Determination of the undercut for the piles of the bridge located in the municipality of Riosucio Caldas
Determinación de la socavación para las pilas del puente localizado en el municipio de Riosucio Caldas

Diego Alejandro Pulgarín Montoya[1], Juan Camilo Reyes Ramírez [2] Carlos Alberto Reyes Ramírez [3]

ABSTRACT

This investigation makes the determination of the local scour depth of piles by means of the equations proposed in the literature. Previously, the characterization of the hydraulic operation of the river associated with the hydrological characteristics of the site is available, which will be directly related to the subsoil geotechnical parameters. Once the critical conditions prone to undergoing the undermining process were identified, the subgrade of the foundation was improved, using cementitious materials, which were carried out in laboratory tests. These tests were carried out in different proportions, with the purpose of increasing its resistance to cutting to admissible ranges, for interaction with the structure, guaranteeing its stability and reducing the undercutting process, so that once carried out, the corresponding laboratory tests , it was found an addition ratio of cement material composed of 3%, 3% FLY ASH (fly ash) and 4% sodium silicate, thus generating a geo-polymer. Performing subsoil improvement by adding additives reduced the magnitude of the expected undercut depth by magnitudes of up to 40%. Additionally, it was found that the equations for the determination of the local scour depth are considering the average size of the particles as a representative geotechnical parameter of the condition of the particles, which is considered not representative for the modeling of the particles. This problem is due to the fact that, due to the improvement of the mechanical characteristics of the subsoil, there are direct changes in the resistance to cutting of the subsoil in a drained and drained condition, parameters that are not involved in solving the problem of determining the depth of scour. battery room.

Keywords: Local piles scour, Soil cut resistance, Subsoil improvement, Geopolymers, Stabilization of non-cohesive soils.

RESUMEN

Esta investigación realiza la determinación de la profundidad de socavación local de pilas mediante las ecuaciones propuestas en la literatura, previamente se cuenta con la caracterización, del funcionamiento hidráulico del rio asociado a las características hidrológicas del sitio, lo cual se relacionará directamente con los parámetros geotécnicos del subsuelo. Identificadas las condiciones críticas y propensas a estar sometida al proceso de socavación, se realizó el mejoramiento de la subrasante de cimentación, mediante el uso de materiales cementantes, los cuales se realizaron ensayos de laboratorio. Estos ensayos se realizaron en diferentes proporciones, con el propósito de aumentar su resistencia al corte hasta rangos admisibles, para la interacción con la estructura, garantizando su estabilidad y disminución del proceso de socavación, por lo que una vez efectuado, los ensayos de laboratorio correspondientes, se encontró una proporción de adición de material cemento compuesto por un 3%, 3% de FLY ASH (Cenizas volantes) y 4% de silicato de sodio, generando de esta manera un geo polímero. Al realizar el mejoramiento del subsuelo mediante la adición de aditivos redujo la magnitud de la profundidad de socavación esperada en magnitudes hasta del 40%. Adicionalmente se encontró que las ecuaciones para la determinación de la profundidad local de socavación están considerando como parámetro geotécnico representativo de la condición de las partículas el tamaño promedio de las mismas, lo cual se considera que no es representativo para la modelación del problema, debido a que ante el mejoramiento de las características mecánicas del subsuelo, se encuentran cambios directos en la resistencia al corte del subsuelo en condición drenada y drenada, parámetros que no se involucran en la resolución de la problemática de determinación de la profundidad de socavación local de pilas.

Palabras clave: Socavación Local de pilas, Resistencia al corte del suelo, Mejoramiento del subsuelo, Geo polímeros, Estabilización de suelos no cohesivos.

Introducción

La socavación de pilas en puentes, genera de manera directa una dificultad en los elementos estructurales de fundación, los cuales la mayoría, su uso es en la infraestructura vial e hidráulica, ante la necesidad de corregir el problema se han generado diversos métodos de tratamiento que permiten brindar condiciones estables a la subrasante y estabilidad de estos elementos estructurales de comunicación entre cauces.

La socavación local se refiere a la remoción del material que circunda pilas, estribos, diques o terraplenes de acceso a un puente. Está causada por el cambio de dirección de las líneas de corriente, la turbulencia, la aceleración del flujo y los vórtices resultantes in-

[1] Profesor Especialización en recursos hídricos, Universidad Católica de Colombia, E-mail: dapulgarin@ucatolica.edu.co
[2] Estudiante Especialización en recursos hídricos, Universidad Católica de Colombia, E-mail: jcreyes05@ucatolica.edu.co – jcreyesr@unal.edu.co
[3] Estudiante Especialización en recursos hídricos, Universidad Católica de Colombia, E-mail: careyes03@ucatolica.edu.co – alberick872004@yahoo.es

ducidos por la obstrucción al flujo. La socavación local puede presentarse bajo condiciones de agua clara o lecho móvil. El mecanismo que causa la socavación local ha sido estudiado por varios investigadores (Tison, 1940; Shen, H. W. y Schneider V. R. (1969); Melville, B. W., 1975; Breusers, H. N. C., Nicollet, G. y Shen, H. W., 1977; Raudkivi, A. J. y Ettema R., 1983, Raudkivi, A. J., 1986, y Dargahi, B. 1990). Para la socavación local pueden existir tanto en pila como en los estribos del puente.

Se considera para la determinación de la socavación local de las pilas del puente los siguientes factores:

- Ancho de la pila
- Longitud de la pila
- Angulo de ataque del flujo
- Profundidad del agua
- Velocidad de flujo
- Forma de la pila
- Características del material del lecho como tamaño y cohesión
- Gradación del sedimento
- Estratificación del suelo
- Tiempo del proceso de socavación

Para esto, se determinarán los parámetros de socavación inicial a través de los parámetros particulares del suelo y así, mejorar sus propiedades mecánicas del suelo, obteniendo nuevos parámetros geotécnicos de cálculo, para la determinación de la nueva socavación con el suelo mejorado. Para el desarrollo del trabajo se cuentan con muestras del sitio, donde se localiza el proyecto muestras inalteradas y sobre ellas se realizaron ensayos estándar de caracterización física.

Metodología

El desarrollo del presente trabajo de grado se realizó considerando el análisis de la socavación local, mediante el análisis de la condición actual, se refiere a las condiciones mecánicas in situ actuales del suelo, denominando este como el suelo patrón y posteriormente se realiza la estabilización de este suelo, con la adición de cemento de portland, Fly ash y silicato de sodio, este último formando el geo polímero, una vez obtenida la formula de trabajo para este suelo en particular, se obtienen los nuevos parámetros mecánicos del suelo.

A continuación, se presenta el respectivo perfil estratigráfico y registro fotográfico de las exploraciones realizadas en campo.
Figura 1. Perfil estratigráfico de la exploración del subsuelo.

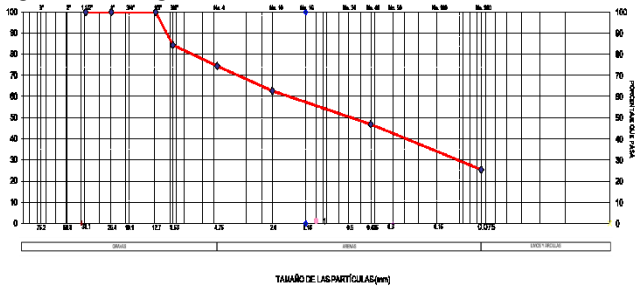
PROFUNDIDAD (m)		ESPESOR M.	CLASIF.	DESCRIPCION
DESDE	HASTA	(m)	USCS	
0.000	0.600	0.600	GM	GRAVA ARENOSA DE COLOR CAFÉ CON PRESENCIA DE VETAS GRISES Y SOBRETAMAÑOS DE 4"
0.600	3.200	2.600	SM	ARENA LIMOSA DE COLOR CAFÉ CON PRESENCIA DE LENTES DE GRAVA
3.900	3.900	0.000	NA	NIVEL FREATICO
3.200	3.800	0.600	SM	ARENA LIMOSA DE COLOR CAFÉ CON PRESENCIA DE LENTES DE GRAVA
3.800	5.500	1.700	SM	ARENA LIMOSA DE COLOR CAFÉ CON PRESENCIA DE VETAS GRISES
5.500	6.000	0.500	ML	LIMO ARENOSO DE COLOR CAFÉ CON PRESENCIA DE VETAS GRISES Y LENTES DE GRAVA

Figura 2. Registro fotográfico de los sondeos realizados.

Así pues, se realiza la caracterización de los materiales a utilizar en la elaboración del suelo a estabilizar, definición del subsuelo de protección de la pila, diseño de mezcla y formula de trabajo de la subrasante a mejorar. Posteriormente y una vez obtenido los parámetros mínimos del subsuelo, se realiza el cálculo de la socavación conforme a las condiciones iniciales del subsuelo y una vez obtenido los nuevos parámetros del suelo estabilizado se realiza el cálculo de la nueva socavación. Lo anterior, presentamos los parámetros actuales geotécnicos del suelo:

Se determina el tamaño de las partículas del suelo, con un tamaño mayor a 75μm (retenidas en el tamiz No.200), es de anotar que este ensayo, se encuentra normalizada por la norma ASTM D 422-63 (INV E-123, 2013).

Figura 3. Curva granulometríca del estrato de diseño.



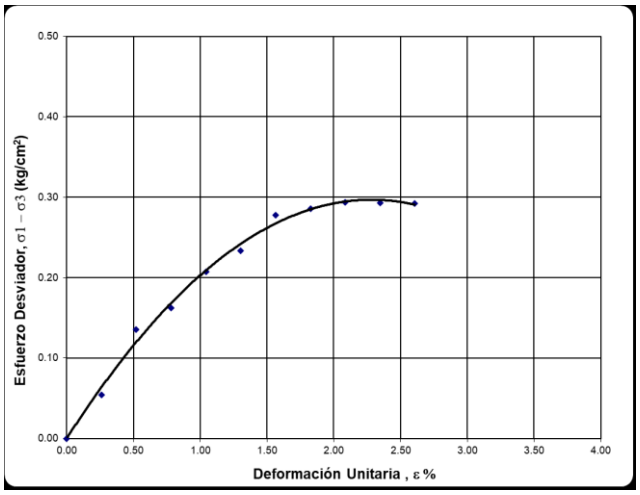
Albert Atterberg definió seis límites de consistencia por los que puede pasar un suelo fino: límite superior del flujo viscoso, límite líquido, límite de pegajosidad, limita de cohesión, límite plástico y límite de contracción; sin embargo, hoy en día solo se utilizan de estos seis solo tres que son: límite líquido, límite plástico y límite de contracción; la realización de estos tres ensayos sirve para determinar o calcular el comportamiento de suelos finos en presencia de humedad (INV E-125, 2013), por lo tanto nos permitimos presentar la consistencia del suelo patrón.

Tabla 1. Resultados de ensayos de consistencia del suelo patron.

RESULTADOS	
Humedad Natural (%):	12.45
Límite Líquido (%) :	28.14
Límite Plástico (%) :	21.61
Indice Plasticidad (%):	6.5
USCS :	SM
Índice de Grupo:	0
AASHTO :	A-1-b
Índice de Liquidez	-1.40
Índice de Consistencia	2.40

Se realizo el cálculo de la resistencia a la compresión de suelos dando como resultado un valor de esfuerzo total, aplicándole una carga axial, conforme a lo normalizado en la norma ASTM D 2166-06 (INV E-152-13), representado a continuación el comportamiento del suelo:

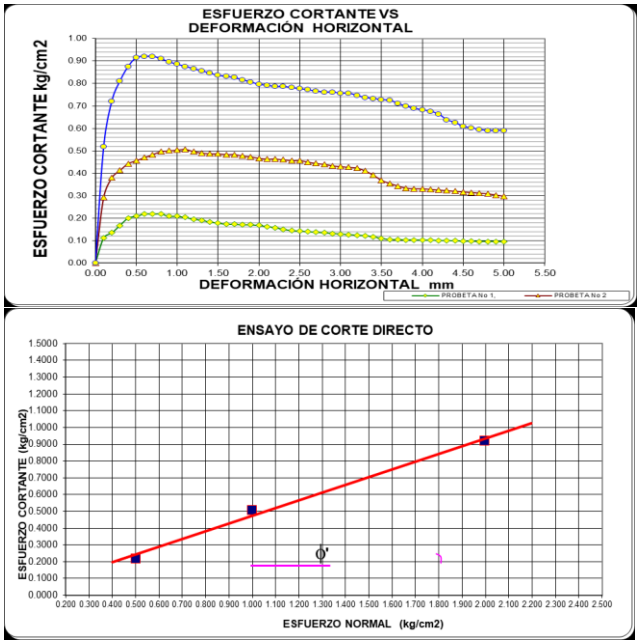
Figura 4. Comportamiento esfuerzo – deformación en condición No drenada.



Los resultados que se obtuvieron para determinar la resistencia a la compresión, fue una resistencia a la compresión inconfinada de Cu= 0,29 kg/cm^2 y un qu=0,15 kg/cm^2

Se determina la resistencia al corte de la muestra de suelo consolidada y no drenada, empleando el método de corte directo. El ensayo se podrá hacer con un corte sencillo, por lo que se determina en el material la máxima resistencia al corte, cohesión y ángulo de fricción, lo anterior, se representará los parámetros iniciales y finales de la muestra patrón. (INV E-154, 2013).

Figura 5. Resultados del ensayo de corte directo.



Los resultados que se obtuvieron para determinar el ángulo de fricción es de 24.8°, y Cohesión de 0.011 kg/cm2.

Teniendo en cuenta los resultados de laboratorio y caracterización de cada una de las muestras recuperadas en campo, presentamos la siguiente tabla resumen, donde enuncia el suelo a mejorar, conforme a las condiciones requeridas para la socavación y así mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, con el fin de disminuir la socavación.
Profundidad: 6m
Descripción: ARENA LIMOSA DE COLOR CAFÉ CON PRESENCIA DE LENTES DE GRAVA - USCS – SM

Tabla 2. Resultados de laboratorio del suelo laboratorio.

Resultados de ensayos del suelo patrón	
Humedad Natural [%]	17.2
Limite liquido [%]	29.5
Limite plastico [%]	22.6
Indice de plasticidad [%]	6.9
Proporción pasa tamiz 200 [%]	25.9
Peso unitario [g/cm3]	1.52
Resistencia a la compresión inconfinada [kg/cm2]	0.29
Resistencia al corte no drenada [kg/cm2]	0.145
Cohesión [kg/cm2]	0.011
Ángulo de fricción [°]	24.8

Una vez desarrollados los ensayos de laboratorio, se recopiló información de proyectos e investigaciones relacionadas a los temas de socavación y estabilización de suelos, de tal manera que se puedan referenciar datos y experiencias con el uso de geo polímeros, resumiendo los resultados para la investigación y disminución de la socavación, garantizando la estabilidad de los elementos estructurales, a continuación, se presentan algunos autores donde adoptan parámetros del geotécnicos en el calculo de la socavación local.

Método de Lacey (1930)

Corresponde a la continuidad de los estudios de Lindley, quien este autor realizó la observación de 4345 km de canales en la India, por lo que en 1930 presentaron las ecuaciones para obtener los principales parámetros hidráulicos y geotécnicos, por lo que propuso la siguiente expresión:

$$hs = 1.34 * \left(\frac{q^2}{1.76 * d50^{0.5}}\right)^{0.333}$$

Con el fin de dar mayor exactitud en el calculo de la socavación, se adoptan en algunas expresiones parametros del suelo, comunmente densidad y tamaño del material, por lo que, se empleará la siguiente expresión propuesta por Terzaghi and Peck (1967), como es correlacionar el tamaño de las partículas en función del ángulo de fricción, parámetro obtenido por medio del ensayo de corte directo, mediante la siguiente expresión:

$$\mathrm{D50} = 0.7486 * \Phi - 17.96$$

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la muestra del suelo, se realiza el analisis del D50 equivalente, de acuerdo a la expresión propuesta por Terzaghi and Peck (1967).

Método de Blench (1941)

El autor realizó la siguiente expresión, para gravas (d50>2mm), este lo realizo producto al análisis de varios autores, indicando lo siguiente:

$$hs = 1.23 * \left(\frac{q^2}{d50^{0.25}}\right)^{0.333}$$

Método de Maza (1973), Maza (1978), Lischtvan (1959), Neil (1980) y Laursen (1963)

Los autores trabajaron con la misma expresión de socavación, sin embargo cada uno, y conforme a sus investigaciones difieren en la manera de determinar la velocidad critica, por lo que los métodos de velocidad, están basados en el supuesto que la so-

cavación ocurre, hasta que se alcanza la condición crítica en velocidad, es de anotar que estos métodos por lo general son conservadores pues que los canales transportan sedimentos y estos son estables y no necesariamente socavan, es así, y teniendo en cuenta los autores anteriormente propuestos se efectúa la correlación y análisis de la socavación en condicional normal, como también se realiza el análisis de la socavación, donde contemplan únicamente parámetros hidráulicos tales como son HEC-18 y FHWA, por tanto, mediante la siguiente tabla se realiza el calculo de la socavación con el suelo patrón y parámetros hidráulicos:

Tabla 3 Resultados de la profundidad de socavación local mediante distintas formulaciones.

FORMULACIÓN (Por autor)	SOCAVACIÓN INICIAL (m)
	Suelo Patrón
LACEY (1930)	9.5
BLENCH (1941)	10.2
MAZA (1973)	4.5
MAZA (1978)	3.5
LISCHTVAN (1959)	3.3
NEIL (1980)	4.1
LAURSEN (1963)	3.2
BRIAUD (2011)	5.7
HEC-18	3.0
FHWA	1.7

Dentro de la información necesaria y recopilada para el análisis hidráulico están las batimetrías del cauce, así como la topografía actualizada de la zona del proyecto. Las secciones batimétricas se realizaron cada 5m a través del cauce con secciones aguas arriba y aguas abajo del puente.

Parámetros hidráulicos de entrada para el análisis de la socavación

De acuerdo a los resultados de la modelación hidráulica (parámetros hidráulicos), en la zona del puente, se obtienen lo siguiente:

Tabla 4. Resultados de la profundidad de socavación local mediante distintas formulaciones.

PARAMETROS DEL RÍO	
Velocidad media [m/s]	3.8
Área [m2]	8.4
Caudal [m3/s]	31.9
Profundidad media [m]	2.4
Profundidad a la pila Y1 [m]	1.5

Resultados

Con el fin de determinar la fórmula de trabajo ideal, en el mejoramiento del subsuelo, que estará sometido al proceso de socavación, se realiza como primera etapa aumentar la resistencia de los suelos, mediante la adición de cemento en diferentes proporciones de peso del 1%, 2%, 3%, 4% y 5%, con el fin de evidenciar el mayor incremento en resistencia y densidad del suelo, por lo que a continuación se presentará los resultados de una adición y consolidado final, este ensayo de compresión inconfinada, se realizó con el fin de dar estabilidad al suelo.

A continuación, se presentan los resultados de resistencia a la compresión inconfinada, peso unitario y humedad en función del contenido adicionado de cemento:

Figura 6. Comportamiento de la resistencia a la compresión inconfinada respecto al contenido de cemento adicionado.

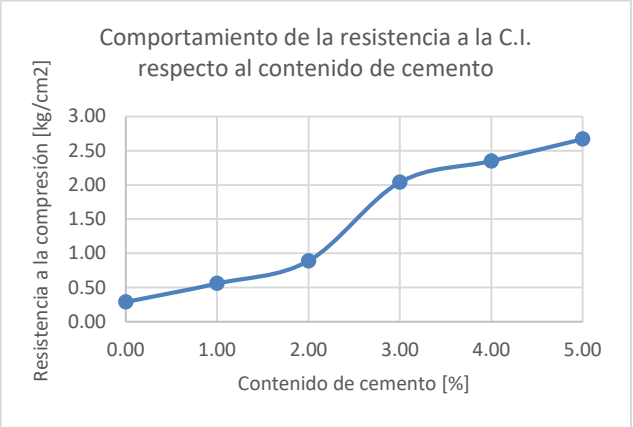


Figura 7. Comportamiento del peso unitario respecto al contenido de cemento adicionado.

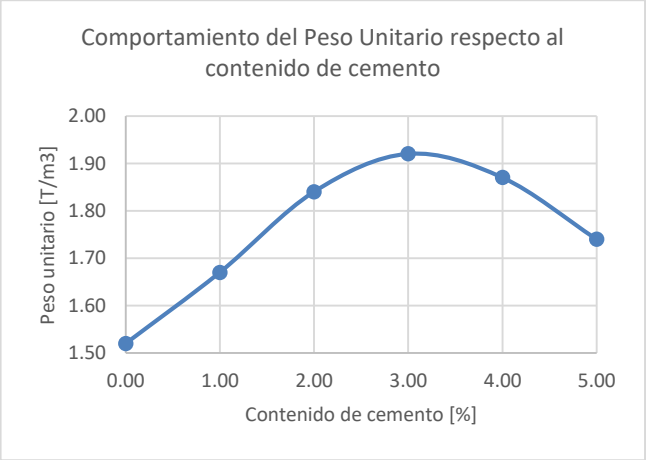
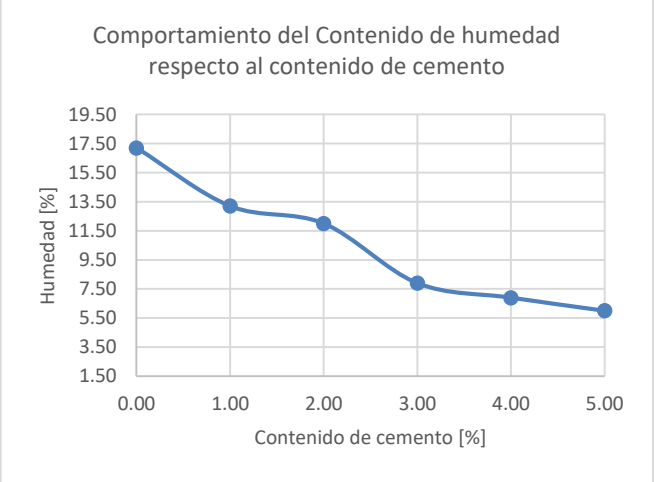


Figura 8. Comportamiento del contenido de humedad respecto al contenido de cemento adicionado.



A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron para determinar la resistencia a la compresión de un suelo con adición de cemento en diferentes proporciones en peso. Es de precisar que el mejor comportamiento y aumento en densidad y resistencia axial fue con la adición del 3%, por lo tanto, se determina este contenido como el óptimo en esta fase.

Tabla 5. Resultados del material adicionado con cemento.

Dosificación	Peso Unitario total (g/cm3)	qu (kg/cm2)	Cu (kg/cm2)	Incremento con respecto a la muestra inicial
Sub suelo Patron	1.52	0.29	0.15	0%
Sub suelo + 1% Cemento	1.67	0.56	0.28	189%
Sub suelo + 2% Cemento	1.84	0.89	0.45	302%
Sub suelo + 3% Cemento	1.92	2.04	1.02	694%
Sub suelo + 4% Cemento	1.87	2.35	1.18	799%
Sub suelo + 5% Cemento	1.74	2.67	1.34	906%

Con el fin de determinar la fórmula de trabajo ideal, en el mejoramiento del subsuelo, que estará sometido al proceso de socavación, se realiza como segunda fase adicionar fly ash (Ceniza Volante), mediante la adición de Ceniza Volante en peso del 1%, 2%, 3%, 4% y 5%, con el fin de evidenciar la densidad del suelo, por lo que a continuación se presentará los resultados de una adición y consolidado final, este ensayo de compresión inconfinada, se realizó con el fin de dar estabilidad al suelo.

Figura 9. Comportamiento de la resistencia a la compresión inconfinada respecto al contenido de FLY ASH adicionado.

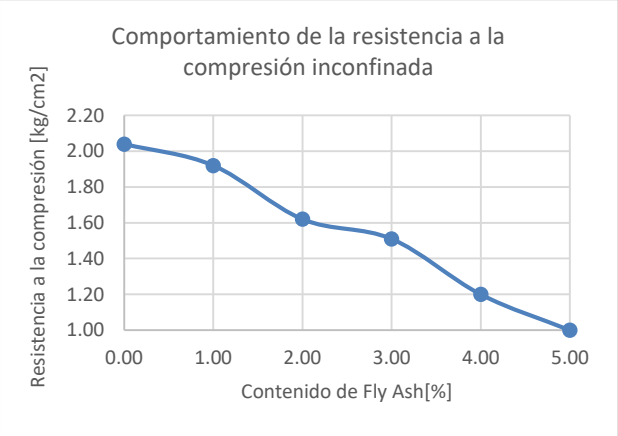


Figura 10. Comportamiento del peso unitario respecto al contenido de FLY ASH adicionado.

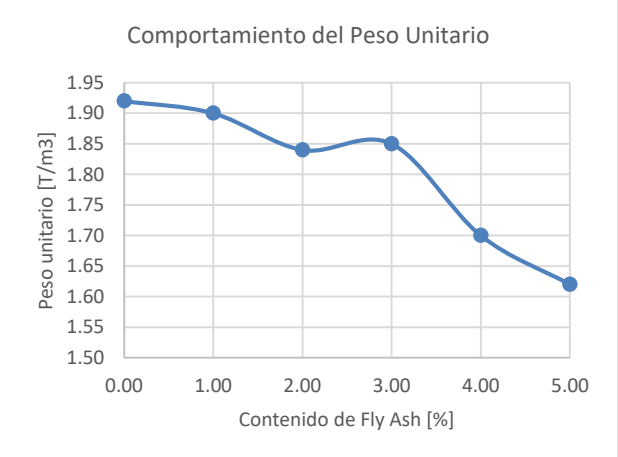
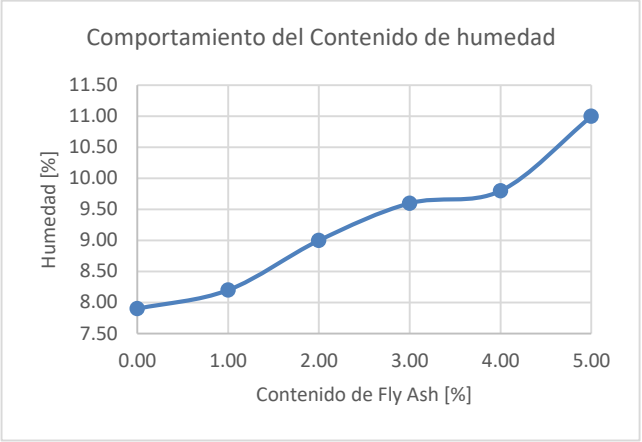


Figura 11. Comportamiento del contenido de humedad respecto al contenido de FLY ASH adicionado.



A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron para determinar la resistencia a la compresión de un suelo con adición de 3% cemento y Fly Ash en diferentes proporciones en peso. Es de precisar que el mejor comportamiento y aumento en densidad fue con la adición del 3% de Fly Ash, por lo tanto, se determina este contenido como el óptimo en esta fase.

Tabla 6. Resultados de laboratorio del material adicionado con FLY ASH.

Dosificación	Peso Unitario total (g/cm3)	qu (kg/cm2)	Cu (kg/cm2)
Sub suelo Patron	1.52	0.29	0.15
Sub suelo + 3% Cemento + 1% FLY ASH	1.90	1.92	0.96
Sub suelo + 3% Cemento + 2% FLY ASH	1.84	1.62	0.81
Sub suelo + 3% Cemento + 3% FLY ASH	1.85	1.51	0.75
Sub suelo + 3% Cemento + 4% FLY ASH	1.70	1.20	0.60
Sub suelo + 3% Cemento + 5% FLY ASH	1.62	1.00	0.50

Los suelos contienen gran contenido de agua debido a su saturación y según sus propiedades físicas presenta índices muy altos de socavación, uno de estos casos es la resistencia, ya que tiende a tener cambios y deformaciones a causas del flujo hídrico externo, por lo que se busca mejorar la resistencia con ayuda de un geopolímero, como es el caso del Silicato de Sodio. A continuación, se presenta los resultados obtenidos en el ensayo de compresión inconfinada y formula de trabajo definitiva.

Figura 12. Comportamiento de la resistencia a la compresión inconfinada respecto al contenido de Silicato de sodio adicionado.

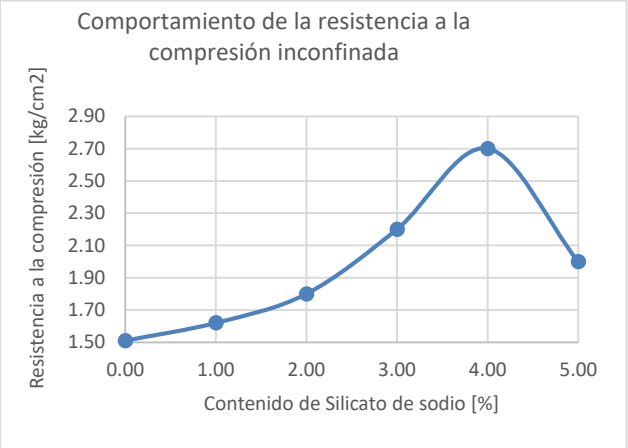


Figura 13. Comportamiento del peso unitario respecto al contenido de Silicato de sodio adicionado.

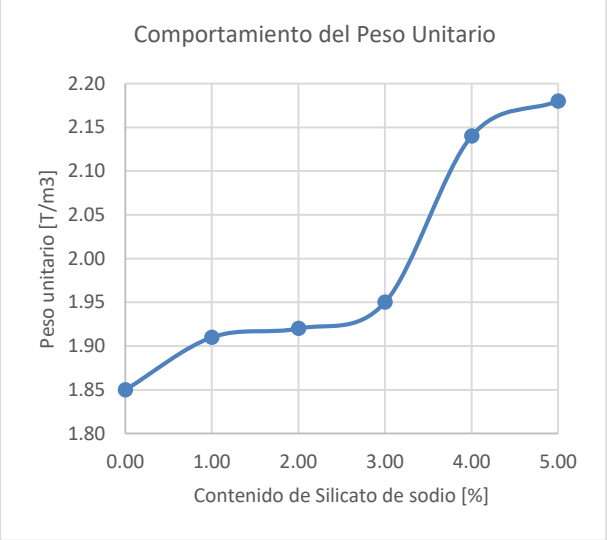


Figura 14. Comportamiento del contenido de humedad respecto al contenido de Silicato de sodio adicionado.

A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron para determinar la resistencia a la compresión de un suelo con adición de 3% cemento, 3% Fly Ash + silicato de sodio (Na2SiO3). Es de precisar que el mejor comportamiento y aumento en resistencia conservada fue con la adición del 4% de silicato de sodio (Na2SiO3), por lo tanto, se determina este contenido como el óptimo en esta fase.

Tabla 7. Comportamiento del peso unitario respecto al contenido de Silicato de sodio adicionado.

Dosificación	Peso U. total (g/cm3)	qu (kg/cm2)	Cu (kg/cm2)
Sub suelo Patron	1.52	0.29	0.15
Sub suelo + 3% Cemento + 3% FLY ASH + 1% Na2SiO3	1.91	1.62	0.81
Sub suelo + 3% Cemento + 3% FLY ASH + 2% Na2SiO3	1.92	1.80	0.90
Sub suelo + 3% Cemento + 3% FLY ASH + 3% Na2SiO3	1.95	2.20	1.10
Sub suelo + 3% Cemento + 3% FLY ASH + 4% Na2SiO3	2.14	2.70	1.35
Sub suelo + 3% Cemento + 3% FLY ASH + 5% Na2SiO3	2.18	2.00	1.00

Tabla 8. Resultados de ensayos de laboratorio del suelo adicionado con el contenido optimo de cemento.

Resultados de ensayos del suelo patron + 3% cemento	
Humedad Natural [%]	7.9
Limite liquido [%]	NP
Limite plastico [%]	NP
Indice de plasticidad [%]	NP
Proporción pasa tamiz 200 [%]	25.9
Peso unitario [g/cm3]	1.92
Resistencia a la compresión inconfinada [kg/cm2]	2.04
Resistencia al corte no drenada [kg/cm2]	1.02
Cohesión [kg/cm2]	0.032
Ángulo de fricción [°]	34

Tabla 9. Resultados de ensayos de laboratorio del suelo adicionado con el contenido optimo de FLY ASH.

Resultados de ensayos del suelo patron + 3% cemento +3% FLY ASH	
Humedad Natural [%]	9.6
Limite liquido [%]	NP
Limite plastico [%]	NP
Indice de plasticidad [%]	NP
Proporción pasa tamiz 200 [%]	25.9
Peso unitario [g/cm3]	1.85
Resistencia a la compresión inconfinada [kg/cm2]	1.51
Resistencia al corte no drenada [kg/cm2]	0.755
Cohesión [kg/cm2]	0.013
Ángulo de fricción [°]	34.4

Tabla 10. Resultados de ensayos de laboratorio del suelo adicionado con el contenido optimo de silicato de sodio.

Resultados de ensayos del suelo patron + 3% cemento +3% FLY ASH + 4% silicato de sodio	
Humedad Natural [%]	5.7
Limite liquido [%]	NP
Limite plastico [%]	NP
Indice de plasticidad [%]	NP
Proporción pasa tamiz 200 [%]	25.9
Peso unitario [g/cm3]	2.14
Resistencia a la compresión inconfinada [kg/cm2]	2.7
Resistencia al corte no drenada [kg/cm2]	1.35
Cohesión [kg/cm2]	0.043
Ángulo de fricción [°]	39.1

De acuerdo a la tabla anterior la adición de 3% de cemento + 3% FLY ASH + 4%silicato de sodio Na2SiO3, presenta un aumento significativo en el peso unitario del suelo presentando inicialmente una densidad de 1.52 g/cm3 y conforme a su estabilización obtuvo un peso unitario mejorado de 2.14g/cm3, similar comportamiento obtuvo con la compresión axial inconfinada de 0.29 kg/cm2 a 2.7kg/cm2, por lo que una mayor resistencia entre sus partículas garantizará un mejor comportamiento en el análisis de la socavación.

Figura 15. Comportamiento de la humedad natural en función del tipo de material

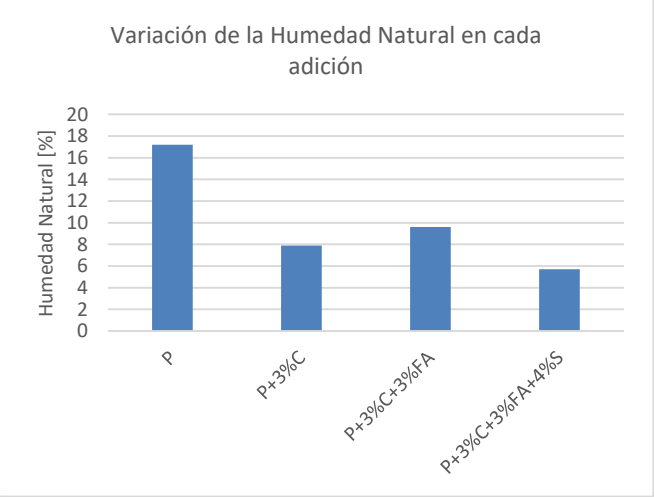


Figura 16. Comportamiento del índice de plasticidad en función del tipo de material

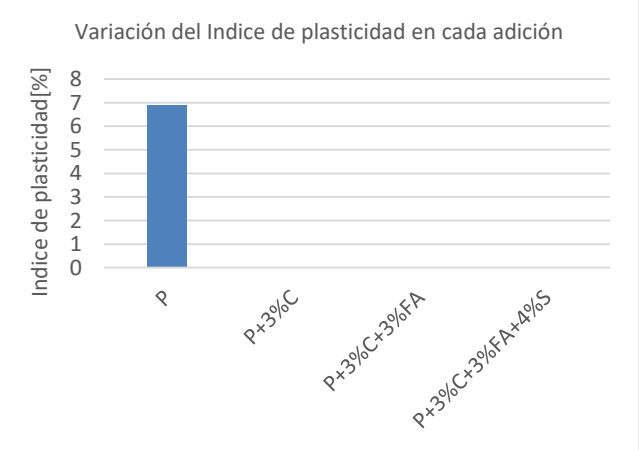


Figura 17. Comportamiento del peso unitario en función del tipo de material

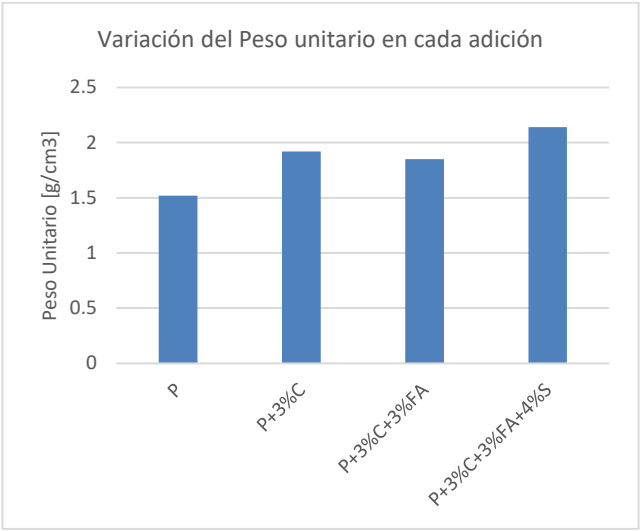


Figura 18. Comportamiento de la resistencia a la compresión inconfinada en función del tipo de material

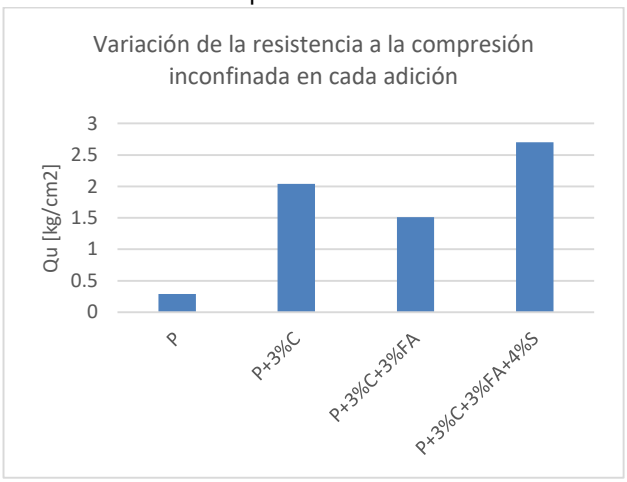


Figura 19. Comportamiento de la resistencia al corte no drenada en función del tipo de material

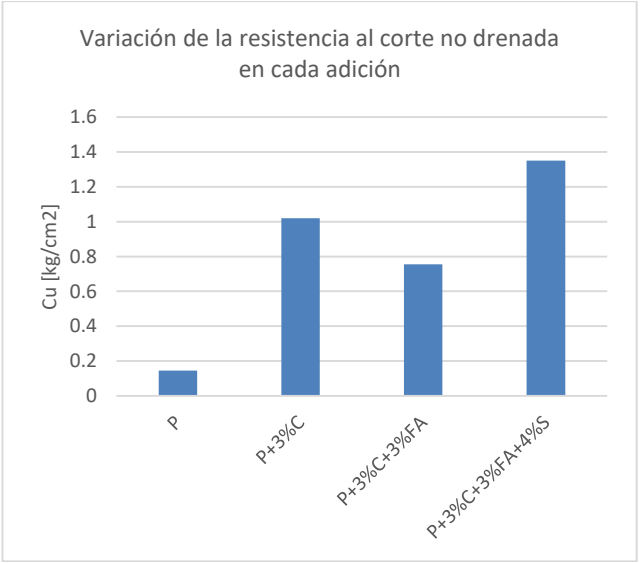


Figura 20. Comportamiento de la relación de resistencia en el curado en función del tipo de material

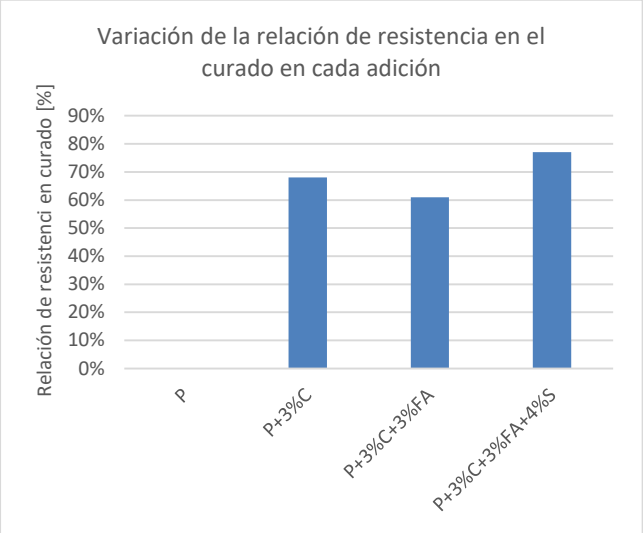


Figura 21. Comportamiento del intercepto de cohesión en función del tipo de material

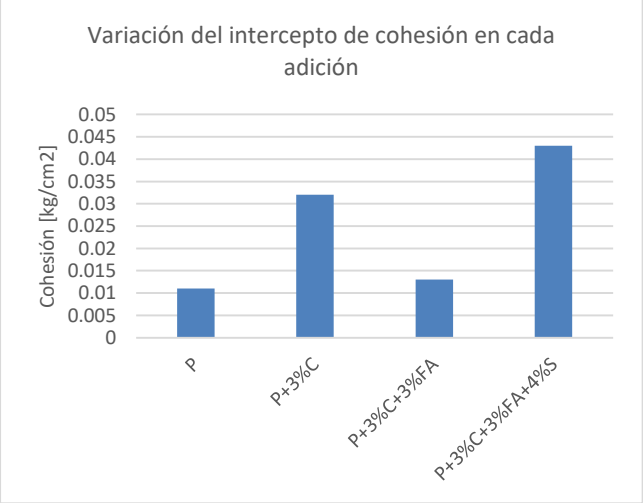
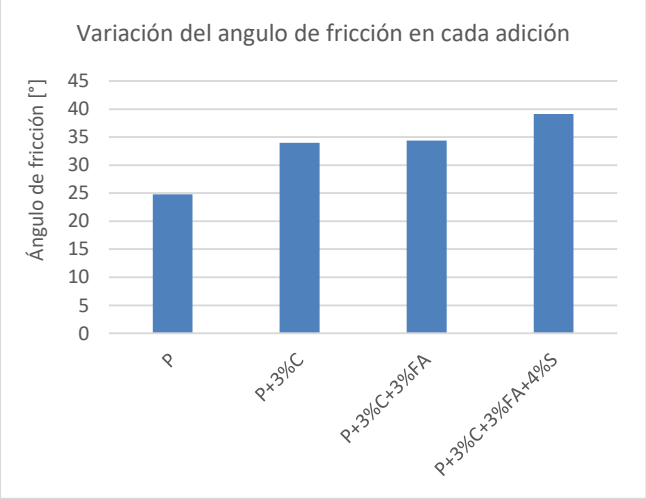


Figura 22. Comportamiento del ángulo de fricción del material en función del tipo de material



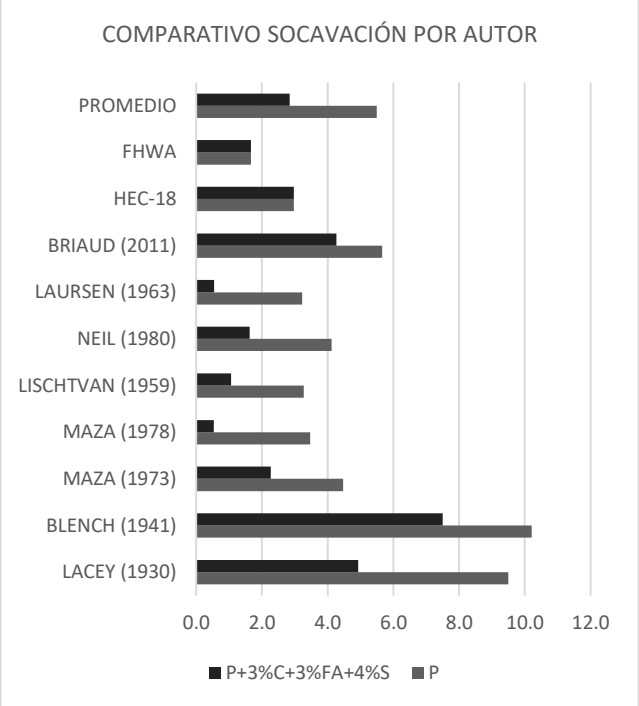
Análisis de Resultados

Teniendo en cuenta el análisis de socavación efectuado para el suelo patrón y mejorado, se realiza el siguiente análisis grafico del comportamiento de la socavación en función de la profundidad calculada, conforme a las expresiones propuestas de cada uno de los autores, representado a continuación:

Tabla 11. Cálculo de la socavación local de pilas para el escenario del suelo patrón en condición insitu y con mejoramiento.

FORMULACIÓN	SOCAVACIÓN INICIAL (m) -PATRÓN	SOCAVACIÓN MEJORADO (m)-P+3%C+3%FA+4%S
LACEY (1930)	9.5	4.9
BLENCH (1941)	10.2	7.5
MAZA (1973)	4.5	2.3
MAZA (1978)	3.5	0.5
LISCHTVAN (1959)	3.3	1.1
NEIL (1980)	4.1	1.6
LAURSEN (1963)	3.2	0.5
BRIAUD (2011)	5.7	4.3
HEC-18	3.0	3.0
FHWA	1.7	1.7
PROMEDIO	5.5	2.8

Figura 23. Resultados del cálculo de socavación local para cada material.



Conclusiones

- En este capítulo se describen las conclusiones del trabajo realizado, teniendo en cuenta los siguientes ensayos: granulometría, límites de consistencia, resistencia al corte, y compresión inconfinada de la muestra, teniendo presente que los resultados arrojados sirvieron para identificar el contenido óptimo de estabilización a utilizar dentro de una subrasante, para dar como resultado el mejoramiento del suelo y así su disminución en el cálculo de la socavación.

- Se realizó la determinación de la socavación de las pilas del puente preexistente localizado en el municipio de rio sucio, Caldas con base en las metodologías propuestas para una condición de subsuelo en estado natural y en estado modificado en el cual se determinó una reducción del 40% de la profundidad de la socavación.

- Las alternativas de acción para el mejoramiento del subsuelo dependen de forma directa del tipo de suelo sobre el cual se apoyará la pila, para el caso estudiado se realizó el mejoramiento del suelo clasificado como arena limosa, con la adición de una mezcla compuesta por cemento hidráulico, fly ash y silicato de sodio.

- Se realizó la determinación de los parámetros geotécnicos del subsuelo para la condición natural y la modificada, donde se evidencia un mejoramiento de las condiciones mecánicas del subsuelo, representado por: una reducción total del Índice de plasticidad, un aumento del peso unitario en alrededor del 40%, un aumento de aproximadamente 10 veces la resistencia al corte no drenada y un aumento del 80% de la resistencia al corte en condición drenada para un nivel de esfuerzo equivalente a la presión atmosférica.

- Se recomienda para el mejoramiento del subsuelo susceptible a socavación en una aplicación distinta en términos espaciales a la propuesta en el siguiente estudio, se debe realizar el respectivo proceso secuencial de ensayos de laboratorio con el fin de definir las proporciones optimas de aditivos, para efectos de la siguiente aplicación se considera que la proporción optima contempla las siguientes magnitudes de proporción en peso: 3% de cemento Hidráulico, 3% de Fly Ash y 4% de Silicato de Sodio.

- En condiciones adaptadas a un mejoramiento del subsuelo en una escala 1:1, se recomienda realizar el mejoramiento del subsuelo sobre el cual se realizará la implantación de la pila en una magnitud mayor o igual a la profundidad de socavación calculada para el subsuelo en condición natural.

- Se realizó la modelación hidráulica de la cuenca con el fin de determinar los parámetros relevantes para el cálculo de la socavación: sección transversal, velocidad media y caudal volumétrico medio.

- Se encontró que las ecuaciones para la determinación de la profundidad local de socavación están considerando como parámetro geotécnico representativo de la condición de las partículas el tamaño promedio de las mismas, lo cual se considera que no es representativo para la modelación del problema, debido a que ante el mejoramiento de las características mecánicas del subsuelo, se encuentran cambios directos en la resistencia al corte del subsuelo en condición drenada y drenada, parámetros que no se involucran en la resolución de la problemática de determinación de la profundidad de socavación local de pilas.

Recomendaciones

- Se recomienda generar nuevas propuestas para la determinación de la profundidad de socavación, considerando parámetros geotécnicos que tengan mayor representatividad en la representación del comportamiento del subsuelo, no se debe limitar el modelo a la consideración únicamente del diámetro medio de las partículas

- Se deben enfocar las investigaciones hacia la determinación de parámetros geotécnicos del subsuelo que permitan cuantificar y representar de mejor manera la interacción entre las trayectorias de esfuerzos impuestas por el fluido en movimiento y por la trayectoria de esfuerzos resistentes del subsuelo.

- Es necesario desarrollar modelos numéricos y de laboratorio con el fin de determinar nuevas propuestas para el cálculo de la socavación y que sea representativo para las condiciones actuales del sitio, es de precisar que las propuestas que se presentan en la literatura son aplicables para zonas que presentan condiciones distintas a las de Colombia en términos geológicos.

- Se recomienda implementar una red de monitoreo que permita medir la profundidad de socavación de las pilas y en simultaneo realizar la determinación de parámetros hidráulicos representativos de la cinemática del rio, lo anterior con el fin de desarrollar propuestas representativas para la determinación de la profundidad de socavación.

Referencias

AMERATUNGA, J., SIVAKUGAN, N., & DAS, B. M. (2016). correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering. http://www.springer.com/series/13410

ARNESON, L. A., ZEVENBERGEN, L. W., LAGASSE, P. F., & CLOPPER, P. E. (2012). evaluating scour at bridges. fifth edition, hydraulic engineering circular no. 18 (hec-18). publication no. fhwa-hif-12-003. u.s. department of transportation, federal highway administration, april, 340pp.

AYALA-CRUZ, L. E., HERRERA-DÍAZ, I. E., CEPEDA-NEGRETE, J., & SALDAÑA-ROBLES, A. (2018), Modelación numérica de la socavaión local en pilas circulares con modelos lagrangeanos

BARBOSA GIL, S. (2013). metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de gravas).

BONELLI, S., MAROT, D., TERNAT, F., BENAHMED, N., BONELLI, S., MAROT, D., TERNAT, F., & BENAHMED, N. (2017). criteria of erosion for cohesive soils to cite this version : hal id : hal-01007486.

BRIAUD, J. L., CHEN, H. C., CHANG, K. A., OH, S. J., & CHEN, X. (2009). abutment scour in cohesive materials. 15(october).

BRIAUD, J. L., GOVINDASAMY, A. V., & SHAFII, I. (2017). erosion charts for selected geomaterials. journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 143(10). https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001771

BRIAUD, J. L. (2004). the sricos-efa method. geotechnical special publication, 125, 348-360. https://doi.org/10.1061/40743(142)19

CAMACHO, L., RODRIGUEZ, E., GELVEZ, R., GONZALEZ, R., MEDINA, M., & TORRES, J. (2007). metodología para la caracterizacion de la capacidad de autopurificacion de ríos de montaña. i congreso internacional del agua y el ambiente, 16.

CASTIBLANCO RODRÍGUEZ, E. A. (2014). evaluación del comportamiento geomecánico de arcillas en el sector de campoalegre - ciudad de barranquilla. 139.

CHAROENCHAI, R., & CHINDAPRASIRT, P. (2014). influences of the ratios of high-calcium fly ash to low-calcium fly ash on the strength and drying shrinkage of geopolymer mortar. advanced materials research, 931-932, 416-420. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.931-932.416

CHINDAPRASIRT, P., CHAREERAT, T., HATANAKA, S., & CAO, T. (2011). high-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash. journal of materials in civil engineering, 23(3), 264-270. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000161

CHINDAPRASIRT, P., CHAREERAT, T., & SIRIVIVATNANON, V. (2007). workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. cement and concrete composites, 29(3), 224-229. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002

CIVIL, E. D. E. I., CASTRO, A., & SEBASTIAN, D. (2013). UNIVERSIDAD DE CUENCA. Inspeccion y evaluacion de la socavacion en cimentaciones de puentes y establecimiento de medidas de proteccion contra este fenómeno

CROZZOLI, L., & BATALLA VILLANUEVA, R. (2003). aplicación de la fotografía al análisis granulométrico de ríos con lecho de gravas. cuaternario y geomorfología: revista de la sociedad española de geomorfología y asociación española para el estudio del cuaternario, 17(3), 29-39.

DEL, G., & SEDIMENTOS, A. D. E. (N.D.). UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO 4. 63–86. Transporte de sedimentos y morfodinámica de rios aluviales

FARIAS, H. D., PILÁN, M. T., PECE, F. J., & MATTAR, M. T. (1912). Socavación local en pilas de puentes: formulación general y análisis crítico de metodologías existentes.

GIL, S. B. (2013). Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de gravas).

GONZALEZ VERDUGO, J. A., & MARTINEZ AUTRIA, P. F. (1990). método general para calcular coeficientes de dispersión longitudinal en ríos. ingenieria hidraulica en mexico, 2(3), 26-32.

GRIS, R. B., ALFREDO, J., & VERDUGO, G. (2016). Aportaciones a la tecnología actual contra la socavación de pilas y estribos de puente y otras estructuras

GUSTAVO, G., CARRASCO, A., MIGUEL, L., & TRUJILLO, B. (2013). Study of methods of analysis based on overlay scour components for applied to complex bridge pillars reque.

HORACIO, L., MARTÍNEZ, M., & LEÓN, D. DE. (2016). Evaluación simultánea de socavación y cargas vivas en la pila de un puente vehicular de concreto reforzado

KUMAR, C. (2014). strength characteristics of low calcium fly ash based geopolymer concrete. iosr journal of engineering, 4(5), 07-17. https://doi.org/10.9790/3021-04570717

LÓPEZ-ALONSO, R., BARRAGÁN-FERNÁNDEZ, J., & COLOMER-CUGAT, M. Á. (2008). predicción de la resistencia al flujo en ríos de montaña. ingenieria hidraulica en mexico, 23(3), 65-76.

LOS, E. D. E., DE, R., EN, O., & DE, S. (2005). Análisis de la evolución temporal de los procesos de socavación local en elementos estructurales de puentes

MAYORAL, H. (2011). particle size , critical shear stress , and benthic invertebrate distribution and abundance in a gravel-bed river of the southern appalachians.

MAZA ALVAREZ, J. A. (1997). calculo de socavación de puentes. socavación en puentes, 84.

MEIXUEIRO, J., & PÉREZ, M. (2008). metodología general para la evaluación de proyectos. banco nacional de obras y servicios públicos, s.n.c, 30. http://www.cepep.gob.mx/work/models/cepep/metodologias/documentos/metodologia_general.pdf

MONCADA, A. (2018). Estudio comparativo de ecuaciones que predicen la socavación local en pilas de puentes con datos de campo y laboratorio estudio comparativo de ecuaciones que predicen la socavación local en pilas de puentes con datos de campo y laboratorio.

NCHRP (2003). Complex pier scour and contraction scour in cohesive soilsmayoral, h. (2011).

PÉREZ, I. S. M. (1999). Erosión y socavación.

PILÁN, M. T., CHAZARRETA, J. T., JOSÉ, F., AZAR, P., MATTAR, M. T., & OLMOS, L. A. (2005). Análisis de metodologías para predecir la socavación local en pilas complejas

PLATA, F., & SALDARRIAGA, C. N. G. (N.D.). Socavación local en pilas de puente.

POR, H. S., & MAO, L. (2016). Sedimentos, hidráulica y efectos morfológicos.

REYES ORTIZ, O. J., TRONCOSO RIVERA, J. R., & CAMACHO TAUTA, J. F. (2006). comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes. ingeniería y universidad, 10(1), 1-17. http://cyber.usask.ca/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&an=24015922&site=ehost-live

RIVER, E., RICA, C., CERVANTES-CÓRDOBA, A., MARÍA, A., GUZMÁN-ARIAS, I., & VILLAGRA-MENDOZA, K. (2016). Cuantificación del transporte de sedimentos en el río la estrella, limón, costa rica. https://doi.org/10.18845/tm.v29i6.2905

SHUAIBU, R. A. (2014). compressive strength of low calcium fly ash geopolymer concrete- a review. international journal of emerging technology and advanced engineering, 4(4), 463-470.

SUÁREZ, J. (2001). cálculo de la socavación. control de erosión en zonas tropicales, 135-166.

TAHIR, U. B. I. N., DENG, Q., LI, S. E. N., LIU, Y. Y., WANG, Z. H. E., GU, Z. M., ZHAO, D. D., ZHAI, Y. H., LIU, Y. Y., WANG, S. J., GU, Z. M., WHIPPS, C. M., GU, Z. M., ZENG, L. B., JIA, L., LI, D., GU, Z. M., YUAN, J., ZHAI, Y. H., … WINTON, J. R. (2011). automatizacion de la granulometria del material del lecho en rios y gravas y piedras mediante el procesamiento digital de imagenes. diseases of aquatic organisms, 10(1), 37-41. https://doi.org/10.1577/1548-8667(2001)013

TAUTA, J. F. C., ORTIZ, O. J. R., ANTOLÍNEZ, C. M., & G., D. F. M. (2006). evaluación de aditivos usados en el tratamiento de arcillas expansivas. ciencia e ingeniería neogranadina, 16(2), 45-53. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91116205

TOAPAXI, J., GALIANO, L., CASTRO, M., HIDALGO, X., & VALENCIA, N. (2015). Análisis de la socavación en cauces naturales.

TORRES, B. G., ALFREDO, J., & VERDUGO, G. (2018). Socavación aguas abajo de cubetas deflectoras.