



Fuente: [http://www.segsantander2012.unican.es/sesiones/sesi%C3%B3n%20%20\(2\).html](http://www.segsantander2012.unican.es/sesiones/sesi%C3%B3n%20%20(2).html)

Caracterización de Materiales para Establecer Profundidad de Falla en Deslizamientos Traslacionales Tipo Creep o Reptación.

Bernal Villate Andrés Felipe
Ramírez Oscar

Caracterización de Materiales para Establecer Profundidad de Falla en Deslizamientos Traslacionales Tipo Creep o Reptación.

BERNAL VILLATE. Andrés Felipe
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Servicios de Ingeniería LTDA
andresfelipe.bernal@uptc.edu.co
Ingeniero Civil

RAMIREZ. Oscar
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
oscar.ramirez@uptc.edu.co
Magister en Geotecnia

Resumen: El conocimiento de las condiciones del suelo, es un aspecto que se vuelve muy importante, a la hora de ejecutar una obra de tipo civil, especialmente de características viales, pues ante la incorrecta intervención de un sector, se pueden llegar a presentar movimientos o fenómenos de remoción en masa que pueden ser locales, como también afectar grandes extensiones, hasta el punto de volverse incontrolables, o llegara a afectar significativamente a poblaciones aledañas.

Uno de los efectos recurrentes que se generan por una incorrecta intervención, corresponden a la activación de movimientos lentos del material conocidos como reptaciones, o técnicamente como procesos de Creep, en donde el material de predominio fino, y junto a contenidos importantes de agua, comienza a moverse de forma lenta de acuerdo a las condiciones topográficas, generando alteraciones importantes, que se evidencian en la superficie del terreno, y en las diferentes construcciones o elementos que se encuentre sobre estos materiales.

El presente artículo, se centra en el proceso de reptación o creep del suelo que se presenta en un sector del municipio de Guateque, en donde se vieron afectadas diferentes estructuras de tipo residencial, pero más que eso, corresponde a un movimiento de tipo regional, que posee unas dimensiones de movimiento del material significativas, y de contener este desplazamiento que se produce de forma lenta, depende el desarrollo de la región, pues en parte de este, se encuentra construida la vía que comunica al municipio de Guateque, con el municipio de Santa María y otros. Copyright © L'esprit Ingéniux

Palabras clave: deslizamiento, Movimiento, reptación, arcillas, suelos, finos, estabilidad, falla

Abstract: The knowledge of the conditions of the soil, is an aspect that becomes very important, at the time of implementing a work of civilian type, especially features vials, since before the incorrect intervention of a slice, you can arrive to present movements or phenomena of mine that mass can be local, as well as affect large extensions, up to the point of becoming incontraolables, or came to affect significativamente to surrounding towns.

One of the recurring effects that are generated by an incorrect intervention, corresponen to activation of slow movements of the material known as reptaciones, or technically as porcesos of Creep, where the material of predominance thin, and next to important content of water, starts to move slowly according to the topographical conditions, generating major alterations, which is apparent on the surface of the ground, and in the different constructs or elements that is on these materials.

This article focuses on the process of creep or creep of the soil that is presented in a sector of the municipality of Guateque, where were affected different estructras residential-type, but more than that, corresponds to a movement of regional type, which possesses some dimensions of material movement significant, and contain this shift that occurs slowly, depends on the development of the region, as part of this, is built via that communicates to the municipality of Guateque, with the municipality of Santa Maria and others. Copyright © L'sprit Ingenieux.

Keywords: landslide, Movement, creeping, clays, soils, fine, stability, failure.

1. Introducción:

A medida de que avanza el tiempo, las diferentes poblaciones se ven en la necesidad de aumentar su capacidad productiva, económica y demás, para generar con esto un mayor progreso en sus comunidades, viéndose obligadas a intervenir diferentes componentes en su estructura, entre los que se destaca la parte física o de infraestructura, la cual a medida de que se desarrolla, genera unas alteraciones en las condiciones físicas en su relieve, hasta el punto de poder llegar a ocasionar unos altos impactos no solamente a nivel local sino a nivel regional, de acuerdo a la magnitud de la intervención. Una de estas condiciones que desencadena procesos poco favorables la mayoría de las veces a comparación de otro tipo de actividades, corresponden a la obras de infraestructura vial, en donde si no se cuenta con un muy buen conocimiento de los diferentes materiales que componen el sector que se va a intervenir, y a un más, el comportamiento que estos pueden llegar a desarrollar se pueden llegar a generar procesos de inestabilidad de diferentes tipos, ya serán deslizamientos rotacionales, o desprendimientos locales del material, se presentan unos movimientos que pueden ser desplazamientos del material a gran escala, principalmente generados en suelos blandos, conocidos como procesos de reptación o creep, los cuales, a pesar de que pueden ser movimientos de

poca profundidad, la longitud que abarcan pueden ser muy alta, y por ende, el empuje que se desarrolla en su frente de avance puede llegar a ser tan importante que con el pasar del tiempo y variación de diferentes condiciones naturales, puede llegar a convertirse en un proceso muy difícil de contener.

Debido a las grandes afectaciones que se pueden llegar a presentar con estos movimientos de reptación del suelo, es necesario conocer de una forma mas muy detallada, las magnitudes de estos movimientos del suelo, además de las condiciones físicas, y mecánicas de todos los materiales que componen el área para establecer que comportamientos se pueden llegar a presentar en estos materiales, como también poder establecer hasta que profundidad se pueden llegar a generar la alteración de los materiales, y así, poder identificar las medidas más apropiadas, para generar con esto, una estabilización muy favorable de un zona.

Ante esta condición, el presente artículo, muestra un ejemplo de ocurrencia de un proceso de reptación del suelo, en el cual, además de identificar las condiciones de falla mediante programas computacionales o software especializado, se realizó la identificación de las condiciones físicas del movimiento mediante la caracterización física, mecánica, estableciendo el comportamiento que

pueden llegar a desarrollar estos suelos, y así corroborar, que tan efectivo es la utilización de un software de equilibrio límite para estas situaciones.

2. Descripción del Sitio

El sitio de estudio se encuentra localizado en cercanías del municipio de Guateque, sobre a vía principal que conduce del municipio al sector conocido como las juntas sobre el kilómetro 1.4 desde la cabecera municipal, sobre las coordenadas 5°00'33.6" N, y 73°28'00.9"E.



Figura 1. Ubicación del K1+400
Fuente: Google Earth. 2014

El sitio de estudio se encuentra localizado en un sector intermedio de la ladera, en una sector de baja pendiente, especie de meseta sobre la ladera, donde se tienen zonas de pendientes entre los 10° a 20°; en las áreas aferentes de la vía, sin embargo estas inclinaciones tienden a aumentar a medida que se aleja del eje de la vía en dirección ortogonal al eje, las cuales corresponde a la parte alta de la ladera y baja de la ladera, donde se presentan zonas con pendientes mayores a 30°, como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Vista general de la Zona
Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

El movimiento del terreno, que se presenta en la zona de estudio, corresponde a un movimiento lento de la superficie, que afecta un área en la que está involucrado parte del corredor de la vía. Este movimiento se puede describir como un deformación plástica de una capa de la capa más superficial del terreno, y puede ser clasificada como una reptación, la cual se evidencia en toda la longitud de la vía afectada, representada por

deformaciones y agrietamientos en la carpeta de rodadura, los cuales se presentan en una longitud de aproximada de 50m, los cuales cubren la zona delimitada por los cauces de agua y la zona de ingreso y salida del movimiento.

Respecto a la longitud de la zona de movimiento, medida de forma perpendicular a la vía, se encuentra en el rango de 35.00 m, a 40 m, por lo que se tiene que el fenómeno cubre un área considerable. A pesar de que se presentan algunas zonas de la ladera en donde se observan deformaciones excesivas, en la superficie de la vía, no se tiene presencia de escarpes principales o secundarios, en la figura 3 se presenta una planta del sector en estudio, donde se ha delimitado la zona afectada por movimientos descritos, localizando las zonas de deformaciones excesivas, zonas donde la vegetación presenta señales de movimientos lentos, longitud afectada de la vía, localización de estructuras de drenaje y contención involucradas en el área en movimiento, canales de desagüe de las aguas lluvias.



Figura 2. Sitios de afectación del movimiento y localización de cauces

Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

Por otra parte, en el flanco izquierdo del movimiento, o el flanco más cercano al municipio de Guateque, se tiene la presencia de la quebrada Suaitoque, la cual posee un flujo de agua continuo, pero la geometría del cauce no es homogéneo, por lo que se tienen sitios de estancamientos de agua, que pueden generar infiltración y saturación de los materiales, por tal motivo, para el análisis de estabilidad, se debe considerar una etapa de saturación total de los materiales, puesto que la quebrada constituye una condición de recarga de agua a la ladera.

En las fotografías de la figura 4 se muestra la carpeta de la vía, un patrón de fisuras longitudinales, paralelos al borde de la vía, y donde se puede

apreciar el hundimiento de la cuneta del borde externo de la vía, desprendida de los materiales de la estructura del pavimento.



Figura 4. Vista general del Movimiento
Fuente: Servicios de ingeniería Limitada

Sobre los cortes realizados para la vía, localizados en la margen izquierda en dirección hacia las Juntas, se evidencia que el material que conforma esta parte de la ladera, corresponde a material rocoso, conformado por lutitas medianamente meteorizadas, de color negro con presencia de material representado por limos y arcillas de baja plasticidad, que de acuerdo a los rumbos y buzamientos se prevee que este material conforma la subrasante de la vía, presentándose una secuencia de un material del cuaternario en superficie seguido de este material de Formación.



Figura 5. Condiciones de la zona
Fuente: Servicios de ingeniería Limitada

Una condición de importancia para el sector en estudio, sobre el borde externo de la vía, para el control del movimiento se realizó la construcción de un muro de contención con gaviones, en dos niveles, estos localizados en el margen derecho de la vía en sentido del abscisado, cuya finalidad es el confinamiento del material de la vía, como también para el control del movimiento descrito del suelo; Esta estructura en la actualidad presentan deformaciones debido a las deformaciones del nivel de fundación del muro y a los empujes que genera el movimiento y las cargas del tránsito vehicular que hay en la zona; en esta estructuras se alcanzan a medir separaciones entre bloques, de 10 cm, generando hundimientos en la berma de la vía, por el mal funcionamiento del sistema de confinamiento.



Figura 6. Condiciones de las obras de la zona
Fuente: Servicios de ingeniería Limitada

2.1. Movimiento

El movimiento que se presenta en el sitio, corresponde a un proceso de deformación lenta del terreno, que es denominado fenómeno de reptación, pues en la zona, en suelo que se plastifica por incrementos de agua, logra la saturación total, ocasionando un cambio en la consistencia, y por efecto de la pendiente, este se desplaza con diferentes tasas de velocidad desde la superficie, hasta la profundidad de falla. El movimiento que en general abarca un área mucho mayor a la que se va a estabilizar, presenta unas condiciones topográficas muy variables, pues en la parte alta de la ladera, se tiene la presencia de afloramientos rocosos, y materiales correspondientes a suelos, con pendientes superiores al 30%, pero en la parte baja de la vía, la topografía de la zona, se vuelve un poco más homogénea, pues la pendiente desciende, hasta aproximadamente 8%.

A pesar de que en la parte baja del sector, las condiciones del terreno se vuelven más planas, se presenta el proceso de reptación, puesto que se tienen materiales de condición fina, y junto a este se tiene la presencia de la quebrada Suaitoque, la cual suministra agua al movimiento en algunas zonas generando la plastificación del material. Además de la infiltración que se puede estar generando por la presencia del agua de la quebrada, en el sitio se tiene la presencia de grietas, por las cuales, en épocas de alta precipitación, o lluvias esporádicas se produce la infiltración de agua, generando el incremento en la humedad, y por lo tanto el cambio de consistencia del material, con lo cual se genera el movimiento de reptación del suelo.

Este desequilibrio generado en el manejo de las aguas de escorrentía superficial, ha generado una mayor infiltración, al cual ha llevado a mayores cantidades de agua en los materiales del subsuelo, y esto ha desencadenado un proceso progresivo de plastificación del material, lo cual se refleja en el movimiento de reptación delimitado por la micro

cuenca donde existen dos corrientes de agua, por lo que se confirma que el tipo de movimiento corresponde a un proceso local.

De acuerdo a la visita realizada al sitio, se observan desplazamientos muy lentos de la capa superficial, casi uniformes en toda el área afectada, además de esto no se presentan escarpes de altura, por lo que no se tienen evidencias de desprendimientos de material, pero si se tiene un proceso de meteorización importante del material aflorante, “lutitas” que corresponden a un nivel de la formación Fomeque y que al alterarse, se convierten en materiales que también se plastifican y presentan deformaciones.



Figura 7. Vista general del movimiento del material.
Fuente: Servicios de ingeniería Limitada

El movimiento se puede clasificar como un fenómeno de reptación, el cual se evidencia en las deformaciones en casi la totalidad del ancho de la vía, en la longitud afectada por el movimiento, esta condición de bajas deformaciones del material de la subrasante presente en la parte superior del área en movimiento, presenta menores niveles de deformación de la zona afectada, pero tiene incidencias en el estado de la capa de rodadura, además de la inclinación de árboles de mediana altura y pequeños arbustos, muestran la incidencia del movimiento en la zona. El que las deformaciones aparezcan en la vegetación arbustos y árboles de mediana altura, es un índice de la fecha en que el movimiento está teniendo incidencia en la estabilidad del sector.

En conclusión, el factor detonante del movimiento, corresponde a la saturación del material por efectos de la posible infiltración del agua de la quebrada Suaitoque, además de la infiltración de agua proveniente de escorrentía superficial, o precipitaciones, por las grietas de tracción que se encuentran en el cuerpo del movimiento, y en las partes altas de la vía.

3. Condiciones Generales de la Zona

3.1. Usos del Suelo.

A nivel local, los suelos presentes en el sitio, corresponden a asociación de cultivos con rastrojos, o relictos del bosque (Ac), en los cuales se encuentran algunos vestigios de zonas boscosas, y grandes zonas de cultivos, de maíz y hortalizas. Además de esto, en el sitio se tiene una actividad ganadera por lo que la cobertura vegetal en algunas partes, solo corresponde a pastizales, además de un área determinada al almacenamiento de materiales de construcción.



Figura 8. Usos de suelos de la región (Cultivos)
Fuente: Servicios de ingeniería Limitada

La cobertura vegetal es producto de la acción de los factores ambientales sobre el conjunto interactuante que cohabitan en un espacio continuo y de la acción del hombre sobre el medio; es decir, la cobertura vegetal refleja factores bióticos y antrópicos que se producen en una zona o región dada.

3.2. Topografía local

La figura 9 presenta las características topográficas de la zona en donde se encuentra localizado el movimiento de estudio, en la cual se tiene la presencia de dos cauces que limitan el sector, los cuales corresponden a la quebrada Suaitoque, y una alcantarilla de recolección de aguas de la vía. En el sitio de estudio, y en cercanías, no se presenta una variación topográfica, que indique la presencia de un movimiento potencial cercano. Hacia la parte superior de la vía se tiene que las curvas de nivel se presentan casi paralelas a la orientación de la vía y hacia la zona del movimiento se observa que las curvas de nivel reflejan un movimiento.



Figura 9. Topografía local para el K1+400
Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

La única variación que se presenta en el sitio, es la que se encuentra en el margen izquierdo del cauce en la parte superior, la cual presenta una alta pendiente, por la cual se puede producir un desprendimiento de materia, pero que será de tipo superficial, ya que en esta zona se tienen afloramientos de roca.

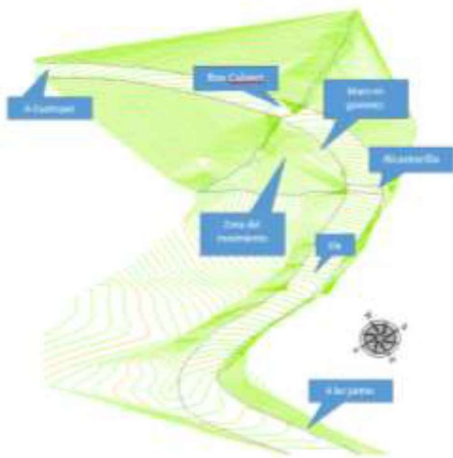


Figura 10. Isometría del sector de estudio.
Fuente: CSS constructores – Servicios de Ingeniería

En la parte alta de la vía se tiene pendientes muy altas, las cuales son originadas debido a los cortes realizados para el paso de la vía donde quedo expuesto material “rocoso, propio de la formación Fomeque. La cual aflora en la región, este material se encuentra estable gracias a sus propiedades mecánicas que permiten tener ángulos de corte altos sin generar derrumbes o movimientos. En la figura 11 se presenta el perfil topográfico donde se observa la vía y hacia la zona inferior la zona de movimiento (Perfil A-A’), se evidencia la pendiente que tiene la ladera hacia la zona superior observando que la pendiente de la zona es de aproximadamente 40% en

descenso, lo que indica que se tienen unas condiciones favorables para la circulación del agua, pero una condición que favorece el proceso de inestabilidad, pues con estas inclinaciones del terreno, se puede desarrollar más acentuadamente el fenómeno de reptación del suelo.

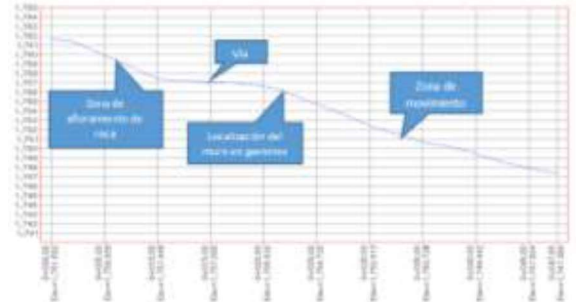


Figura 11. Perfil regional de la zona de estudio
Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

3.3. Precipitación

Desde el punto de vista climático se observa el predominio de la Zona de Confluencia o Convergencia Intertropical. En esta zona predominan las bajas presiones debido a la confluencia de los vientos Alisios del Noroeste y Suroeste, dirigiendo su trayectoria predominante de Sur – Este hacia el Ecuador Geográfico¹.

Esta zona de convergencia, al desplazarse de Sur a Norte provoca la formación de tiempo ciclónico, es decir lluvioso, cubierto y fresco, determinando un régimen de tipo mono modal que se extiende desde abril a noviembre, con un máximo en el mes de julio. En la siguiente tabla, se expresa la precipitación mensual multianual en valores medio, mínimo y máximo, según los registros de la Estación Sutatenza, las Juntas y Somondoco las más cercanas

Mes	Precipitación anual (mm)											
	Ene	Feb	Mar	Abril	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
17	31,6	49,8	110,7	163,8	181,2	184,4	141,7	107	88,8	64,7	30,1	1170,8
17	37,1	50	121,3	160,1	171,6	169,5	140,3	99,9	99,2	62,7	28	1156,7
15,9	39,9	54,4	121,4	159,4	171,1	198,5	146,1	62	85,6	57,9	26,2	1138,4
16,6	36,2	51,4	117,8	161,1	174,6	184,1	142,7	89,6	91,2	61,8	28,1	1155,3

Fuente:
http://www.corpochivor.gov.co/sites/default/files/attach/capitulo_I_II_caracterizaciongral.pdf

al municipio de Guatemala.

¹
www.cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Aspectossocioeconomicosguatequ

Basados en los datos promedio de precipitación en las tres estaciones climáticas cercanas al municipio de Guateque (Sutatenza, Las Juntas y Somondoco), los meses más lluviosos son mayo, junio y julio con 161.1 mm, 174.6 mm y 184.1 mm respectivamente. Los meses más secos son diciembre, enero y febrero con 28.1 mm, 16,6 mm y 36,2 mm, respectivamente. El total anual de precipitación promedio para el municipio es de 1155,3 mm2.

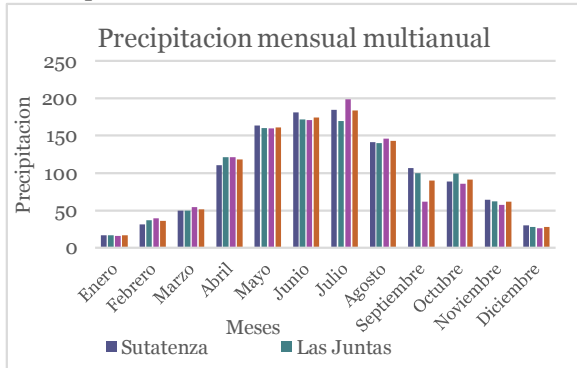


Figura 12. Precipitación mensual multianual para la zona de estudio. Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

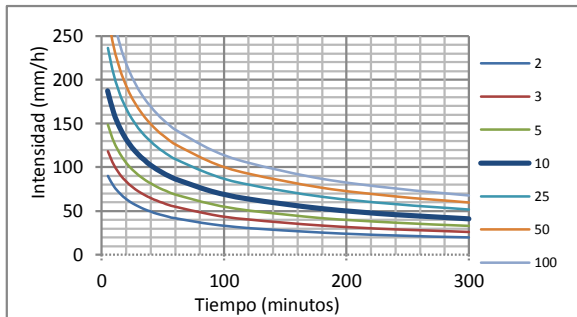


Figura 13. Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia. Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

4. Investigación del Subsuelo

Para determinar las características de los materiales presentes en sitio y con estas establecer las condiciones geotécnicas del subsuelo en el lugar del proyecto, se realizaron tres (3) sondeos con equipo manual, dos de estos a una profundidad de 6.00 m y uno a una profundidad de 4.50 m, adicional a estos se realizaron tres (3) sondeos con equipo mecánicos de lavado a 10.00 m de profundidad, esta perforación se realizó con el fin de conocer las condiciones del material presente en el subsuelo.

Durante la perforación de los sondeos se tomaron muestras alteradas e inalteradas con el fin de determinar las propiedades básicas e índices, y las propiedades mecánicas de cada uno de los estratos del subsuelo reportados en la exploración. En la figura 14 se presenta fotografías de exploración.



Figura 14. Exploración del Suelo. Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada



Figura 15. Localización de Sondeos Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

En la Tabla 2 se presenta el tipo de sondeo realizado, el número, la profundidad de exploración alcanzada y se establecen el número de ensayos efectuados para cada uno de los sondeos realizados.

Ensayo	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Profundidad	6.00	6.00	4.50	10.00	10.00	10.00
Humedad natural	4	5	4	8	8	7
Lavado sobre el tamiz N°200	4	4	4	6	6	6
Límites de Atterberg	4	4	5	7	6	6
Gravedad Específica	1	2	2	2	2	2
Ensayo de SPT	3	3	-	6	5	2
Veleta de laboratorio	1	-	-	-	2	1
Compresión inconfiada	2	2	2	2	2	1
Corte Directo	-	1	-	1	1	-
Consolidación unidimensional	-	-	1	1	-	-

4.1. Tipo de material.

En la parte baja de la ladera teniendo como punto de referencia la vía se observa un movimiento de material, compuesto por materiales arcillosos y limosos de baja plasticidad los cuales contienen

2

http://www.corpochivor.gov.co/sites/default/files/attach/capitulo_III_caracterizaciongral.pdf

porcentajes representativos de gravas y arenas; en algunos sectores se tiene la presencia de materiales compuestos por gravas embebidos en una matriz arcillosa y limosa.



Figura 16. Materiales Presentes
Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

En la parte superior del movimiento, específicamente en el corte realizado en la zona de la vía, se observa la presencia de material rocoso correspondiente a la formación Fomeque, en donde se encuentran afloramientos de “lutitas” altamente meteorizadas, en el flanco izquierdo de la vía. La lutita es un material de alta sensibilidad a la meteorización por efectos climáticos y en el material expuesto se observan los cambios en las propiedades del material. De igual forma, bajo el material que conforma la estructura del pavimento de la vía, se tiene la presencia de materiales arcillosos y limosos sobrepuestos a los materiales de la Formación Fomeque, condición estratigráfica que favorece la saturación del material más superficial.



Figura 17. Materiales Presentes en la Zona de Estudio parte Alta
Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

El bloquediagrama se construye sobre las condiciones topográficas. En la figura 18 se muestran la vista isométrica del sitio, en el cual se puede observar los diferentes materiales que se encuentran en la zona y así como su orientación.

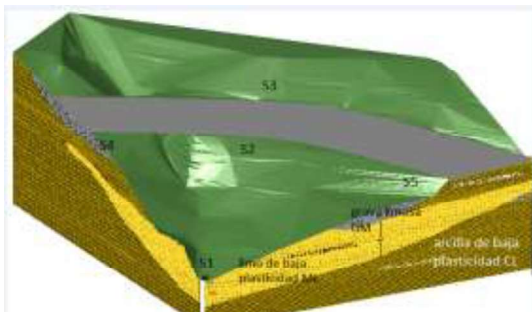


Figura 18. Bloquediagrama de la Zona de Estudio
Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

Como se observa, tanto en el bloquediagrama del sitio, y en los perfiles longitudinal y transversal, se tiene que el sitio de estudio, se encuentra conformado en casi su totalidad, por materiales completamente finos, estos distribuidos entre limos de baja plasticidad, y arcillas de la misma condición, lo cual favorece la generación de comportamientos plásticos ante altos niveles de saturación, llegándose a producir el comportamiento plástico del material y con esto los movimientos de reptación, el cual es el fenómeno que se presenta en el sitio.

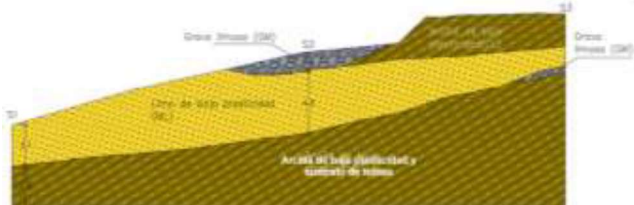


Figura 19. Perfil Longitudinal del sitio – sentido del movimiento
Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

De acuerdo a lo presentado en los perfiles algunos de los materiales corresponden a rellenos antrópicos, que fueron llevados al sitio para la construcción del corredor vial y otros materiales corresponden a depósitos de coluvión y materiales degradados de los materiales de la Formación presente en el sitio.

5. Determinación de Profundidad de Falla Mediante Análisis de Estabilidad

Para realizar el análisis de estabilidad del talud que se tiene en el sitio de estudio, se definió el perfil estratigráfico con base en los resultados de la exploración de campo realizado y los resultados de los ensayos realizados sobre las muestras tomadas en toda la zona de estudio. Dentro de este capítulo se establecen los factores de seguridad en primera instancia para la condición actual y luego para las condiciones críticas que se pueden llegar a presentar en el sitio, como presencia de agua en superficie y la ocurrencia de un sismo, con la magnitud prevista para la zona y con base en estos factores se establece la necesidad de medidas correctivas para garantizar la estabilidad del talud en estudio. De acuerdo a los resultados de los análisis de estabilidad se selecciona y define la medida a implementar, en el sitio, la cual se diseña y con esta se analizan las condiciones críticas para el sitio, estableciendo condiciones estables de acuerdo a los valores del factor de seguridad, que brinde estabilidad para la zona de estudio.

La evaluación de amenaza se realizó teniendo en cuenta el valor del factor de seguridad resultante para las diferentes condiciones de análisis y partiendo de los niveles de amenaza indicados en la Tabla 3. En esta tabla la condición normal corresponde al análisis sin sismo y sin agua y la condición extrema corresponde al análisis con los coeficientes propios de aceleración sísmica, los cuales son de 0.20 g, que es el coeficiente de aceleración sísmica horizontal, y 0.25, el cual es el coeficiente de aceleración sísmica vertical, determinados para el municipio de Guatemala en la NSR 10, y condición crítica del nivel de agua.

Amenaza	Condiciones normales FS
Baja	> 1,6
Media	1,1 - 1,6
Alta	< 1,1
Amenaza	Condiciones extremas FS
Baja	> 1,2
Media	1,0 - 1,2
Alta	< 1,0

5.1. Parámetros Geomecánicos del suelo

Para la definición de los parámetros geotécnicos de la cohesión y el ángulo de fricción de los materiales reportados en la exploración del subsuelo, se emplearon los diversos resultados de las pruebas de penetración estándar llevadas a cabo en campo además de los ensayos de corte directo, compresión Inconfinada y veleta rectangular realizados. En la tabla 4, se presentan la caracterización mecánica de cada uno de los estratos o niveles de materiales presentes en el subsuelo.

Material	Descripción	Cohesión efectiva (t/m ²)	Cohesión no drenada (t/m ²)	Ángulo de fricción ϕ (°)	Peso unitario total (t/m ³)	Peso unitario seco (t/m ³)
1	Grava con limos de baja plasticidad		10.3	33	2.28	2.06
2	Arcilla de baja plasticidad		29.0		2.17	1.89
3	Limo de baja plasticidad	4.1		21	1.97	1.87
4	Grava con limos de baja plasticidad		10.3	33	2.28	2.06
5	Arcilla de baja plasticidad	3.5*		19*	1.96*	1.54*

Fuente: Servicios de Ingeniería limitada

* Tomado del ensayo de corte directo

** Tomado del ensayo de compresión confinada

5.2. Análisis de condiciones actuales

Como etapa inicial, se realiza el análisis en condición actual, para identificar la susceptibilidad del sector, ante la aplicación de cargas repetitivas, propias del paso de los vehículos. Para esto, se llevó a cabo la formación del perfil geotécnico, en donde se considera la geometría del sitio, la identificación de

los materiales presentes, y sus parámetros de resistencia. A partir del análisis de estabilidad del modelo geotécnico elaborado se obtienen los respectivos factores de seguridad con los que se evalúa su condición de estabilidad con el efecto de agua y de sismos probables.

De acuerdo a las condiciones observadas para el sitio, la estabilidad general del talud se evaluó asumiendo la generación de fallas de forma circular, y no circular para representar el mecanismo de falla para los movimientos que se pueden haber presentado en el sitio de estudio.

Para el análisis de estabilidad, se empleó el método propuesto por Spencer, ya que este tiene en cuenta el análisis de equilibrio de fuerzas y momentos.

Como se puede observar en la figura 20, se tiene que el sitio de estudio, presenta unas buenas condiciones de estabilidad, si se tuviera una condición completamente seca de los materiales presentes, además de que no se llegase a presentar una condición de movimientos del material debido a la ocurrencia de un evento sísmico, con una alta influencia en el sitio, ya que el factor de seguridad mínimo que se puede llegar a presentar ante la posibilidad de falla circular es de 1.08, parámetro que garantiza un buen comportamiento, tanto de la vía, como del talud en general.

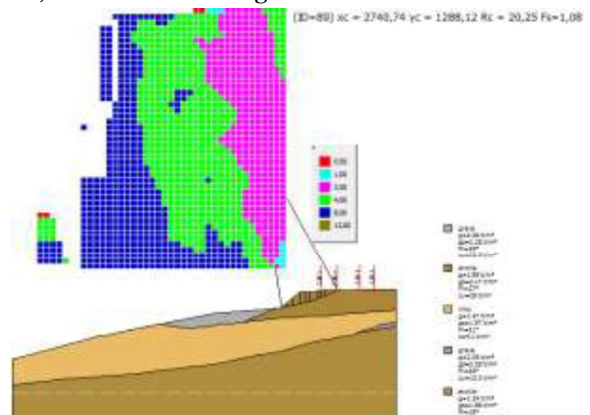


Figura 20. Condición de estabilidad ante condiciones normales y falla circular

Además de esto, se tiene que como en el sector se presenta un movimiento tipo reptación, la posibilidad de ocurrencia de una superficie de falla no circular es probable, por lo que se realiza el análisis de estabilidad bajo esta condición, en donde se obtiene que a partir de 6 superficies no circulares, se presenta un factor de seguridad, entre 1.04 y 5.77,

indicando que bajo las condiciones actuales, la posibilidad de ocurrencia de un desplazamiento de material es muy bajo pero que puede ocurrir con una velocidad baja.

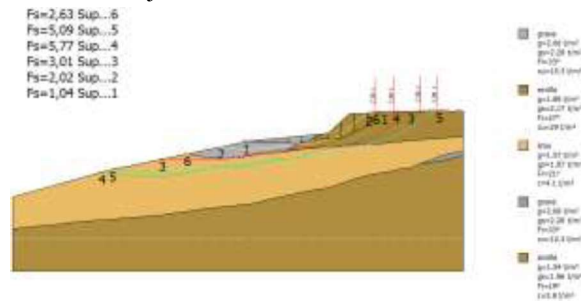


Figura 21. Condición de estabilidad ante condiciones normales y falla no circular

Identificando que la zona de estudio, ante condiciones normales presenta buena estabilidad, se realiza el análisis de estabilidad para el sitio, teniendo en cuenta dos posibles detonantes para el movimiento de la masa de suelo, las cuales son: la presencia del agua y la generación de un evento sísmico en el sitio, ambas generadas por procesos naturales con alta probabilidad de ocurrencia.

5.3. Análisis de condiciones críticas

Debido a que para la zona de estudio, debido a sus condiciones ambientales, geográficas y dinámicas, las condiciones menos favorables que pueden llegar a presentarse corresponde a la presencia de altos contenidos de agua, y generación de vibraciones, se realiza el análisis de estabilidad para la condición más crítica que se puede llegar a presentar en el sitio, la cual contempla la saturación total del material, y la presencia de un evento sísmico, con unos coeficientes de aceleración de ondas propios del sitio, en donde se simula la posibilidad de que el epicentro se encuentre en el sitio.

Ante esta situación, se tiene que el factor de seguridad, sigue presentando una reducción, pues si se llegara a presentar una superficie de falla circular, el factor de seguridad mínimo que se puede llegar a encontrar es de cerca de 0.66, con el cual se indica una inestabilidad crítica del sector, representada en altas deformaciones y fisuramiento del material en toda el área de influencia del movimiento, además del desarrollo rápido del proceso de reptación en la ladera.

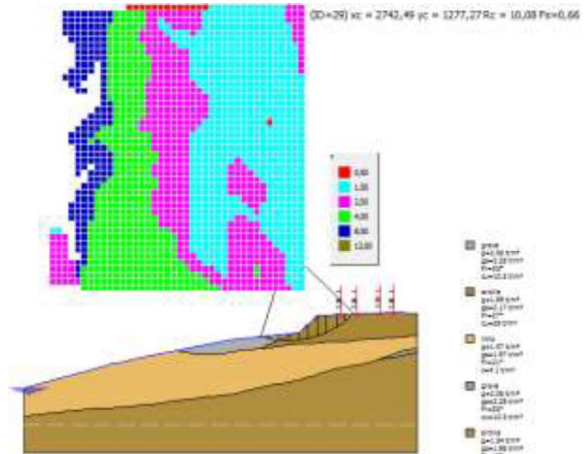


Figura 22. Condición de estabilidad ante condiciones saturadas y falla circular

De igual forma, se tiene que ante la posibilidad de ocurrencia de una superficie de falla no circular, y contemplando la condición más crítica, además de la posibilidad de 6 superficies a diferentes profundidades y longitudes, el factor de seguridad mínimo resultante es de 0.59, además de que se encuentran superficies igualmente críticas con factores de seguridad entre 0.7 y 0.73, estas localizadas a una profundidad cercana a los 1.80 m, a partir de la superficie, por lo que las estructuras de contención a desarrollar en el sitio, deben superar esta profundidad para garantizar una condición estable del material.

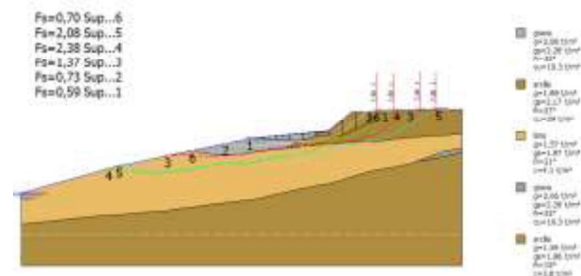


Figura 23. Condición de estabilidad ante condiciones saturadas y falla no circular

Teniendo en cuenta todas las condiciones anteriormente mencionadas, en donde se observa que se presenta una inestabilidad ante los fenómenos sísmicos y de saturación, se establece que el detonante más probable del movimiento es el agua, en donde se registran factores de seguridad inferiores al admisible, situación que se debe controlar, pues por estos factores desfavorables, actualmente se están produciendo altas deformaciones en la zona; además de esto, las estructuras que se realicen en el sector, deben poseer una profundidad entre los 2.0 m y 3.0 m, para

controlar todas las superficies potencialmente críticas, ya sean de forma circular, o no circular.

De acuerdo a lo anterior se observa que la zona de estudio presenta una alta susceptibilidad a la ocurrencia de un sismo y a la saturación de las capas que componen la zona. Ocasionando esto deformación plásticas del material razón por la cual es necesario la implementación de una obra de mitigación al proceso que se viene observando en la actualidad.

6. Verificación de Profundidad de Falla

Como se presenta en el anterior análisis de estabilidad para la zona, se tiene que la superficie de falla más crítica, se encuentra a una profundidad de aproximadamente 4.50 m, por lo que se realizan las diferentes obras de contención de forma que se intercepten estas profundidades, y se genere un empotramiento aceptable, y que garantice la estabilidad de la ladera. Para determinar si la profundidad de falla se encuentra a estas profundidades se realizó el análisis de variación de los diferentes parámetros, como el cambio de humedad del suelo, límites de consistencia, y condición del suelo ante la saturación total. Es importante mencionar que en análisis de estabilidad realizado, no hace referencia a la forma de falla del material, sino a la identificación de la profundidad de la superficie potencialmente crítica, puesto como se menciona en el capítulo 1, el movimiento corresponde a un fenómeno de reptación, cuya superficie es de tipo lineal.



Figura 24. Localización de Sondeos
Fuente: Servicios de Ingeniería Limitada

Como se puede observar en la figura 24, la zona de la banca de la vía, se encuentra caracterizada por los sondeos 3, 4 y 5, y en cercanías a estos, se encuentra

el sondeo 2, por lo que se puede incluir dentro del análisis.

En la figura 25 se presenta la variación de la humedad natural en los sondeos que se encuentran en el cuerpo del talud, y en la zona de la vía, en el cual se observa que se tienen grandes cambios, pero se aprecia un comportamiento descendente en el contenido de agua, en los 4 sondeos a una profundidad entre los 4 y 5 metros, por lo que se puede establecer que la zona inestable se encuentra a esta profundidad.

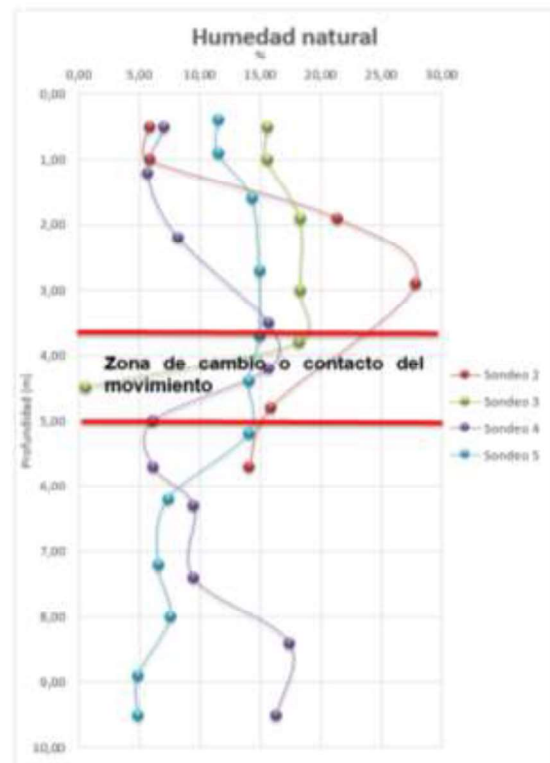


Figura 25. Variación de la Humedad Natural en los sondeos cercanos a la vía

Otra situación que ratifica la presencia de una superficie de falla a estas profundidades, es la condición que se puede llegar a presentar ante la saturación total del material, el cual a profundidades por encima de los 3.0m, de tener una saturación del 100%, el comportamiento del suelo es de tipo plástico, lo cual corrobora el movimiento de tipo traslacional, pero por debajo de estas profundidades (después de los 4.0 m), la condición de saturación total, no genera un cambio en el comportamiento, pues se tiene uno de tipo semisólido, lo cual se verifica con los altos valores de resistencia de los materiales.

Como se observa en la figura 26, para el sondeo 2, se tiene que en condición de saturación total, el material puede llegar a presentar un comportamiento plástico desde la superficie del terreno, hasta una profundidad de cerca de los 2.50, pero luego de esto, la humedad de saturación es menor al límite plástico, por lo que se presentaría una variación en el comportamiento a un tipo semisólido, por lo que el material por debajo de los 3.0 m presenta una baja probabilidad a desarrollar movimiento, además, porque el contenido de agua en el suelo presenta un decrecimiento importante.

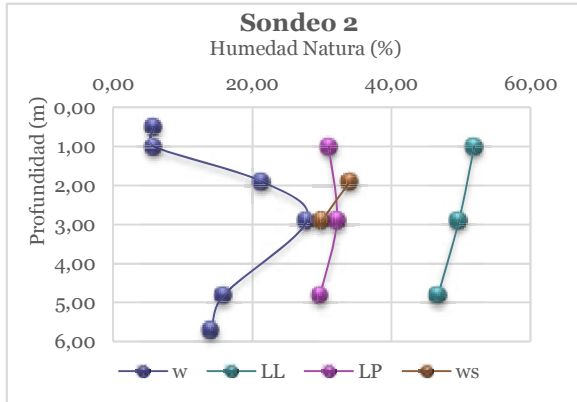


Figura 26. Condiciones de humedad y límites para sondeo 2

De forma similar a lo encontrado en el sondeo 2, se tiene que el sondeo 3 presenta un estado un poco más favorable, puesto que la humedad natural del material en todo su espesor es mucho menor al límite plástico, por lo que se puede decir que el estado del suelo en condición actual es de tipo semisólido, el cual no presenta una variación importante si se llegase a presentar la saturación total, puesto que a pesar de que la humedad del suelo aumenta significativamente con relación a la profundidad, esta no alcanza a superar el límite plástico, por lo que las deformaciones que se puedan llegar a presentar son bajas.

Una condición que es importante mencionar en este sitio, es que la humedad de saturación a una profundidad de 3.0 m, se encuentra muy cerca al límite plástico, pero a esta misma profundidad, la humedad natural presenta un decrecimiento importante, por lo tanto la humedad de saturación también presentará un descenso, y por consiguiente, este valor se volverá a alejar del límite de consistencia plástico.

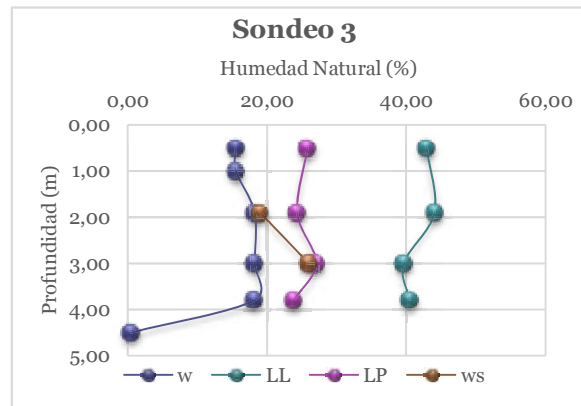


Figura 27. Condiciones de humedad y límites para sondeo 3

De igual forma a lo encontrado y presentado en el sondeo 3, en las figuras 28 y 29, los cuales corresponden a los sondeo 4 y 5, se presenta un comportamiento similar a los dos sondeos anteriores, pues se tiene que ante condición actual se presenta un comportamiento semisólido en todo el espesor del terreno, pero ante la saturación total de los materiales, se presenta una variación en el estado de consistencia del suelo, pues como se observa en el sondeo 5, se puede llegar a presentar un comportamiento plástico a profundidades entre los 2.0 m y 4.0 m, pero luego de los 4.50m, la humedad natural presenta un decrecimiento importante, por lo que esta misma condición se verá reflejada en la humedad de saturación, reduciendo la posibilidad de generación de un movimiento a mayores profundidades.

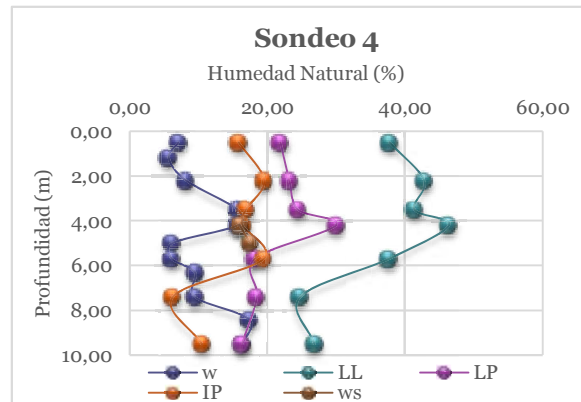


Figura 28. Condiciones de humedad y límites para sondeo 4

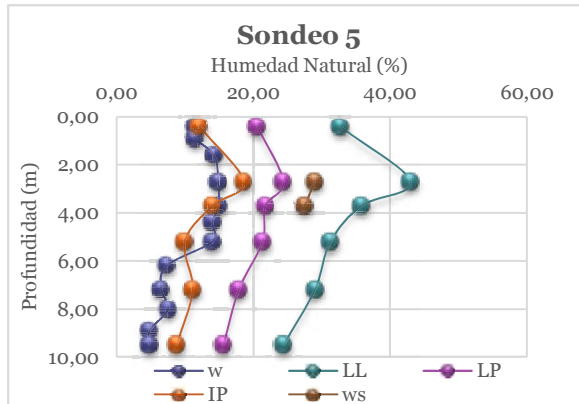


Figura 29. Condiciones de humedad y límites para sondeo 5

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se puede establecer que según la variación en el contenido de agua en el suelo, sus límites de consistencia, y condición del subsuelo en estado de saturación, se puede establecer que a una profundidad que oscila entre los 4.0 m, y los 5.0 m, se presenta una reducción importante en el contenido de agua, por lo que se puede establecer que la superficie del movimiento se encuentra en este rango de profundidad, además de que en condición de saturación total, los niveles por encima de los 4.0 m, presentan una alta susceptibilidad a plastificarse, pero por debajo de los 4.50, esta susceptibilidad se reduce

Otra condición con la cual se puede validar la localización del contacto de falla en el sitio, es mediante la resistencia que presenta el material en el sitio de estudio, y en especial en la zona de la vía, pues se tiene que mediante el ensayo de corte directo realizado para el material encontrado en los sondeos

Tabla 5. Resistencia al corte directo

Sondeo/ Muestra	Profundidad [m]	Peso Unitario (t/m ³)	Cohesión no drenada [kg/cm ²]	Fricción (°)	Material
S2/M4	2.90	1.97	0.41	21	Limo con Arena de Baja Plasticidad (ML)
S4/M6	4.30	2.18	1.43	20	Limo de Baja Plasticidad (ML)
S5/M5	3.80	1.96	0.38	19	Arcilla de Baja Plasticidad (CL)

2, 4 y 5, los cuales se relacionan en el informe general, y en la tabla 5.

En esta tabla se aprecia que los materiales que se encuentran en los niveles superficiales, o entre la superficie del terreno y los 3.40 m, presentan unas resistencias oscilando entre 0.38 Kg/cm², y los 0.41 Kg/cm², pero en cercanías a estos, se tiene que por debajo de los 4.30 m, esta resistencia presenta un

aumento significativo, pues se tiene una cohesión del material de 1.43 Kg/cm², lo cual indica que a esta profundidad, se tiene la presencia de materiales mucho más competentes.

Tabla 6. Compresión inconfínada

Sondeo/ Muestra	Profundidad [m]	Peso unitario (t/m ³)	Cohesión no drenada (Kg/cm ²)	Material
S2/M3	1.80	1.89	3.57	Limo con Arena de Baja Plasticidad. (ML)
S2/M4	2.80	1.94	1.00	Limo con Arena de Baja Plasticidad. (ML)
S3/M3	1.80	2.17	2.90	Arcilla Arenosa con Grava de Baja Plasticidad. (CL)
S3/M4	3.00	2.01	4.16	Limo de Baja Plasticidad. (ML)
S4/M6	4.30	2.20	8.00	Limo de Baja Plasticidad. (ML)
S4/M7	4.90	2.17	2.04	Limo de Baja Plasticidad. (ML)
S5/M4	2.70	1.95	0.59	Arcilla con Grava de Baja Plasticidad. (CL)
S5/M5	3.70	1.98	0.60	Arcilla de Baja Plasticidad (CL)
S6/M5	4.70	2.28	1.03	Grava Arcillosa con Arena donde los finos son de Baja Plasticidad. (GC)

En la tabla 6, se presentan los valores de resistencia obtenida mediante el ensayo de compresión inconfínada, en donde se aprecia la misma condición, valores relativamente bajos en los materiales que se encuentran entre la superficie del terreno, y los 4.0 m de profundidad, y luego de esta, se presenta un incremento importante, por ejemplo, en el sondeo 5 que se encuentra cerca de la vía a profundidades por encima de los 4.0 m, se registran unas resistencias de 0.60 Kg/cm², pero para los materiales encontrados en el sondeo 4 que se encuentra cerca a este, a profundidades por debajo de los 4.0 m, la resistencia del material se encuentra cercana a los 8.0 Kg/cm², lo cual corrobora la presencia de un nivel mucho más competente a estas profundidades.

7. Conclusiones

El sitio de estudio, se encuentra predominado principalmente por materiales finos, correspondientes a arcillas de baja plasticidad, y limos de igual condición, aunque se presentan pequeños niveles o lentes de gravas en algunos sitios, condición que favorece el flujo en dirección de la pendiente.

De igual forma, debido al predominio de la fracción fina en el sector, algunos de los fenómenos que se pueden llegar a presentar son los de expansión y ablandamiento cíclico, siendo en más probable la expansión, pues el material presenta un potencial medio a bajo, lo que indica que los aumentos de volumen por efectos de saturación van a ser bajos. Respecto a la condición de ablandamiento, se tiene que el material presenta una susceptibilidad media, por lo tanto, se debe garantizar de que no se presente la saturación del suelo pues si se llegara a presentar

un evento sísmico, se puede generar una pérdida repentina de la capacidad de soporte, condición que sería muy perjudicial para las estructuras del sector.

El movimiento que se tiene en el sitio se refleja por medio de un fenómeno de reptación o creep, proceso que se caracteriza por presentar tasas de movimiento bajas pero constantes al encontrarse el suelo saturado, movimiento que se da en sentido de la pendiente y que se traduce en la vía en agrietamientos al encontrarse una estructura de pavimento rígida.

Debido a las condiciones topográficas del sitio, el tipo de cobertura, la presencia de cuerpos de agua cercanos, se puede generar un aumento importante en los contenidos de agua en la estructura del suelo, más aun, cuando los materiales de composición fina, poseen una plasticidad importante, como se encuentra en este sector, lo que genera que una vez ingrese el agua al suelo, se reduzcan de forma importante o significativa las propiedades mecánicas del suelo, además de su estado de consistencia, y se den origen a los movimientos que se generan en el sitio, que corresponden a desplazamientos lentos, pero con espesores importantes.

Además de esto, una vez se genere un aumento en el contenido de agua del material, ya sea por infiltración o por flujos subsuperficiales, por condiciones de permeabilidad o capilaridad, las aguas van a llegar hasta una profundidad de terminada, la cual es indispensable conocer, ya que es la que va a definir de forma cuantitativa cual es el empuje que está ejerciendo el material en sentido de la pendiente, y cuál es el esfuerzo al que va a estar sometidos los posibles elementos de contención o mitigación a estos desplazamientos.

Mediante el análisis de estabilidad de la zona, empleando un software, se pudo establecer que la forma de falla, efectivamente correspondía a un movimiento tipo plástico, con una superficie de falla no circular, sino que posee una superficie de falla de gran longitud, corroborando que corresponde a un movimiento del suelo tipo creep.

Debido a que es necesario llevar a cabo la estabilización de la zona, es muy importante conocer con un detalle y una confiabilidad mayor la profundidad del material en movimiento, por lo

tanto, se establece que con las características físicas y mecánicas de los materiales, es posible determinar esta condición, por lo tanto, estableciendo las variaciones de parámetros, como la humedad, condición de saturación, estados de consistencia, como también parámetros mecánicos insitu y de laboratorio, se evidencia que la el espesor del material afectado es similar al obtenido mediante modelos computacionales, pero se presentan algunas variaciones que pueden ocasionar un alto impacto en las medidas de estabilización de la zona, y el corredor vial que se encuentra en un sector del movimiento.

8. Referencias

- Corporación Autónoma de Chivor, CORPOCHIVOR. (Diciembre de 2014), Aspectos Generales municipio de Guateque. Precipitación municipio de Guateque. Recuperado el día 12 de Diciembre de 2014 desde. http://www.corpochivor.gov.co/sites/default/files/attach/capitulo_III_caracterizaciongral.pdf
- ESCUELA SUPERIOR DE ADMINISTRACION PUBLICA (Diciembre de 2014). Aspectos Socioeconomicos del municipio de Guateque. Recuperado el día 12 de Diciembre de 2014 de [www.cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Aspectos socioeconomicosguateque](http://www.cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Aspectos_socioeconomicosguateque).
- GEOSTRU SLOPE, (2014). Software Estabilidad de taludes, Licenciado por SERVICIOS DE INGENIERIA LTDA
- SERVICIOS DE INGENIERIA LTDA. (Diciembre de 2014), Estudio De Estabilidad Del Talud Ubicado En K1+400 Corredor El Sisga, Municipio De Guateque - Departamento De Boyacá.

9. Autores

ANDRES FELIPE BERNAL VILLATE, Ingeniero Civil de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, egresado del año 2012, y en la actualidad culminando el programa de Maestría en Geotecnia de la misma Universidad, pues se encuentra en desarrollo de trabajo de grado, en el área de modelación geotécnica. Laboralmente, se desempeña en la parte de Consultoría en Geotecnia en la Empresa Servicios de Ingeniería LTDA, cumpliendo labores de coordinación, y diseñados de obras civiles, especialmente, en el área de

estructuras de contención, cimentaciones, taludes, y demás actividades geotécnicas. Por otra parte, en la actualidad, se desempeña como docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en el área de Geotecnia.

OSCAR RAMIREZ. Ingeniero Civil de la Universidad Nacional. Maestría en Geotecnia en la Universidad Nacional y especialista en Gerencia de Empresas Constructoras en convenio con la Escuela de Administración de Negocios y la UPTC. Cargos: consultor de Ingetec, Interdiseños, Tecnicontrol y empresas estatales como Ecopetrol, de Acueducto y Alcantarillado de Boyacá. Profesor y Catedrático de la FUB, vicerrector administrativo de la UPTC, creador y director de la Escuela de Ingeniería Civil en la UPTC y docente de este claustro universitario.