UNIVERSIDAD DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL PIRHUA

DESEMPEÑO DE SUELOS ESTABILIZADOS CON POLÍMEROS EN PERÚ

Darko Nesterenko-Cortes

Lima, agosto de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Nesterenko, D. (2017). Desempeño de suelos estabilizados con polímeros en Perú. En E. Carrera (Dir.), *I Congreso Internacional de Ingeniería y Dirección de Proyectos III Congreso Regional IPMA – LATNET*, (pp. 15-26). Lima: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Esta obra está bajo una licencia
Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

I CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y DIRECCIÓN DE PROYECTOS
III CONGRESO IPMA-LATNET

DESEMPEÑO DE SUELOS ESTABILIZADOS CON POLIMEROS EN PERÚ

Nesterenko Darko

Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Calle Mártir Olaya 162 – Miraflores, Lima, Perú.

Autor en correspondencia: Nesterenko Darko
Correo electrónico: darko.nesterenko@concar.com.pe

Palabras clave: Estabilización de suelos, Pavimento, Polímeros, CBR, Proceso de estabilización

RESUMEN

Los suelos estabilizados con polímeros han ganado mayor atención en la última década. Los casos estudiados en la bibliografía especializada concluyen que son estabilizadores eficaces y sostenibles al posibilitar la reutilización de suelo existente luego de cumplir su vida útil y que, durante su ejecución, no presentan el agrietamiento por contracción propio de los estabilizadores convencionales.

Las normas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones no definen un procedimiento constructivo para el caso de los polímeros en el Perú y los fabricantes de polímeros proponen seguir un procedimiento constructivo elaborado en Australia que es utilizado en suelos y rendimientos constructivos diferentes a los que se presentan en obras viales peruanas, proveyendo información muy general de los parámetros estructurales del suelo estabilizado.

El artículo propone un procedimiento de estabilización de suelos con polímeros acorde al contexto peruano y determina los parámetros estructurales correspondientes a muestras de suelo provenientes de obras viales peruanas.

Se realizaron ensayos de laboratorio en muestras de suelo virgen y en muestras estabilizadas con polímeros concluyéndose que el uso de polímeros como estabilizador de suelos evidencia una mejora de sus características físico – mecánicas, mostrando su mejor desempeño para suelos peruanos con IP≥9.

Keywords: Stabilization of soils, Pavement, Polymers, CBR, Stabilization process

ABSTRACT

Polymer stabilized soils have gained more attention in the last decade. The cases studied in the specialized literature conclude that they are effective and sustainable stabilizers by enabling the reuse of existing soil after its useful life and that, during its execution, do not present the contractive cracking proper to conventional stabilizers.

The rules of the Ministry of Transport and Communications do not define a constructive procedure for the case of polymers in Peru and the manufacturers of polymers propose to follow a constructive procedure elaborated in Australia that is used in soils and different constructive yields in which it is presented in Peruvian roadworks, proving very general information of the structural parameters of stabilized soil.

ISBN: 978-9972-48-190-1

The paper proposes a soil stabilization procedure with polymers according to the Peruvian context and determines the structural parameters corresponding to soil samples from Peruvian road works.

Laboratory tests were carried out on samples of virgin soil and on samples stabilized with polymers, concluding that the use of polymers as soil stabilizer evidences an improvement in their physical - mechanical characteristics, showing their best performance for Peruvian soils with IP≥9.

1. Introducción

Desde el inicio del siglo XXI el uso de grandes equipos de estabilización en la construcción de carreteras se convirtió en una realidad en Latinoamérica. Grandes estabilizadoras como CMI – TEREX y WIRTGEN lograron obtener capas de estabilización superiores a 300 mm las que, en comparación con las utilizadas en la construcción tradicional mediante reemplazo de material granular, reportan un ahorro económico sustancial para los proyectos viales (Wirtgen, 2010).

Los estabilizadores utilizados actualmente en el Perú son la cal, el cemento y polímeros. La cal fue incorporada como agente estabilizador para mejorar la trabajabilidad del suelo (NLA, 2004) y el cemento fue utilizado desde 1995 como estabilizador de Base y Subbase para obtener mejoras en parámetros adicionales a la trabajabilidad tales como la resistencia y módulo estructural del pavimento (PCA, 2005). Sin embargo la cal y el cemento van acompañados durante el proceso constructivo de agrietamientos por contracción (Adaska y Luhr, 2004)

Andrews y Duffy (2008) afirman que los estabilizadores tradicionales como la cal y el cemento requieren largos tiempos de curado y cantidades considerables de aditivos a un costo significativo por lo que estabilizadores no tradicionales como los polímeros han ganado mayor atención, ya que son potencialmente más eficaces en campo debido a que el polímero posee mayor trabajabilidad con los suelos estabilizados durante el proceso constructivo y sostenibles, es decir mantiene los niveles de servicio de los caminos tratados a lo largo del tiempo, comparados con los convencionales.

Shao y Horton, (2011) indican que el polímero orgánico sintético Poliacrilamida (PAM) posee una cadena larga de monómeros que une las partículas del suelo, lo que conduce a un aumento del porcentaje de partículas mayores de 4 mm en los agregados, propiedad importante porque refuerza el esqueleto de agregado grueso en la estructura del pavimento. Shao y Horton (2011) en tal sentido concluyen que el polímero se une a los agregados y juntos hacen que el suelo sea más resistente a la erosión, dispersión, colapso y corte.

Las principales características del PAM para la estabilización de suelos según Austroads (1998) son la buena adherencia a las partículas del suelo y la alta resistencia al agua, además de reducir la frecuencia de mantenimiento.

1. Justificación

En la ejecución de obras viales en el Perú existen variables que determinan en gran medida la calidad de trabajo durante la estabilización de suelos. Estas variables son: los tipos de equipos de ejecución y rendimiento de ejecución, las cuales varían de región a región. Por otro lado la normatividad peruana vigente reglamentada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) no define un proceso constructivo con las variables mencionadas para la estabilización de suelos utilizando polímeros.

Los fabricantes del polímero poliacrilamida (PAM) recomiendan un procedimiento constructivo de estabilización de suelos para el territorio de Australia. Dicho

procedimiento proporciona información genérica para sus propias condiciones de contexto como son los tipos equipos de ejecución: la estabilizadora de suelos de potencia 335 hp y cilindrada de 893 pulg3, motoniveladora de potencia 185 hp y cilindrada de 638 pulg3, compactador vibratorio de potencia 153 hp y cilindrada de 403 pulg3, compactador neumático de potencia 105 hp y cilindrada de 243 pulg3 y camión cisterna 4x2 de capacidad 3000 gln. Así mismo reportan rendimientos constructivos de 5000 m2 por jornada diaria de trabajo, condiciones distintas a las peruanas. Dicho esto, el procedimiento que recomienda el proveedor no es aplicable al territorio peruano.

La aplicación del PAM es nueva en el Perú y la introducción de esta tecnología es evidentemente un aporte a la ingeniería vial como alternativa de solución en el proceso de estabilización de suelos. Durante la incorporación del PAM en los áridos trabajados se comprobará el aumento de la capacidad estructural mediante variables cuantificables en laboratorio como son: el aumento de la capacidad portante (CBR), aumento de la densidad (MDD) y la reducción del óptimo contenido de humedad (OCH) de la capas granulares estabilizadas vs la construcción tradicional de las capas granulares con áridos vírgenes sin modificación.

La presente investigación busca establecer un procedimiento de estabilización de suelos acorde al contexto peruano y obtener los parámetros estructurales del suelo, utilizando el polímero poliacrilamida PAM en las condiciones existentes en el Perú.

2. Objetivos

- Definir el procedimiento constructivo de estabilización de suelos mediante el uso del polímero poliacrilamida acorde a la realidad peruana incorporando variables propias del contexto como son los tipos de equipos de ejecución y rendimientos constructivos.
- Comparar bajo las mismas condiciones de contexto, los resultados de los suelos ensayados en estado natural respecto a los suelos estabilizados con polímero PAM.

3. Metodología

Para elaborar el procedimiento constructivo de estabilización de suelos con PAM se trabajó en localidades con diferentes tipos de equipos de ejecución y diferentes rendimientos constructivos como son: Chiclayo, Cajamarca, Huánuco, Pasco y Pucallpa, se describió las definiciones operacionales y se elaboró el flujo de actividades durante la estabilización de suelos.

La caracterización física y mecánica de los áridos en estado natural y estabilizados con PAM se realizó a través de la interpretación de los resultados de ensayos de laboratorio ubicados en Chiclayo, Cajamarca, Huánuco, Pasco y Pucallpa, siendo los ensayos realizados: granulometría, límites de consistencia, clasificación de suelos, relación humedad – densidad y CBR.

4. Propuesta del proveedor en Australia

4.1 Recursos

Crisera (2016), describe el proceso constructivo de estabilización de suelos utilizando PAM en Australia, con los siguientes recursos: la mano de obra (personal técnico de planta y personal ejecutor), materiales (estabilizador poliacrilamida – PAM), material granular (sólo en zonas donde amerite recarga de material una vez definida las

características geométricas), y equipo mecánico, en la Figura 1 se muestra el layout de equipos utilizado en el proceso constructivo de estabilización con PAM en Australia:

Figura 1: Layout de equipos utilizados en la estabilización de suelos con PAM en Australia

Estabilizadora de suelos de potencia de 335 hp y 893 pulg^3 de cilindrada, garantiza alta producción y mejoramiento del batido	Motoniveladora de potencia de 185 hp y 638 pulg^3 de cilindrada	Compactador vibratorio de potencia de 153 hp y 403 pulg^3 de cilindrada, de rola lisa.	Compactador neumático de potencia de 105 hp y 243 pulg^3, utilizado para el acabado de los trabajos.	Camión cisterna 4x2 de capacidad de 3000 Gln, con regadera tipo spray a ambos lados en la parte posterior	Accesorio de aplicación PAM de forma diluida (Aplicación - Húmeda)	Esparcidor en seco del PAM (Aplicación - Seca)

4.2 Aspectos constructivos

5.2.1. Aplicación en vía húmeda

Crisera (2016), describe el procedimiento de aplicación del PAM en el territorio de Australia mediante la aplicación de vía húmeda, el cual se realiza mediante riego con camión cisterna sobre la superficie a estabilizar o utilizando equipos estabilizadores. En Australia el ratio de dilución del PAM es 0.001 Kg/Lts, con la finalidad de crear un fluido con baja viscosidad, confirmando que esta aplicación no genera problemas durante el proceso constructivo. El detalle del proceso de aplicación del PAM– vía húmeda en Australia se muestra en la Figura 2:

Figura 2: Proceso de aplicación del PAM mediante la vía húmeda en Australia

Tamaños del accesorio en función a la capacidad de la cisterna	Valvula principal abierta en posición de 10 am. Trampa de agua abierta para derivar el agua al momento de la mezcla	Se verifica que este conectado la tuberia de suministro con el camión cisterna, luego de ello colocar el PAM uniformemente logrando la solución esperada, este accesorio permite que el PAM no se aglutine y genere grumos en la mezcla durante el proceso de riego.	Aplicación del PAM mediante riego con Camión Cisterna sobre el área a estabilizar

5.2.2. Aplicación en vía seca

Crisera (2016), afirma que la aplicación en el territorio de Australia por medio de vía seca se realiza mediante un esparcidor eléctrico seco el cual va anclado a un vehículo. El esparcidor requiere para su funcionamiento una carga de 12V, debido a ello se utiliza un adaptador el cual se conecta a la unidad, una vez encendido el equipo éste esparce el PAM utilizando una tasa de 0.0026% del peso suelto del árido analizado sobre la superficie definida por el cliente. El detalle del proceso de aplicación del PAM– vía seca en Australia se muestra en la Figura 3:

Figura 3: Proceso de aplicación del PAM mediante la vía seca en Australia

Instalación de esparcidor seco utilizando el anclaje de la barra de soporte sobre una Pick Up, para su uso se instalará un adaptador de 12V.	Se vierte el PAM sobre el esparcidor seco para su posterior colocación.	Proceso de esparcido del PAM sobre la superficie a estabilizar, la velocidad de colocación será 25 KPH	Esta configurado el volumen del recipiente para que la tasa de colocación (Kg/m2) se esparza uniformemente, con una abertura de 10 mm.

5. Diagrama de flujo del proceso de estabilización con PAM propuesto por el autor

Se describe a continuación las definiciones operacionales y el flujo de actividades propuesto por el autor, involucrando en dicho análisis variables propias del contexto peruano, equipos de ejecución y los rendimientos constructivos, diferente a las australianas. Los recursos asignado son: una estabilizadora de suelos de potencia de 335 hp, 893 pulg3 de cilindrada, dimensiones de 240 mm de ancho y una profundidad de corte (e > 200 mm) y un tren de trabajo compuesto por: 01 motoniveladora de potencia de 125 hp y 403 pulg3 de cilindrada , 01 compactador vibratorio de potencia de 153 hp y 403 pulg3 de cilindrada de rola lisa, 01 compactador neumático de potencia de 105 hp y 243 pulg3 utilizado para el acabado de los trabajos y 01 Camión Cisterna de Agua 4x2 de capacidad de 4000 gln con regadera tipo spray ubicados a ambos lados de la parte posterior, y un rendimiento constructivo de 4000 m2. Dada la diferencia en los tipos de equipos de ejecución se evidencia la diferencia de rendimiento de construcción. El flujo de actividades para la estabilización de suelos utilizando PAM se detalla en la Tabla 1:

Tabla 1. Flujo de actividades para la estabilización de suelos utilizando PAM

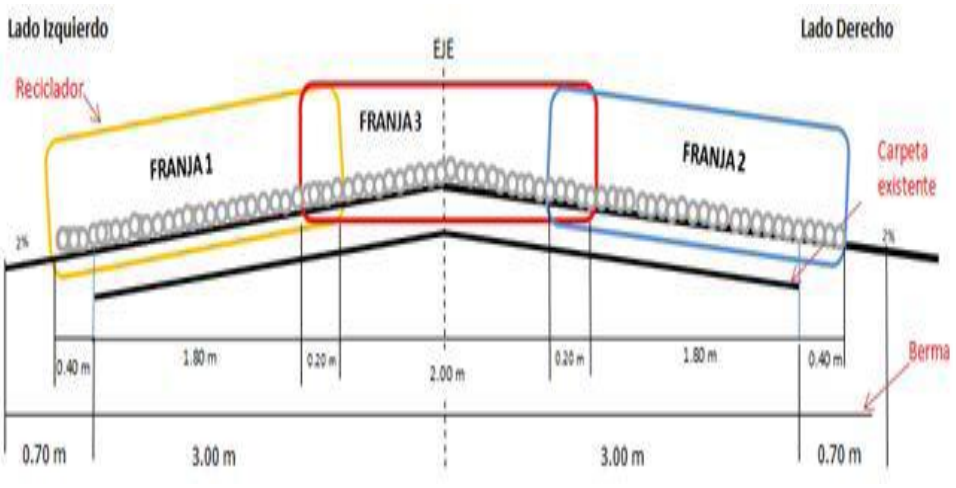
FLUJO DE ACTIVIDADES	
ACTIVIDAD	**DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES**
INICIO REALIZAR LAS TAREAS DE PREVENCIÓN	Se iniciará la jornada de trabajo siempre y cuando se generen los controles de seguridad respectivos (Analisis de Seguridad en el Trabajo - AST, lectura del procedimiento de ejecución de la actividad de estabilización de suelos con PAM y Charla de 05 minutos de seguridad). Se realizará la señalización correspondiente a los trabajos en calzada, los cierre de vía estará en función al ciclo calculado para el tren de trabajo.
VERIFICAR LAS CONDICIONES PRELIMINARES	Los controles topográficos sera en forma permanente antes, durante y al finalizar el trabajo programado; de igual forma se deberá verificar el suelo de cimentación existente. Los obstaculos deberán de ser removidos con los recursos planificados para tal fin. Verificar las condiciones iniciales de la calzada (%Humedad natural in situ). Se trazarán los puntos de corte según los niveles topográficos existentes.
EJECUTAR EL TRAMO DE PRUEBA	Antes de proceder a la ejecución de los trabajos de estabilización, se procederá a ejecutar un tramo de prueba, para verificar el estado y comportamiento de los equipos y determinar en secciones de ensayo el método definitivo de preparación, transporte y colocación del suelo estabilizado con PAM con la finalidad de cumplir las especificaciones según las normas vigentes. Si el tramo de prueba resultara defectuoso, se realizará la remoción del mismo y su disposición será en los Depósitos de Material Excedente (DME) proyectados dentro de la Obra.
REALIZAR LA CONFIGURACIÓN DE TREN DE TRABAJO	Las unidades operativas para la ejecución del trabajo, deberá de ser en cadena (Estabilizadora, Motoniveladoras, Compactador de rola lisa, Cisterna de Agua, Compactadora Neumática). Durante la implementación de esta etapa deberá estar definido el tipo de aplicación del PAM (vía Húmeda y vía Seca). Durante la vía húmeda se deberá de calibrar la tasa de dilusión del PAM de 0.001 Kg/Lts con la finalidad de crear un fluido de baja viscocidad. Durante la vía seca solo se deberá calibrar el esparcidor seco para la colocación sobre la superficie escarficada utilizando una tasa de aplicación del 0.0026% del peso suelto del árido analizado.
EJECUTAR EL RECICLADO	Se deberá emplear el equipo, sólo en condiciones de aceptación del tramo de prueba. La profundidad de corte deberá ser según las especificaciones del proyecto (200 - 300 - 400 mm). Sólo será validado la recarga de material previo sustento según controles topográficos, se tendra el diseño de la granulometría del agregado para la incorporación del PAM durante el primer corte con la Recicladora. Durante la etapa de construcción se deberá ejecutar el número de cortes con la Recicladora, definidos en la etapa de planeamiento: Franja 01 (Amarillo): Empezar por el lado izquierdo de la calzada, cortar 0.40 m de la berma izquierda y 2.00 de carpeta. Franja 02 (Azul): Se pasa al lado derecho, corta 0.40 m de la berma derecha y 2.00 de carpeta. Franja 03 (Rojo): Continua en el centro de la carpeta, cortando 2.00 m y traslapando 0.20 m en las Franjas 1 y 2. Se debe reciclar el tramo con una diferencia de ±1.50 m (aprox.) en el largo de cada franja, de forma que la unión con el siguiente tramo no sea una línea recta. Este protocolo de corte es referencial y el número de cortes y el orden dependeran del ancho de calzada a reciclar. 

Tabla 1. Flujo de actividades para la estabilización de suelos utilizando PAM

INCORPORAR AGUA Y PAM	La incorporación del agua durante la aplicación del PAM deberá ser en forma controlada según los resultados de laboratorio realizados (Proctor, %Humedad), la incorporación del PAM durante la etapa del Reciclado será en Kg/m2 en función al espesor definido por el cliente.
CONFORMAR EL MATERIAL	El material será extendido en una capa uniforme por medio de una motoniveladora, de tal manera que forme una capa suelta de mayor espesor que el que debe tener la capa compactada. En caso se requiera se debe tambien batir todo el material por medio de la cuchilla de la motoniveladora en toda la profundidad de la capa, llevándolo en forma alternada hacia el centro y los bordes de la calzada. Debido a la diferencia del equipos que se utiliza en Perú (Motoniveladora de potencia de 125 hp y 403 pulg^3 de cilindraje) respecto a la que se utiliza en Australia (Motoniveladora de potencia de 185 hp y 638 pulg^3 de cilindraje) se logran rendimiento de ejecución menores, siendo el rendimiento en Australia (5000 m2) y rendimiento en Perú (4000 m2) por jornada de trabajo.
NIVELAR Y COMPACTAR	Extendido el material estabilizado con PAM se procederá a una primera compactación con ayuda de una compactadora vibratoria de rola lisa de potencia de 153 hp y 403 pulg^3 de cilindraje. Se procederá a compactar de acuerdo a los resultados obtenidos en los tramos de prueba para luego pueda ingresar el área de topografía, los controles serán las densidades de campo obtenidos en esta etapa. Se procederá a colocar plantillas en el eje y laterales de la vía. En lugares rectos (tangente) las estacas deberán de ser ubicadas cada 10 m y en lugares de curva pronunciada se procederá a colocar plantillas cada 5 m. Se deberá nivelar el material reciclado con ayuda de la motoniveladora, para luego ser compactado en su ancho total por medio de las compactadoras vibratorias de rola lisa.
REFINAR	Se procederá a refinar la base estabilizada con PAM con ayuda de la motoniveladora con el fin de dar acabado a la superficie. Se deberá controlar espesores del pavimento reciclado requerido por el cliente. Durante la actividad de refine realizada por la Motoniveladora tambien se verificará el rendimiento de ejecución, siendo este rendimiento menor por jornada de trabajo debido a las caracteristicas de los equipos de ejecución utilizados en Australia (mayor potencia y mayor cilindraje) respecto a los equipos de ejecución utilizandos en Perú (menor potencia y menor cilindraje).
COMPACTAR CON MULTINEUMATICO	La compactación de la compactadora neumática de potencia de 105 hp y 243 pulg^3 de cilindraje, será finalizada despues de la compactación de la compactadora de rola lisa. Se ejecutará la compactación utilizando un riego inicial con el camion cisterna de capacidad de 4000 gln de agua mediante sus aspersores posteriores, a fin de garantizar el sellado de los finos mediante las ruedas de la compactadora neumática.
REALIZAR CONTROLES FINALES	La capa terminada deberá presentar una superficie uniforme y ajustarse a las rasantes y pendientes establecidas en la etapa de pleneamiento. La densidad y espesor del estabilizado colocado deberá verificarse según lo indicado en las especificaciones técnicas.
EJECUTAR LA LIMPIEZA FINAL Y RETIRO DE EPC FIN	Al terminar los trabajos, se deberá limpiar y conformar las zonas laterales de la vía y las de préstamo. Retirar los equipos y herramientas y los dispositivos de seguridad EPC Abrir el transito.

6. Ensayos en laboratorio

6.1 Tipos de suelos de trabajo

Se ensayaron 05 tipos de áridos que presentan diversas propiedades físico mecánicas, provenientes de proyectos ejecutados en el Perú, desde gravas limosas hasta arcillas rojizas de baja plasticidad, asignando un nombre a cada muestra por tipo de suelo (Suelos A, B, C, D y E).

Los suelos fueron clasificados de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) según ASTM D2487 (ASTM 2011) y por el sistema de clasificación AASHTO.

6.2 Tipo de estabilizador (PAM)

Georgees et al. (2016) afirman que el polímero poliacrilamida (PAM) es producido en forma granular y fue desarrollado en Adelaide – Australia. El (PAM) tiene una densidad de carga moderada (aproximadamente 18%) y un alto peso molecular (12 – 15 Mg/mol, el cual es equivalente a 150 000 monómeros por molécula)

El polímero poliacrilamida (PAM) al entrar en contacto con el agua, incrementa su viscosidad. El aditivo no es tóxico y soluble al agua, presenta una gravedad específica de 0.8 y PH de 6.9 a 25 °C.

6.3 Método de ensayo

Los ensayos realizados en laboratorio que determinan el comportamiento físico, mecánico de los áridos incluyen los ensayos de caracterización: límites de consistencia (IP), ensayos de relación humedad – densidad (MDD y OMS) y capacidad portante (CBR).

Se utilizó el (PAM) a una tasa de 0.0026 % del peso suelto del suelo ensayado. El PAM se mezcló inicialmente con el agua en una proporción de 3 gr/lt, durante 20 minutos, se vertió la solución en el suelo hasta obtener el óptimo contenido de humedad, y se realizó el ensayo de proctor modificado. La máxima densidad seca se obtuvo en el estado natural de los áridos y para las muestra estabilizada con PAM con la tasa descrita según estándar (MTC E 132 & ASTM D 1883), para los suelos A, B, C,D y E.

El ensayo CBR se realizó según normatividad vigente (MTC E 132 & ASTM D 1883), los especímenes fueron moldeados y compactados en capas con la misma energía de compactación utilizada en el ensayo de proctor modificado al 95% MDD (ensayo a nivel se Subrasante) y al 100% MDD (ensayo a nivel de base). Durante la ejecución del ensayo de inmersión y curado, las muestras estabilizadas con PAM fueron controladas bajo periodos de curado en 04, 07, 14 y 28 días antes de proceder a ser ensayados para obtener su capacidad de soporte.

7. Resultados y discusión de ensayos de laboratorio

Las características físico –mecánicas de los áridos ensayados, características como son el índice de plasticidad (IP), la máxima densidad seca (MDD), óptimo contenido de humedad (OCH) y los resultados de la capacidad portante (CBR), son mostradas en la Tabla 2

Tabla 2. Características físico mecánicas de los áridos en estado natural y estabilizado con PAM.

DESCRIPCION DE TIPO DE SUELO	CLASIFICACION DE SUELOS		NATURAL	POLÍMERO - PAM	IP	MDD	OMC	CBR 0.1%	
	SUCS	AASHTO						95% MDD	100% MDD
SUELO A	SP-SM	A-3 (0)	X	-	NP	1.947	8.66	15	19.1
	SP-SM	A-3 (0)	-	X	NP	2.032	8.45	29.6	38.6
SUELO B	CL	A-7-6(17)	X	-	11	1.389	28	15.6	24.7
	CL	A-7-6(17)	-	X	9	1.401	26	38.4	47.8
SUELO C	GP-GM	A-1-b (0)	X	-	4	2.217	7.6	41.4	50.1
	GP-GM	A-1-b (0)	-	X	3	2.221	6.6	50	63
SUELO D	GP	A-1-b (0)	X	-	NP	2.05	8.4	40.5	56.8
	GP	A-1-b (0)	-	X	NP	2.101	7.6	52.6	69.7
SUELO E	GM	A-2-4 (0)	X	-	6	2.09	11	38.4	49.3
	GM	A-2-4 (0)	-	X	5	2.16	9.8	60.3	72.8

La Tabla 2 muestra la reducción del Índice de plasticidad (IP) con la incorporación del PAM de las muestras (B, C y E). Las muestras de suelo C y E presentan una reducción

moderada del IP [16.166%] siendo estos suelos clasificados dentro de la familia de las Gravas, así mismo el valor más alto reportado en relación a la reducción del IP representa el suelo C [18.18%] siendo este suelo clasificado dentro de la familia de las arcillas – suelos finos, no siendo analizadas las muestras A y E por ser suelos no plásticos (NP).

Se comprueba que la incorporación del aditivo PAM reduce el IP de los suelos ensayados, según la postulación del proveedor de PAM en Australia, siendo relevante este valor al momento de seleccionar un suelo para ser incorporado en las capas estructurales que forma el pavimento.

7.1 Máxima densidad seca (MDD) y Óptimo contenido de humedad (OMC)

La relación humedad – densidad, fueron obtenidas en laboratorio comparando el (OMC) y (MDD) para las muestras ensayadas en estado natural y para las muestras estabilizadas con PAM, clasificados en 05 diferentes tipos de suelos (A, B, C, D y E)

Tabla 3. Efectos del PAM en Máxima densidad seca (MDD) y Óptimo contenido de humedad (OMC)

DESCRIPCION DE TIPO DE SUELO	CLASIFICACION DE SUELOS		MDD	OMC	ΔMDD	ΔOMC
	SUCS	AASHTO				
SUELO A	SP-SM	A-3 (0)	1.95	8.66	4.37%	2.42%
SUELO B	CL	A-7-6(17)	1.389	28	0.86%	7.14%
SUELO C	GP-GM	A-1-b (0)	2.217	7.6	0.18%	13.16%
SUELO D	GP	A-1-b (0)	2.05	8.4	2.49%	9.52%
SUELO E	GM	A-2-4 (0)	2.09	11	3.35%	10.91%

La Tabla 3 muestra el incremento de los valores en MDD y reducción del OMC en el ensayo relación humedad – densidad, para las muestras (A, B, C, D y E). Las muestras de suelo B y C presentan un incremento moderado en la MDD [0.86% - 0.18%] respectivamente, mientras que la muestra de suelo A representa el valor más alto de la tabla con relación al incremento de la MDD [4.37%]. Así mismo se obtiene de los resultados de laboratorio la reducción del OMC con la incorporación del PAM con relación a los resultados obtenidos con las muestras ensayadas en estado natural, presentando valores moderados en la reducción del OMC de las muestras B y D [7.14% - 9.52%] respectivamente, así mismo el valor más alto reportado en relación a la reducción del OMC representa el suelo C [13.16%].

Se comprueba que la incorporación del aditivo PAM incrementa la densificación de los suelos mediante la reorientación de las partículas existentes dentro del paquete estructural que conforma la capa de pavimento estabilizado según la postulación del proveedor de PAM en Australia

7.2 **Capacidad de soporte (CBR)**

Se realizó el ensayo CBR en 05 tipos de suelos. Todas las muestras ensayadas con PAM presentan un incremento de su capacidad de soporte vs las muestras no tratadas. Tanto al 95 % MDD (a nivel de subrasante) y al 100 % MDD (a nivel de base) y en todas

sus fases (compactación, inmersión/expansión y penetración). Los porcentajes de incremento de valores del CBR son mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje de incremento de valores de CBR para muestras estabilizadas con PAM

DESCRIPCION DE TIPO DE SUELO	CLASIFICACION DE SUELOS		CBR	
			0.1%	
	SUCS	AASHTO	Δ95% MDD	Δ100% MDD
SUELO A	SP-SM	A-3 (0)	97.33%	102.09%
SUELO B	CL	A-7-6(17)	146.15%	93.52%
SUELO C	GP-GM	A-1-b (0)	20.77%	25.75%
SUELO D	GP	A-1-b (0)	29.88%	22.71%
SUELO E	GM	A-2-4 (0)	57.03%	47.67%

En la Tabla 04, se observa que en los 05 suelos ensayados el porcentaje de incremento del CBR se encuentra por encima del 20 %. Las muestras de suelos C y D presentan un incremento moderado al 95 % MDD [20.77 % - 29.88%] y al 100 % MDD [25.75 % - 22.71 %], respectivamente. El incremento de valores de CBR para la muestra B es el más alto registrado durante las muestras ensayadas con la incorporación del polímero PAM al 95% MDD [146.15 %] y 100 % MDD [93.52%].

El incremento del valor de CBR para el suelo B, IP≥9 tratada con aditivo PAM, demuestra que para este tipo de suelo el PAM generaría ahorros en los costos de diseño y construcción de pavimento económico comparado a la construcción tradicional de suelos naturales.

Se muestra en la Tabla 05 los resultados de CBR para muestras controladas bajo proceso de curado en periodos de 04, 07, 14 y 28 días, siendo graficados estos resultados en suelos para CBR 0.1” al 95 % MDD (Resultados para Subrasante) y para CBR 0.1” al 100% MDD (Resultados para Base) representados en las Figura 4 y Figura 5 respectivamente:

Tabla 5: Resultado de ensayo CBR para muestras bajo el proceso de curado

DESCRIPCION DE TIPO DE SUELO	CLASIFICACION DE SUELOS		04 DÍAS		07 DÍAS		14 DÍAS		28 DÍAS	
			CBR 0.1"		CBR 0.1"		CBR 0.1"		CBR 0.1"	
	SUCS	AASHTO	95% MDD	100% MDD	95% MDD	100% MDD	95% MDD	100% MDD	95% MDD	100% MDD
SUELO A	SP-SM	A-3 (0)	29.6	38.6	35.9	44.8	50	59.1	85.2	95
SUELO B	CL	A-7-6(17)	38.4	47.8	46.8	58.1	77.2	93	89.3	96.7
SUELO C	GP-GM	A-1-b (0)	50	63	68.3	79.4	98.7	111.2	135.6	151.1
SUELO D	GP	A-1-b (0)	56.8	69.7	64.2	78.6	92.1	105.3	119.8	137.8
SUELO E	GM	A-2-4 (0)	60.3	72.8	72.8	86.3	96.4	110.4	123.8	136.2

En la Tabla 05, se observa que en todos los suelos ensayados el porcentaje de incremento del CBR bajo procesos de curados a 28 días comparados a 04 días, se encuentra por encima del 45 %. Así los suelos B, C presentan un incremento al 95 % MDD (De 56.99 % a 63.12%) y al 100 % MDD (De 50.56 % a 58.30 %). El incremento de valores de CBR para la muestra A es el más alto registrado al 95% MDD [65.25%] y 100 % MDD [59.36%].

Figura 4: Resultados obtenidos del ensayo CBR 0.1” al 95% MDD para muestras con diferentes tiempos de curado

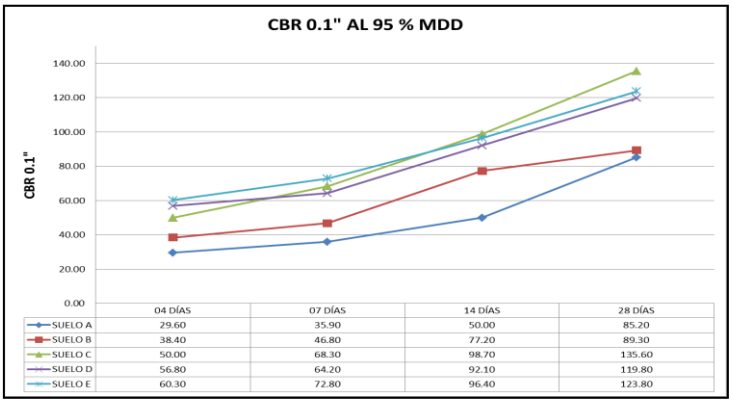
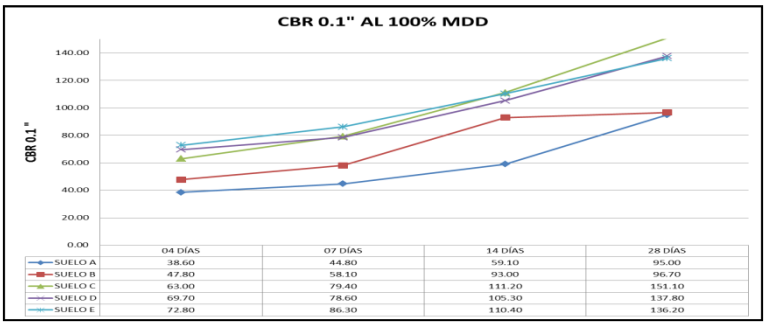


Figura 5: Resultados obtenidos del ensayo CBR 0.1” al 100% MDD para muestras con diferentes tiempos de curado



8. Conclusiones y recomendaciones

- El estabilizador no tradicional, el polímero poliacrilamida – PAM, puede ser considerado como una alternativa de solución para los caminos con deficiente capacidad portante (CBR < 30%) debido a su desempeño en campo sustentado en el presente artículo en el aumento del CBR por encima del 20% en promedio vs suelos en estado natural.
- Se verifica un aumento de la MDD de las muestras de suelo estabilizadas con PAM frente a las muestras en estado natural, presentando un incremento de 2% en promedio. Por lo tanto el PAM tiene la capacidad de densificar las capas granulares que forma parte del paquete estructural del pavimento, mejorando la durabilidad del pavimento.
- Se verifica la reducción del OCH de las muestras de suelo estabilizadas con PAM frente las muestras en estado natural, presentando valores reducción de 8 % en promedio. Este valor es significativo ya que implica el ahorro de agua en la ejecución de un tramo carretera realizando la estabilización de suelos con PAM.
- Se verifica el incrementó el CBR incorporando el PAM de las muestras ensayadas con relación a las muestras en estado natural, presentando incrementos de 70% en promedio al 95% MDD e incrementos de 58% en promedio al 100% MDD demostrado su mejor desempeño para muestras con

IP≥9, que implica un aumento de la capacidad portante del pavimento e incremento de vida útil.

- Debido a la diferencia de los equipos que se utilizan en Perú para la estabilización con PAM (Motoniveladora de potencia de 125 hp y 403 pulg3 de cilindraje) respecto a los equipos que se utilizan en Australia (Motoniveladora de potencia de 185 hp y 638 pulg3 de cilindraje) se logran rendimientos menores de ejecución, siendo el rendimiento en Australia (5000 m2) y rendimiento en Perú (4000 m2) por jornada de trabajo, la diferencia de lo equipos utilizados en Perú respecto a los equipos utilizados en Australia implica rendimientos menores de ejecución 5000 m2 en Australia y 4000 m2 en Perú por jornada de trabajo.
- Se recomienda que el diagrama de flujo de actividades presentado en el procedimiento constructivo de estabilización de suelos utilizando PAM presentado por el autor pueda ser evaluado al Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) a fin de ser incluida a la normatividad nacional.
- Se recomienda en una próxima investigación realizar el análisis de la condición funcional de la vía evaluando parámetros como IRI, desprendimiento de material particulado (emisión de polvo) de un tramo de carretera estabilizado con PAM comparando con un tramo de carretera construido con material natural y de esta forma demostrar la existencia de otros beneficios de suelos estabilizados con PAM.

Referencias Bibliográficas

Andrews, R & Duffy., P (2008). Polymer Stabilisation and Best Value Management of Unsealed Road Networks, Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice, vol. 17, no. 3, p. 59.

AUSTROADS (1998). Guide to Stabilisation in Roadwork, Sidney 1998.

Crisera, J (2016). Construction guidelines for In Situ Polycom Stabilisation Aid.

Li, Y, Shao, M, and Horton, R (2011), 'Effect of Polyacrylamide Applications on Soil Hydraulic Characteristics and Sediment Yield of Sloping Land', Procedia Environmental Sciences, vol. 11, pp. 763-773.

National Lime Association (2004) – Cal Treated Stabilization Manual

PCA (1995). Soil – Cement Construction Handbook, Portland Cement Association (PCA), Skokie, Illinois

Romel, Georgees., Rayya A, Hassan., Robert, Evans & Piratheepan, Jegatheesan (2016). Performance Improvement of Granular Pavement Materials Using a Polyacrylamide-Based Additive

Wayne S. Adaska & David R. Luhr (2004) – Control of Reflective Cracking in Cement Stabilized Pavement.

Wirtgen Cold Recycling Technology 3rd edition (2010) - Appendix 5 Relevant Construction Cost Pag 336