

Estudio del comportamiento del residuo de la perlita expandida (RPE) en la estabilización de suelos

Ing. Sebastián Chanta¹ y Mg. Ing. Silvia Beatriz Palazzi²

*(1) Laboratorio de Vías de Comunicación. Departamento de Construcciones y Obras Civiles.
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán (UNT)
inqchanta@yahoo.com.ar - Teléfono: +54381 4364093 Int. 7776*

*(2) Laboratorio de Ensayo de Materiales. Departamento de Construcciones y Obras Civiles.
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología. Universidad Nacional de Tucumán (UNT)
spalazzi@herrera.unt.edu.ar - Teléfono: +54381 4364093 Int. 7783*

Avda. Independencia 1800 – (4000) San Miguel de Tucumán – Tucumán – Argentina

Estudio del comportamiento del residuo de la perlita expandida (RPE) en la estabilización de suelos

RESUMEN

La tendencia actual en las construcciones viales apunta fundamentalmente al cuidado del medio ambiente y al desarrollo sostenible de la energía y los materiales utilizados, reduciendo los impactos ambientales. Considera necesario para la competitividad de los proyectos viales, la necesidad de usar no sólo la mayor cantidad de materiales adyacentes a la traza del camino sino también reutilizar los residuos susceptibles de ser empleados. El presente trabajo estudia la forma de aprovechar la naturaleza puzolánica del residuo de una industria local, procedente de la fabricación de perlita expandida (RPE). Intentando asemejar al cemento romano, se considera combinar distintas cantidades de este RPE con cal hidratada dosificada en “cal útil vial” (C.U.V.) buscando producir los compuestos principales o activos del cemento Pórtland y a partir de ahí estudiar la factibilidad de su utilización como agente estabilizante de suelos. Se adopta un suelo representativo de la provincia de Tucumán, y sobre el mismo se combinan seis distintas mezclas de RPE y C.U.V.. Comparativamente se estudia el comportamiento del mismo suelo en estabilizaciones convencionales de suelo-cal y suelo-cemento consideradas como patrones. Se evalúan las resistencias a compresión simple y tracción indirecta para distintas edades (24 horas, 7, 28 y 90 días). Para completar la caracterización mecánica de los estabilizados se determina la Rigidez E para edades (28 y 90 días), a través del ensayo de tracción por compresión diametral con carga pulsante.

Los estudios comprueban que a 28 días la Rigidez E de la mezcla (suelo+7,1% C.U.V.+9,7% RPE) supera a la del patrón (suelo+10% cemento) en un 5%, incrementando la diferencia a 90 días hasta un 17%. El trabajo permite caracterizar este nuevo estabilizado según criterios modernos de diseño, e incorporar valor agregado al residuo para convertirlo en una solución sostenible en la construcción de caminos con una visión técnica y ambientalmente saludable.

1. INTRODUCCION

En la construcción moderna de caminos, el ingeniero vial busca utilizar al máximo los materiales disponibles en la zona, teniendo como premisa fundamental minimizar y compensar en lo posible el movimiento de suelos y agregados de acuerdo a evaluaciones de tipo técnicas, económicas y ambientales. Sin embargo las condiciones que rigen dichas consideraciones desmejoran continuamente debido principalmente al agotamiento progresivo de canteras, la necesidad creciente de materias primas, los altos costos de transporte de los materiales, y los sostenidos problemas ambientales originados por las distintas industrias y sus residuos, muchos de los cuales pueden ser reciclados o reutilizados. En este contexto la estabilización o corrección de suelos ha favorecido notoriamente a ese propósito al mejorar las propiedades de los mismos y hacerlos aptos para el uso vial. Esta experiencia en particular pretende contribuir al cuidado ambiental, además de los beneficios económicos potenciales.

Al ser el material con que se trabaja un residuo de la industria su utilización como agente estabilizante resulta doblemente beneficiosa al medio ambiente: por un lado, al captar propiamente el residuo y por el otro, al obtener a partir del mismo un compuesto de naturaleza cementicia y favorecer la disminución del uso del cemento Pórtland (la industria cementera genera 1 tonelada de dióxido de carbono por cada tonelada de clinker que produce, una cifra impactante si se tiene en cuenta la producción anual global de clinker). Paralelamente este tratamiento permitiría incorporar un volumen mayor de suelo en la estructura del camino y potenciar la premisa de aprovechamiento de materiales locales.

Para reutilizar este RPE se deben estudiar minuciosamente sus propiedades, e idear las acciones necesarias para hacer posible su admisión a la obra, de manera apropiada, segura y durable.

En esta misma línea se pueden mencionar los variados usos y empleos que se dan actualmente a distintos residuos: de materiales urbanos, industriales⁽¹⁾, de construcción y demolición (RCDs)⁽²⁾, etc. empleados en la construcción de carreteras previo tratamiento específico en cada caso, a fin de llegar a incluirlos en capas de firmes.

El RPE no es un conglomerante hidráulico, pero contiene un porcentaje importante de sílice y alúmina, dichos minerales amorfos o débilmente cristalizados constituyen la denominada "fracción puzolánica" capaz de reaccionar con cal en presencia de agua para formar compuestos cementicios. Asemajando al cemento romano, la idea del presente trabajo es combinar distintas cantidades de este RPE con hidróxido de calcio dosificado en términos de cal útil vial (C.U.V.) buscando producir los compuestos principales o activos del cemento Pórtland, y estudiar la factibilidad de su utilización como agente estabilizante de suelos de manera similar a las estabilizaciones químicas convencionales. De esta forma, con el suelo patrón adoptado, A-4 (8) constituir un estabilizado de características "semejantes" a las de un suelo-cemento empleando, por un lado la cal, material de relativo bajo costo, y mucho menos contaminante durante su fabricación que el cemento Pórtland debido a instalaciones más pequeñas y menor temperatura de cocción y por el otro, un desecho abundante, químicamente inerte, incombustible, imputrescible y atóxico, que se genera en altos volúmenes.

Actualmente, la disposición final de este residuo es ser utilizado para relleno de canteras, con las dificultades y riesgos propios que acarrea su gran volumen durante el traslado.

De la composición e importancia de la "fracción puzolánica" y su adecuada proporcionalidad con la cal depende el grado de cementación alcanzado en la mezclas. Esta cementación influye sobremanera en la resistencia que ganaran las mismas, medible mediante ensayos sencillos como la resistencia a la compresión simple o tracción indirecta, o por ensayos más complejos como la determinación de la Rigidez E a través del ensayo de tracción por compresión diametral con carga pulsante. El análisis de estas resistencias para las distintas dosificaciones permite determinar la combinación óptima de RPE y C.U.V. que produce el mayor efecto cementante en el suelo. Luego, como en cualquier otra estabilización, el volumen del mismo a combinar con el suelo debe estimarse en función de evaluaciones técnico-económicas acordes a las necesidades y variables del proyecto.

2. MATERIALES

2.1 Residuo de perlita expandida (RPE): Adición mineral puzolánico

El residuo utilizado como adición para este trabajo procede de la industria de la fabricación de perlita expandida. La perlita es una roca volcánica silícea de origen natural, de naturaleza vítrea y estructura globular, que tiene un alto contenido de agua ocluida en su molécula. En el noroeste de la Argentina se encuentran varios yacimientos de este mineral. En este estudio se utiliza material procedente de San Antonio de los Cobres (Salta). El mismo es explotado mediante minado a cielo abierto, luego molido y clasificado para su transporte a las plantas de expansión de la provincia de Tucumán. Este mineral tiene la propiedad de expandirse hasta veinte veces su volumen cuando se lo calienta lo suficiente. En este proceso, en hornos a 950°C, el agua ocluida se transforma en vapor y obra como expandente, hasta constituir un grano muy ligero, de muy baja densidad, entre 50 y 200 kg/m³, de ello que resulta un excelente aislante térmico y acústico.

En la

Fig. 1 se muestra al mineral en sus diferentes etapas de producción.



Fig. 1: Mineral Perlita en diferentes etapas del proceso de expansión

La Empresa proveedora del residuo fabrica principalmente tres líneas de productos:

1. La línea principal, por ser la que más produce, es la de auxiliar filtrante, para las industrias alimenticia, aceiteras, de encimas, de antibióticos, de jugos, vitivinícolas, etc. Debe tener los mayores controles al estar en contacto con alimentos. Este producto se obtiene de una línea mineral denominada PAVA 20-100 u otra llamada GACELA 20-100 (pasa tamiz 20-retenido tamiz 100), que vienen triturados y tamizados en ese tamaño del yacimiento de San Antonio de los Cobres. Luego de expandido pasa por un molino de trituración y finalmente por separadores a presión. Su densidad seca ronda los 200 kg/m³. Se lo vende por peso, en bolsas de papel. En esta línea no se permite más del 1% de perlita sin expandir.

2- La línea perlita agrícola y perlita para la construcción: agregado livianos para losa, rellenos, revoques, proviene del mineral PAVA 6-12 (pasa tamiz 6-retenido tamiz 12) es más grueso, al expandirse queda como pochoclo, no se usa luego molino de trituración porque se desea un mayor tamaño, su densidad seca es de 125 kg/m^3 , se vende por volumen en bolsas de polipropileno.

3- La línea perlita aislante-térmico, procede de un mineral situado a unos km del yacimiento principal de San Antonio de los Cobres, denominado TINA 20-100 (pasa tamiz 20-retenido 100). Al mismo se le realiza un precalentamiento a 200°C , luego se expande a 870°C aproximadamente para obtener un producto intermedio llamado perlita criogénica, que se utiliza como aislante en tanques de Oxígeno, Nitrógeno, etc. que trabajan a temperaturas inferiores a los -100°C . Su densidad seca es de $45\text{-}60 \text{ kg/m}^3$. De este mismo producto se pueden obtener también los aislantes térmicos para cañerías, utilizando como aglutinante un binder (solución de silicato de sodio) y luego prensado de acuerdo al diámetro deseado.

Los residuos que interesaron como adición mineral activa son los dos que se producen fundamentalmente en la línea principal:

a) Uno muy fino (talco muy pulverulento, blanco), este material procede de los filtros de manga de cada línea de producción, y corresponde a partículas extremadamente finas y volátiles, de muy baja densidad, siendo la línea que más produce en cantidad la de auxiliar filtrante. Anteriormente llamado filler, este residuo actualmente se comercializa en la industria textil para desteñir jeans (debido a su poder abrasivo) bajo el nombre **CF100** (tiene densidad en estado suelto que ronda los 100 kg/m^3) y del cual se producen en temporada alta en el orden de 20 Tn/mes. No obstante hay meses en los cuales se cubren los requerimientos de las fábricas de jeans y deben disponerlo finalmente para relleno de canteras (Figura 2).

b) Un material más grueso (del tamaño de una arena fina con algo de polvo, color grisáceo) que proviene de la fabricación del auxiliar filtrante denominado scrap fino de auxiliar filtrante identificado internamente como **P450** (porque su densidad suelta oscila de 400 a 500 kg/m^3) que corresponde a una fracción de partículas que no han sido expandidas en su totalidad debido a alguna falla o impureza y que en temporada alta se producen en el orden de 100 Tn/mes. La disposición final de este residuo es solo relleno de canteras (Figura 3).



Fig. 2: RPE fino CF100

Fig. 3: RPE grueso P450

Los ensayos preliminares se realizaron con el residuo CF100, originariamente más problemático por su fineza y volatilidad. Luego debido a su aprovechamiento en la industria textil, la empresa deja de considerarlo excedente y suministra el residuo P450 como sobrante, usado finalmente para los ensayos definitivos. Si bien este cambio significa para el proyecto una mengua en función de la actividad puzolánica esperada debido a la menor superficie específica del nuevo residuo, es favorable desde el punto de vista constructivo por la simplificación del mezclado en obra, a diferencia del anterior desecho muy pulverulento y complejo de manipular.

2.1.1 Caracterización del Residuo de Perlita Expandida

Para la caracterización del RPE se realizaron ensayos de microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, granulometría, composición química y densidad absoluta. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 4 corresponde a imágenes tomadas con microscopio electrónico de barrido. En la imagen izquierda se aprecian partículas que no han sido expandidas en su totalidad. La imagen restante muestra en detalle la estructura celular de una partícula expandida, explicando la muy baja densidad del material. Durante el análisis del residuo con un microscopio electrónico de barrido también se miden las dimensiones de las partículas de mayor y menor tamaño (Figura 5), entre 3,88 mm y 0,3 mm respectivamente. (Este ensayo se realizó en el LAMENOA – UNT).

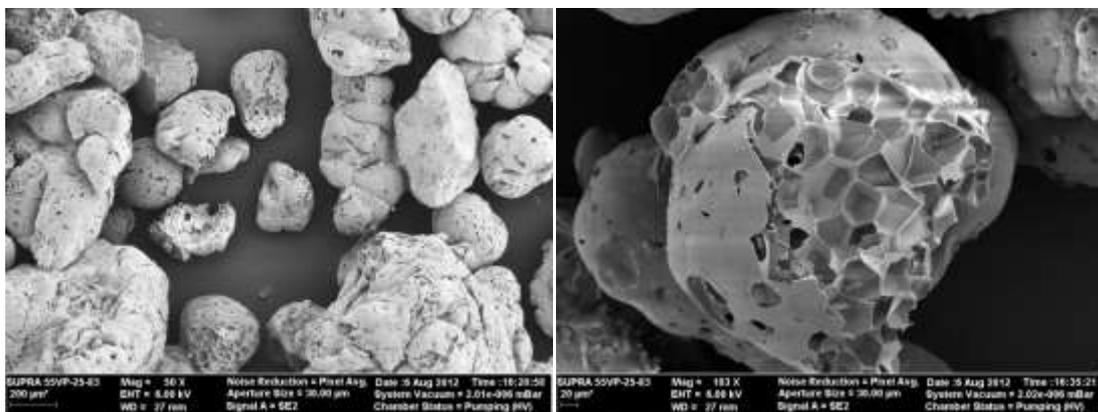


Fig. 4: Imágenes de microscopio electrónico de barrido sobre partículas de RPE

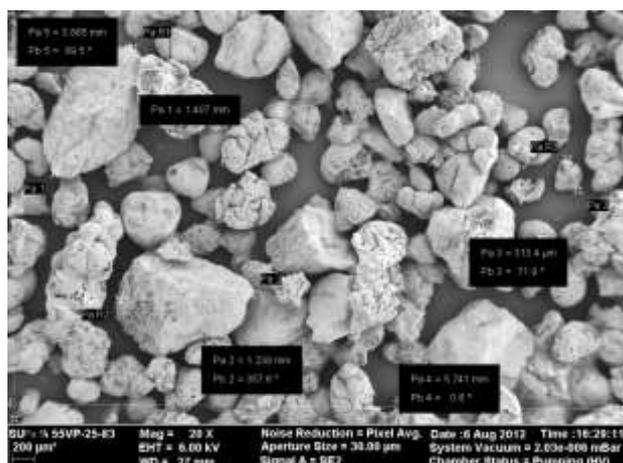


Fig. 51: RPE en microscopio con dimensiones de partículas

Se determina el peso específico, promedio de 6 muestras, igual a $1,86 \text{ kg/dm}^3$ con una desviación muestral de $0,046 \text{ kg/dm}^3$. La empresa proveedora del residuo suministra los análisis químico y físico que se aprecian en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Tabla 2.

Tabla 1: Análisis Químico del RPE

ELEMENTO	PORCENTAJE
SiO ₂	77,81 %
Al ₂ O ₃	14,58 %
Fe ₂ O	0,27 %
TiO ₂	<0,01 %
P ₂ O ₅	0,03 %
MnO	0,05 %
CaO	0,76 %
MgO	0,06 %
Na ₂ O	0,53 %
Ka ₂ O	4,67 %
SO ₃	<0,01 %

Tabla 2: Granulometría del RPE

TAMIZ	RETENIDO gr	RETENIDO %
# 16	0,0165	0,06
# 32	2,8520	10,13
# 60	6,1915	21,98
# 100	10,5385	37,42
# 250	6,8665	24,38
Fondo	1,7	6,04

Para profundizar el conocimiento del residuo industrial se encargó el análisis de una muestra al Laboratorio de Sedimentología de la Fundación Miguel Lillo, en San Miguel de Tucumán.

Los exámenes se realizaron mediante difracción de rayos X en un preparado no orientado. Las sustancias cristalinas identificadas son:

- Albita alta ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)
- Cristobalita baja (SiO_2)
- Cuarzo bajo (SiO_2)
- Tridimita (SiO_2)
- Ferroselita (FeSe_2)
- $\text{Na}_6\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{17}$ (con reservas)

Las sustancias amorfas representan un 60% de la muestra y se revelan en la convexidad de la Figura 6, cuyo máximo corresponde a SiO_2 amorfo.

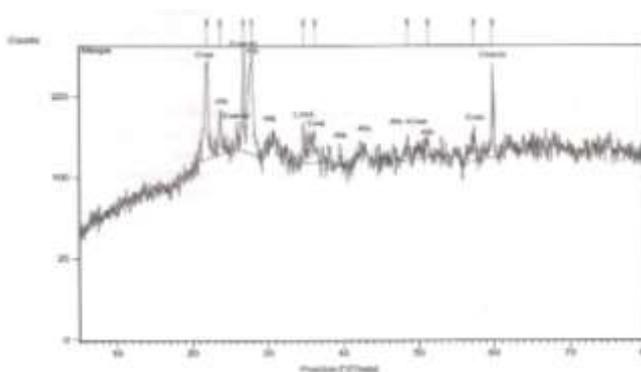


Fig. 6: Difractograma analítico

2.2 Cemento Pórtland

El cemento utilizado es un CPN40, Cemento Portland Normal, que cumple con las especificaciones de las Normas IRAM 50000 y 50001.

2.3 Cal

Para caracterizar la cal se realizan los ensayos de Cal Útil Vial y Densidad Absoluta.

Se denomina “cal útil vial” (C.U.V.) a la cal de origen o liberada, que es capaz de reaccionar química y físicamente con el suelo, produciendo cambios en su naturaleza y propiedades y provocando cementación al crearse productos cementantes hidráulicos (Lilli F., 1964).

La determinación de la C.U.V. es una aplicación necesaria y específica para la estabilización de suelos con cal. Permite dosificar acertadamente en base a porcentajes de C.U.V. en vez de porcentajes de cal comercial (CC), cuyos valores de C.U.V. suelen ser muy variados.

Para su cálculo se utiliza el Pliego de Especificaciones Técnicas Generales de la DNV en su Sección K-IV (Edición 1994).

El ensayo consiste en titular potenciométricamente una cierta cantidad de la cal suspendida en agua destilada, mediante la incorporación de una solución de ácido

clorhídrico 1,0 N, determinando la variación progresiva del pH. A partir del pH de origen de la suspensión de cal (alrededor de 12,5) se lo lleva sucesivamente hasta valores de pH 7 y pH 2, registrándose los consumos respectivos de ácido y titulándose los excesos de ácido por retorno hasta pH 7 con una solución de NaOH 1,0 N. El estudio fue realizado en el laboratorio de Ingeniería Química de la UNT (Figuras 7 y 8).



Fig. 7: Materiales y equipos usado para el ensayo de C.U.V.



Fig. 8: Reacción de la muestra de cal con la solución

Se obtiene para la cal de estudio: **C.U.V.= 69,8%.**

Para determinar la densidad absoluta se siguió la Norma IRAM 1624.

Para ello se vierte una cierta cantidad de kerosene en un volumenómetro de arena hasta una dada marca inicial de 381,7 ml (menisco inferior). Se coloca 64 gr de cal en el volumenómetro y se deja en reposo 24 hs. tratando de liberar el aire contenido en la fracción sólida antes de la lectura definitiva. La lectura final del menisco inferior fue de 407,3 ml. Por lo tanto:

$$\rho_{cal} = m/vol = 2,50 \text{ g/cm}^3$$

2.4 Suelo

El suelo utilizado procede de la construcción del terraplén en la obra de ampliación de la Ruta Provincial N°314, que une las localidades de San Miguel de Tucumán y Tafí Viejo, en la progresiva 3700 (Figura 9).

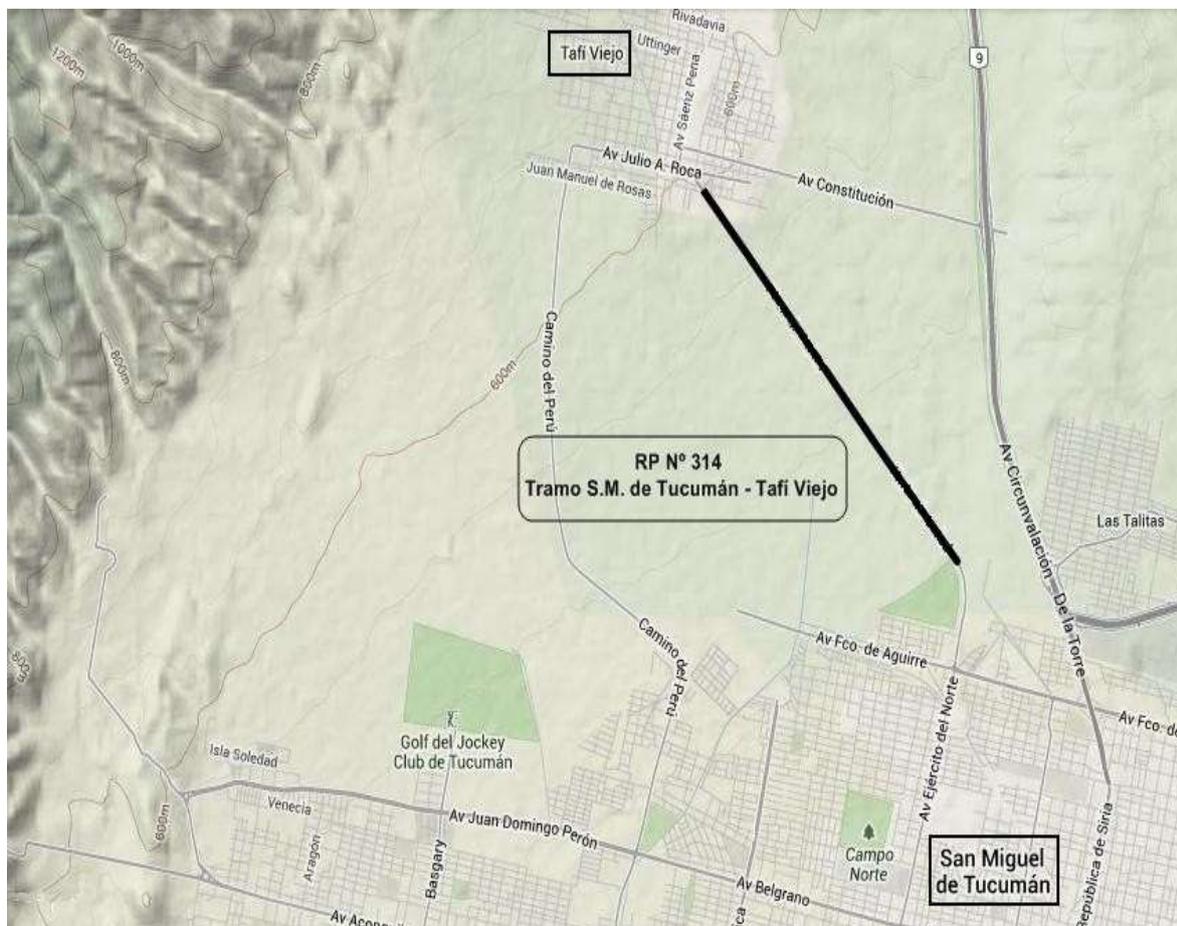


Fig.9: Ubicación de la Ruta Provincial N° 314

El mismo se retira de un acopio situado en las inmediaciones de la ruta, el suelo fue excavado con máquina y apilado en diferentes montículos de donde se extrajeron las muestras. (Figura 10).



Fig. 10: Suelo adoptado: Relleno de Terraplén Ruta 314 (diagonal a Tafí Viejo)

El suelo escogido es un limo arcilloso relativamente homogéneo, identificado geológicamente por su origen eólico y atribuible al Pleistoceno Superior, que guarda en términos generales igual composición mineralógica y química con el loess pampeano (patagónico) pero presenta diferencias granulométricas, limo arenoso el pampeano y limo arcilloso el tropical (al que pertenece el tucumano). Se adoptó el mismo por ser representativo del manto cuaternario superficial que cubre la extensa llanura que se extiende hacia el este desde los cordones montañosos occidentales de la provincia de Tucumán. Consiste principalmente en sedimentos loésicos que forman un potente horizonte de limos y arenas muy finas intercaladas con capas limo arcillosas; y ocasionalmente delgados bancos de ceniza volcánica.

2.4.1 Caracterización del suelo

Siguiendo la norma de ensayo (VN-E4-84), primeramente se determinan las constantes físicas del suelo:

- Límite Líquido: 32,09 (VN-E2-65)
- Límite Plástico: 23,80 (VN-E3-65)
- Índice de Plasticidad: 8,29 (VN-E3-65)

Ensayo de tamizado por Vía Húmeda (VN-E1-65):

Sobre 200 gramos:

- Retenido en Tamiz N° 10.....0 gr (pasa 100%)
- Retenido en Tamiz N° 40..... 2,82 gr (pasa 98,59%)
- Retenido en Tamiz N° 200.....13,94 gr (pasa 91,62%)

$$IG = (F - 35) [0,2 + 0,005 (LL - 40)] + 0,01 (F - 15) (IP - 10) = 7,77 \quad (1)$$

Donde:

F = porcentaje de material que pasa por el tamiz IRAM 75 micrómetros (N° 200)

LL = límite líquido; IP = índice de plasticidad

De acuerdo a la clasificación de suelos dada por la AASHTO, resulta ser un **A-4 (8)**.

2.5 Dosificaciones Estudiadas

Con el objeto principal de encontrar la adecuada proporcionalidad entre la cal y el RPE que genere mayor efecto cementante para un volumen de suelo dado, se adopta como punto de partida una combinación de **5,5% de RPE y 10% de C.U.V.** (Dosificación 1) y la cantidad total de aglutinante resultante como el volumen a respetar en todas las otras dosificaciones (a excepción de las mezclas patrones suelo cal y suelo cemento que se dosifican en peso), ya que el suelo tiene componentes sílico aluminosos que pueden reaccionar con la cal.

O sea todas las mezclas (suelo-cal-RPE) parten de una dada dosificación en la que se mantiene fijo el porcentaje de RPE y se disminuye gradualmente el porcentaje de cal, ver Tabla 3, que luego se corrige proporcionalmente para igualarse en cantidad total de aglutinante (en peso) y poder tener un punto común de comparación suelo-aglutinante.

En la Tabla 4 se muestran las dosificaciones 2, 3, 4, 5 y 9 corregidas a partir de la dosificación 1 para mantener los pesos del aglutinante y del suelo constantes.

Las Dosificaciones 6, 7 y 8 se realizaron directamente con los porcentajes propuestos en peso ya que son evaluadas como parámetros de borde de estabilizaciones convencionales. La Dosificación 7 corresponde a un estabilizado con cemento Pórtland con un porcentaje del 10% y las Dosificaciones 6 y 8 a estabilizados con cal al 5% y 10% de C.U.V., respectivamente.

Tabla 3: Dosificaciones propuestas

N°	Mezcla	RPE	C.U.V.	Cemento
1	suelo + cal + RPE	5,5%	10%	no
2	suelo + cal + RPE	5,5%	8%	no
3	suelo + cal + RPE	5,5%	6%	no
4	suelo + cal + RPE	5,5%	4%	no
5	suelo + cal + RPE	5,5%	2%	no
6	suelo + cal	no	10%	no
7	suelo + cemento	no	no	10%
8	suelo + Cal	no	5%	no
9	suelo + cal + RPE	5,5%	1%	no

Tabla 4: Dosificaciones corregidas a iguales pesos de aglutinante y suelo

		Cemento (gr)	Cal (gr)	RPE (gr)	Cal correg. (gr)	RPE correg. (gr)	Aglutinante (gr)	suelo (gr)	Total (gr)
1	Suelo - cal - RPE		429,8	165			594,8	2405,2	3000
	(10% CUV+ 5,5% RPE)		10,0%	5,5%					
2	Suelo - cal - RPE		343,8	165	401,9	192,9	594,8	2405,2	3000
	(9,4% CUV+ 6,4 % RPE)		8,0%	5,5%	9,4%	6,4%			
3	Suelo - cal - RPE		257,9	165	362,7	232,1	594,8	2405,2	3000
	(8,4% CUV+ 7,7 % RPE)		6,0%	5,5%	8,4%	7,7%			
4	Suelo - cal - RPE		171,9	165	303,5	291,3	594,8	2405,2	3000
	(7,1% CUV+ 9,7 % RPE)		4,0%	5,5%	7,1%	9,7%			
5	Suelo - cal - RPE		86,0	165	203,7	391,1	594,8	2405,2	3000
	(4,7% CUV+ 13,0 % RPE)		2,0%	5,5%	4,7%	13,0%			
6	Suelo-cal		429,80				429,8	2570,2	3000
	10%		10%						
7	Suelo - cemento	300					300	2700	3000
	10%	10%							
8	Suelo cal		214,90				214,90	2785,10	3000
	5%		5%						
9	Suelo - cal - RPE		43,0	165	122,9	471,9	594,8	2405,2	3000
	(2,9% CUV+ 15,7 % RPE)		1,0%	5,5%	2,9%	15,7%			

3. ENSAYOS

3.1 Ensayos de Compresión Simple y Compresión Diametral (tracción indirecta)

Para cada una de las dosificaciones, tipo de ensayo y edad de rotura a 24 hs, 7, 28 y 90 días, se moldearon tres probetas. Para el ensayo de Compresión Diametral se agregan probetas para extender los estudios de rotura a las edades de 180 y 270 días.

Para cada mezcla se determina primeramente la humedad óptima y densidad máxima mediante el Ensayo de Compactación Proctor Estándar T99 (Tabla 5). Luego se moldea con esa humedad y energía cada mezcla.

Las probetas se preparan en tandas de 6 especímenes (3 por cada ensayo) en una misma bandeja para optimizar el tiempo de trabajo. Se mezcló primero la cal con el RPE y luego en la bandeja con el suelo. Una vez homogeneizada la mezcla se agregó el agua. Durante los moldeos se preservó la humedad de la bandeja con una manta húmeda. A cada probeta una vez pesada se la embolsó y tapó con una frazada a la espera del traslado a la cámara húmeda (Figura 11).

A pesar de no ser aplicable en obra, para homogeneizar la mezcla en laboratorio sin grumos, se zarandea la cal por el tamiz N° 80. Esta tarea insume un tiempo considerable, sobre todo en las dosificaciones con altos contenidos de cal. Se nota que a mayor contenido de RPE en las mezclas, resulta más rápido homogeneizar la humedad en la misma (favorable al proceso constructivo). Durante la confección de las probetas se verificó la humedad real de moldeo, para cotejar con la humedad óptima correspondiente a dicha dosificación (de importancia en las reacciones puzolánicas).

Tabla 5: Humedad óptima y densidad máxima de las mezclas

Dosificación	Mezcla	D. máx. (gr/cm ³)	H. óptima (%)
	suelo sólo	1,61	22,0
1	suelo + 10% (C.U.V.) + 5,5% (RPE)	1,45	26,2
2	suelo + 9,4% (C.U.V.) + 6,4% (RPE)	1,44	25,8
3	suelo + 8,4% (C.U.V.) + 7,7% (RPE)	1,47	25,6
4	suelo + 7,1% (C.U.V.) + 9,7% (RPE)	1,45	24,7
5	suelo + 4,7% (C.U.V.) + 13% (RPE)	1,45	24,6
6	suelo + 10% (C.U.V.)	1,50	23,7
7	suelo + 10% cemento	1,58	21,6
8	suelo + 5% (C.U.V.)	1,51	23,0
9	suelo + 2,9% (C.U.V.) + 15,7% (RPE)	1,44	24,4

Analizando los resultados de la Tabla 5 para las dosificaciones con RPE, se aprecia que existe muy poca variación tanto en la densidad máxima como en la humedad óptima a medida que decrece el contenido de cal y aumenta el del RPE. Se puede interpretar esto como una suerte de compensación en el requerimiento de humedad entre ambas variables.



Fig. 11: Homogeneización de los materiales

Una vez cumplida la edad de ensayo, previo a la rotura se ventilan las probetas durante una hora, mientras se corrobora peso y dimensiones.

Para el ensayo de compresión simple se sigue la norma (VN-E33-67) especificada para probetas compactadas de suelo cal y suelo cemento. En la Figura 12 se observa el comportamiento de una probeta en la rotura y como las tensiones originan un cono típico de rotura frágil. En la Tabla 6 se indican los resultados de ensayos.



Fig. 12: Forma de rotura de las probetas ensayadas a compresión simple
 Tabla 6: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión Simple

Resistencia a la compresión promedio (corregida por esbeltez)				
Dosificación		R.comp. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 24 horas	1,8485	0,99	94,72%
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 24 horas	0,8039	0,97	97,91%
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 24 horas	0,7438	1,00	97,59%
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 24 horas	0,7371	0,99	95,79%
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 24 horas	0,7224	0,95	97,30%
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 24 horas	0,7125	1,01	93,95%
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 24 horas	0,7080	0,98	91,17%
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 24 horas	0,6641	0,94	98,31%
		R.comp. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 7 días	3,2959	1,05	97,90%
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 7 días	1,7446	0,97	99,68%
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 7 días	1,6563	1,05	97,77%
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 7 días	1,5490	1,04	95,67%
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 7 días	1,5282	0,99	97,37%
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 7 días	1,5126	1,00	96,02%
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 7 días	1,4750	1,03	98,44%
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 7 días	1,4118	1,04	96,59%
		R.comp. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 28 días	4,8000	1,03	96,78%
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 28 días	3,4611	0,99	99,55%
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 28 días	3,1636	0,98	96,80%
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 28 días	3,1419	0,99	99,04%
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 28 días	2,9926	1,01	96,59%
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 28 días	2,9319	1,00	98,79%
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 28 días	2,7104	0,97	98,07%
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 28 días	2,5588	0,98	93,05%
[Suelo - 2,9% (C.U.V.) - 15,7% (RPE)]	Dosificación 9 - 28 días	2,2631	1,06	91,15%
		R.comp. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 90 días	7,5447	1,02	98,07%
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 90 días	6,1181	0,91	99,47%
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 90 días	5,7513	1,01	97,90%
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 90 días	5,0853	1,06	98,03%
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 90 días	4,9830	0,99	95,20%
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 90 días	4,6552	1,10	98,69%
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 90 días	4,1794	0,94	98,07%
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 90 días	3,5825	1,17	92,48%
[Suelo - 2,9% (C.U.V.) - 15,7% (RPE)]	Dosificación 9 - 90 días	2,4131	1,11	94,40%

Analizando los resultados de Tabla 6, se aprecia que las Dosificaciones 1 y 6 tienen el mismo contenido de C.U.V.= 10%, con la diferencia que la Dosificación 1 contiene

además 5,5% de RPE. Sin embargo, salvo para 28 días, presenta menor resistencia a compresión que la mezcla convencional de suelo cal. Esto se debe a que evidentemente la reacción puzolánica que predomina al comienzo es entre la cal y el suelo, y prevalece antes que la reacción puzolánica de la cal con el RPE, debido a que la superficie específica del mismo es entre siete a diez veces menor que la fracción de arcilla contenida en el suelo. Este hecho se evidencia en el comportamiento de las mezclas con RPE a medida que pasa el tiempo y la resistencia se incrementa.

En cuanto al ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral (tracción indirecta), se sigue la norma NLT-304/89, prescripta para materiales tratados con conglomerantes hidráulicos.. En la Tabla 7 se presentan los resultados del ensayo. La Figura 13 muestra una probeta en el momento de la rotura.

El valor de la Tensión de rotura a compresión diametral, tracción indirecta se obtiene de la fórmula:

$$R_{\text{tracción}} = (2 \times P) / (\pi \times \Phi \times h) \quad (2)$$

Donde:

$R_{\text{tracción}}$: Tensión de rotura a tracción indirecta por compresión diametral en MPa

P: carga de rotura en N

Φ : diámetro de la probeta en mm

h: altura de la probeta en mm

Tabla 7: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión Diametral

Resistencia a compresión diametral				
Dosificación		R.tracción ind. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 24 horas	0,3588	0,99	94,72%
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 24 horas	0,1236	0,97	97,91%
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 24 horas	0,1069	1,00	97,59%
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 24 horas	0,1033	0,99	95,79%
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 24 horas	0,0990	0,98	91,17%
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 24 horas	0,0980	0,95	97,30%
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 24 horas	0,0964	0,94	98,31%
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 24 horas	0,0946	1,01	93,95%
		R.tracción ind. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 7 días	0,5975	1,05	97,90%
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 7 días	0,2873	0,97	99,68%
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 7 días	0,2659	0,99	97,37%
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 7 días	0,2643	1,04	95,67%
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 7 días	0,2535	1,05	97,77%
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 7 días	0,2318	1,03	98,44%
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 7 días	0,2287	1,00	96,02%
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 7 días	0,1788	1,04	96,59%
		R.tracción ind. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 28 días	0,7633	1,03	96,78%
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 28 días	0,5711	1,01	96,59%
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 28 días	0,5473	0,99	99,04%
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 28 días	0,5447	1,00	98,79%
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 28 días	0,5292	0,98	96,80%
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 28 días	0,5125	0,99	99,55%
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 28 días	0,4225	0,98	93,05%
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 28 días	0,4051	0,97	98,07%
[Suelo - 2,9% (C.U.V.) - 15,7% (RPE)]	Dosificación 9 - 28 días	0,3882	1,06	91,15%
		R.tracción ind. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 90 días	1,1465	1,02	98,07%
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 90 días	0,9618	0,91	99,47%
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 90 días	0,9340	1,01	97,90%
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 90 días	0,9079	1,06	98,03%
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 90 días	0,9076	0,94	98,07%
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 90 días	0,8917	1,10	98,69%
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 90 días	0,8812	1,17	92,48%
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 90 días	0,8015	0,99	95,20%
[Suelo - 2,9% (C.U.V.) - 15,7% (RPE)]	Dosificación 9 - 90 días	0,4776	1,11	94,40%
		R.tracción ind. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 180 días	1,32	0,988	0,97
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 180 días	1,31	1,039	0,96
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 180 días	1,28	1,008	0,98
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 180 días	1,21	1,050	0,96
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 180 días	1,19	1,017	0,95
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 180 días	0,85	1,029	0,93
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 180 días	1,08	1,053	0,95
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 180 días	1,04	1,045	0,98
[Suelo - 2,9% (C.U.V.) - 15,7% (RPE)]	Dosificación 9 - 180 días	0,66	1,036	0,93
		R.tracción ind. (MPa)	Hmoldeo/Hopt.	Dmoldeo/Dmáx teórica
[Suelo - 9,4% (C.U.V.) - 6,4% (RPE)]	Dosificación 2 - 270 días	1,45	0,981	0,97
[Suelo - 7,1% (C.U.V.) - 9,7% (RPE)]	Dosificación 4 - 270 días	1,39	0,966	0,95
[Suelo - 10% (C.U.V.) - 5,5% (RPE)]	Dosificación 1 - 270 días	1,25	1,008	0,96
[Suelo - 8,4% (C.U.V.) - 7,7% (RPE)]	Dosificación 3 - 270 días	1,22	1,002	0,93
[Suelo - 10% cemento]	Dosificación 7 - 270 días	1,22	0,957	0,98
[Suelo - 5% (C.U.V.)]	Dosificación 8 - 270 días	1,09	0,991	0,98
[Suelo - 4,7% (C.U.V.) - 13% (RPE)]	Dosificación 5 - 270 días	1,05	0,972	0,93
[Suelo - 10% (C.U.V.)]	Dosificación 6 - 270 días	0,96	0,877	0,95
[Suelo - 2,9% (C.U.V.) - 15,7% (RPE)]	Dosificación 9 - 270 días	0,61	0,977	0,91

Analizando los resultados de la Tabla 7 se observa claramente que el efecto cementante de las mezclas con RPE se incrementa con la edad. A 180 días las dosificaciones 1, 4 y 2 logran mayores resistencias que la dosificación patrón suelo cemento. Este efecto se acentúa a los 270 días, ya que la Dosificación 4 (suelo - 7,1% C.U.V. - 9,7% RPE) presenta a esa edad un 14% más de resistencia que la Dosificación 7 (suelo - 10% cemento).



Fig. 13: Rotura de una probeta a compresión diametral

3.2 Ensayo de tracción por compresión diametral con carga pulsante. Determinación de la Rigidez E

Para completar la caracterización mecánica del estabilizado suelo-cal-RPE y poder considerarlo adecuadamente en los métodos empírico-mecanicistas de diseño de pavimentos actuales, ya que desarrolla una resistencia intrínseca con un módulo independiente del nivel de tensiones impuesto y fallas relacionadas con la fisuración por fatiga, resulta apropiado la determinación de la Rigidez E y leyes de fatiga a través del ensayo de tracción por compresión diametral con carga pulsante.⁽³⁾ Se utiliza para el mismo una adaptación de la norma UNE-EN 12697-26 “Método de ensayo para mezclas bituminosas- Parte 26: Rigidez- Anexo C” que se aplica en consecuencia. Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio Vial del Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario.

Se determina la Rigidez E para todas las dosificaciones a edades de 28 y 90 días. Luego estas mismas probetas fueron ensayadas a tracción indirecta por compresión diametral. Finalmente se busca el modelo matemático que correlacione estos valores, a la edad de 90 días.

La Figura 14 muestra una probeta preparada para ser ensayada.

Luego de procesar los datos de los ensayos se adoptan los valores de Rigidez E como promedio de dos característicos para cada dosificación.

Con la adopción de los pares característicos se procede al llenado de la planilla con los valores de Rigidez E adoptados.



Fig. 14: Colocación de sensores en la probeta y montaje en el equipo de ensayo

En las Tabla 8 y 9 se muestran los valores de E y los de la Resistencia a tracción indirecta por compresión diametral a las edades de 28 y 90 días respectivamente.

Tabla 8: E y Rtracción (28 días)

ENSAYOS Probetas IMAE	Epromedio (Mpa)	Rtracc (Mpa)
Dosificación 4 - 28 días	7354,5	0,6488
Dosificación 7 - 28 días	7049,5	0,8633
Dosificación 1 - 28 días	6528,5	0,6408
Dosificación 2 - 28 días	6495,5	0,6597
Dosificación 6 - 28 días	6484,5	0,5798
Dosificación 5 - 28 días	6414	0,7280
Dosificación 8 - 28 días	6312,5	0,7194
Dosificación 3 - 28 días	6102,5	0,6530
Dosificación 9 - 28 días	5244	0,4531

Tabla 9: E y Rtracción (90 días)

ENSAYOS Probetas IMAE	Epromedio (Mpa)	Rtracc (Mpa)
Dosificación 4 - 90 días	10297	1,3394
Dosificación 3 - 90 días	9943	1,2481
Dosificación 7 - 90 días	8782,5	1,1240
Dosificación 2 - 90 días	8782	1,2774
Dosificación 1 - 90 días	8090	1,1563
Dosificación 6 - 90 días	7482	0,9951
Dosificación 8 - 90 días	7095	1,1069
Dosificación 5 - 90 días	7037	0,9229
Dosificación 9 - 90 días	5622,5	0,5452

Se observa que a 28 días el módulo de la dosificación 4 (7,1% de C.U.V. + 9,7% RPE) supera al de la dosificación patrón 7 (suelo+10% cemento) en un 5%, incrementando la diferencia a 90 días hasta un 17%. Esto abriga grandes perspectivas al proyecto.

3.3 Correlación entre E y la Resistencia a la tracción indirecta

En el Gráfico 1 se muestra la variación de la rigidez E y la resistencia a tracción indirecta de todas las mezclas con RPE estudiadas a la edad de 90 días.

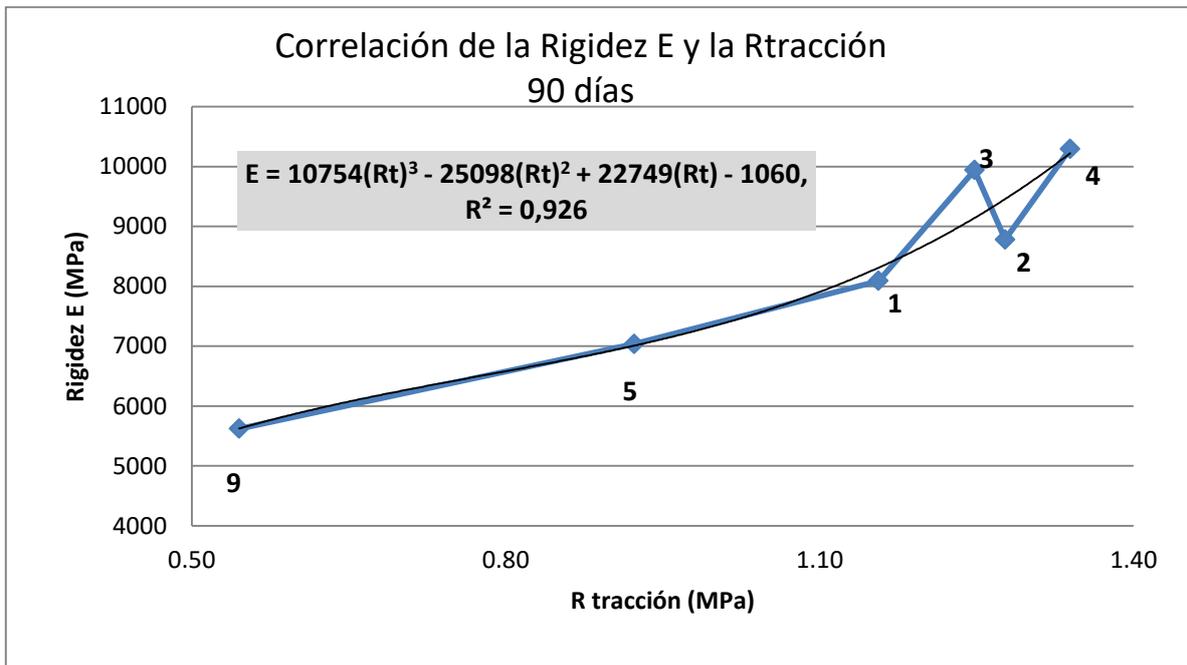


Gráfico 1: Variación de la Rigidez E y Rtracción a la edad de 90 días

Se observa en el gráfico que la dosificación 4 (7,1% CUV+9,7 % RPE) es la mezcla que mejor se comporta. Si comparamos los valores de resistencia a la tracción indirecta y Rigidez E a 90 días de esta mezcla con las de los patrones se observa claramente el mejor comportamiento mecánico de la mezcla estabilizada (Tabla 10).

Tabla 10: Rigidez E y Rtracción a la edad de 90 días para dosificación 4 y Patrones

Dosificaciones	Rtrac (Mpa)	Rig. E (MPa)
4 (7,1% CUV +9,7% RPE)	1,34	10297
7 (10% Cemento)	1,12	8783
6 (10% CUV)	1,00	7482
8 (5% CUV)	1,11	7095

4. CONSIDERACIONES FINALES

- ✓ Los resultados ponen en evidencia el efecto puzolánico del residuo.

- ✓ A pesar de que son varias las mezclas con RPE que mostraron tener mejor comportamiento mecánico que las patrones, a partir de los 90 días, se recomienda el uso de la Dosificación 4 por ser la que menor contenido de cal lleva.

La estabilización del suelo en estudio, típico de la provincia de Tucumán, mediante una mezcla de cal y residuo de perlita expandida es posible y ha permitido cumplir con el objetivo del trabajo, abriendo un abanico de posibilidades para lograr la valoración del residuo mediante una continua y provechosa reutilización en la ingeniería de caminos de manera amigable con el medio ambiente.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) Sánchez L, Palazzi S, ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE RESIDUO INDUSTRIAL DE PERLITA EXPANDIDA EN HORMIGONES DE CEMENTO PÓRTLAND. Memorias V Congreso Internacional y 19º Reunión Técnica Ing. Oscar Batic, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. 2012
- (2) H. G. Botasso, E. A. Fensel, "PROYECTO PARA EL USO SISTEMÁTICO DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN, DEMOLICIÓN Y PROCESOS INDUSTRIALES", Congreso CONAMET/SAM 2004.
- (3) S. Angelone, R. Cassan, F. Martínez. CARACTERISTICAS MECANICAS DE ESTABILIZADOS CON LIGANTES HIDRAULICOS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS. XIV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Buenos Aires. Año 2005.
- (4) DIRECCION NACIONAL DE VIALIDAD, Normas de Ensayo.