agua reaccionan químicamente con hidróxidos alcalinos y alcalinos terrosos a temperatura ambiente para formar o contribuir a la formación de compuestos cementantes. Esta propiedad de las cenizas es conocida desde los orígenes de la civilización humana. Los romanos utilizaban hace 2000 años en la construcción un cemento producido por mezcla de ceniza volcánica de la localidad de Puzzuoli y cal.

En el Siglo XX se comenzaron a utilizar en Europa y Estados Unidos cenizas volantes y cenizas pesadas resultantes de la quema de carbón y otros combustibles en plantas industriales y termoeléctricas, en especial como sustituto de cemento Portland en hormigones y para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos (modificación y estabilización de suelos). En Brasil, el primer registro remonta a 1964, cuando fue incorporada ceniza volante al hormigón en la construcción de la hidroeléctrica de Jupia. Las investigaciones sobre el uso de cenizas volantes en pavimentación se iniciaron en Brasil en 1969 (Marcon, 1977). Ceratti (1979) estabilizó un suelo residual de Rio Grande do Sul con ceniza y cal.

En la década de los años cincuenta del siglo pasado Korisa (1958) señaló que las CCA tratadas actúan como agregados inertes y competentes cuando son empleadas en bloques de cemento de alta calidad. A mediados de los años 70, Metha (1975) patentó un proceso para fabricar cementos en base a CCA. Los procesos químicos involucrados en las reacciones entre la CCA y el cemento fueron estudiados por James y Rao (1986). Boateng y Skeete (1990) estudiaron el uso de CCA como sustituto de cemento Portland en Guyana.

Varias investigaciones realizadas en países de alta producción de arroz han mostrado que la CCA es un material muy barato que mejora las propiedades de suelos bien cuando se lo incorpora de forma aislada, como cuando es mezclado con cal o

cemento (Lazaro y Moh, 1970; Hadji Ali et al. , 1992; Rahman, 1986; Muntohar y Hantoro, 2000; Basha et al. , 2003; Basha et al., 2005).

En Uruguay, Rodríguez (2000) estudió el uso de CCA de ARROZUR, Villa Sara, como sustituto de cemento Portland para hormigones de alto desempeño y convencionales más livianos y económicos. Behak (2007a, 2007b, 2008, 2009) investigó la potencialidad de estabilizar un suelo sedimentario arenoso con cal y CCA de la quema de cáscara de arroz a temperatura no controlada en las calderas de ARROZUR y de CCA de incineración a temperaturas controladas en una mufla de laboratorio, concluyendo que el material producido es más resistente, durable y menos deformable que el suelo sin tratar, siendo una alternativa técnicamente viable y ambientalmente correcta para pavimentación de caminos de bajo volumen de tránsito.

La CBCA, ha sido utilizada particularmente en Brasil como sustituto de cemento Portland o arena en la construcción civil (Zardo et al., 2004; Cordeiro, 2006; Ganesan et al., 2007; Cordeiro et al., 2009a; Lima et al., 2009; Sales y Lima, 2010; Silva, 2010). De Paula et al. (2008) evaluaron el potencial de utilización de CBCA, obtenida mediante quema de bagazo de la central Jaticoba, Minas Gerais, en mufla por 3 h a temperatura controlada de 700°C, como aditivo mineral en la producción de pastas y morteros de cemento Portland. Valenciano y Freire (2004) analizaron algunas características físicas y mecánicas de mezclas de un suelo arcilloso de Campinas y una arena del Municipio de Sumaré con cemento y CBCA de la central Furlan, San Pablo, para evaluar su posible utilización como material alternativo de construcción.

Sin embargo, no hay registros de experiencias de utilización a escala real de materiales producidos por estabilización o modificación de suelos con CCA o CBCA como capas de pavimentos, siendo un aspecto de interés más para abordar una investigación con tal objeto.

## 1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO

El Proyecto FMV\_2\_2011\_1\_6706 Uso de Residuos Agroindustriales para Materiales Alternativos de Pavimentos fue realizado por el LGP del Departamento de Ingeniería Geotécnica de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR entre marzo de 2013 y mayo de 2015 con el objetivo de evaluar el desempeño de materiales de suelo modificado con CCA o CBCA y cal como capas de pavimentos de bajo volumen de tránsito, dando una solución alternativa a la deposición de estas cenizas con beneficios ambientales, sociales y económicos. Para tal fin fueron construidos y monitoreados:

- Un tramo experimental de pavimento a escala completa de 95 m de longitud con base de 15 cm de espesor de material granular modificado con CBCA y cal en la calle Melo de Bella Unión, construida sobre el suelo de la subrasante.
- Dos tramos experimentales de pavimento a escala completa con base de 15 cm de espesor de material granular modificado con CCA y cal en el Camino a la Piedra Pintada, próximo a la ciudad de Artigas:
  - Un tramo de 80 m de longitud con capa de base de material modificado construido sobre el pavimento existente, constituido por una capa de base de material granular y el suelo de la subrasante (llamado Tramo de Recargo).
  - Un tramo de 80 m de longitud con capa de base reconstruida con el material de la base existente mezclado con CCA y cal, sobre el suelo de la subrasante (llamado Tramo Unicapa).

El Proyecto fue realizado bajo la responsabilidad científica del Dr. Leonardo Behak, participando los investigadores Dr. Marcos Musso, MSc. Gustavo Piñeiro, Bach. Federica Selves y Bach. Bruno Telechea, así como el técnico de laboratorio Juan Álvez. Además participaron parcialmente en calidad de investigadores la Bach. Valeria Rey y Bach. Verónica Aguilar.

La experiencia fue financiada por el Fondo María Viñas de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y contó con el interés y apoyo logístico de la Dirección de Infraestructura Vial de la IDA.



### 1.3. ESTRUCTURA DEL INFORME

Este informe técnico describe los trabajos desarrollados en el Proyecto FMV\_2\_2011\_1\_6706 así como los resultados y conclusiones obtenidos. El marco conceptual y los antecedentes son presentados en el Capítulo 2. En el Capítulo 3 se presenta la estrategia y la metodología del Proyecto. El desarrollo de la experiencia realizado en Bella Unión con la CBCA y en Artigas con la CCA, sus resultados y conclusiones son presentados en los Capítulos 4 y 5 respectivamente. Las principales conclusiones son sintetizadas en el Capítulo 6.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. ESTABILIZACIÓN Y MODIFICACIÓN DE SUELOS

El suelo natural es el material más ampliamente utilizado en obras de pavimentación, constituyendo la subrasante y siendo los más frecuentemente usados para la construcción de las capas de base y subbase. Aunque no siempre satisfacen las exigencias impuestas por las cargas de tránsito y las condiciones ambientales para su utilización, es posible alterar sus propiedades, creando un nuevo material que atienda las necesidades del proyecto. A esta alternativa se le llama estabilización de suelos. 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, el cemento Portland y las cenizas son los estabilizadores más ampliamente usados.

Estrictamente hablando, existen esencialmente dos formas de mejorar las propiedades de suelos tratados con aditivos: modificación o estabilización (Little, 1999). 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), 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) 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. A su vez, Seddom y Bhindi (1983) establecen como frontera entre las fases estabilizadas y modificadas de las mezclas suelo-cal una resistencia a la tracción por compresión diametral (RT) de 120 kPa.

Otro criterio para clasificar un suelo en modificado o estabilizado es según su desempeño fundamental bajo cargas de tránsito (Jameson, 2013). La *National Association of Australian State Road Authorities* (NAASRA) definió en la *Guide to Stabilization on Roadworks* de 1970 como modificación aquella en la cual una pequeña cantidad de aditivo (entre 0,5% y 3% en peso de suelo) resulta en un pavimento que puede ser considerado que se comporta como un pavimento “flexible normal”. Mientras tanto, la estabilización produce un material con una significativa resistencia a la tracción una vez compactado y curado.

En la Austroads *Guide to Stabilization on Roadworks* de 1988 las dos categorías de materiales tratados con cemento fueron revisadas (Jameson, 2013). Los materiales modificados son caracterizados como comportándose de modo similar a un material granular para el diseño de pavimentos, mientras que los materiales estabilizados tienen la rigidez y la resistencia a la tracción lo suficientemente mejorada como para tener una aplicación práctica en la rigidización del pavimento.

Los criterios para definir un material como modificado o estabilizado para capa estructural de pavimento varían de agencia en agencia (Little, 1999). Thompson (1970), apud Little (1999), definió como admisible para base estructural mezclas suelo-cal con una resistencia a la compresión inconfínada (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.

La *Guide to Stabilization on Roadworks* (1970) de la NAASRA utilizó criterios de valores de CBR y RCI solo para materiales estabilizados para base de pavimentos (Jameson, 2013). La *Guide to Stabilization on Roadworks* (1986) de la NAASRA señala que no existe criterio definido para delimitar entre material modificado y estabilizado aunque límites arbitrarios de 80 kPa de RT y 800 kPa de RCI después de 7 días de cura húmeda fueron sugeridos (Jameson, 2013).

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). 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.

Jameson (2013) señala que un material modificado podría tener como máximo una RT de 150 kPa y un máximo de 1,0-1,2 MPa de RCI, recomendando que un material modificado con cal sea definido como aquél que tenga una RCI indicativa entre 0,7 MPa y 1 MPa a los 28 días para el Peso Unitario Seco Máximo (PUSM).

## 2.2. REACCIONES ALCALINAS

Se entiende por reacciones alcalinas a las reacciones químicas que se desarrollan entre la sílice y la alúmina y el hidróxido de calcio, en presencia de agua. El hidróxido de calcio es proporcionado por la cal. 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).

Las reacciones alcalinas 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. 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).

Los minerales arcillosos tienen cationes ligados eléctricamente para balancear la deficiencia de cargas en su superficie, entre las capas y dentro de los intersticios del retículo cristalino. Estos cationes pueden ser intercambiados por otros en la solución acuosa sin generar modificaciones en la estructura cristalina. A este fenómeno se lo conoce como intercambio catiónico y es una propiedad muy importante de los minerales arcillosos debido a su efecto en sus propiedades físico-químicas. Grim (1962) afirmó que, considerando concentraciones iguales, el orden de preferencia de adsorción de cationes comúnmente presentes en los suelos está dada por la serie: Sodio ( $\text{Na}^+$ ) < Potasio ( $\text{K}^+$ ) < Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) < Magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ). El orden de sustitución es de derecha a izquierda. Como la cal es una fuente de calcio libre, su adición en cantidad suficiente

crea una concentración de  $\text{Ca}^{++}$  libre que sustituye cationes adsorbidos en la superficie coloidal.

La floculación y la adsorción producen un cambio aparente en la textura. Herzog y Mitchell (1963) afirmaron que este fenómeno es causado por el aumento de la concentración electrolítica de agua intersticial y la adsorción de calcio en la superficie de la arcilla.

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). 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). 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). 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).

Le Roux (1969), citado por Chauvel y Nóbrega (1980), propone que la compactación sea hecha inmediatamente después de la mezcla del suelo y la cal, para evitar la carbonatación. La compactación tiene el objetivo de reducir la porosidad del material, disminuyendo la circulación interna de aire.

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) y el método de Thompson (1966). 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). 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.

Las cenizas son materiales compuestos en alta proporción por sílice por lo que combinadas con cal desarrollan reacciones alcalinas, que para el caso son solo puzolánicas (lentas o dependientes del tiempo), ya que las reacciones rápidas sólo son posibles por las propiedades de los minerales arcillosos. La química de las reacciones puzolánicas de la sílice amorfa de la CCA con la cal forma silicatos hidratados de calcio (CSH) (Boateng y Skeete, 1990), mientras que James y Rao (1986) afirman que los silicatos formados son del tipo CSHI y CSHII. Hadji Ali et al. (1992) observaron CSH y CASH en mezclas con 7, 28 y 90 días de un suelo residual granítico con CCA producida por incineración a cielo abierto y cal. Productos cementantes, como antigorita, albita y analista han sido observados en mezclas de suelos arenosos con diferentes contenidos y tipos de CCA y distintos contenidos de cal o cemento con 7 días y 28 días de cura (Basha et al., 2005; Behak, 2007).

La temperatura de cura influye en las reacciones puzolánicas y, consecuentemente, en la velocidad de ganancia de resistencia (Bhattacharja et al., 2003). 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. La posible disminución de resistencia máxima puede deberse a la alteración de productos de reacción y su forma.

### 2.3. REACTIVIDAD DE LAS CENIZAS

La reactividad de las cenizas, o sea su potencialidad para reaccionar con el hidróxido de calcio, depende significativamente del proceso de quema. Houston (1972) propuso una clasificación para la CCA, según las condiciones de quema: ceniza con alto

contenido de carbón (negra), ceniza de bajo contenido de carbón (gris), ceniza libre de carbón (rosada o blanca). Los colores son asociados con el grado de evolución del proceso de combustión y con las transformaciones estructurales de la sílice en la ceniza (Boateng y Skeete, 1990). Colores oscuros indican alto contenido de orgánico, lo que es característico de combustión incompleta (Cordeiro et al., 2008). Temperaturas muy elevadas y largos períodos de incineración producen ceniza rosada representativa de sílice cristalina (cristobalita y tridimita).

La reactividad de la ceniza depende de la temperatura y tiempo de incineración, tiempo de enfriamiento y condiciones de molienda (James y Rao, 1986). La sílice en la ceniza sufre transformaciones estructurales bajo condiciones de temperatura variable que afectan la reactividad de las cenizas, ya que cuanto mayor sea la superficie específica de la sílice, mayor será el alcance de las reacciones químicas con la cal (Boateng y Skeete, 1990). El difractograma de rayos-x es una herramienta usual en la determinación cualitativa del grado de cristalinidad de la sílice en la ceniza (Boateng y Skeete, 1990).

El tipo de ceniza apropiada para las reacciones puzolánicas es la amorfa, antes que la cristalina (Boateng y Skeete, 1990). La tecnología de producción de ceniza varía desde quema a cielo abierto hasta incineradores especialmente proyectados (Metha, 1979). Debido a los altos gradientes de temperatura y la formación resultante de estructuras silíceas altamente cristalinas, la incineración a cielo abierto es asociada a las puzolanas de baja reactividad (Boateng y Skeete, 1990).

Según Metha (1975), la cáscara de arroz quemada a cielo abierto o en hornos convencionales produce ceniza cristalina. Cuando se incinera en hornos a temperatura controlada, el residuo es una ceniza blanca altamente reactiva que mezclada con cal se transforma en un cemento estructuralmente tan bueno como el cemento Portland.

Según Boateng y Skeete (1990), la incineración de cáscara de arroz en un rango de temperatura entre 550°C y 700°C produce CCA con sílice amorfa, mientras que Behak (2007) obtuvo CCA amorfa para temperaturas entre 500°C y 800°C después de 4 h de quema de cáscara de arroz de ARROZUR, Villa Sara. Temperaturas superiores a 900°C producen formas cristalinas no deseables (Boateng y Skeete, 1990; Behak, 2007).

Con todo, Smith y Kamwanja (1986) observaron formación de sílice cristalina en pequeñas proporciones para temperaturas inferiores a 800°C mantenidas durante 12 h.

Estructuras cristalinas fueron determinadas mediante difractogramas de rayos X por Sales y Lima (2010) en cuatro CBCA de quema no controlada. Mientras tanto, Ganesan et al. (2007) cuando una CBCA residual fue nuevamente incinerada en laboratorio a temperatura controlada de 650°C, presentó en los difractogramas de rayos-X una estructura amorfa con pequeñas cantidades de fase cristalina de cuarzo y cristobalita. Similar resultado fue obtenido por Cordeiro et al. (2009b) para una CBCA quemada a temperatura controlada de 600°C.

La CBCA producida por quema en mufla por 3 h a 700°C por De Paula et al. (2008) mostró una fase amorfa y una fase cristalina, igualmente que la producida por Teixeira (2010) en dos etapas de incineración, primero de 20 min a 400°C y luego durante 1 h a 800°C. La quema a temperatura de 1000°C durante 4 h promovió la formación de sílice cristalino en forma de cuarzo, dando como resultado una CBCA con baja reactividad puzolánica (Zardo et al., 2004).

La materia orgánica afecta el proceso de estabilización al retardar las reacciones alcalinas y producir pequeñas ganancias de resistencia. Esto es debido a la avidez del orgánico por el agua y por los iones calcio, interfiriendo así en las reacciones entre los iones calcio y los minerales arcillosos del suelo (Petry y Glazier, 2005). En general, la cáscara de arroz y el bagazo de caña de azúcar son usados como combustible de calderas y rara vez el proceso de quema tiene un control sobre la temperatura y tiempo de combustión y del tipo de enfriamiento, dando lugar a cenizas con variable contenido de orgánico y, por tanto, de baja a media reactividad.

Behak (2007) observó que la CCA resultante de la quema no controlada de cáscara de arroz en las calderas de secado de ARROZUR en Villa Sara es de color negro, clasificándose como ceniza con alto contenido de carbón (Houston, 1972). Los resultados de los ensayos de pérdida por ignición comprobaron que el contenido en peso de orgánico en ésta CCA es del 18%. Cuando la CCA residual fue quemada en mufla a temperaturas controladas de 500°C, 650°C, 800°C y 900°C durante 4 h, se observó un remanente de orgánico de 7,8%, 4,1%, 2,3% y 0,3% respectivamente. Rahman (1986),



quemando cáscara de arroz colectada en Nigeria, en un horno a temperatura controlada de 800°C determinó en la CCA un remanente de orgánico menor de 3%.

Una CBCA de quema sin control de temperatura en una central azucarera de la India era de color negro debido a un contenido de 11% de orgánico (Ganesan et al., 2007). Cuando esta ceniza fue nuevamente incinerada a una temperatura controlada de 650°C por 1 h, el contenido de orgánico cayó al 5%. Sales y Lima (2010) determinaron en tres CBCA colectadas en centrales sucro-alcoholeras de San Carlos, Brasil, un contenido muy bajo de orgánico de entre 0,35% y 1%. Una cuarta CBCA presentó un mayor contenido de orgánico de 16% probablemente debido al sistema de colección de la ceniza, el cual mezcla cenizas pesadas de la caldera con cenizas volantes de las chimeneas.

Un 5% de carbono fue determinado por De Paula et al. (2008) en una CBCA producida por quema en una mufla por 3 h a 700°C. Más recientemente, Teixeira (2010) sometió bagazo a incineración con una tasa de 10°C/min, hasta alcanzar un escalón de 400°C, permaneciendo en esa temperatura por 20 min. Después de esa etapa, usando la misma tasa de incremento de temperatura, la ceniza fue calcinada a 800°C por 1 h. La composición química de la CBCA, después de este proceso, tenía un contenido de carbono en torno al 4%.

#### 2.4. SUELOS APROPIADOS PARA ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS

Los suelos arenosos o limo arenoso con poca arcilla no reaccionan satisfactoriamente a la cal porque el contenido de sílice y alúmina amorfa es poco o nulo. Para estabilizarlos, una alternativa es adicionarle sílice, la que reaccionará con los iones calcio de la cal, generando productos cementantes que cohesionarán los granos de los materiales granulares.

Las cenizas son fuente de sílice y, dentro de ellas la CCA es una de las que tienen más alto contenido de este mineral, estando entre el 90% y el 96% (Juliano, 1985; Korisa, 1958; Lazaro y Moh, 1970; Hadji Ali et al., 1992; Rodríguez, 2002; Basha et al., 2003).

La CBCA presenta normalmente un contenido de sílice superior al 60% en masa (Ganesan et al., 2007; Cordeiro et al., 2009b) pero menor que en la CCA. Sin embargo, Sales y Lima (2010) determinaron en tres CBCA colectadas en centrales alcoholazucareras de San Carlos, Brasil un contenido de sílice superior al 88%, aunque esto probablemente se haya debido al sistema de colección que mezclaba cenizas pesadas de la caldera con cenizas volantes de las chimeneas. Un contenido de 84% de sílice fue determinado por De Paula et al. (2008) en una CBCA producida por quema en mufla por 3 h a 700°C. Mientras que Teixeira (2010) cuando sometió a incineración bagazo con una tasa de 10°C/min, hasta alcanzar un escalón de 400°C, permaneciendo en esa temperatura por 20 min y, después de esa etapa, usando la misma tasa de incremento de temperatura, la ceniza fue calcinada a 800°C por 1 h, determinó que la composición química de la CBCA tenía cerca de un 80% de sílice.

Aumentos rápidos de RCI han sido observados al estabilizar arenas bien graduadas con limo y arenas limosas con CCA de horno sin control de temperatura o quema a cielo abierto (Hadji Ali et al., 1992; Behak, 2007). La ganancia es mayor con el aumento del contenido de CCA y cal hasta alcanzar un máximo, más allá del cual incrementos de CCA producen caída de RCI. La RCI aumenta con el tiempo, con mayores tasas de incremento en edades tempranas y una disminución posterior. El desarrollo de RCI con el tiempo de cura ofrece un factor de seguridad considerable para pavimentos dimensionados a partir de la resistencia a los 7, 28 ó 56 días (Hadji Ali et al., 1992).

Aumentos de RCI también fueron verificados cuando arenas limosas fueron estabilizadas con cemento y CCA de quema a cielo abierto o en incinerador (Hadji Ali et al., 1992; Basha et al., 2005). La investigación de Basha et al. (2005) mostró que la RCI de mezclas suelo-cemento puede ser aumentada adicionando entre 15 y 20% de CCA. Así, mientras la RCI de la mezcla suelo-4% cemento fue de 0,2 MPa, la RCI de la mezcla suelo-15% CCA-4% cemento fue de 0,95 MPa y la de la mezcla suelo-20% CCA-4% cemento fue de 1,1 MPa. La RCI del suelo residual estabilizado con 4% de cemento y 20% de CCA fue 4 veces mayor que la muestra con 8% de cemento y 20% de CCA. Los autores concluyeron que un tenor menor de cemento es necesario para alcanzar una RCI dada en comparación con el suelo estabilizado con cemento. Siendo el cemento más caro que la CCA, cuanto menor la cantidad de cemento necesaria para

alcanzar una resistencia dada, serán menores los costos de construcción. Sin embargo, Hadji Ali et al. (1992) observaron que la cal propicia mayores ganancias de RCI que el cemento en mezclas de suelo con CCA. Para 28 días de cura, la RCI de una mezcla de suelo con 12% de CCA y 3% de cal fue 40% superior a la mezcla de suelo más 12% de CCA y 3% de cemento. Para alcanzar una RCI de 1,1 MPa a los 28 días de cura, fue necesario agregar 6% de cemento y 3% de cal.

El aumento de la temperatura de cura resulta en una ganancia de RCI del suelo tratado con CCA y cal (Hadji Ali et al., 1992). Probetas de arena arcillosa estabilizada con diferentes tenores de CCA y cal fueron curadas húmedas por los investigadores en un horno durante 28 días, donde fue mantenida una circulación de aire forzada a 60°C. En tales condiciones de cura, las máximas RCI correspondieron a un 6% de CCA, para ambos tenores de cal analizados, siendo de 2,1 MPa para el material suelo-6%CCA-6%Cal y de 2,6 MPa para el suelo-6%CCA-9%Cal. Para una temperatura de cura de 30°C los valores de RCI fueron de 1,2 MPa y 1,5 MPa respectivamente.

Muntohar y Hantoro (2000) observaron aumentos de RCI al tratar con CCA y cal un suelo limo arcilloso, con un 91% de fracción pasante por el tamiz #200 (81% de limo y 10% de arcilla), límite líquido de 74% e índice plástico de 41%; cuando fue estabilizado con CCA y cal. Sin embargo, la RCI del suelo aumentó de 500 kPa a 1300 kPa cuando se adicionó 10% de cal solo, no alterándose prácticamente cuando además se añadió 7,5% de CCA. La variación de RCI se debe a las reacciones alcalinas entre la cal y la sílice de los minerales arcillosos de suelo antes que con la sílice de la ceniza.

Rahman (1986) estabilizó con CCA, cal y cemento, un suelo laterítico A-7-6, con una RCI de 211 kPa a ser utilizados como capas de subbase. Las mezclas suelo-CCA presentaron pequeñas ganancias de RCI con 1 día de cura, hasta alcanzar un valor máximo de 416 kPa para un 20% de CCA, más allá del cual la RCI decreció. El pequeño aumento de RCI de las mezclas suelo-CCA obtenido por Rahman (1986), en comparación con las mezclas suelo-cal y suelo-cemento, confirmaría el bajo efecto puzolánico de la CCA y se debería a la influencia del ángulo de rozamiento interno (Muntohar y Hantoro, 2000). La CCA no es apropiada como estabilizante por sí sola (Basha et al., 2005)

Aunque sea usado de forma extensiva, el CBR no es apropiado para caracterizar la resistencia de suelos estabilizados (Thompson, 1975). Los valores de CBR para mezclas curadas pueden ser superiores al 100%. En esos casos es notorio que el resultado del ensayo es de escaso significado práctico. Si las reacciones puzolánicas no hubieran ocurrido, como en el caso de muestras no curadas, el CBR puede servir como indicativo general de resistencia.

Los suelos poseen una muy baja a nula resistencia a la tracción. En los procesos de estabilización el aumento de la resistencia a la tracción es un indicativo de desarrollo de las reacciones alcalinas. Behak (2007) observó el desarrollo de resistencia a la tracción por compresión diametral (RT) cuando estabilizó el suelo arenoso de la cantera Pérez Bustos, Ciudad del Plata, con diferentes contenidos de CCA de horno sin control de temperatura y tiempo de ARROZUR, Villa Sara y cal. La máxima RT fue de 95 kPa para el material de suelo con 20% de CCA y 10% de cal, con 56 días de cura. Para todas las mezclas el aumento de RT fue inicialmente rápido, disminuyendo la tasa de crecimiento con el tiempo.

Valenciano y Freire (2004) verificaron que la incorporación de 3% de cemento o su sustitución parcial por 20% de CBCA de la central Furlan de San Pablo en mezclas de suelo-cemento-ceniza aumentó la RCI a 60 días de un suelo arcilloso y un suelo arenoso.

Sales y Lima (2010) observaron ganancia de resistencia a la compresión en especímenes de morteros con CBCA respecto a morteros tradicionales y con el tiempo de cura. El aumento de resistencia se observó con el aumento de CBCA hasta un 20%-30%, con una pérdida de resistencia para contenidos mayores. Ensayando a la compresión inconfiada morteros de cemento mezclado con CBCA incinerada a temperatura controlada de 650°C, Ganesan et al. (2007) observaron una ganancia de RCI con el aumento de CBCA hasta un 10%, disminuyendo luego hasta alcanzar un valor similar a la mezcla de control para un 20% y menor para 25% y 30%. El incremento de RCI se debería parcialmente a las reacciones puzolánicas y a la alta superficie específica de la CBCA. Similar conclusión realizaron De Paula et al. (2008) en función de los resultados de ensayos de RCI de morteros con CBCA de la quema en mufla durante 3 h a temperatura controlada de 700°C. Para estos autores la RCI a los 7

días fue inversamente proporcional al tenor de ceniza adicionada, siendo mayor y casi igual a los 28 días. Este emparejamiento a los 28 días indicaría que las reacciones puzolánicas tendrían inicio entre los 7 y 15 días, cuando la hidratación del cemento ya presenta un estado avanzado.

Ganesan et al. (2007) también observaron incrementos de RCI en probetas de hormigón mezcladas hasta con 10% de CBCA con 7, 14, 28 y 90 días. Para 20% de CBCA la RCI de los hormigones tendieron a un valor equivalente al de la probeta de control. Comparando las probetas con 20% de CBCA con las de control, la RCI fue un 24,5% mayor a los 7 días de cura, disminuyendo el incremento relativo a los 14, 28 y 90 días. Esto confirmaría que el hormigón con CBCA hasta 20% desarrolla RCI temprana en comparación con el hormigón de control.

Ganesan et al. (2007) ensayaron a resistencia a la tracción por compresión diametral probetas de hormigón con 28 días, observando un aumento de RT con el aumento de CBCA hasta un 20% y una disminución para 25% y 30%.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para estudiar el desempeño de materiales de suelo modificado con CCA o CBCA y cal como capas de pavimentos de bajo volumen de tránsito, brindando una solución alternativa a la deposición de estas cenizas con beneficios ambientales, sociales y económicos, en el proyecto se propuso la construcción de tramos experimentales de pavimento a escala completa en el Departamento de Artigas que se explicitan a continuación.

- Una experiencia con uso de CBCA en las proximidades de la Planta de ALUR S.A. en Bella Unión, que en acuerdo con la Dirección de Infraestructura de la IDA se realizó en una calle de un barrio de esta ciudad como parte de las obras de saneamiento y rehabilitación de calles.
- Una experiencia con uso de CCA del molino de secado de arroz de la empresa Demelfor en la Ciudad de Artigas, que en acuerdo con la Dirección de Infraestructura de la IDA se realizó en el Camino a la Piedra Pintada.

El Proyecto se desarrolló en 5 etapas:

- 1) Investigación de los sitios de desarrollo de las experiencias
- 2) Caracterización de materiales granulares identificados en la investigación de sitio y cenizas.
- 3) Diseño de los tramos experimentales.
- 4) Construcción de los tramos experimentales.
- 5) Seguimiento de desempeño de los tramos experimentales.

La metodología y métodos generales aplicados en cada una de las etapas definidas son presentados en lo que sigue de este Capítulo.

### 3.1. INVESTIGACIÓN DE SITIO

Con el objetivo de identificar materiales granulares más adecuados a la experiencia y sitios de su explotación se realizaron investigaciones de sitio en las regiones de Artigas y Bella Unión.

La geología del Departamento de Artigas esta compuesta por rocas y sedimentos del Jurásico al presente. La mayor parte del área es cubierta por coladas de basaltos de la Fm. Arapey. En la zona de la ciudad de Artigas y al este de la misma, afloran las areniscas de la Fm. Tacuarembó de edad jurásica. En la zona oeste, hacia las márgenes del río Uruguay, existen cuencas de edad cenozoica, con depósitos de las Fm. Fray Bentos compuestos por limos y areniscas finas con niveles de cementación calcárea. La Fm. Salto está compuesta por areniscas, arenas y conglomerados asociados a ambientes fluviales. Depósitos continentales de las fms. Libertad (lodolitas, loess arcillas y limos arcillosos) y Dolores (lodolitas y limos arcillosos) completan la columna geológica (Preciozzi *et al.* 1985).

En la zona de estudio se procuró encontrar unidades geológicas con potencial uso en caminería, que fueran compatibles con el tratamiento de cenizas (de origen agroindustrial) y cal para mejorar su desempeño como pavimento. Para ello fue necesario identificar suelos con dominio de las fracciones arenas y grava, con bajo contenido de fracción fina (limo y arcilla).

Se realizó una revisión de antecedentes Geológicos-Geotécnicos y de suelos CONEAT de cada zona, localizándose las unidades potencialmente utilizables.

La metodología cartográfica incluyó la interpretación de imágenes de sensores remotos, localizándose zonas potenciales de muestreo y canteras. La misma fue realizada en las siguientes etapas:

a) La fotointerpretación de imágenes aéreas a escala 1/40.000 y 1/20.000 del Servicio Geográfico Militar con el objeto de planificar los puntos de observación (estos puntos fueron verificados durante la recorrida de campo, realizándose el muestreo para la determinación de sus características mediante ensayos geotécnicos de laboratorio), identificados en las Figuras 3.1 y 3.2.

b) La creación de un Sistema de Información Geográfico con el objeto de superponer los puntos de observación previstos, la información disponible sobre las unidades de suelo, la geología, la topografía e imágenes satelitales (Google Earth);

c) El relevamiento y muestreo de campo de los puntos de observación previstos, incluyendo: i) canteras de basalto (Art CB), arena (Art CA) y grava (Art CFr.) usadas por la Intendencia de Artigas o por OSE; ii) canteras en desuso, taludes y cunetas del corredor del camino y afloramientos naturales (siglas Art O); iii) Muestreo de unidades de suelo y roca para su caracterización y la realización de ensayos (Art CB, CA, Art Cfr., Art M, Figuras 3.1 y 3.2).

d) El muestreo de cenizas producidas tras la quema de cáscara de arroz y bagazo de caña de azúcar para su caracterización mineralógica y realización de ensayos

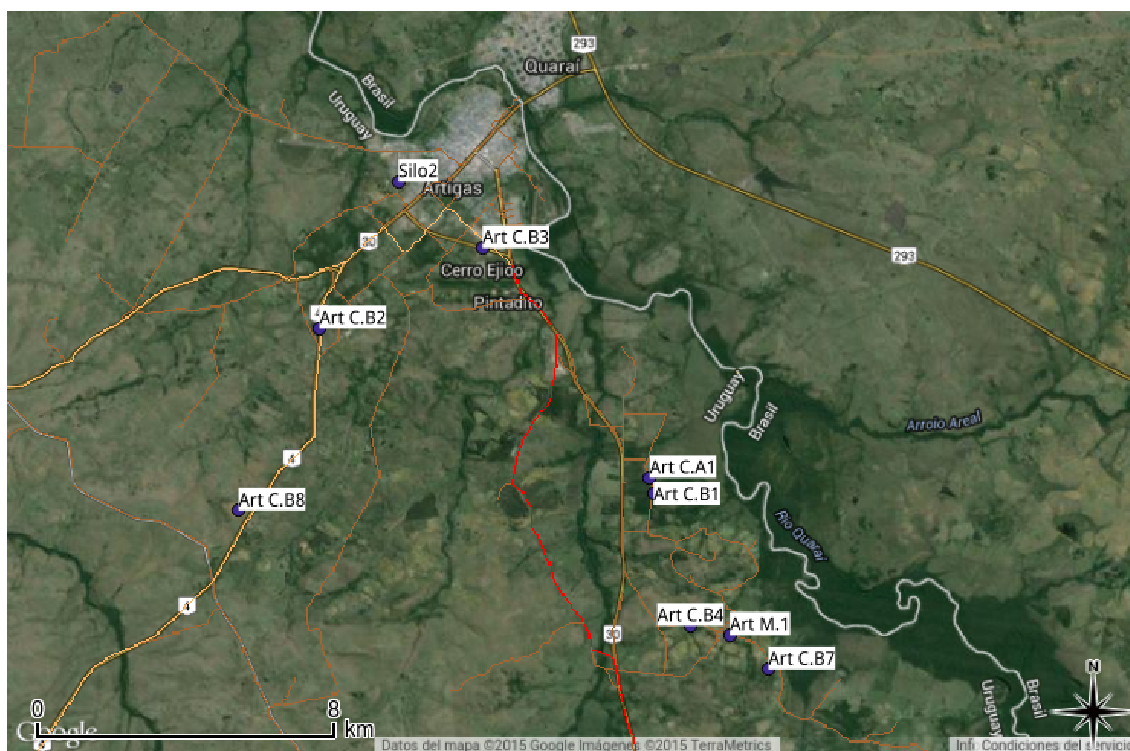


Figura 3.1. Imagen de Sensores Remotos con Puntos de Observación- Artigas.

(Canteras de arenisca de Fm. Tacuarembó (Art CA) Canteras de basalto/sills (Art CB) y puntos de muestreo (Art M))



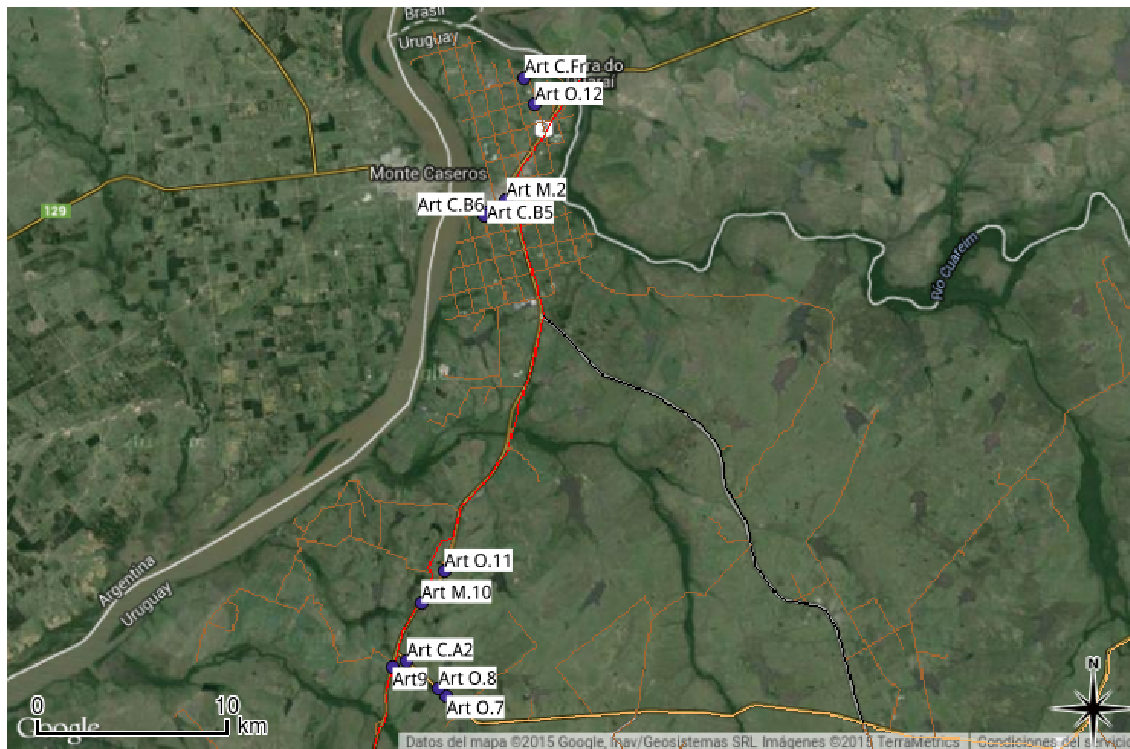


Figura 3.2. Imagen de Sensores Remotos con Puntos de Observación- Bella Unión. (Conglomerado arenoso de Fm. Salto (puntos de observación sobre cortes en ruta 3 y 30: Art O7-12), muestra de cantera "Franquía" (Art CFr), cantera OSE con basalto desagregado y fracturado de Fm Arapey (Art CB5, Art CB6), muestra de suelo en calle de Bella Unión (Art M2))

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 y posibilidad de escalas mayores (básicamente canteras existentes), distancia de transporte, información de los antecedentes bibliográficos de las características necesarias para obtener un comportamiento satisfactorio de mejoramiento cuando se adiciona cal y ceniza.

## 3.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

### 3.2.1. Materiales Granulares

Los materiales granulares identificados en la investigación de sitio fueron caracterizados en laboratorio para seleccionar aquéllos a ser utilizados en las capas de base a experimentar e interpretar el desempeño de éstas. Los ensayos de caracterización

física realizados, junto con las correspondientes normas seguidas, son descriptos a continuación.

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

Los materiales granulares fueron clasificados por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), según Norma ASTM D2487 y el Sistema AASHTO (Norma ASTM D3282).

### 3.2.2. Cenizas

La reactividad de las cenizas fue caracterizada usando la clasificación de Houston (1972).

El contenido de orgánico fue evaluado mediante el ensayo de pérdida por ignición (Norma ASTM D7348). Muestras de las cenizas fueron quemadas en mufla a temperaturas de 450°C y 550°C durante 3 h y 6 h. Las cenizas secas fueron pesadas antes y después de la ignición en mufla, siendo el contenido de orgánico la razón de la diferencia de pesos respecto al peso después de la ignición.

### 3.3. DISEÑO DE TRAMOS EXPERIMENTALES

Como propuesta general los pavimentos de los tramos experimentales estarían compuestos por una capa de base de material granular modificado con una de las cenizas estudiadas y cal a construirse sobre el pavimento existente. En la experiencia de Bella Unión se preveía la colocación de un tratamiento bituminoso superficial sobre la base construida.

La variable principal fue el diseño de los materiales de las capas de base a construirse, que se realiza con el criterio de dosificación óptima de la mezcla de material granular, ceniza y cal (diseño de material suelo-ceniza-cal). El espesor de capa de base a construir y la estructura del pavimento fueron variables dependientes del número de materiales suelo-ceniza-cal diseñados para cada experiencia.

### 3.3.1. Ensayos de Compactación

Ensayos Proctor modificado siguiendo la Norma AASHTO T180 fueron realizados para determinar los parámetros de compactación de las probetas para el diseño de los materiales suelo-ceniza-cal y de los materiales de capas de base a construirse en cada tramo experimental.

Los materiales fueron compactados 1 hora después de culminada la mezcla de los materiales con el agua, en moldes de 10 cm o 15 cm de diámetro según el tamaño máximo del suelo, en 5 capas con 25 golpes/capa o 56 golpes/capa según el diámetro del molde respectivamente.

### 3.3.2. Diseño de Material Suelo-Ceniza-Cal

El diseño de los materiales suelo-ceniza-cal se realizó utilizando el Método de Thompson (1966). Desarrollado originalmente para estabilización de suelos arcillosos con cal, el método establece que el contenido de cal óptimo es aquél que asegura una RCI a los 28 días de al menos 345 kPa. En el caso de estabilización con mezclas de ceniza y cal, se evalúa la RCI de probetas con diferentes combinaciones de porcentaje en peso seco de suelo de estos dos materiales, manteniendo 345 kPa como valor de criterio.

Para el estudio se adoptaron combinaciones de cuatro contenidos de ceniza (0%, 15%, 20% y 25% en peso de suelo seco) y dos contenidos de cal (3% y 5% en peso de suelo seco), totalizando ocho combinaciones de materiales. Además se hicieron ensayos de RCI del suelo sin tratar como control. La Tabla 3.1 resume estas combinaciones.

Tabla 3.1. Combinaciones de mezclas de suelo con ceniza y cal consideradas para el diseño de materiales suelo-ceniza-cal

Material	Cal (%)	Ceniza (%)
Suelo	0	0
S-3%Cal	3	0
S-15%Ceniza-3%Cal		15
S-20%Ceniza-3%Cal		20
S-25%Ceniza-3%Cal		25
S-5%Cal	5	0
S-15%Ceniza-5%Cal		15
S-20%Ceniza-5%Cal		20
S-25%Ceniza-5%Cal		25

Todas las probetas fueron compactadas a la humedad óptima de compactación (HOC) del Proctor modificado correspondiente al suelo sin tratar, al material de suelo con 5% de cal (para los materiales con 0% de ceniza) y al material de suelo con 20% de ceniza y 5% de cal, 1 hora después de culminada la mezcla de los materiales con agua destilada.

La compactación de las probetas con materiales granulares con 100% pasante por el tamiz #4 (4,76 mm) se hizo 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. Para las probetas con material granular con tamaño máximo mayor a 4,76 mm la compactación se realizó un molde metálico cilíndrico de 10,1 cm de diámetro interno y 20,2 cm de altura mediante el sistema de impacto del Proctor modificado.

Una vez compactadas, las probetas de material modificado fueron retiradas del molde, envueltas en película de pvc para conservar la humedad de compactación y curadas por 28 días en cámara húmeda a temperatura ambiente. Las probetas de suelo sin tratar fueron ensayadas inmediatamente después de la compactación.

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 diámetro fueron ensayadas en una prensa triaxial, mientras que las probetas de 10,1 cm de diámetro lo fueron en una prensa CBR.

### 3.4. CONSTRUCCIÓN DE TRAMOS EXPERIMENTALES

#### 3.4.1. Procedimiento

El procedimiento de construcción de las capas de base de materiales modificados con ceniza y cal consistió en los siguientes pasos generales.

- Tender el material granular a lo largo del tramo.
- Tender la ceniza sobre el material granular a lo largo del tramo.
- Colocar uniformemente distribuidas a lo largo del tramo las bolsas de cal, romperlas y tender la cal a lo largo del tramo.
- Mezclar en seco el material granular, la ceniza y la cal.
- Adicionar al material mezclado el agua de compactación y homogeneizar la humedad.
- Compactar con rodillo liso vibrador la capa de suelo-ceniza-cal una vez finalizada la homogeneización de la humedad.

La ceniza y la cal son materiales finos y de baja gravedad específica, por lo que son volátiles ante la abrasión del tránsito vehicular y el viento. Para reducir la emisión de polvo se previó colocar una capa delgada de cobertura de la base a construir. En caso de usarse un material granular grueso con poco fino, para evitar su desgaste por escurrimiento de agua o abrasión de tránsito, se sugirió realizar pasadas de rodillo compactador de forma de soterrar éste en la capa de base de suelo-ceniza-cal.

#### 3.4.2. Control de Obra

Ensayos de control de compactación *in situ* por el método del cono de arena fueron realizados siguiendo la Norma ASTM D1556. Pozos de 10 cm de diámetro y entre 10 cm y 15 cm de profundidad fueron realizados manualmente en las capas de base construidas y el material removido guardado en bolsa plástica y pesado en el laboratorio. Luego, 4,5 kg de arena calibrada (con peso unitario seco conocido) fue colocada en un recipiente y vertida en el pozo por caída libre a través del cono, hasta

llenar completamente el volumen del pozo y del cono. La arena calibrada remanente en el recipiente fue guardada en bolsa plástica y pesada en el laboratorio.

La humedad del material granular se determinó con la muestra extraída del pozo, de acuerdo con la Norma ASTM D2216. La muestra se secó en horno por 24 h a una temperatura entre 105°C y 110°C y luego de ello se pesó.

### 3.5. DESEMPEÑO DE TRAMOS EXPERIMENTALES

El desempeño de los tramos experimentales fue evaluado mediante monitoreos periódicos de condición estructural y funcional. La evaluación funcional fue realizada por observación de estado superficial; grado y extensión de baches, rugosidad, ahuellamiento, desgaste de material, emisión de polvo, fisuras longitudinales y transversales, resistencia al deslizamiento húmedo y seco.

Complementariamente se realizaron en los mismos puntos ensayos de resistencia a la penetración de los materiales de las capas del pavimento.

#### 3.5.1. Medidas de Deflexión

La condición estructural de los pavimentos fue evaluada mediante medidas de deflexión con Viga Benkelman, siguiendo la Norma DNER-ME 024/94, en puntos fijados en los tramos experimentales. Un análisis de desempeño comparativo con pavimentos tradicionales se hizo con medidas de deflexión en puntos fuera de los tramos experimentales.

Fue utilizada una Viga Benkelman con relación de brazo de palanca 2:1 y extensómetro con precisión de 0,01 mm del LGP de la UdelaR. Las deflexiones fueron inducidas mediante camiones de eje trasero simple y ruedas tandem, con 8,2 toneladas de carga y 80 psi (560 kPa) de presión de inflado de neumáticos. Una vez colocado el camión en el punto la Viga Benkelman fue instalada entre las ruedas tandem. Luego se permitió el desplazamiento del camión a una velocidad de 3 km/h y se realizaron lecturas de deflexión para posiciones del eje trasero del camión de 2,5 m, 3,7 m, 5,0 m y 9,0 m del punto de posicionamiento del puntero de la Viga Benkelman.

### 3.5.2. Ensayos de Penetración Dinámica de Cono

Ensayos de Penetración Dinámica de Cono (*Dynamic Cone Penetrometer*, DCP) con el equipo del LGP de la UdelaR fueron realizados en los puntos fijados en los tramos experimentales, en forma complementaria a los ensayos de medidas de deflexión.

El DCP consistente de un cono de acero con punta de 60° unido a un cabezal de acero mediante un hasta que se hace penetrar en el material mediante una energía de impacto generada por caída libre vertical de 57,5 cm de una masa de acero de 8 kg. Se hacen lecturas de penetración del cono ( $\Delta$ ) para un número dado de golpes de masa (N), definiéndose el Índice de Penetración DCP ( $\Delta_{DCP}$ ) como:

$$\Delta_{DCP} = \frac{\Delta}{N}$$

Para cada material, el  $\Delta_{DCP}$  es función de su tamaño máximo y distribución granulométrica, densidad (grado de compactación) y humedad. Esto significa que la relación de la penetración con el número de golpes de cada material es teóricamente lineal. En general, los materiales de cada capa del pavimento tienen todas o algunas de estas características diferentes por lo que tienen diferentes  $\Delta_{DCP}$ . Los puntos de inflexión en las pendientes de la relación de penetración con el número de golpes, indica la frontera entre materiales y, por lo tanto, el espesor de cada capa. Además, para el caso de estudio el  $\Delta_{DCP}$  también es función del grado de cementación del material, siendo mayor cuanto mayor es éste, por lo que es un ensayo indicativo del desarrollo de reacciones cementantes entre la cal y la sílice de la ceniza y los minerales arcillosos del suelo.

#### 4. TRAMO EXPERIMENTAL CON CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

La experiencia con CBCA fue desarrollada en Bella Unión. Un tramo experimental de pavimento de 95 m de longitud con capa de base de material granular modificado con CBCA y cal fue construido en la calle Melo entre San José y Treinta y Tres los días 27 y 28 de noviembre de 2013. El sitio fue seleccionado en acuerdo con la IDA, siendo parte del plan de obras de instalación de la red de saneamiento y rehabilitación de calles del barrio.

La calle Melo se localiza al sudeste del casco urbano de Bella Unión, como puede apreciarse en la Figura 4.1, a unos 100 m al norte de una cañada y en el límite de la planicie de inundación. En la cuadra de la experiencia, la calle tiene una pendiente media ascendente desde San José hacia Treinta y Tres (de noreste a sudoeste). La calle es de bajo volumen de tránsito diario, fundamentalmente de vehículos livianos (autos y en menor cuantía camionetas) y ocasionalmente camiones de eje trasero simple.



Figura 4.1. Localización del Tramo Experimental de Pavimento de Bella Unión

La CBCA utilizada se transportó 11,5 km desde la Planta de ALUR, situada al sur del sitio de la experiencia, mientras que el material granular se extrajo de la Cantera



Franquía, al norte del sitio de la experiencia y una distancia de transporte de 6,5 km (Figura 4.2).

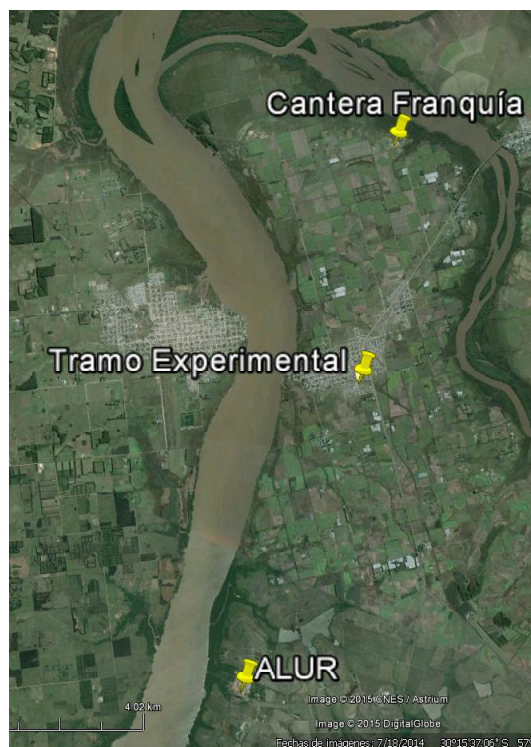


Figura 4.2. Localización de la Planta de ALUR y la Cantera Franquía

#### 4.1. INVESTIGACIÓN DE SITIO

Las rocas más antiguas son los basaltos de la Fm Arapey, que hacia el oeste incluye cuencas sedimentarias con sedimentos y rocas sedimentarias cenozoicos (limos y areniscas finas con carbonato de calcio) de la Fm. Fray Bentos aflorando en las barrancas del Río Uruguay y en el A° Itacumbú. Sobre ella se depositan cantos rodados, arenas y areniscas de la Fm Salto y posteriormente limos arcillosos y arcillas con carbonato de calcio de la Fm. Libertad. En las planicies se depositan limos arcillosos a arenosos de la Fm. Dolores y sedimentos recientes asociados a los cursos fluviales (Figura 4.3).

La unidad geológica que cumple con los requisitos primarios de granulometría y límites de Atterberg identificadas en campo es la Fm. Salto. En Bella Unión hay varias fuentes potenciales de aprovisionamiento, la más próxima es una cantera de la intendencia en la zona de Franquía (Art CFr). La otra fuente se encuentra hacia el sur

(Art O7-9) donde existen corte en la ruta de espesores de varios metros y una cantera de uso de Vialidad-MTOP.

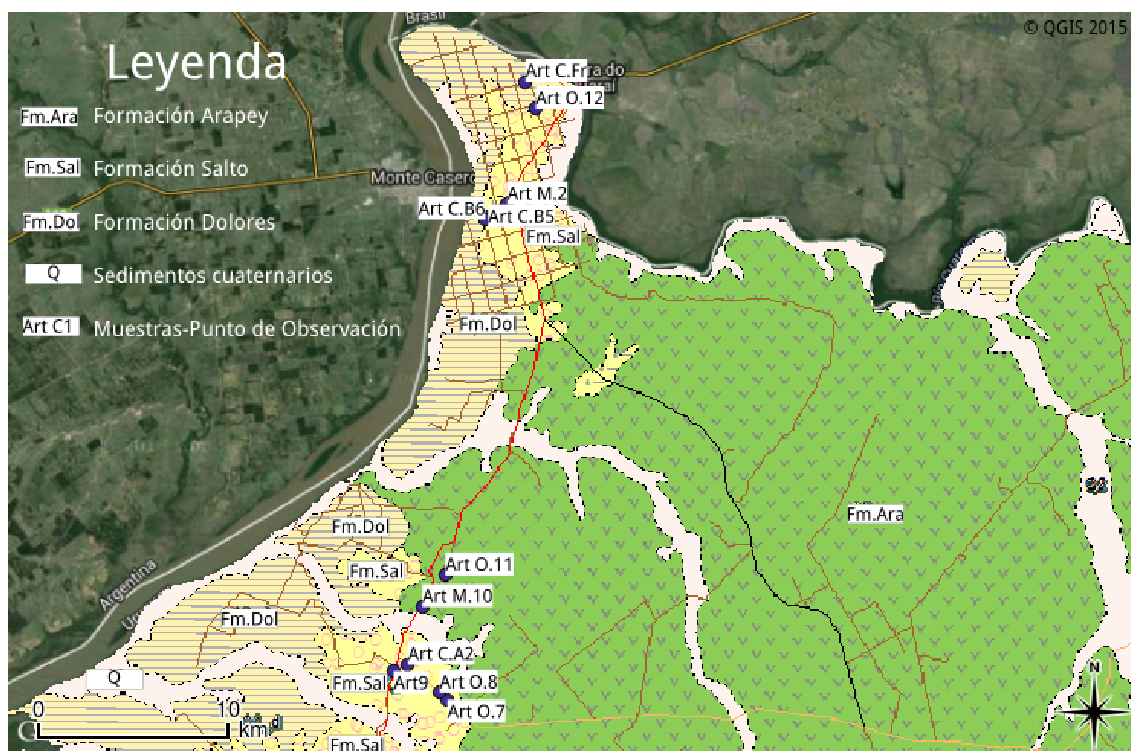


Figura 4.3. Geología y Puntos de Observación de la Región de Bella Unión

La selección de la cantera de Franquía frente a la región sur es porque ante características composicionales similares la distancia de transporte es menor.

## 4.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

### 4.2.1. Material de la Cantera Franquía

El material de la Cantera Franquía seleccionado para la construcción de la capa de base del tramo experimental de Bella Unión fue caracterizado en laboratorio mediante ensayos de análisis de distribución granulométrica, límites de Atterberg y gravedad específica. Los resultados se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Propiedades Físicas del Material de la Cantera Franquía

Propiedad	Valor
Grava	70%
Arena	10%
Limo	10%
Arcilla	10%
Límite Líquido	49%
Límite Plástico	29%
Índice de Plasticidad	20%
Clasificación SUCS	GM
Clasificación AASHTO	A-2-7 (0)
Gravedad Específica	2,64

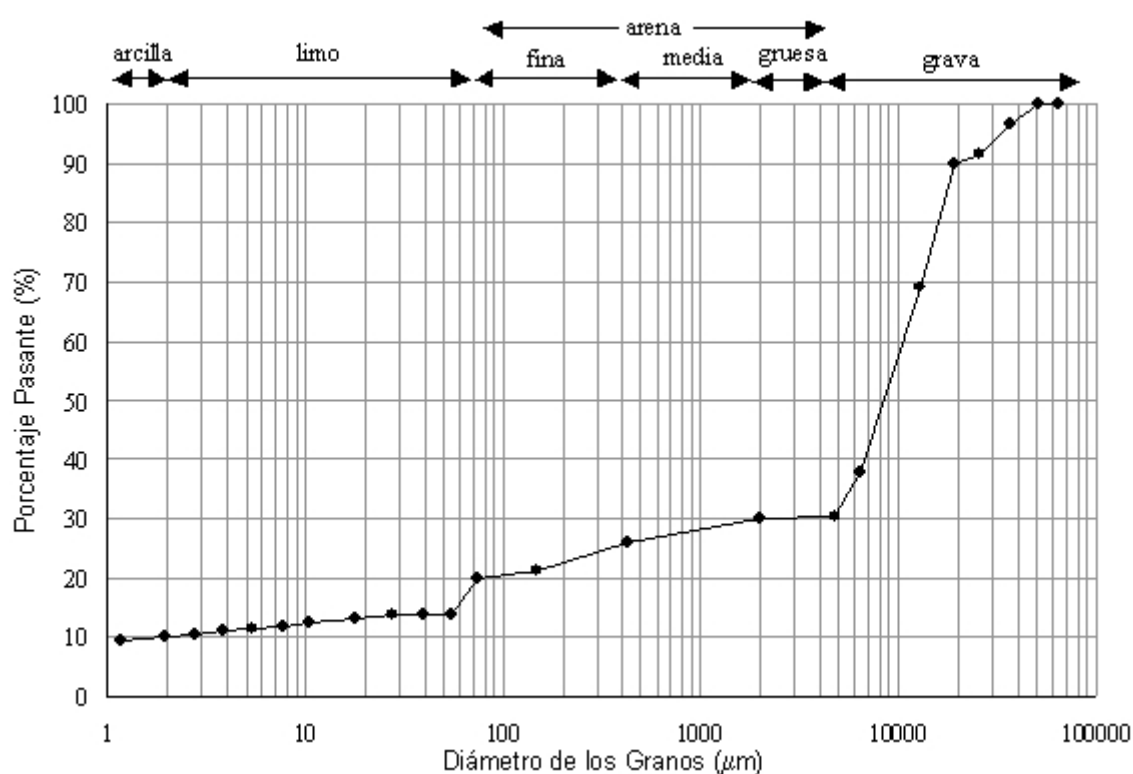


Figura 4.4. Distribución Granulométrica del Material de la Cantera Franquía

La curva granulométrica se aprecia en la Figura 4.4. La fracción grava está conformada por cantos rodados cuarzosos. La fracción pasante por el tamiz #200 (< 0,075 mm) es relativamente alta (20%) y el porcentaje de fracción arena es similar al de las fracciones limo y arcilla. Dos tercios de la fracción arena es fina, mientras que el tercio restante es arena media. Por lo tanto, era de esperarse que haya una competencia por la cal entre los minerales arcillosos del suelo y la CBCA a ser adicionada a éste. Aun así, el material de la Cantera Franquía fue el seleccionado para la experiencia por

ser el más adecuado para la estabilización racional con CBCA y cal en la zona de estudio.

El suelo puede identificarse según el sistema SUCS como una grava limosa (GM), mientras que utilizando la clasificación AASHTO, el material de Franquía se encuentra en el subgrupo A-2-7 (0), tratándose de un suelo inorgánico granular.

#### 4.2.2. Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar

El bagazo de caña de azúcar se usa en la planta de ALUR como combustible de las calderas para generación de energía. La quema se hace sin control de temperatura y tiempo, así como también el enfriamiento de la CBCA residual. Como resultado la CBCA tiene una estructura foliada de color negro, con restos de bagazo no quemado; clasificándose según el criterio de Houston (1972) como una ceniza con alto contenido de carbón.

El contenido de orgánico de la CBCA fue verificado mediante ensayos de pérdida por ignición a 450°C y 550°C durante 6 y 3 horas, dando valores de entre 55% y 83%, con un valor medio de 71% (Tabla 4.2). La dispersión de los valores se debe al variable contenido de bagazo sin quemar en las muestras antes que a las temperaturas y tiempos usados en los ensayos.

Tabla 4.2. Pérdidas de Orgánico por Ignición de la CBCA de ALUR

Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Pérdida Ignición (%)
1	450	6	73,0
2			73,0
3	550	3	70,7
4			73,1
5	450	6	73,1
6			55,6
7	550	3	70,0
8			83,1
Valor Medio			71,4
Desv. Std.			7,5
CV			0,11

El alto contenido de orgánico, sumado a que como resultado del tipo de quema la sílice tendría una estructura en parte cristalina y en parte amorfa permiten concluir que la CBCA de la Planta de ALUR de Bella Unión es de baja reactividad alcalina.

### 4.3. DISEÑO

#### 4.3.1. Material Suelo-Ceniza de Bagazo de Caña de Azúcar-Cal

Probetas cilíndricas de 10,1 cm de diámetro y 20,2 cm de altura de suelo, suelo-cal y suelo-CBCA-cal fueron ensayadas a RCI en la prensa CBR. Las probetas de suelo fueron compactadas con HOC de 9,5% para alcanzar el PUSM de 20,1 kN/m<sup>3</sup>, las de suelo-cal con HOC de 10,5% para alcanzar un PUSM de 18,1 kN/m<sup>3</sup>, mientras que las de suelo-CBCA-cal lo fueron con HOC de 11,5% para obtener un PUSM de 16 kN/m<sup>3</sup>.

Tabla 4.3. Resistencia a la Compresión Inconfinada de las Probetas de Suelo y Suelo Modificado con CBCA y Cal con 28 días

Material	Cal (%)	Ceniza (%)	PUS (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	RCI (kPa)	RCI (kPa)
Suelo	0	0	19,7	13,4	13	13
S-3%Cal		0	20,0	10,9	36	37
			19,8	11,0	38	
S-15%CBCA-3%Cal	3	15	15,6	14,3	131	173
			16,3	16,8	214	
S-20%CCBA-3%Cal		20	15,6	12,4	146	111
			16,3	22,3	76	
S-25%CBCA-3%Cal		25	15,0	13,6	121	135
			14,1	14,3	149	
S-5%Cal		0	20,0	11,5	170	207
			20,0	10,4	244	
S-15%CBCA-5%Cal	5	15	16,4	14,7	204	247
			16,9	15,6	290	
S-20%CBCA-5%Cal		20	15,7	12,3	258	225
			16,0	23,7	192	
S-25%CBCA-5%Cal		25	15,0	14,7	160	205
			15,4	23,6	249	

La Tabla 4.3 resume los valores de RCI a los 28 días de cura a temperatura ambiente de las probetas de suelo-cal y suelo-CBCA-cal ensayadas siguiendo el Método

de Thompson (1966), junto con el PUS y la humedad ( $w$ ) correspondientes. También se presentan las RCI de las probetas de suelo sin tratar y ensayadas inmediatamente después de compactadas.

Se observa una dispersión en los valores de RCI obtenidos para cada contenido de ceniza y cal debido a que el tamaño variable de las fracciones gruesas del suelo ofrece variable resistencia a la compresión del pistón de carga y a la dispersión de la humedad de compactación verificada en cada probeta.

La evolución de la RCI en función del contenido de CBCA para cada contenido de cal se puede observar en la Figura 4.5. 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 5%; lo que se puede explicar por el contenido relativamente alto (del entorno del 10%) de fracción arcilla en el suelo de la Cantera Franquía. Sin embargo, el contenido de mineral arcilloso no sería suficiente para mejorar sustancialmente la RCI con un 3% de cal.

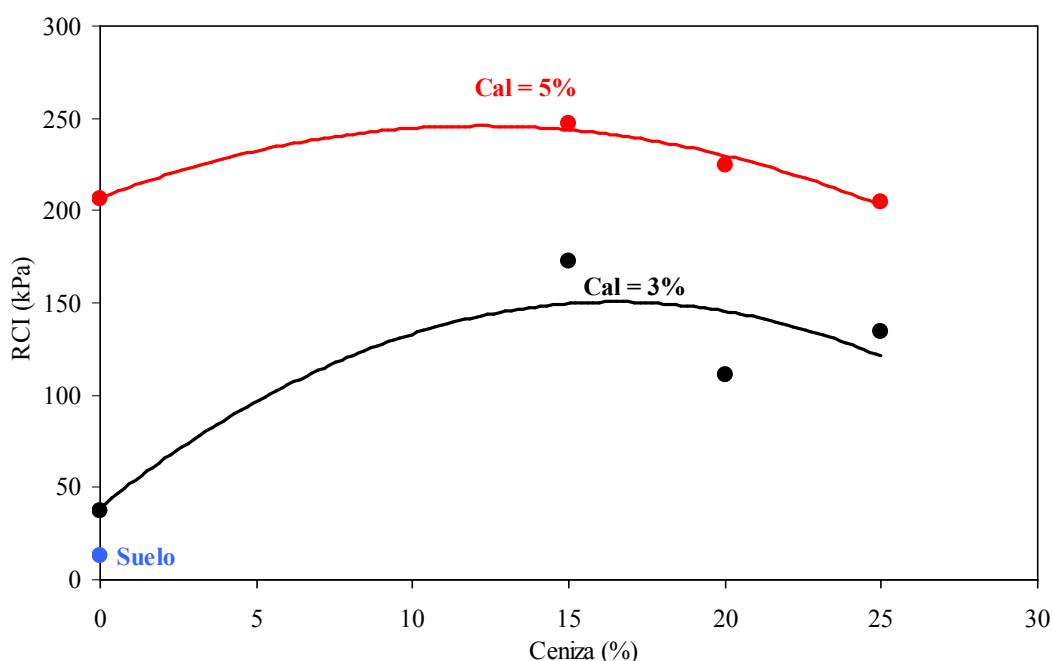


Figura 4.5. Evolución de la Resistencia a la Compresión Inconfinada en Función del Contenido de CBCA para Cada Contenido de Cal

La RCI continúa aumentando cuando se añade CBCA, siendo más significativo el aumento para las probetas con 3% de cal. Mientras que la RCI aumentó apenas 1,2

veces cuando a las probetas con 5% de cal se le añadió 15% de CBCA, ésta lo hizo 4,5 veces cuando el mismo contenido de CBCA se añadió a las probetas con 3% de cal. La CBCA suplementaría la sílice aparentemente faltante en el suelo, mejorando su reactividad a la cal. Para ambos contenidos de cal estudiado se observa que el aumento de RCI se verifica hasta un contenido de CBCA de aproximadamente 15%, disminuyendo con el aumento del contenido de ceniza. Este contenido de CBCA puede considerarse, por tanto, un óptimo para modificar el suelo.

En ninguno de los casos estudiados se alcanzó el valor de 345 kPa establecido por el Método de Thompson para considerar estabilizado al suelo. Como se ve, esto no significa que no haya aumento de resistencia sino que la misma no es significativa por lo que puede considerarse que la adición de CBCA y cal modifica al suelo de Franquía antes que estabilizarlo. Aun teniendo un contenido relativamente alto de fracción fina (20% pasa el tamiz #200), el suelo es un material grueso y, por lo tanto, su resistencia al corte depende de la tensión de confinamiento. Esto puede explicar su baja RCI y al ser modificado por la adición de CBCA y cal su comportamiento mecánico será similar, dependiente de la compresión de confinamiento, resultando lógico que su RCI sea relativamente baja. Siendo así, se adoptó como criterio considerar como mezcla de diseño óptimo aquélla que produjo la máxima RCI; correspondiendo para el caso a una mezcla de material granular de Franquía con 15% de CBCA y 5% de cal.

#### 4.3.2. Parámetros de Compactación

La Figura 4.6 muestra la relación PUS-humedad resultante de los ensayos Proctor modificado realizados al suelo de la Cantera Franquía y al material de suelo modificado con 20% de CBCA y 5% de cal (S-20%CBCA-5%Cal) para determinar los parámetros de compactación de las probetas a ensayar a RCI para el diseño del material óptimo, así como al material de suelo con 15% de CBCA y 5% de cal (S-15%CBCA-5%Cal) resultante del diseño.

Una apreciable caída de PUS se observa en los materiales de suelo modificado respecto al material granular sin tratar, incluso para iguales humedades de compactación. La CBCA y la cal tienen una gravedad específica mucho menor que la del suelo, resultando que la mezcla de aquéllas con esta resulta en un material de menor

gravedad específica que la del suelo y, por tanto de menor PUS. Igualmente el PUSM de las mezclas son menores que el PUSM del material granular.

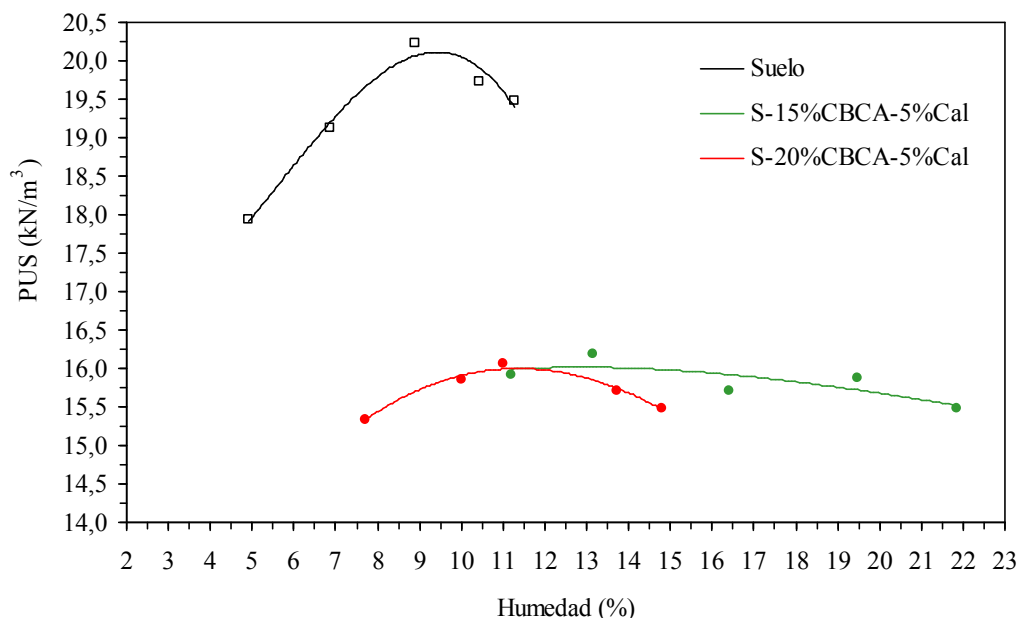


Figura 4.6. Relación PUS-Humedad Resultantes de los Ensayos Proctor Modificado del Suelo de Cantera Franquía y de Materiales de Suelo Modificado con CBCA y Cal

La HOC de las mezclas es mayor que la del material granular. Esto se debe a que, por un lado, parte del agua añadida es absorbida por la hidratación de la cal que libera los iones calcio necesarios para las reacciones alcalinas. Por el otro lado, las cenizas son higroscópicas y su capacidad de absorción de agua es muy alta por ser materiales muy porosos. Como resultado, es necesario añadir a las mezclas un mayor porcentaje de agua para tener una cantidad de agua libre similar a la del suelo sin tratar para su compactación.

Las curvas de compactación de las mezclas tienden a ser más achatadas que las del material granular. Estas formas achatadas, también denominadas curvas sin forma, son típicas de materiales gruesos mal graduados (arenas SP o gravas GP), aunque también han sido observadas en suelos finos poco plásticos. Para el caso particular, parte de la cal reacciona con los minerales arcillosos de la fracción fina del suelo reduciendo su plasticidad. Como esta reacción es rápida y se da en el tiempo entre la



mezcla y la compactación, el material modificado se comportará a la compactación como un material poco plástico, dando curvas sin forma.

Las curvas sin forma son indicativas de que la energía de impacto del Proctor no es eficiente para compactar el material, siendo aconsejable la compactación por el sistema de vibrado. Por tanto, el material de suelo modificado con 15% de CBCA y 5% de cal diseñado para la capa de base a construirse en el tramo experimental de la calle Melo en Bella Unión debería compactarse con rodillo liso vibrador.

La Tabla 4.4 resume los parámetros óptimos de compactación del material S-15%CBCA-5%Cal diseñado para la capa de base a construir en el tramo experimental de la calle Melo de Bella Unión. También se incluyen los parámetros correspondientes al suelo de Franquía y al material S-20%CBCA-5%Cal usados para el diseño del material óptimo.

Tabla 4.4. Parámetros Óptimos de Compactación del Material de Suelo Modificado con CBCA y Cal Diseñado para el Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

Material	PUSM (kN/m <sup>3</sup> )	HOC (%)
<b>S-15%CBCA-5%Cal</b>	<b>16,0</b>	<b>13,0</b>
Suelo Franquía	20,1	9,5
S-20%CBCA-5%Cal	16,0	11,5

#### 4.3.3. Estructura de Pavimento

El pavimento de la calle Melo en la cuadra de implantación del tramo experimental estaba conformado originalmente por una única capa de suelo limo arcilloso negro del sitio compactado sobre el mismo suelo. Se proyectó la construcción sobre ésta de una capa de base de 15 cm de espesor de material granular de Franquía modificado con 15% de CBCA y 5% de cal, quedando el tramo experimental con el pavimento esquematizado en la Figura 4.7.

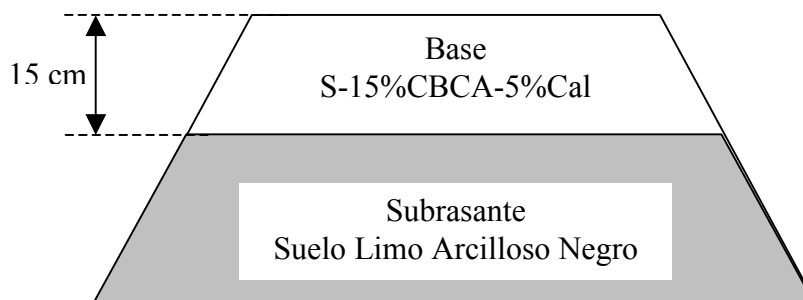


Figura 4.7. Pavimento del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

También se proyectó construir una capa de cobertura de tratamiento superficial asfáltico sobre la capa de base de suelo-15%CBCA-5%Cal para eliminar la emisión de polvo de ésta.

#### 4.4. CONSTRUCCIÓN

El tramo experimental de pavimento de 95 m de longitud con base de 15 cm de espesor de suelo de Franquía modificado con 15% de CBCA de ALUR y 5% de cal comercial fue construido entre el 27 y el 28 de noviembre de 2013. Las particularidades del procedimiento de su construcción se describen a continuación y se ilustran en la Figura 4.8.

El material granular de la Cantera Franquía había sido colocado sobre el pavimento original como una capa de base transitoria para asegurar el tránsito de vehículos pesados durante las obras de instalación de la cañería de saneamiento (Figura 4.8A). Sobre esta capa de transición se tendió la CBCA con pala mecánica (Figura 4.8B).

Luego, se distribuyeron las bolsas de 25 kg de cal con pala mecánica e inmediatamente fueron manualmente rotas (Figura 4.8C). La capa de base transitoria, con la CBCA y la cal tendida encima, fue escarificada con motoniveladora, iniciando la etapa de mezclado (Figura 4.8D). El mezclado se continuó con sucesivas pasadas de motoniveladora (Figura 4.8E). Finalmente la capa fue compactada con rodillo liso vibrador sin adición de agua, ya que se consideró que el material granular y la CBCA tenían la suficiente humedad (Figura 4.8F).



Figura 4.8. Etapas de Construcción del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

La Figura 4.9 muestra la condición final de obra del tramo experimental de la calle Melo de Bella Unión. Se observan líneas oscuras debidas al exceso de humedad del material compactado así como huellas generadas por el paso del camión utilizado para los ensayos de medida de deflexión con Viga Benkelman.



Figura 4.9. Condición al Final de Obra del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

Los ensayos de control de obra fueron realizados el 18 de diciembre de 2013, esto es 20 días después de finalizada la construcción, por lo que sólo se controló el PUS de la capa de material S-15%CBCA-5%Cal. Ensayos de densidad *in situ* por el método del cono de arena fueron realizados en 3 puntos del tramo experimental, identificados por un sistema de progresiva con 0,0m en la esquina de la calle Melo con la calle San José. Los resultados son presentados en la Tabla 4.5, donde la humedad es la correspondiente al día de medición y no la de compactación y se presenta el grado de compactación (GC) alcanzado respecto al PUSM del ensayo Proctor modificado.

Tabla 4.5. Resultado de Ensayos de Densidad in Situ por el Método del Cono de Arena Realizados en el Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

Punto	PUS (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	GC (%)
45,7m	14,0	9,1	88
65,7m	14,3	10,0	90
82,5m	17,9	7,2	112

Los GC alcanzados en los puntos 45,7m y 65,7m fueron relativamente bajos si se los compara con los rutinariamente considerados en los pliegos de condiciones de obra (superiores al 95%), tal vez debido a que la humedad del material era superior a la HOC y que se utilizó un rodillo liso vibrador de energía más próxima a la estándar que a

la modificada. Sin embargo, destaca el alto GC alcanzado en el punto 82,5m fue superior al 100%. La humedad medida en los tres puntos fue inferior a la HOC, lo que denota la alta capacidad de secado y humedecimiento que tiene el material S-15%CBCA-5%Cal, más allá de las altas temperaturas ambiente (superiores a 30°C) y bajos eventos de lluvia verificados en las tres semanas que separaron la construcción del tramo experimental y los ensayos de densidad in situ.

#### 4.5. DESEMPEÑO DEL PAVIMENTO DEL TRAMO EXPERIMENTAL

Cuatro monitoreos de condición funcional y estructural fueron realizados en el Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión en su primer año de vida, siendo las fechas y el tiempo respecto a la construcción indicados en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Monitoreos del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

Fecha	Tiempo (días)
28/11/2013	0
18/12/2013	20
11/09/2014	287
11/12/2014	378

##### 4.5.1. Condición Funcional

La condición funcional del tramo experimental ni bien finalizada su construcción (0 día) se muestra en la Figura 4.10. El material de color negro es la capa de base de S-15%CBCA-5%Cal construida y las diferentes tonalidades se deben a la heterogeneidad de su humedad (Figuras 4.10A y 4.10B). Ocurrió ahuellamiento por el tránsito del camión utilizado en los ensayos de medida de deflexión (Figura 4.10C), particularmente en los dos primeros tercios del mismo (hacia la calle San José), esto es la zona más baja del tramo. El ahuellamiento fue más apreciable en los sitios donde hubo acumulación de agua por rotura de ductos de alimentación de agua potable producidos durante la escarificación del material granular de la capa transitoria y de agua residual (Figuras 4.10D y 4.10E). El alto contenido de humedad del material de la

capa de base construida y el hecho de que las reacciones alcalinas son lentas causaron que éste fuera apreciablemente deformable.

El tramo experimental fue librado al tránsito vehicular inmediatamente después de finalizada la obra y en ese momento se verificó emisión de polvo, que si bien no afectaba seriamente el tránsito, generaba molestias a los vecinos de la cuadra, calificando la condición funcional como de grado intermedio.



Figura 4.10. Condición Funcional del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión Inmediatamente Después de su Construcción

La condición funcional observada en los siguientes monitoreos está mostrada en la Figura 4.11.



Figura 4.11. Condición Funcional del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión en los Monitoreos Posteriores a su Construcción

A los 20 días no se observaron huellas ni baches a lo largo del tramo, inclusive aquéllas que se formaron durante las pruebas de carga realizadas inmediatamente

después de finalizada la obra, ya que fueron eliminadas en días posteriores mediante pasadas de rodillo liso. Además, durante las pruebas de carga no se observó formación de huella, lo que indica que el material S-15%CBCA-5%Cal se hizo más rígido y menos deformable, debido al desarrollo de reacciones cementantes acelerado por las altas temperaturas verificadas en el período y al secado, verificado mediante los ensayos de densidad *in situ*. La emisión de polvo continuó con el mismo grado de severidad constatado al finalizar la obra.

A los 287 días se observan huellas leves por pérdida de material en la senda norte de la calle, así como evolución de los baches ya formados al finalizar la construcción del tramo en las zonas de acumulación de aguas residuales. Se constató una reducción considerable de la emisión de polvo, al punto de no afectar a la vecindad. No hubo modificaciones en la condición funcional del tramo experimental a los 387 días. Se destaca que a poco más de 1 año de servicio no se observó en superficie formación de fisuras longitudinales ni transversales, así como ondulaciones.



Figura 4.12. Condición Funcional Comparativa del Tramo Experimental de la Calle Melo y el Pavimento de la Calle San José



La condición funcional del tramo experimental y de los pavimentos de las calles adyacentes, conformados por una capa de base de basalto modificado granulométricamente con gravilla y arena de la Cantera Franquía y ligado con cemento asfáltico, es muy similar como puede observarse en las imágenes de la Figura 4.12.

A más un año de servicio puede resumirse que la condición funcional del pavimento del tramo experimental de la calle Melo de Bella Unión es muy buena.

#### 4.5.2. Condición Estructural

Las medidas de deflexión con Viga Benkelman y los ensayos de penetración DCP se realizaron en 3 puntos fijados en el tramo experimental, localizados como se muestra en la Figura 4.13. También se muestra la localización del punto de control (PC) de pavimento tradicional en la calle Melo donde se realizaron medidas de deflexión con Viga Benkelman.

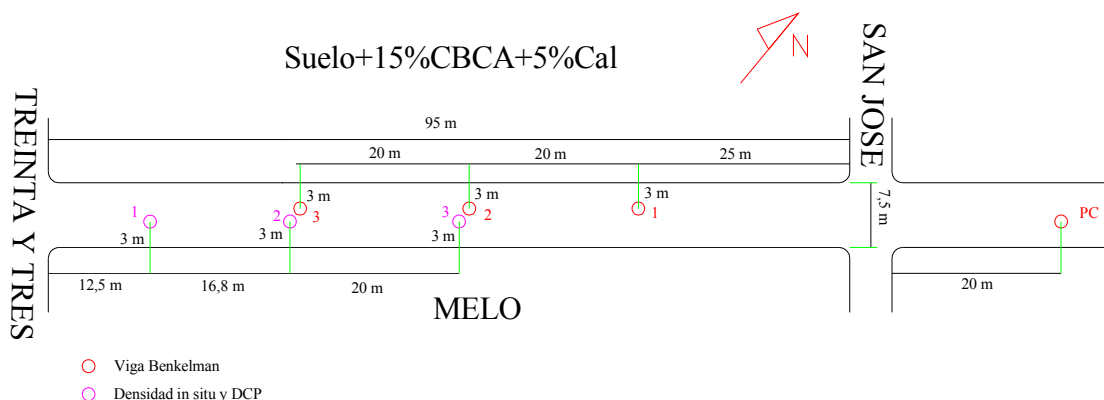


Figura 4.13. Localización de Puntos Fijos del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

Las deflexiones máximas (D) medidas con la Viga Benkelman en cada uno de los puntos (identificados por su progresiva respecto al 0 en la esquina de las calles Melo y San José) y monitoreos se resumen en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Lecturas de Deflexión con Viga Benkelman en los Puntos Fijos del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

Tiempo (días)	Punto	D ( $10^{-2}$ mm)
0	25m	120
	45m	249
	65m	164
20	25m	86
	45m	76
	65m	69
287	25m	36
	45m	33
	65m	33
	PC	2
378	25m	173
	45m	102
	65m	38
	PC	115

Se puede apreciar una dispersión en las lecturas realizadas en el monitoreo, de 387 días, debidas a variaciones en el contenido de humedad de los materiales del pavimento en cada punto de control. Las curvas de ajuste de variación en el tiempo de las deflexiones en cada punto se representan en la Figura 4.14.

Una apreciable disminución de la deflexión en los tres puntos monitoreados se constató en los primeros 20 días de vida del pavimento, pasando de un valor medio de  $178 \times 10^{-2}$  mm el día 0 a  $77 \times 10^{-2}$  mm. Dicho de otro modo, el valor de deflexión a 20 días fue un 43% del valor a 0 día. La disminución de la deflexión es indicativa del aumento de la rigidez de la capa de base de suelo modificado con 15% de CBCA y 5% de cal, debida fundamentalmente al desarrollo de las reacciones puzolánicas entre la cal y la sílice amorfa de la CBCA y los minerales arcillosos del suelo. Estas reacciones ocurrieron a pesar del tránsito pesado de las obras en ejecución en el barrio, verificadas en el tiempo descrito, y fueron aceleradas debido a la alta temperatura ambiente, superior a los 30°C, verificada en el período. Además, estas altas temperaturas

indujeron el secado superficial de la capa cementada, causando un aumento de succión y, por tanto, un aumento de rigidez adicional.

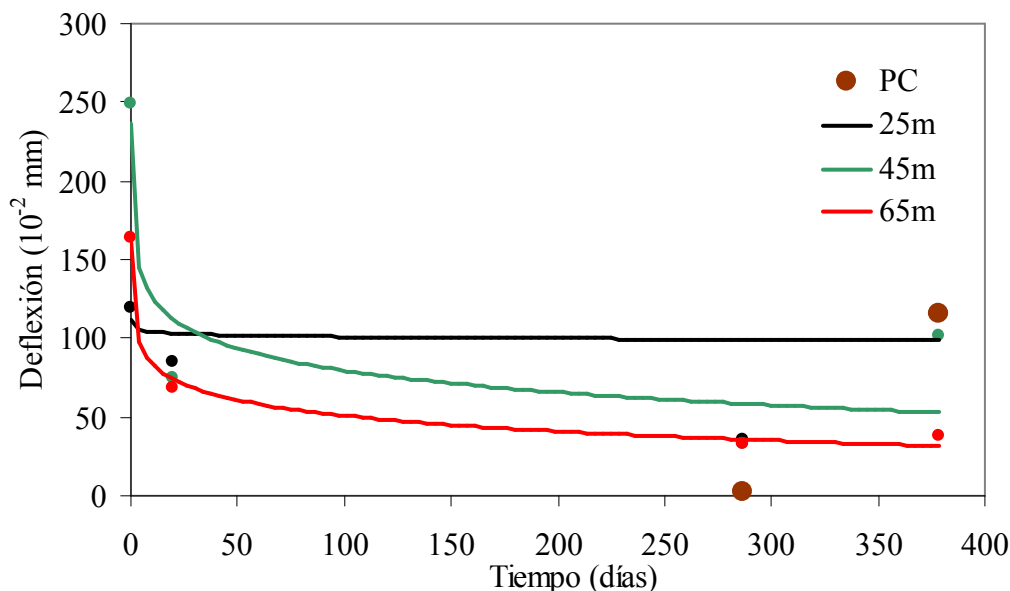


Figura 4.14. Variación en el Tiempo de las Deflexiones del Pavimento del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

La deflexión en el punto 25m se estabilizó en los monitoreos a 287 días y 378 días, mientras que en los puntos 45m y 65m disminuye en menor grado que en los primeros 20 días. El punto 25m se localiza próximo a una de las zonas de acumulación de agua por lo que es probable que los materiales del pavimento tengan un grado de saturación elevado afectando su baja rigidez y explicando que la deflexión allí sea mayor que las medidas en 45m y 65m.

Considerando sólo los puntos 45m y 65m para el análisis de condición estructural, la deflexión tiende a estabilizarse en un valor de  $47 \times 10^{-2}$  mm y  $42 \times 10^{-2}$  mm en los monitoreos a 287 días y 378 días respectivamente, lo que significa una reducción respecto a la deflexión a los 20 días del 39% y 45% respectivamente. Las reacciones puzolánicas tuvieron su mayor desarrollo en las primeras semanas de servicio de la capa de base. Si bien estas se extienden en el tiempo mientras haya iones calcio y sílice disponibles, el aumento de rigidez empieza a ser contrarrestado por el proceso de fatiga del material causado por las cargas de tránsito.

La deflexión medida en el punto de control (PC) en el monitoreo a 378 días fue mayor que los medidos en los puntos del tramo experimental. Inclusive si se compara con el punto 25m, donde la condición de los materiales es mala, la deflexión del PC fue 1,2 veces mayor. Comparada con el valor medio de los puntos 45m y 65m ésta fue 2,7 veces mayor en el PC. El pavimento experimentado es más rígido que el construido con materiales tradicionales, aunque la base de material basáltico haya sido estabilizada granulométricamente y, por lo tanto, es de esperarse un mejor desempeño estructural.

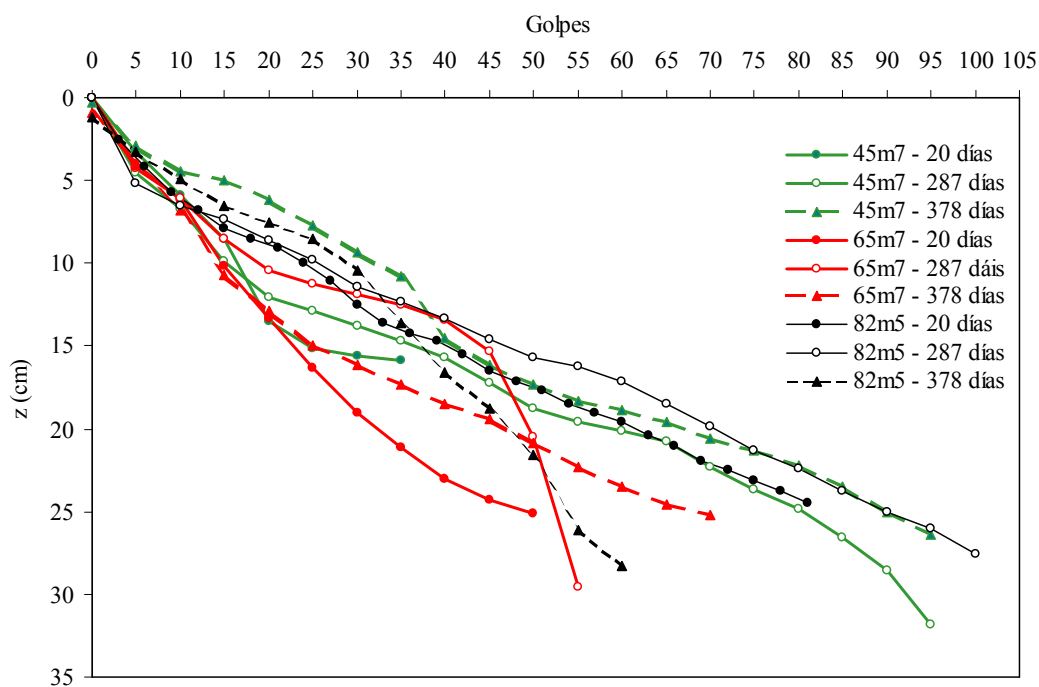


Figura 4.15. Penetración DCP en los Puntos Fijos del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión en Cada Monitoreo

En la Figura 4.15 se muestra la relación de la penetración ( $z$ ) por golpe acumulado resultante de los ensayos DCP realizados en cada punto fijo, referenciado por su progresiva en el tramo experimental, y monitoreo. Debido a que el material granular de la capa de base estudiada y el de la subrasante tienen fracciones mayores a 4,76 mm (tamiz #4) la resistencia a la penetración del cono presenta dispersiones puntuales cuando éste debe superar estas fracciones, reflejándose en la no linealidad de las relaciones en cada ensayo y en la dispersión en cada punto entre monitoreos.

Los ajustes de las curvas de relación de penetración del cono con el número de golpes para cada punto del tramo experimental y monitoreo condujo a la determinación de los valores de espesor y  $\Delta_{DCP}$  de capa de base de S-15%CBCA-5%Cal indicados en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Espesor e Índices de Penetración DCP de la Capa de Suelo Modificado con 15% de CBCA y 5% de Cal del Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

Tiempo (días)	Punto	Espesor de Capa (cm)		$\Delta_{DCP}$ (mm/golpe)	
20	45m7	15	15	5,9	5,4
	65m7	16		6,6	
	82m5	12		3,7	
287	45m7	12	13	5,9	3,9
	65m7	16		3,0	
	82m5	12		2,7	
378	45m7	17	15	3,1	3,8
	65m7	15		5,3	
	82m5	12		3,2	
			14		

El espesor medio de la capa de base construida, estimado a partir de los ensayos DCP, es de 14 cm, siendo prácticamente el diseñado (15 cm). El  $\Delta_{DCP}$  medio de los tres puntos ensayados se redujo un 29% entre el monitoreo a los 20 días y el monitoreo a los 287 días, manteniéndose estable entre este último y el monitoreo a los 378 días lo que demuestra que hubo desarrollo de cementación de la capa, particularmente en los primeros meses de servicio.

A más un año de servicio puede resumirse que la condición estructural del pavimento del tramo experimental de la calle Melo de Bella Unión es muy buena. El pavimento con capa de base de suelo modificado con 15% de CBCA y 5% de cal ha presentado un buen desempeño para un bajo volumen de tránsito, similar o mejor que el de los pavimentos tradicionalmente usados en Bella Unión.

## 5. TRAMOS EXPERIMENTALES CON CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ DE CAMINO A PIEDRA PINTADA - ARTIGAS

La experiencia con CCA fue desarrollada en la Ciudad de Artigas. Dos tramos experimentales de pavimento de 80 m de longitud cada uno con capas de revestimiento primario de material granular modificado con CCA y cal fueron construidos en el Camino a la Piedra Pintada, localizado al sudeste de Artigas (Figura 5.1) entre los días 28 y 29 de mayo de 2014; siendo el sitio seleccionado en acuerdo con la IDA.

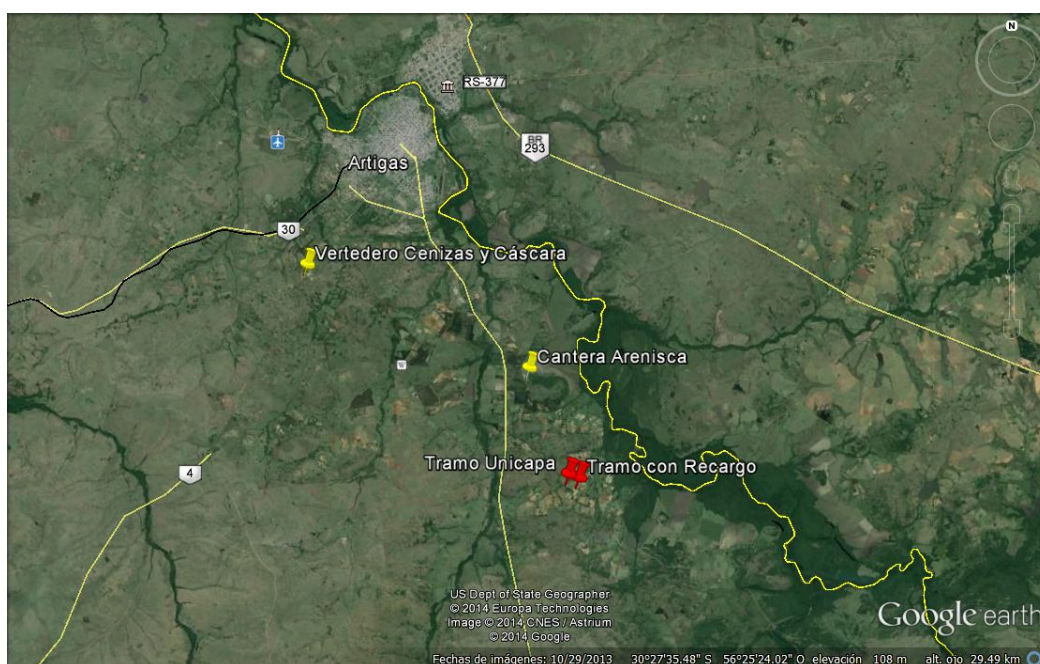


Figura 5.1. Localización de los Tramos Experimentales de Pavimento con Capa de Base de Material Granular Modificado con CCA y Cal, de la Cantera de Arenisca y del Vertedero de Cenizas de Demelfor

Como se aprecia en la Figura 5.2, el Tramo Unicapa fue implantado en un sitio inmediato a una cañada, teniendo una leve pendiente ascendente hacia el sudeste. A la salida del Tramo Unicapa, a partir de la curva, la pendiente del Camino es más acentuada, llegándose a la cresta hacia la intersección de caminos. El Tramo con Recargo se implantó en la zona de la cresta, evitando la zona de mayor pendiente, razón por la cual ambos tramos quedaron separados entre sí 280 m. Aun así, la subrasante en ambos tramos es similar: arena limosa de alteración de la arenisca de la Fm

Tacuarembó. El camino es de bajo volumen de tránsito diario, fundamentalmente de camiones de eje trasero simple y vehículos livianos.



Figura 5.2. Tramos Experimentales del Camino a la Piedra Pintada de Artigas

La CCA utilizada en los dos tramos experimentales se transportó 16,5 km y 16,8 km desde el vertedero de cenizas y cáscara de propiedad de Demelfor, situado al sudoeste de Artigas y al noroeste del sitio de la experiencia, mientras que el material granular para el Tramo con Recargo se extrajo de la Cantera de Arenisca, al norte del sitio de la experiencia y una distancia de transporte de 6 km (Figura 5.1).

### 5.1. INVESTIGACIÓN DE SITIO

Las areniscas de la Fm. Tacuarembó (Jurásico) son las rocas más antiguas y afloran en las cotas bajas y medias, próximas a los cursos de agua. Cubriendo esta formación se encuentran los basaltos de la Fm. Arapey (Cretácico) y son las rocas dominante en los alrededores de la ciudad de Artigas (Figura 5.3). En las planicies de

inundación de los arroyos y del río Cuareim se depositan arenas con cantos rodados de edad cuaternaria.

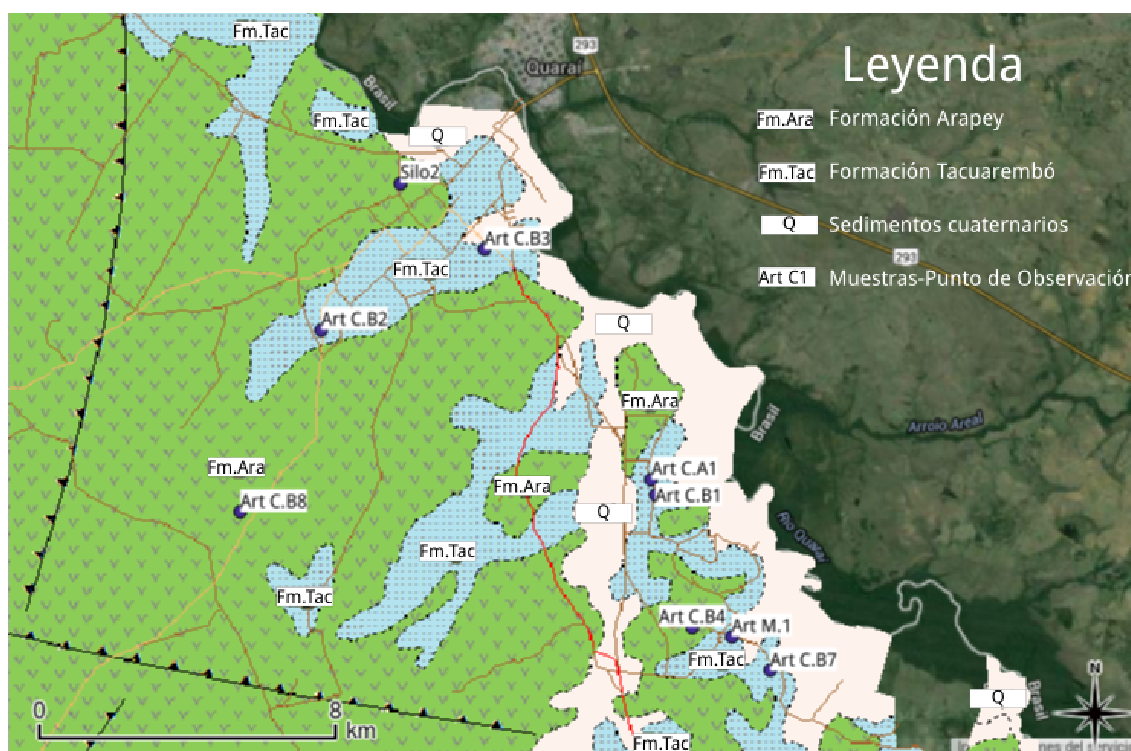


Figura 5.3. Geología y Puntos de Observación de la Zona de Artigas

En la región de Pintado hay varias fuentes potenciales de aprovisionamiento, la unidad geológica Fm. Tacuarembó cumple con los requisitos primarios de granulometría y límites de Atterberg identificadas en campo (cantera de la intendencia en la zona Art CA1), aportando arenas y areniscas de fácil excavabilidad. Está activa y próxima la zona donde se construirá el tramo.

## 5.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

### 5.2.1. Material de la Cantera de Arenisca de Fm Tacuarembó

El material de la Cantera de Arenisca de la Fm Tacuarembó seleccionado para la construcción de las capas de revestimiento primario de los tramos experimentales de Artigas fue caracterizado en laboratorio mediante análisis de distribución granulométrica, ensayos de límites de Atterberg y gravedad específica. Los resultados



se presentan en la Tabla 5.1, mientras que la distribución granulométrica se muestra en la Figura 5.4.

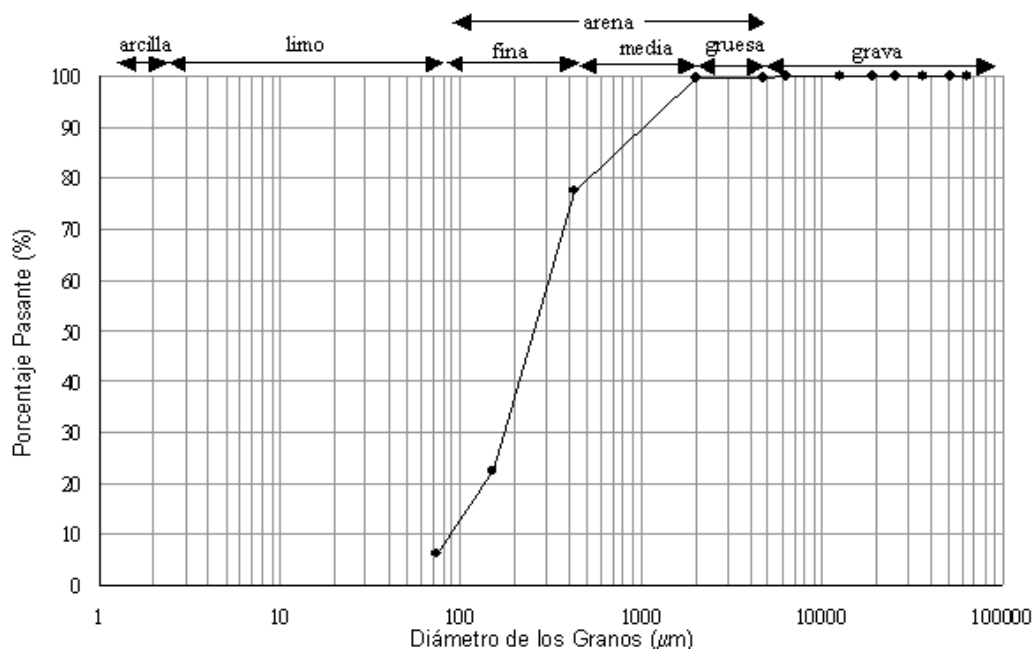


Figura 5.4. Distribución Granulométrica del Suelo de la Cantera de Arenisca de la Fm Tacuarembó

Tabla 5.1. Propiedades Físicas del Suelo de la Cantera de Arenisca de Fm Tacuarembó

Propiedad	Valor
Grava	0%
Arena	94%
Pasa Tamiz #200	6%
Límite Líquido	20%
Límite Plástico	20%
Índice de Plasticidad	NP
Clasificación SUCS	SP-SM
Clasificación AASHTO	A-3 (0)
Gravedad Específica	2,55

Se resalta que, el 72% de la fracción arena, es fina, mientras que el restante 22% restante es arena media. El suelo tiene un contenido de fracción fina (pasante por el tamiz #200) muy bajo y menor aun será el de los minerales arcillosos, por lo que no es reactivo a la cal. Por este motivo, la adición de ceniza es una buena alternativa para estabilizarlo, razón por la cual fue finalmente seleccionado para la experiencia.

El suelo puede identificarse según el sistema SUCS como una arena limosa mal graduada (SP-SM), mientras que utilizando la clasificación AASHTO, el material se ubica en el grupo A-3, es decir, se trata de una arena fina.

### 5.2.2. Ceniza de Cáscara de Arroz

La cáscara de arroz es utilizada en el molino Demelfor de Artigas como combustible de las calderas para el secado del arroz. La quema se hace sin control de temperatura y tiempo, así como también el enfriamiento de la CCA residual. Como resultado la CCA tiene una estructura foliada de color negro, con restos de cáscara de arroz no quemada; clasificándose según el criterio de Houston (1972) como una ceniza con alto contenido de carbón. El color oscuro del material es característico de combustión incompleta (Cordeiro et al., 2008).

A partir de ensayos por pérdida en la ignición a 550°C durante 3 h, se determinó que el medio de orgánico es del 39% (Tabla 5.2). El contenido de orgánico relativamente alto está influido por el contenido de cáscara de arroz no quemada en las muestras ensayadas.

Tabla 5.2. Pérdidas de Orgánico por Ignición de la CCA de Demelfor

Muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Pérdida Ignición (%)
1	550	3	39,7
2			37,7
3			39,0
4			39,0
Valor Medio			38,8
Desv. Std.			0,84
CV			0,2

El alto contenido de orgánico, sumado a que como resultado del tipo de quema la sílice tendría una estructura en parte cristalina y en parte amorfa permiten concluir que la CCA de Demelfor es de baja reactividad alcalina.

### 5.3. DISEÑO

#### 5.3.1. Material Suelo-Ceniza de Cáscara de Arroz-Cal

Probetas cilíndricas de 3,72 cm de diámetro y 7,65 cm de altura de suelo, suelo-cal y suelo-CCA-cal fueron ensayadas a RCI en la prensa triaxial. Las probetas de suelo fueron compactadas con HOC de 5,5% para alcanzar el PUSM de 18,0 kN/m<sup>3</sup>, las de suelo-cal con HOC de 9,0% para alcanzar un PUSM de 18,7 kN/m<sup>3</sup>, mientras que las de suelo-CCA-cal lo fueron con HOC de 12,5% para obtener un PUSM de 11,8 kN/m<sup>3</sup>.

La Tabla 5.3 resume los valores de RCI a los 28 días de cura a temperatura ambiente de las probetas de suelo-cal y suelo-CCA-cal ensayadas siguiendo el Método de Thompson (1966), junto con el PUS y la humedad (w) correspondientes. También se presentan las RCI de las probetas de suelo sin tratar y ensayadas inmediatamente después de compactadas.

Tabla 5.3. Resistencia a la Compresión Inconfinada de las Probetas de Suelo y Suelo Modificado con CCA y Cal con 28 días

Material	Cal (%)	Ceniza (%)	PUS (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	RCI (kPa)	RCI (kPa)
Suelo	0	0	18,5	6,3	5	2,5
S-15%CCA-3%Cal	3	15	14,0	13,6	65	65
S-20%CCA-3%Cal		20	13,2	13,2	84	68
			13,0	13,9	52	
			13,3	13,7	118	
S-25%CCA-3%Cal		25	12,6	13,0	95	84
			12,3	13,7	72	
	13,0		13,2	155		
S-15%CCA-5%Cal	5	15	13,9	13,5	98	92
14,1			13,2	86		
S-20%CCA-5%Cal		20	13,4	13,1	82	82
S-25%CCA-5%Cal			25	12,3	14,0	60
		12,7		13,6	90	

La RCI aumenta con el contenido de CCA, siendo más significativo el aumento para las probetas con 3% de cal, como puede observarse en la Figura 5.5 donde se presenta su evolución en función del contenido de CCA para cada contenido de cal. El punto en el origen representa la RCI del suelo sin tratar. Por ejemplo, para un 15% de

CCA la RCI aumentó respecto a la del suelo sin tratar 11,8 veces cuando se añadió un 3% de cal mientras que lo hizo 1,4 veces cuando se añadió un 2% de cal más (5%). La RCI alcanzó un máximo para las probetas con 5% de cal, correspondiendo a un 15% de CCA aproximadamente. Mientras, para las probetas con 3% de cal la RCI continuó aumentando hasta el máximo de CCA estudiado (25%), siendo que el valor para este caso fue prácticamente igual a los correspondientes al suelo tratado con 15%, 20% y 25% de CCA y 5% de cal.

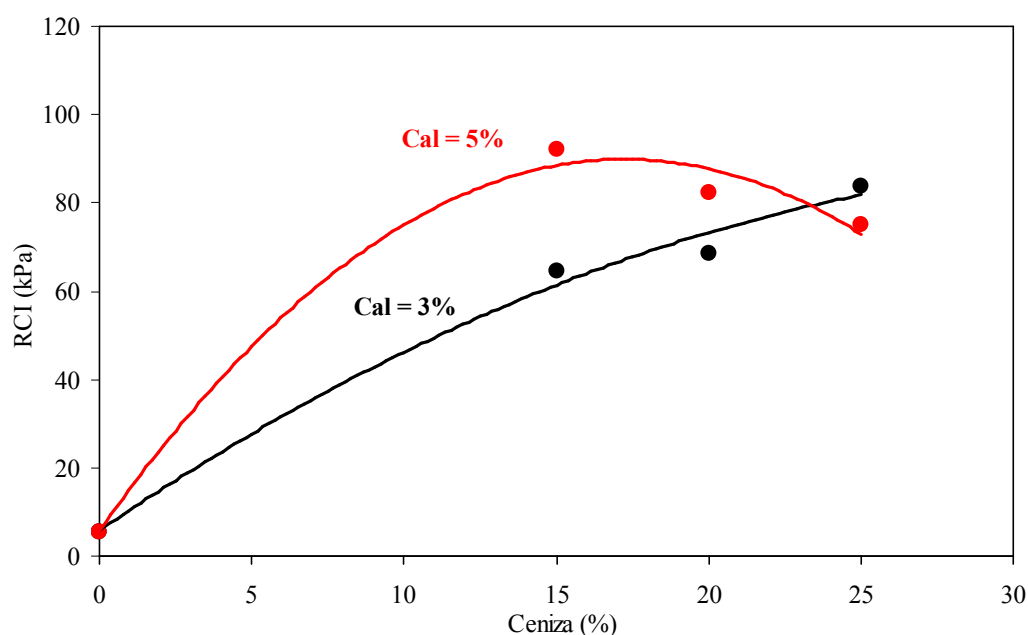


Figura 5.5. Evolución de la Resistencia a la Compresión Inconfinada en Función del Contenido de CCA para Cada Contenido de Cal

A igual contenido de CCA, se verifica un aumento de resistencia con el contenido de cal, debido a que parte de ésta reacciona con los minerales arcillosos de la arena limosa de la Cantera de Arenisca a pesar de que su contenido de finos (pasante por el tamiz #200) es muy bajo (6%).

En ninguno de los casos estudiados se alcanzó el valor de 345 kPa establecido por el Método de Thompson para considerar estabilizado al suelo. Como se ve, esto no significa que no haya aumento de resistencia sino que la misma no es significativa por lo que puede considerarse que la adición de CCA y cal modifica al suelo de la Cantera de Arenisca antes que estabilizarlo. El suelo es un material arenoso por lo que su

resistencia al corte depende de la tensión de confinamiento. Esto explica su baja RCI y al ser modificado con CCA y cal su comportamiento mecánico será similar, dependiente de la compresión de confinamiento, resultando que su RCI sea relativamente baja. Siendo así, se adoptó como criterio considerar como mezcla de diseño óptimo aquella que produjo la máxima RCI con mínimo contenido de cal por ser un producto comercial; correspondiendo para el caso a una mezcla de material granular de Cantera de Arenisca con 25% de CBCA y 3% de cal.

### 5.3.2. Parámetros de Compactación

La Figura 5.6 muestra la relación PUS-humedad resultante de los ensayos Proctor modificado realizados al suelo de la Cantera de Arenisca y al suelo modificado con 20% de CCA y 5% de cal (S-20%CCA-5%Cal) para determinar los parámetros de compactación de las probetas a ensayar a RCI para el diseño del material óptimo.

Una apreciable caída de PUS se observa en el material de suelo modificado respecto al suelo sin tratar, incluso para iguales humedades de compactación. La CCA y la cal tienen una gravedad específica mucho menor que la del suelo, resultando que la mezcla de aquéllas con esta resulta en un material de menor gravedad específica que la del suelo y, por tanto de menor PUS. Igualmente el PUSM de las mezclas es menor que el PUSM del material granular.

La curva de compactación del suelo es del tipo sin forma, típica de este tipo de material arenoso mal graduado con finos limosos no plásticos. Si bien la CCA y la cal son materiales finos, también son no plásticos por lo que su mezclado con la arena limosa de la Cantera de Arenisca, como era de esperar, presentó una curva de compactación sin forma. Para el caso particular, parte de la cal reacciona con los minerales arcillosos de la fracción, similar a la del suelo sin tratar.

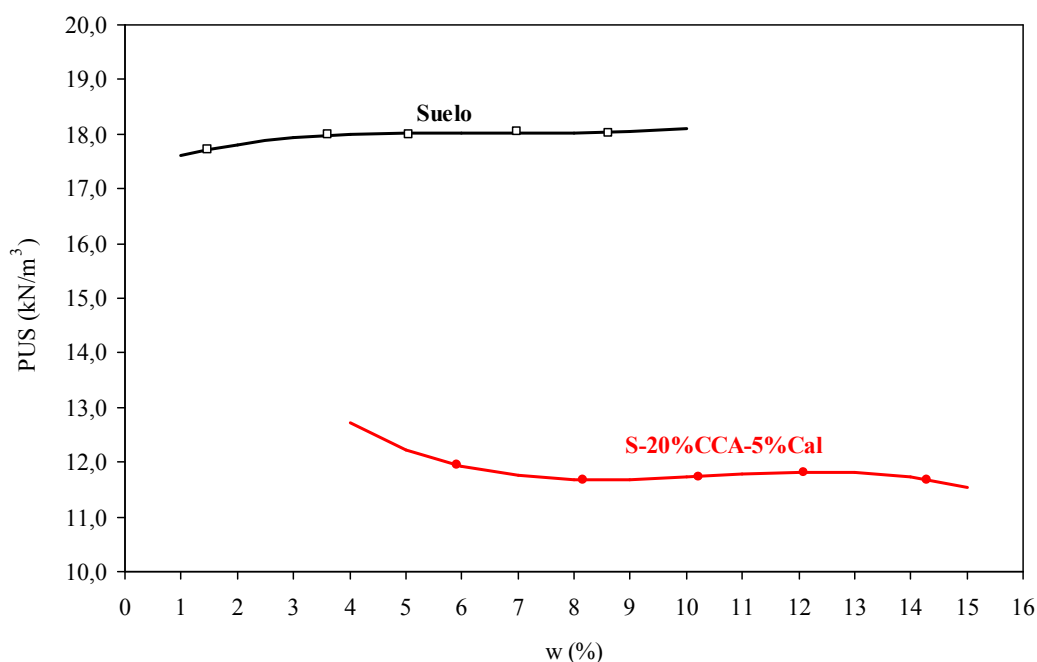


Figura 5.6. Relación PUS-Humedad Resultantes de los Ensayos Proctor Modificado del Suelo de la Cantera de Arenisca y del Suelo Modificado con 20% de CCA y 5% de Cal

Las curvas sin forma son indicativas de que la energía de impacto del Proctor no es eficiente para compactar el material, siendo aconsejable la compactación por el sistema de vibrado. Por tanto, el material de suelo modificado con 15% de CCA y 3% de cal diseñado para la capa de base a construirse en los tramos experimentales del Camino a la Piedra Pintada Unión debería compactarse con rodillo liso vibrador.

La determinación de la HOC en materiales con curvas de compactación sin forma es dificultosa, considerándose para los casos estudiados aquella humedad correspondiente a algún punto de la curva de máximo PUS, que a su vez será considerado como el PUSM. Trabajando de esa manera se observa que la HOC de la mezcla es mayor que la del material granular. Esto se debe a que, por un lado, parte del agua añadida es absorbida por la hidratación de la cal necesaria para las reacciones alcalinas. Por el otro lado, por la alta capacidad de absorción de agua de las cenizas.

Siendo de esperar poca variación en su PUSM y HOC respecto al suelo modificado con 20% de CCA y 5% de cal, fueron adoptados como parámetros óptimos de compactación del material a construir en los tramos experimentales del Camino a la

Piedra Pintada los obtenidos en la mezcla usada en laboratorio, tal como se resume en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Parámetros Óptimos de Compactación del Material de Suelo Modificado con CCA y Cal Diseñado para los Tramos Experimentales del Camino a la Piedra Pintada

Material	PUSM (kN/m <sup>3</sup> )	HOC (%)
<b>S-25%CCA-3%Cal</b>	<b>12,0</b>	<b>12,5</b>
Suelo Arenoso Limoso	18,0	5,5
S-20%CCA-5%Cal	11,8	12,5

### 5.3.3. Estructura de Pavimentos

El pavimento del Camino a la Piedra Pintada en el sitio de implantación de la experiencia estaba conformado originalmente por una capa de revestimiento primario de suelo de Fm Tacuarembó, similar al a utilizar como material granular para las capas de base a construir, sobre una subrasante de suelo de Fm Tacuarembó (Figura 5.7). Se proyectó la construcción de dos tramos experimentales, uno llamado Unicapa y otro llamado con Capa de Recargo con las características particulares descritas a continuación.



Figura 5.7. Pavimento del Camino a la Piedra Pintada Original en el Sitio de Implantación de los Tramos Experimentales

### 5.3.3.1. Tramo Unicapa

Dado que el material de la capa de revestimiento primario y el suelo de la subrasante existentes en el Camino a la Piedra Pintada eran similares al de la Cantera de Arenisca, se proyectó reconformar una capa de revestimiento primario de 15 cm de espesor mediante mezcla del material granular ocurrente con 25% de CCA de Demelfor y 3% de cal comercial.

De esta forma, el pavimento del tramo experimental quedaría conformado por una única capa de revestimiento primario sobre la subrasante de suelo arenoso limoso de Fm Tacuarembó, es decir un pavimento de una sola capa (Unicapa), tal como se esquematiza en la Figura 5.8. Para reducir la emisión de polvo se previó la colocación sobre la capa de revestimiento primario de una capa delgada (1" a 2" de espesor) de cobertura funcional de material basáltico.

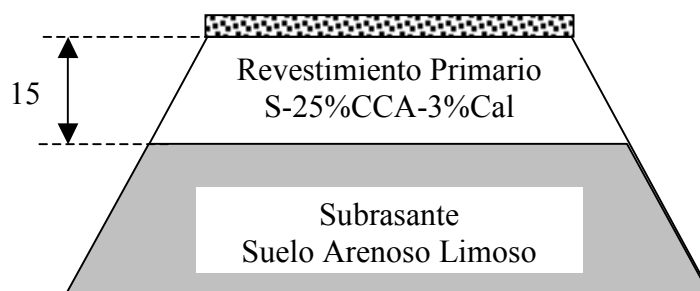


Figura 5.8. Pavimento del Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada

### 5.3.3.2. Tramo con Capa de Recargo

En este tramo se proyectó construir sobre el pavimento existente una capa de revestimiento primario de recargo de 15 cm de espesor de material granular de la Cantera de Arenisca modificado con 25% de CCA de Demelfor y 3% de cal comercial, quedando el pavimento como se esquematiza en la Figura 5.9. Al igual que en el Tramo Unicapa, se previó la colocación de una capa delgada (1" a 2" de espesor) de cobertura funcional de material basáltico para reducir la emisión de polvo.



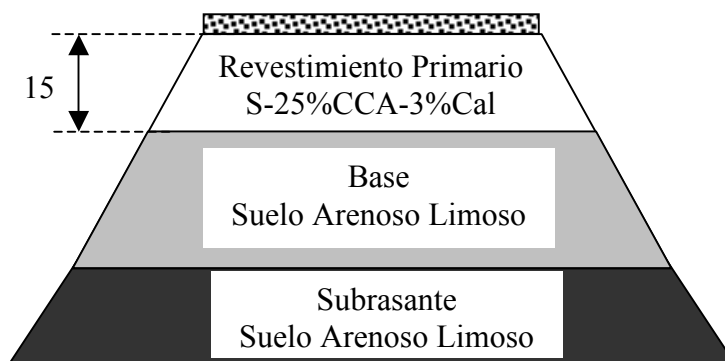


Figura 5.9. Pavimento del Tramo Experimental con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada

#### 5.4. CONSTRUCCIÓN DE TRAMOS EXPERIMENTALES

##### 5.4.1. Tramo Unicapa

Este tramo fue construido entre el 28 y 29 de mayo de 2014. Las particularidades del procedimiento de su construcción se describen a continuación y se ilustran en la Figura 5.10.

Sobre la capa de revestimiento primario de suelo arenoso limoso existente se tendió con motoniveladora la CCA (Figura 5.10A). Luego, se distribuyeron las bolsas de 25 kg de cal (Figura 5.10B), fueron manualmente rotas y la cal tendida con motoniveladora (Figura 5.10C). La capa de revestimiento primario, con la CCA y la cal tendida encima, fue escarificada con motoniveladora, iniciando la etapa de mezclado que se continuó con sucesivas pasadas de motoniveladora (Figura 5.10D). Finalmente la capa fue compactada con rodillo liso vibrador sin adición de agua, ya que se consideró que el material granular y la CCA tenían la suficiente humedad (Figura 5.10E).



Figura 5.10. Etapas de Construcción del Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada

La Figura 5.11 muestra la condición final de obra del tramo experimental unicapa del Camino a la Piedra Pintada, donde se observa el ahuellamiento formado por el paso de las máquinas de construcción debido a que el material construido es muy deformable (de baja rigidez) antes de que se desarrollen las reacciones cementantes.



Figura 5.11. Condición del Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada al Finalizar la Obra de Construcción

Los ensayos de control de obra fueron realizados inmediatamente finalizada la obra de construcción del tramo experimental. Ensayos de densidad in situ por el método del cono de arena fueron realizados en 3 puntos del tramo experimental, identificados por un sistema de progresiva con 0m en su extremo noroeste. Los resultados son presentados en la Tabla 5.5 donde se presenta el grado de compactación (GC) alcanzado respecto al PUSM del ensayo Proctor modificado.

Tabla 5.5. Resultados de los Ensayos de Densidad in Situ por el Método del Cono de Arena Realizados en el Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada

Punto	PUS (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	GC (%)
20m	12,7	12,0	108
40m	13,1	15,2	111
60m	12,9	15,5	109

Los GC alcanzados en los tres puntos de medición son superiores al 100%, esto es el PUS de la capa de suelo modificada con CCA y cal es superior en todo el tramo al PUSM del Proctor modificado. Esto, a pesar de que la humedad de compactación en campo fue superior a la HOC del Proctor modificado (12,5%) en los puntos 40m y 60m e inferior en el punto 20m.

#### 5.4.2. Tramo con Capa de Recargo

Este tramo fue construido entre el 29 de mayo de 2014. Las particularidades del procedimiento de su construcción se describen a continuación y se ilustran en la Figura 5.12.



Figura 5.12. Etapas de Construcción del Tramo Experimental con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada

Sobre el pavimento existente fueron colocados y tendidos con motoniveladora sucesivamente el material granular (Figura 5.12A), la CCA (Figura 5.12B) y la cal (Figura 5.12c). Luego se ejecutó el mezclado de los tres materiales con sucesivas pasadas de motoniveladora (Figura 5.12D). Finalmente la capa fue compactada con rodillo liso vibrador sin adición de agua, ya que se consideró que el material granular y la CCA tenían la suficiente humedad (Figura 5.12E).

La condición del pavimento del tramo experimental con capa de recargo del Camino a la Piedra Pintada al finalizar la obra se presenta en la Figura 5.13. Se llega a apreciar el ahuellamiento formado por los neumáticos traseros del equipo compactador, lo que indica que el material construido es muy deformable (de baja rigidez) antes del desarrollo de las reacciones cementantes.



Figura 5.13. Condición del Tramo Experimental con Capa de Recargo del Camino a la Piedra Pintada al Finalizar la Obra de Construcción

Los ensayos de control de obra fueron realizados el 9 de octubre de 2014, esto es 102 días después de finalizada la construcción, por lo que la humedad medida no correspondía a la de compactación. Ésta fue verificada mediante ensayo de laboratorio de una muestra compuesta de una selección de diferentes puntos del tramo. Los ensayos de densidad in situ por el método del cono de arena se realizaron en 3 puntos del tramo

experimental, identificados por un sistema de progresiva con 0,0m en su extremo noroeste. Los resultados son presentados en la Tabla 5.6, donde se incluye la humedad de compactación medida en la muestra seleccionada y el grado de compactación (GC) respecto al PUSM del ensayo Proctor modificado.

Tabla 5.6. Resultados de los Ensayos de Densidad in Situ por el Método del Cono de Arena Realizados en el Tramo Experimental de la Calle Melo de Bella Unión

Punto	PUS (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	GC (%)
Muestra		18,9	
20m	14,4	15,6	122
40m	14,8	15,5	125
60m	14,4	15,8	122

Los GC alcanzados en los tres puntos de medición son superiores al 100%, esto es el PUS de la capa de suelo modificada con CCA y cal es superior en todo el tramo al PUSM del Proctor modificado. Esto, a pesar de que la humedad de compactación en campo fue superior a la HOC del Proctor modificado (12,5%).

### 5.5. DESEMPEÑO DE PAVIMENTOS

Tres monitoreos de condición funcional y estructural se realizaron en los tramos experimentales del Camino a la Piedra Pintada en su primer año de vida, siendo las fechas y el tiempo respecto a la construcción indicados en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Monitoreos de los Tramos Experimentales del Camino a la Piedra Pintada

Fecha	Tiempo (días)
30/05/2014	1
10/09/2014	104
10/12/2014	195

### 5.5.1. Condición Funcional

#### 5.5.1.1. Tramo Unicapa

La condición funcional del Tramo Unicapa ni bien finalizada su construcción (0 día) y en el monitoreo a 104 días se muestra en la Figura 5.14. Las imágenes una vez finalizada la construcción del tramo fueron tomadas antes de la colocación de la capa de cobertura de material granular grueso, siendo la explicación de la variación de las tonalidades de la superficie de la capa entre los dos monitoreos.



Figura 5.14. Condición Funcional del Tramo Experimental Unicapa del Camino a la Piedra Pintada Inmediatamente Después y a 104 Días de su Construcción

El tramo fue liberado al tránsito una vez finalizada la obra, verificándose ahuellamiento apreciable con el tránsito a lo largo de éste y en las dos sendas. Antes de desarrollarse las reacciones alcalinas el material de suelo modificado con 25% de CCA y 3% de cal es muy deformable (baja rigidez).

También se observó emisión de polvo del material de la capa de revestimiento primario construido con el tránsito vehicular, antes de la colocación de la capa delgada de cobertura de materia granular grueso. La magnitud del polvo emitido era tal que se invisibilizaba el camino y los vehículos, afectando severamente la seguridad del tránsito y el medio ambiente por lo que fue clasificado como de muy alto riesgo; justificando aun más la necesidad de la colocación de la capa de cobertura funcional proyectada.

A los 104 días no se observa el ahuellamiento marcado al liberarse el tramo al tránsito, debido a la compactación realizada al colocar la capa delgada de cobertura. Este monitoreo se realizó bajo una intensa lluvia, por lo que se pudo realizar una evaluación funcional en condiciones húmedas. En estas condiciones se observó durante las pruebas de carga con Viga Benkelman que los neumáticos del camión marcaban la capa superficial del pavimento pero sin deformación apreciable, tal como se observa en la Figura 5.15. Esas marcas, que se mantienen cuando la superficie se seca, sumado a la pérdida incipiente de material por abrasión del tránsito son las que se observan en la Figura 5.15.



Figura 5.15. Marcas Dejadas por el Neumático del Camión en la Superficie del Pavimento en Condiciones Húmedas.

Entre el primer y segundo monitoreo hubo formación de baches aislados a lo largo de todo el tramo, en ambas sendas y en el eje central de la calzada. La emisión de polvo en seco se redujo notablemente con la colocación de la capa delgada de cobertura,