

INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL SUELO / CEMENTANTES PARA MEJORAR EL TERRENO DE CIMENTACIÓN OBRA DE PASO CAÑADA EL HATILLO – OCAÑA - COLOMBIA

Recepción:
Octubre 13 de 2011

Aprobación:
Diciembre 13 de 2011

Aldo Onel Oliva González
Esp. en Ingeniería de Minas, Doctor en Ciencias Técnicas,
Especialista en Ingeniería del Terreno
Director del Área de Investigación
Universidad de las Calificadas Internacionales UDCI, México
aldo.oliva@udcedu.mx

Romel Jesús Gallardo Amaya
Esp. en Ingeniería Ambiental, Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga
Investigador Grupo GIGMA, Departamento de Ingeniería Civil
Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia
rjgallardoa@ufps.edu.co

Oscar Andrés Cuanalo Campos
Sc. D. Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central de Las
Villas, Cuba
Docente Investigador, Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla BUAP, México
oscar.cuanalo@fibi.buap.mx

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la Investigación Experimental Suelo/Cementantes para mejorar el terreno de cimentación en la Cañada el Hatillo, Municipio de Ocaña. El terreno en el área de interés está constituido por arenas arcillosas y limosas en estado suelto a medianamente compacto con espesor de 4.4 m, subyacentes por una roca sedimentaria de tipo limolita que da origen a un suelo limo arenoso de baja plasticidad; el agua freática se ubica a nivel del terreno natural. Para este proyecto se recomendó un cajón de cimentación desplantado a 1 m de profundidad y apoyado sobre una arena arcillosa mejorada hasta una profundidad de 2.74 m mediante la adición de cemento y cal para lograr una resistencia a la compresión simple $q_u = 586$ kPa. Con el suelo mejorado se obtuvo una capacidad de carga admisible $q_{admisible} = 235$ kPa, valor que es mayor que los esfuerzos de flexo-compresión originados por las cargas estáticas y dinámicas debido al tránsito de los vehículos, de magnitud 64.7 y 11.8 kPa, para el valor máximo y mínimo respectivamente. Los asentamientos inmediatos resultaron del orden de 3 cm bajo toda el área del cajón de cimentación.

Palabras Claves:

Cimentación compensada, estabilización de suelos, subsuelo de mala calidad, suelo mejorado

Abstract

This paper presents the results of Experimental Research Soil/Cement to improve the foundation soil in the Hatillo Cañada, municipality of Ocaña, which subsoil consists of clayey and silty sands loose to fairly compacted with a thickness of 4.4 m, underlain by siltstone sedimentary rock that gives a low plasticity sandy silt soil; the water table is in the level of the ground. For this project a foundation caisson was recommended to 1 m depth and supported on a sandy loam improved up to 2.74 m depth, by the addition of cement and lime to achieve a simple compressive strength $q_u = 586$ kPa (kilopascals). With the improved soil an acceptable capacity $q_{admisible} = 235$ kPa (kilopascals) was obtained (Vesic theory), this value is greater than the flexo-compression stress caused by static and the dynamic loads due to the traffic of vehicles, of magnitude 64.7 and 11.8 kPa (kilopascals), for the maximum and minimum

value respectively. Immediate settlements were approximately 3 cm below the caisson foundation area.

Key Words:

Compensated foundation, improved soil, subsoil of poor quality, soil stabilization.

Introducción

El terreno para la cimentación de cualquier tipo de estructura (edificios, puentes, muros, etc.), debe ofrecer las características de resistencia y deformación que permitan soportar adecuadamente dicha estructura. En algunos casos este terreno no cuenta con la capacidad de carga suficiente y por ello debe remplazarse con un material sobre el cual pueda construirse de manera segura la cimentación (Das, 2008). El mejoramiento del suelo se puede realizar por diversos métodos que pueden ser mecánicos (como la compactación) o químicos adicionando aditivos (U.S. Army, 1997), de estos últimos los más frecuentes son: cemento, cal, cenizas y asfalto (Suárez, 1999). Estos aditivos al ser mezclados con el suelo producen una doble acción. Por un lado actúan como "conglomerante de las gravas arenas y limos" y por otro interactúan con las moléculas de agua incorporadas al material arcilloso presente en el suelo (Torrente, *et al.*, 1974). Lo anterior permite que el suelo disminuya su porosidad, plasticidad y aumente su resistencia y durabilidad.

Las condiciones de mejoramiento de propiedades de los suelos mediante mezcla con aditivos se planteó para el caso del sector de la cañada el Hatillo, sitio donde se encuentran suelos compuestos por arenas arcillosas y limosas con alta compresibilidad, en estado suelto y saturado. Estas condiciones determinan que estos suelos presenten muy baja capacidad portante para cimentar estructuras; es por ello que la estructura de paso existente presentaba grandes asentamientos que ya habían afectado la funcionalidad de la misma. Debido a la necesidad de plantear una estructura que permitiera el paso tanto de peatones como de vehículos pesados, se propuso mejorar las condiciones del suelo encontrado y para ello se desarrolló una Investigación Experimental Suelo/Cementantes.

Materiales Y Métodos

2.1 Descripción del Proyecto

La realización del proyecto consistió en primer lugar en proponer una obra que permitiera el paso tanto a los peatones, que habitan en el sector del Hatillo del municipio de Ocaña, (ver Figura 1), y a vehículos livianos y pesados. En segundo lugar se estableció la necesidad de realizar un mejoramiento al suelo encontrado en el sitio a implementar la obra de paso. Este suelo está constituido por materiales arenos arcillosos de muy baja capacidad de soporte presentes en un espesor de 3.5 m desde la superficie, los cuales se encuentran sobre un material arenoso limoso de 1.0 m de espesor de capacidad de soporte media, el cual reposa sobre una roca dura de origen sedimentario (Limolita) (PBOT, 2002) conocida en la región como "pan de jabón".

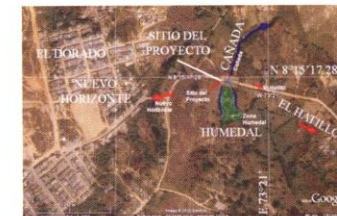


Figura 1. Localización Sitio de Paso Quebrada El Hatillo. Fuente: Google Earth 2011.

Como estructura de paso se plantearon dos alternativas, una es la construcción de un pontón y la otra la construcción de una estructura tipo cajón (Box Colvert). En lo que compete a los autores se decidió tomar para el estudio la segunda alternativa. Se estableció que esta estructura debería apoyarse sobre una capa de suelo mejorado mediante la adición de aditivos como la cal y el cemento, la cual debía ser posteriormente colocada en capas con un grado de compactación adecuado.

2.2 Soluciones geotécnicas para la cimentación del Box

La construcción de estructuras sobre terrenos de mala calidad, plantea un reto ingenieril para el diseño de sus cimentaciones, las cuales deberán

considerar dos aspectos fundamentales: 1) La capacidad de carga del subsuelo para garantizar que los esfuerzos que transmiten dichas estructuras no rebasen la capacidad de sustentación o de soporte del terreno de apoyo, y 2) Las deformaciones que producirán las sobrecargas, evaluadas en términos de hundimientos o asentamientos, deberán estar dentro de rangos tolerables para las propias estructuras.

Para la obra de paso de la cañada el Hatillo se propuso un cajón de cimentación de concreto armado desplantado a 1 m de profundidad, ancho de 5 m y largo de 5.5 m, (ver Figura 2).

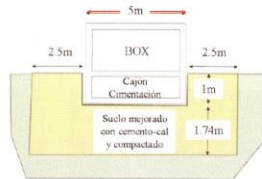


Figura 2. Cajón de cimentación para la cañada el Hatillo

Este cajón es parcialmente compensado; es decir, el peso del suelo excavado para emplazar la cimentación compensa una parte de las cargas que bajan de la estructura. Lo anterior permite reducir la magnitud de los asentamientos que se producirán por el peso que transmite la obra al subsuelo de pobre calidad (cargas muertas y vivas por el tráfico vehicular).

El cajón se apoyará en el estrato superficial de arena-arcillosa SC la cual deberá ser mejorada hasta una profundidad de 2.74 m, mediante la adición de cemento y cal, perfectamente homogeneizada y compactada al 95% de su peso volumétrico seco máximo. Con este mejoramiento se logró obtener en esta capa una resistencia a la compresión simple $q_u = 560$ kPa.

2.3 Propuesta Suelo/Cementantes para mejorar el terreno de cimentación

La excavación del terreno para el mejoramiento de los suelos y el emplazamiento del cajón de cimentación se podrá efectuar a cielo

abierto excavando 2.74 m del terreno natural, correspondiendo el primer metro a la profundidad de desplante del Box ($D = 1$ m) y los 1.74 m restantes, a la capa de apoyo constituida por un suelo mejorado con cemento y cal, utilizando el material producto de la excavación.

Para la dosificación adecuada de la capa de suelo mejorado, se efectuaron en el laboratorio de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña - UFPSO, tres series de ensayos de compresión simple en muestras de suelo en las que se variaron los contenidos de cal hidratada con una pureza del 95% y cemento portland tipo I (estos contenidos de cementantes se establecieron basados en experiencias previas de los autores (Cabrera, 2003), manteniendo fijas las cantidades de suelo seco y agua.

En la Tabla 1 se consignan los datos de contenido de materiales y en la Tabla 4 las relaciones cemento/suelo y cemento/agua para cada serie, y en las Figuras 3 y 4 se presentan algunas imágenes de los trabajos de laboratorio efectuados en esta etapa experimental (Gallardo, et al., 2010).

Serie	Contenido de materiales (kg)			
	Suelo seco natural	Agua	cemento	cal
1	1000	255	50	50
2	1000	255	75	75
3	1000	255	100	100

Tabla 1. Contenido de materiales para las pruebas.

Serie	Relaciones	
	cem/suelo	cem/agua
1	5%	0.196
2	7.5%	0.294
3	10%	0.39

Tabla 2. Relaciones de materiales para las pruebas.



Figura 3. Ensayos de compresión sin confinamiento



Figura 4. Mezclas suelo cementantes (cemento y cal)

2.4 Pruebas de Laboratorio

A partir de los sondeos realizados para la exploración del subsuelo se tomaron muestras representativas de los diferentes estratos o capas de suelo encontradas, tomando muestras inalteradas para el ensayo de compresión simple y peso unitario y muestras alteradas para ensayos de humedad natural, clasificación, proctor normal y gravedad específica de los sólidos.

Pruebas índice para clasificación de suelos

Para las muestras obtenidas en los sondeos con el equipo SPT se realizaron ensayos de granulometría, límites de plasticidad y humedad natural. Para el material encontrado a partir de 4.3 m de profundidad bajo el lecho de la quebrada se realizaron ensayos de peso unitario y para la capa de material a mejorar se realizó ensayo de gravedad específica de los sólidos y ensayo de compactación proctor normal.

Pruebas mecánicas de resistencia y compresibilidad.

Se realizaron ensayos de compresión confinada para las muestras obtenidas de la

roca sedimentaria (limolita) a partir de los 4.3 m de profundidad bajo el lecho de la quebrada. Los ángulos de fricción interna se estimaron utilizando la correlación de los valores de N del ensayo SPT de Peck, Hanson y Thornburn (Das, 2000). Los datos anteriores se encuentran consignados en la Tabla 3.

Prof. (m)	Sondeo 2		Sondeo 3	
	N_{gr}	ϕ^o	N_{gr}	ϕ^o
0.0 - 0.5	0	0	0	0
0.5 - 1.0	0	0	0	0
1.0 - 1.5	0	27.1	5	27.5
1.5 - 2.0	0	0	0	0
2.0 - 2.5	0	0	5	0
2.5 - 3.0	47	0	3	0
3.0 - 3.5	24	33.1	1	0
3.5 - 4.0	7	0	20	29.9
4.0 - 4.5	16	0	9	35.1
4.5 - 5.0	42	36.6	39	35.1
5.0 - 5.5	52	-	-	-

Tabla 3. Valores de N y ángulo de fricción interna para sondeos eje Cañada.

2.5 Diseño Geotécnico de la cimentación

Para el cálculo de la capacidad de carga admisible del terreno de cimentación se utilizó la teoría de Vesic aplicando la ecuación No.1 para suelos cohesivos y un factor de seguridad de 3 (Winterkorn, et al., 1987); además se tomó en cuenta que una vez mejorada la capa de apoyo SC con la adición de materiales cementantes (cemento y cal), se obtendrá una resistencia a la compresión simple mínima de q_u de 560 kPa, con una cohesión $c = 280$ kPa.

$$I_{admissible} = \frac{CN_c \delta_c}{3} + \gamma'_m D_f N_q \delta_q \quad (1)$$

Los factores de capacidad de carga utilizados fueron: $N_c = 5.14$; $N_q = 1$ y $N_\gamma = 0$; y los correspondientes factores de forma para un cimient rectangular $\delta_c = 1.18$, $\delta_q = 1$ y $\delta_\gamma = 0.36$. Además se utilizó un factor de resistencia de 0.4 para determinar la cohesión de trabajo "c" empleada en los cálculos. Con los datos anteriores se obtuvo una capacidad de carga admisible $q_{adm} = 235$ kPa.

Previamente se determinaron los esfuerzos de flexo-compresión originados por las cargas permanentes y vivas, y los momentos producidos por la circulación del vehículo C40-95 (MINTRANSPORTE, 1996). Se obtuvieron esfuerzos $\sigma_{m\acute{a}x} = 64.7$ kPa y $\sigma_{m\acute{i}n} = 11.8$ kPa,



ambos de compresión y de magnitud menor que la capacidad de carga admisible, y el esfuerzo máximo fluctuando a uno y otro lado de la cimentación cuando el vehículo entra y sale de la estructura.

Se evaluaron los asentamientos que se producirán en los estratos arenosos ubicados entre 2.74 m y 4.42 m de profundidad, utilizando una presión máxima sobre el terreno $w = 64.7$ kPa y su distribución por medio de la teoría de Boussinesq (Berry, *et al.* 2000). Debido a que estos estratos son de naturaleza friccionante, los asentamientos esperados serán inmediatos o elásticos δ_i , determinados utilizando la ecuación No. 2 (Das, 1999) y las siguientes propiedades elásticas del material (Bowles, 1997):

- Módulo de elasticidad $E = 6867$ Kpa (obtenido por correlación con los valores del ensayo SPT) (Bowles, 1997)
- Relación de Poisson $\mu = 0.36$
- Factor de influencia $I_w = 0.82$

$$\delta_i = wB \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right) * I_w \quad (2)$$

Los asentamientos inmediatos que se producirán durante el proceso constructivo serán uniformes del orden de los 3 cm bajo toda el área del cajón de cimentación propuesto. Se considera que estas deformaciones están dentro de los rangos tolerables.

Resultados

En la Tabla 6 se observan los resultados obtenidos de las pruebas índice realizadas a las muestras de suelo obtenidas del sitio de estudio.

SONDEO #1						
Prof. (m)	% wmat.	Y_m (gr/cm ³)	% pasa Tamiz No. 200	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0.0 - 1.22	35.53	-	87.15	43	26	17
1.22 - 1.68	14.59	-	26.65	NI	NP	NP
1.68 - 1.83	7.18	-	15.09	21	17	4
SONDEO #2						
Prof. (m)	% wmat.	Y_m (gr/cm ³)	% pasa Tamiz No. 200	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0.0 - 2.74	-	-	19.98	32	21	11
2.74 - 4.27	27.98	-	23.70	32	22	10
4.27 - 4.42	-	-	13.54	NI	NP	NP
4.42 - 4.72	22.54	2.314	63.50	48	28	20
SONDEO #3						
Prof. (m)	% wmat.	Y_m (gr/cm ³)	% pasa Tamiz No. 200	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0.0 - 3.35	-	-	19.98	32	21	11
3.35 - 4.11	23.42	-	25.70	32	22	10
4.11 - 4.30	-	-	13.54	NI	NP	NP
4.30 - 4.57	25.75	2.314	63.50	48	28	20

Notas: [1] Los resultados en el sondeo 2 y 3 son idénticos dado que los materiales encontrados son iguales.

Tabla 6. Resumen de pruebas índice.

Los resultados de las pruebas mecánicas de resistencia y compresibilidad se tabularon en la Tabla 7.

En la Tabla 8 se resumen los promedios de resistencia a la compresión simple obtenidos de los ensayos a las muestras de las 3 series, para diferentes relaciones de cemento/suelo y cemento/agua.

SONDEO #1					
Prof. (m)	Ss	Proctor Normal		q_p (kg/cm ²)	Clasificación U.S.C.S., AASHTO
		% Wopt.	Y_{max} [2]		
0.0 - 1.22	-	-	-	-	CL A-7(6)16
1.22 - 1.68	-	-	-	-	SM A-2-4(0)
1.68 - 1.83	-	-	-	-	SM A-1-b(0)
SONDEO #2					
Prof. (m)	Ss	Proctor Normal		q_p (kg/cm ²)	Clasificación U.S.C.S., AASHTO
		% Wopt.	Y_{max} [2]		
0.0 - 2.74	-	-	-	-	SC A-2-6(0)
2.74 - 4.27	2.685	15.75	1.15	-	SC A-2-6(0)
4.27 - 4.42	-	-	-	-	SM A-1-b(0)
4.42 - 4.72	-	-	-	3.65	MI A-7-6(12)
SONDEO #3					
Prof. (m)	Ss	Proctor Normal		q_p (kg/cm ²)	Clasificación U.S.C.S., AASHTO
		% Wopt.	Y_{max} [2]		
0.0 - 3.35	-	-	-	-	SC A-2-6(0)
3.35 - 4.11	2.685	15.75	1.15	-	SC A-2-6(0)
4.11 - 4.30	-	-	-	-	SM A-1-b(0)
4.30 - 4.57	-	-	-	3.65	MI A-7-6(12)

Notas: [2] El peso específico seco máximo está en gr/cm³.

Tabla 7. Resumen de pruebas mecánicas de resistencia y compresibilidad

Serie	Resistencia q_u (kg/cm ²)		
	7 días	14 días	28 días
No.			
1	1.52	1.36	1.52
2	1.76	2.57	3.09
3	3.04	4.01	5.72

Tabla 8. Resistencia a la compresión simple de especímenes de ensayo.

Discusión de Resultados

Los resultados de las pruebas índice describen un perfil estratigráfico compuesto por suelos arenos arcillosos saturados y sueltos con una capacidad portante nula hasta los 3.0 m de profundidad. Una vez realizadas las pruebas a las muestras de estos suelos arenos arcillosos saturados, con las diferentes relaciones de suelo/cementante, se aprecia que el suelo estabilizado con adición de cal y cemento en las proporciones dadas en la Tabla 4, mejoró su resistencia a la compresión simple (q_u) desde cero hasta un valor máximo de 5.72 kg/cm².

Se aprecia en los resultados de las pruebas de compresión simple que una variación en 2.5% en la relación cemento/suelo, permitió aumentar casi al doble la resistencia del suelo.

Es de establecer que la adición de cal permitió retardar el proceso de fraguado del cemento, lo cual es fundamental para el trabajo en campo durante la instalación del suelo mejorado.

En lo que respecta la capacidad de carga del suelo se pasó de valores cercanos a cero kPa hasta un $q_{admisible} = 235$ kPa, de acuerdo a los resultados obtenidos sobre los especímenes de ensayo.

Conclusiones

Cuando se tienen que desplantar estructuras en terrenos de cimentación de pobre calidad, constituidos por suelos muy compresibles o en estado suelto, existen dos alternativas de solución:

a) Bajar las cargas a estratos más resistentes ubicados a mayor profundidad mediante cimentaciones profundas.

b) Mejorar el terreno superficial de apoyo mediante alguna técnica o proceso constructivo.

El mejoramiento del terreno mediante la adición de agentes cementantes es una práctica ingenieril que se puede utilizar para aumentar la resistencia del terreno y/o reducir su deformación. En general los agentes cementantes de uso común pueden incluir el cemento, la cal y la ceniza; de estos se seleccionaron los dos primeros para el tratamiento del terreno de cimentación donde se emplazará el box en la Cañada El Hatillo, el cual está constituido por arenas arcillosas y limosas en estado suelto hasta 4.4 m de profundidad. Los agentes cementantes convenientemente dosificados, mezclados con el suelo de cimentación y adecuadamente compactados alcanzarán una resistencia a la compresión simple de 560 kPa (5.7 kg/cm²) para una relación cemento/suelo del 7.5%, equivalente a un suelo de consistencia dura, según los datos experimentales obtenidos en las series de pruebas de laboratorio llevadas a cabo en esta investigación. Lo anterior es una notable mejora en la capacidad del suelo teniendo en cuenta que en estado natural este suelo tiene capacidad de carga de 32.7 kPa.

El terreno así mejorado ofrece buena capacidad de carga para resistir los esfuerzos estáticos y dinámicos originados por el tráfico vehicular, además las deformaciones en el suelo de cimentación están dentro de rangos tolerables para la estructura de proyecto, esto equivale a aumentar la capacidad de carga del suelo desde 32.7 kPa (condición natural) hasta

Agradecimientos

Los autores manifiestan su reconocimiento a los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña Fernando Lázaro y Alexander Ramírez, con quienes se desarrolló el trabajo de campo y laboratorio del estudio.

Bibliografía

- Berry, P. y Reid, D. (2000). Mecánica de Suelos. Edit. McGraw Hill. Santafé de Bogotá, Colombia. p.59-71.
- Bowles, J. (1997) "Foundation analysis and design" Editorial Mc Graw Hill, USA. pp. 123, 303-306, 316.
- Cabrera, C. (2003). Investigación experimental de suelos estabilizados con cal. Tesis de Pregrado en Ingeniería Civil. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. p. 200
- Das, B., 2000. "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica." Editorial Thomson Learning, México, DF. p. 260.
- Das, B., 2008. "Principios de Ingeniería de Cimentaciones." Quinta Edición. Editorial CENGAGE Learning Brooks Cole, México, DF. p. 83, 664.
- Das, B., 1999 "Principles of Geotechnical Engineering," Third Edition, PWS Publishing Company, Boston USA. p.303.
- Gallardo, R. y Cuanalo, O. Diseño Geotécnico de la cimentación de un Box para la obra de paso en la Cañada El Hatillo, Municipio de Ocaña, Departamento de Norte de Santander – Colombia. Informe Técnico – DIE UFPSO 2011. pp.46
- MINISTERIO DE TRANSPORTE. Instituto Nacional de Vías. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. Noviembre 1996.
- Plan Básico de Ordenamiento Territorial (2002). Municipio de Ocaña, Norte de Santander, Colombia. p.294-300.
- Suarez, J., 1999. Estabilización de Suelos. p.4. Extraído el 08 de Julio de 2011 desde http://www.erosion.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=66:estabilizacion-de-suelos&catid=54&Itemid=201
- Torrente, M. y Sagues, L. (1974). Estabilización de Suelos: Suelo/Cemento. Edit. Reverté. España. p.113
- U.S. Army (1997, March). Military Soils Engineering. Field Manual 5-410. Chapter 9, Washington, DC. p.9-1. Extraído el 08 de Julio de 2011 desde http://www.erosion.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=66:estabilizacion-de-suelos&catid=54&Itemid=201
- Winterkorn, H. y Fang, H., 1987 "Foundation Engineering Handbook. Editorial Van Nostrand Reinhold USA.