

20 SEGUIMIENTO GEOTÉCNICO EN OBRA Y SUGERENCIAS TÉCNICAS DADAS DURANTE EL PROCESO CONSTRUCTIVO

En este capítulo se presenta en orden cronológico parte del seguimiento y aporte de la tesis al proyecto y el desarrollo de las obras correctivas, basados en la interacción Asesores Geotécnicos (G y C) de la Concesionaria y la U. Nacional (J.Montero O. - C. Palomino S.) -

- **Fecha: Febrero 15 de 2010, - Solicitud de ingreso y programa de trabajo.**

Respetuosamente solicitamos permiso para iniciar las visitas de campo de la tesis. Lo anterior teniendo en cuenta que en las excavaciones que se encuentran en proceso podemos tomar datos de presencia de planos de discontinuidades, zonas débiles, superficies pulidas ("slickensides") que nos indiquen tendencias de movimiento o inicio de las superficies de falla, así como el registro de la presencia de flujos de agua freática y artesianas. Esta información será útil para ajustes de diseño y ajustes también en el dimensionamiento de las obras en ejecución (profundidad de las estructuras previstas).

Durante el proceso se compartirá la información recopilada y se darán sugerencias técnicas o académicas en caso de que se requieran en algún momento.

- **Fecha: Junio 4 de 2010, - Artículo técnico de diseño de Caissons y recomendaciones complementarias.**

Basados en reuniones con el Geól. Juan Montero, enviamos el artículo "Installation, monitoring and Design of Caissons" H.Brandl, 1993. El artículo contiene información importante relacionada con el comportamiento de los caissons, como elementos individuales y en grupo. En el caso específico de El Cune creemos que se deben tener en cuenta los siguientes aspectos en el comportamiento de los caissons ya construidos:

Drenaje mediante las estructuras ya existentes (Pozos y galería en construcción). Aumento de la rigidez de los caissons mediante la construcción de vigas de amarre (temporal o definitivo) que repartan de forma uniforme la carga-empuje recibida del terreno. Las vigas contribuirían a la estabilidad, mientras se termina la excavación de la galería.

Descarga local del terreno en una zona próxima a los caissons, excavando una faja del orden de 10 a 15 m de ancho desde el borde interno de los caissons hacia arriba de la ladera. Con esta excavación se disminuirán los empujes del terreno hacia los caissons, dando mayor tiempo para establecer el drenaje definitivo.

- **Fecha: Junio 17 de 2010, - Reconocimiento Junio 11 de 2010 Análisis de superficies de falla y comportamiento del flujo profundo.**

En reconocimiento realizado el día viernes 11 de Junio de 2010 se observó lo siguiente:

Los drenes horizontales excavados en el nicho de la galería de drenaje están drenando de forma adecuada, lo que indica que ya se ha establecido el flujo subterráneo hacia los drenes. Se debe tener en cuenta que esta profundidad se tiene solamente la permeabilidad secundaria de la roca (Planos de discontinuidades), por lo tanto el flujo de agua será lento pero permanente; en los próximos drenes que se perforen el flujo de agua tardará un tiempo mientras se establecen las líneas de flujo hacia los drenes.

Entre las abscisas 50 y 70 de la galería existe gran acumulación de agua subterránea, evidenciada en los arcos y el revestimiento de concreto. En este tramo en particular durante la excavación se registró una zona débil-brecha donde se observaron flujos importantes de agua hacia el frente de excavación. Se considera que entre estas dos abscisas de la galería 50-70 se debe concentrar la mayor cantidad de drenes para efecto de abatimiento del nivel freático en el deslizamiento.

Se inspeccionó el pozo No. 4, al igual que en la galería se considera que debe existir flujo debido a permeabilidad secundaria de la roca. Se sugirió que se perforara el fondo de este pozo y se instalara un piezómetro de tubo abierto para observar el comportamiento del agua.

En Inspección del pozo No. 1 se observa que hay buen comportamiento de esta estructura pero no se está bombeando, lo que impide la circulación local de líneas de flujo en este sector del deslizamiento.

Igualmente se estableció la conveniencia de profundizar entre 3 m y 4 m el pozo No. 2, con el fin de llegar al contacto coluvión/lutita (localizado a 23 m de profundidad) donde hay aún aporte importante de presiones hidrostáticas ("Explosiones de agua" una vez se toque el contacto) hacia las superficies de falla del deslizamiento. Esta actividad aumentará la eficiencia del sistema de drenaje en alto grado y contribuirá en el abatimiento del nivel freático general. El frente de excavación está a 150 m (Junio 11). En general se considera que tanto la galería de drenaje como los pozos tendrán un comportamiento eficiente, cumpliendo con lo proyectado y esperado (**Fotografías 39 a 41**).



Fotografías 39 a 41. Galería de drenaje. Proceso de revestimiento y funcionamiento en el sector de las abscisas K0+050/070. Junio 2010 2010.

- **Fecha: agosto 9 de 2010 - seguimiento geotécnico meses de julio y agosto, observaciones y sugerencias del estado de obras de contención y drenaje.**

Se presentan las observaciones y recomendaciones relacionadas con el seguimiento a la zona El Cune durante los reconocimientos geotécnicos llevados a cabo durante los meses de julio y agosto:

CONDICIONES GEOTÉCNICAS GENERALES

A La fecha (agosto 8 2010) se observa una mejora sustancial en el comportamiento geotécnico del deslizamiento, principalmente en la tendencia de las tasas de desplazamiento, las cuales se han reducido en un 50 %. Lo anterior debido al efecto benéfico del drenaje de los pozos y la galería, estructuras que han generado una componente vertical importante en las trayectoria de las líneas de flujo subsuperficial y profundo, se estima que una vez lograda dicha componente, las presiones hidrostáticas seguirán disminuyendo de forma gradual, aumentándose de esta forma los contactos entre partículas y la resistencia al corte en las superficies de falla existentes en el subsuelo.

GALERÍA DE DRENAJE

Entre las abscisas 175 y 198 de la galería de drenaje se presentaron derrumbes en el techo y altas deformaciones asociadas con presiones hidrostáticas provenientes desde la parte alta de la ladera, siendo necesario parar las labores de excavación y proceder a drenar y definir un nuevo sistema de excavación para poder seguir avanzando. En la abscisa 198 de la galería actualmente se han perforado drenes horizontales tanto en el

frente como a 45 grados, buscando dos cosas: drenar el frente de excavación y tratar de interceptar el fondo del pozo No. 2 mediante los drenes a 45 grados.

En nuestra apreciación, creemos que parte de la presión hidrostática en el frente de excavación es producida por la cantidad de flujo de agua existente en el contacto coluvión/lutita en el área de Influencia del pozo No. 2. Alcanzando en lo posible el contacto y disipando de esta manera la totalidad de las presiones de agua.

En el pozo No. 1 se alcanzó el contacto y no se produjeron dificultades cuando la galería de drenaje avanzó en este sector.

Con las condiciones actuales, es conveniente mejorar la estabilidad y excavabilidad en el frente de la galería, mediante la REEXCAVACIÓN del pozo No. 2 hasta lograr penetrar el contacto coluvión/lutita; implicaría excavar 4m-(4 anillos de concreto). Una vez se logre llegar al contacto se deberá bombear inmediatamente el flujo de agua que llegue a la estructura. El bombeo mejorará sustancialmente las condiciones en el frente de excavación y evitará que constructivamente se siga tratando de drenar desde el frente de excavación de la galería (Condición constructiva compleja por espacio e incertidumbre) y no desde los pozos, en particular el pozo No. 2 (condición mas "sencilla" y rápida, ya que se disipa la presión hidrostática con una estructura de mayor capacidad y el desagüe con bomba será mucho más rápido). **Fotografía 42.**



Fotografía 42. Frente de excavación de la galería, agosto de 2010.

CONEXIÓN DE LOS POZOS CON LA GALERÍA DE DRENAJE

Se sugiere que el elemento de conexión entre el fondo de los pozos ya excavados y el techo de la galería de drenaje sea de diámetro suficiente, que en el futuro permita un drenaje eficiente entre los dos tipos de estructuras de drenaje aplicadas.

APORTE ESTRUCTURAL DE VIGAS DE AMARRE Y VIGAS PUNTALES

En la zona de la banca de la vía se observa mejor comportamiento debido al trabajo como grupo de pilotes, alcanzado una vez se construyen las 4 filas de pilotes de cada sección transversal. Cuando se completan los cuatro pilotes que conforman las secciones transversales, las deformaciones debidas al empuje del terreno disminuyen considerablemente. Igualmente con el aporte de las vigas de amarre (longitudinales) y vigas puntales (transversales) se espera un mejor comportamiento en la disipación de presiones debidas a empujes de tierra. Fotografías 43 y 44.



Fotografías 43 y 44. Construcción de vigas de amarre longitudinales, agosto de 2010

- **Fecha: Septiembre 13 de 2010 - Reducción de tasas de desplazamiento**

A la fecha en la sección 440 se registra una tasa de desplazamiento de 0,1 mm/día inicialmente era de 2 a 3 cm/día. Las tasas siguen disminuyendo.

- **Fecha: Octubre 9 de 2010 - Análisis de resultados de instrumentación y sugerencias técnicas relacionadas con las obras de drenaje.**

En reunión de trabajo sobre la tesis del Cune se considera conveniente hacer los siguientes comentarios:

Se analizan los resultados de instrumentación e indica que el comportamiento del terreno en general es favorable, pues los desplazamientos disminuyen a partir de la fecha en que comenzó a funcionar el subdrenaje (Pozos-Galería) Agosto 10 de 2010.

Lo referente a la concentración de agua y deformación en el frente de excavación de la galería. Es muy razonable profundizar el pozo numero 2 hasta la roca (los otros pozos se excavaron hasta la roca). Este pozo tiene la particularidad de ubicarse en una cubeta coluvial que por su geometría concentra mucha humedad; es muy conveniente por tanto no solamente profundizar el pozo sino optimizar además el drenaje subhorizontal desde el

mismo, instalando más drenes de penetración con la mayor longitud posible. Además, el fondo del pozo se debe comunicar con la galería mediante tubería de 10 pulgadas que mejore la sección hidráulica. En el mediano plazo considerar la posibilidad de instalar mas pozos en sitios estratégicos, frente a las condiciones excepcionales de recarga.

En la zona desconfiada cerca del puente donde en la actualidad hay movimiento; sería conveniente considerar estructuras de contención adicionales a las previstas que ayuden a reforzar el terreno.

- **Fecha: Octubre 29 de 2010 - Observaciones y sugerencias relacionadas con el mecanismo de falla y la zona inferior del túnel falso**

Adjunto enviamos fotografías de la banca en el sector El Cune, tomadas en abril de 2000. En éstas se observa que la tendencia del mecanismo de falla del deslizamiento es de levantamiento fuerte con compromiso de los dos carriles de la vía (para la fecha de la fotografía el levantamiento era de 1,0 a 1,4 m), razón por la cual sugerimos mantener la construcción de los refuerzos en la base del túnel previstos, teniendo en cuenta que éstos distribuirán de forma adecuada (continua) los esfuerzos impuestos por el terreno a la estructura. En este sentido pensamos que el refuerzo en esta zona del túnel es muy importante. Adicionalmente sugerimos que la pantalla de protección (eje 1) se extienda lo suficiente en los extremos, hasta lograr llegar a sectores relativamente estables. Fotografías 45 y 46.



Fotografías 45 y 46. Levantamiento fuerte de la banca. Fotos: C.Palomino S, años 1999 a 2000.

- **Fecha: Diciembre 10 de 2010 - Seguimiento geotécnico al deslizamiento, sugerencias relacionadas con acciones de drenaje después de periodo invernal fuerte y rellenos.**

A la fecha (Dic. 2010) y después de las fuertes precipitaciones del mes de noviembre se estima conveniente hacer las siguientes sugerencias:

Mantener en observación permanente el comportamiento de las estructuras de drenaje, pozos y galería., realizar revisión de los drenes horizontales ya construidos, verificando la salida de agua. Si no hay salida de agua, realizar mantenimiento de los drenes mediante agua a presión o limpieza con sondas.

Sería muy conveniente optimizar el pozo No. 4, en lo posible reperfilarlo (desde el fondo actual) en un diámetro del orden de 10" a 12" y ver si se puede conectar con la galería de drenaje para obtener desagüe por gravedad. La optimización de este pozo contribuiría mucho al control de profundo de flujos próximos al túnel falso.

En el tema de los rellenos sobre la bóveda superior, ver la posibilidad de usar rellenos reforzados con geomallas o geotextil que actúen como refuerzo del relleno. El geotextil-geomalla daría a los rellenos resistencia a tensión y evitaría la formación de posibles superficies de falla dentro del mismo relleno, asociadas con la altura y disposición de los rellenos en el sitio. Adicionalmente, se transmitiría menor carga-deformación a las bóvedas superiores. Sugerimos se estudie esta opción.

Debido a que se iniciarán excavaciones en las zonas confinadas actualmente por las pantallas (Ejes 1 a 4), y se generarán volúmenes importantes de materiales excavados durante este proceso. Se sugiere no disponer materiales de excavación en una faja cercana a la pantalla del eje 1, considerando que si se disponen materiales a distancias cercanas al eje 1, se estaría contribuyendo de forma importante a que se presenten deformaciones durante el proceso de excavación dentro del túnel, teniendo en cuenta que se generarían sobrecargas que inducirían deformaciones inmediatas durante las excavaciones. Por tal razón se deberá dejar una faja (distancia) de seguridad donde no se permita la disposición de materiales de excavación, así posteriormente se vayan a reutilizar los materiales excavados en los rellenos superiores.

Dadas las altas precipitaciones actuales, se sugiere construir más canales interceptores en el cuerpo del deslizamiento, revestidos con geomembranas, con el fin de disminuir la infiltración de aguas de escorrentía hacia el subsuelo.

- **Fecha: Diciembre 15 de 2010 - Seguimiento geotécnico al deslizamiento y análisis conceptual de efectos de las excavaciones.**

Se elaboró un gráfico conceptual del comportamiento-Efecto de una excavación, con el fin de complementar las sugerencias enviadas en el mensaje anterior. Se destacan en nuestro caso los EFECTOS 5 y 6 (Ver figura adjunta.- Asentamientos y grietas) en una zona próxima a la excavación. Debido a lo anterior se debe mantener la faja de seguridad recomendada, en la que no se dispongan materiales que generen sobrecarga.

El EFECTO 4 (Deformaciones Convergentes) principalmente en nuestro caso paredes de excavación (taludes) y fondo, con convergencia hacia el centro y hacia arriba. En nuestro caso se deberá estudiar la posibilidad de usar apuntalamientos temporales hacia el centro de la sección que se excavará, teniendo en cuenta que la altura crítica de excavación para la roca lodosa es baja y puede estar entre 3,5 y 4,0 m.

El efecto de la excavación sobre la presiones de poros (EFECTO 1 - Drenaje). debe ser controlada por el sistema de drenaje profundo ya establecido, como ya se mencionó sería muy conveniente optimizar el pozo de drenaje No. 4, ya que es el más próximo a la excavación., por lo tanto si se tiene controlado el flujo subsuperficial y profundo este efecto debe ser mínimo sobre la excavación y las estructuras ya construidas. Figura 54.

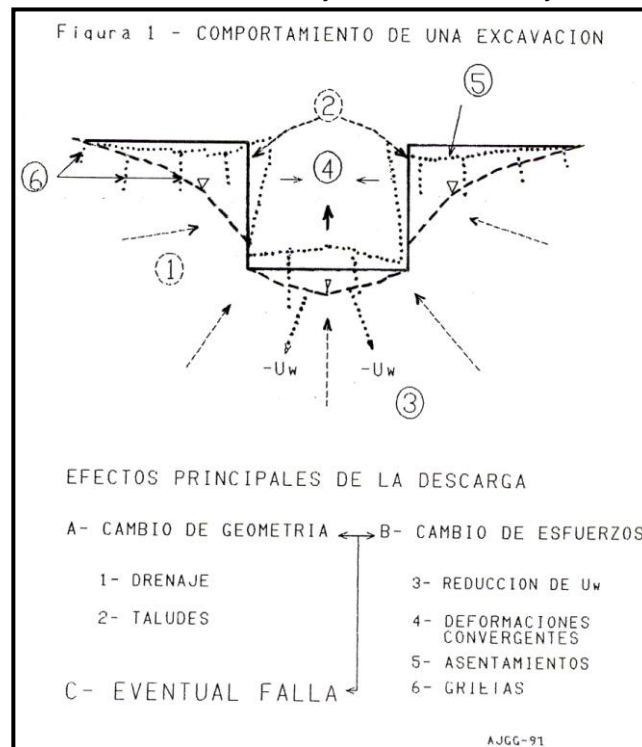


Figura 54. Efectos producidos por una excavación. Fuente: AJGG/91.

- **Fecha: Febrero 23 de 2011 - Seguimiento Geotécnico al deslizamiento, observaciones relacionadas con la protección del macizo rocoso y las paredes del túnel falso.**

Basados en observaciones recientes en las excavaciones que se realizan en la sección transversal de terreno entre ejes 3 y 4., se observa que la roca lodosa que conforma la pared del eje 4 está fracturada y una vez excavada muestra cambios en las condiciones superficiales que indican que al quedar expuesta se inicia un proceso de degradación importante.

Debido a lo anterior, es conveniente ir revistiendo las paredes que se excaven, se puede usar un sistema de malla mortero (o concreto), con abundantes pases de drenaje, este proceso de revestimiento se debe realizar una vez se excaven tramos en la sección. No es bueno dejar tramos excavados sin revestimiento de paredes, debido a que el proceso de degradación en esta roca es muy rápido; según nuestras observaciones en el sitio se

pasa de una condición de roca a suelo en 5 días, por lo tanto no se deben dejar tramos expuestos más de 3 días, debido a que se perderá confinamiento lateral en las pantallas de pilotes (Fotografías 47 a 50).



Fotografías 47 y 48. Sección actual del túnel falso y relleno de contrapeso en zona superior de la bóveda. Feb. 20 /2011.
Fotos: C.Palomino S.



Fotografías 49 y 50. Pantalla de pilotes del eje 4. Se observa el macizo rocoso y los pilotes de concreto.
Febrero 20 de 2011.

21 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

21.1 Aplicación del método observacional en el seguimiento geotécnico

Durante el desarrollo de la presente investigación se aplicó el método observacional siguiendo parámetros de control durante el proceso constructivo:

1. Observación de las características geotécnicas del terreno y deducciones de comportamiento basado en hechos observacionales.
2. Selección de variables y cantidades que se deben observar durante la Construcción.
3. Seleccionar las acciones o modificaciones.
4. Medir variables y evaluar condiciones reales.
5. Realizar ajustes durante construcción con base en las condiciones reales del sitio.
6. Aportes del Observador Geotécnico a la toma de decisiones durante el proceso constructivo de las obras.
7. Definición de umbrales y recomendaciones para seguimiento posterior (después de construcción).

21.2 Conocimiento del comportamiento de los materiales

21.2.1 Características geológicas de las rocas lodosas del deslizamiento

Lo más sobresaliente de las rocas lodosas que conforma el deslizamiento El Cune son los numerosos planos de debilidad que se presentan: su laminación, clivaje, fracturas, venas y fallas, que favorecen la infiltración de fluidos, su alteración y deformación.

Los minerales constituyentes con excepción del cuarzo y algunas arcillas, se depositaron o formaron y se preservaron en un ambiente con potencial químico reductor, por lo que al ponerse en contacto con el ambiente oxidante de la superficie, se alteran fácilmente, el hierro en estado de oxidación +2 de arcillas, pirita y materia orgánica, se hidroliza y oxida formando hidróxidos y óxidos de hierro, o sales como el carbonato de hierro (siderita); el ion sulfuro de las piritas y la materia orgánica se oxida a sulfatos, como el yeso.

En general se obtuvo una estructura tipo laminar y cúbica. En las muestras de roca laminar predomina la presencia de oxígeno (entre el 50% y 70%) y en las formas cúbicas

hay un contenido importante de Hierro (entre el 15% y el 30%) y azufre (entre el 14% y 30%), relacionados la presencia de pirita (FeS_2).

Los tipos de rocas excavadas y estudiadas presentan la siguiente clasificación:

1. Lodolita silícea carbonosa.
2. Shale carbonoso.
3. Arcillolita silícea.
4. Lodolita carbonosa
5. Arenisca de grano medio (Bloques del depósito coluvial superior)
6. Arenisca de grano medio, conglomerática (Bloques del depósito coluvial superior)
7. Arcilla arenosa (matriz del depósito coluvial)

21.2.2 Estados de alteración de la roca producidos por condiciones climáticas

Con base en las observaciones realizadas a los materiales excavados, se establecieron seis (6) estados de alteración de la roca lodosa desde el estado 1 ($t=0$), inmediatamente después de excavada, donde observan bloques de roca consistentes hasta el estado 6 ($t=120$ horas, 5 días) donde ya se ha degradado totalmente la resistencia de la roca, pasando de una condición de roca a suelo. El análisis observacional realizado en el terreno ha permitido establecer un tiempo de exposición de la roca de máximo **3 días**, cuando se realicen excavaciones en este tipo de roca (taludes, túneles etc.). tiempo en el cual se deberán proteger los taludes y superficies de la roca, para evitar pérdida de resistencia acelerada por alteración.

21.3 Verificación del mecanismo de falla y profundidad de superficies de falla

21.3.1 Aspectos relacionados con el mecanismo de falla y condiciones de flujo

El autor del presente trabajo destaca las consideraciones hechas por Castro-Montero, 2004 relacionadas con la incidencia de los planos de discontinuidades en la superficie de falla. Estos dos factores contribuyentes a la inestabilidad se han comprobado en el seguimiento geotécnico llevado a cabo durante la construcción de las obras correctivas 2009-2010. En el mecanismo de falla se presenta un antecedente de levantamiento en la base del deslizamiento, asociado con los altos valores de presiones de poros en las superficies de falla.

En el caso de la sección 440 se observa un mecanismo de falla del terreno de tipo deslizamiento de Bloque-Traslacional controlado por el contacto coluvión roca lodosa, con un espesor importante de roca lodosa de muy baja resistencia. En la 540 un mecanismo de traslación (tendencia baja a la rotación) con predominio de un espesor de coluvión deslizando sobre un estrato de roca lodosa, de baja resistencia.

Los siguientes factores se consideran contribuyentes al mecanismo de falla del deslizamiento (Observaciones del presente trabajo de grado):

1. Presencia de depósitos coluviales arcillosos de espesores importantes, se registran espesores promedio de 15 a 23 m sobreyaciendo roca lodosas blandas.
2. Existencia de rocas blandas, lodosas de baja resistencia al corte con presencia de fisuras y planos pulidos de desplazamiento (“slikenslides”) que evidencian movimientos en la roca relacionados con tectónica y minerales arcillosos que se han degradado con el tiempo.
3. Procesos de inestabilidad del terreno en los depósitos coluviales localizados en la parte alta de las laderas. Estos depósitos han ejercido un efecto importante de sobrecarga y aporte de aguas de infiltración que ocasionan desplazamientos.
4. Altas presiones hidrostáticas en la superficie de falla del deslizamiento, alimentada por zonas de recarga regional. En las excavaciones se han observado presiones importantes en las zonas débiles, principalmente entre 12 y 15 m de profundidad, evidenciándose este factor de recarga regional.
5. Presencia de flujo ascendente en los estratos de roca lodosa, principalmente en planos de discontinuidad de la roca localizados hacia el flanco derecho del deslizamiento.

21.3.2 Mecanismo de falla progresiva

De manera cualitativa se establece que el proceso de Inestabilidad inicial en el deslizamiento (durante los años 1997-1999) correspondió a un mecanismo de falla progresiva, en el cual se dio inicio a la formación de las superficies de falla en el material. Las características de los materiales en el deslizamiento El Cune cumplen las tres condiciones establecidas por Bjerrum (1966) en el mecanismo de falla progresiva:

(1) *Esfuerzos laterales internos grandes que causan concentraciones de esfuerzos en el frente de una superficie de deslizamiento incipiente y que tales esfuerzos excedan la resistencia pico.* **(2)** *Que el material tenga suficiente energía de deformación para producir la expansión necesaria en la dirección del deslizamiento y así llevarlo más allá de la deformación de falla (energía pico),* **(3)** *El material debe tener una curva esfuerzo deformación que presente un pico sustancial, esto es, debe ser del tipo deformación-ablandamiento (frágil), para que la resistencia al corte en la zona de falla, no impida la*

ocurrencia de las deformaciones diferenciales y así la zona de concentración de esfuerzos se traslade hacia la arcilla vecina no fallada.

21.4 Condiciones de resistencia al corte de los materiales y su relación de los valores de con la presión de poros medidos

En este trabajo se da especial interés a los valores de presiones de poros registrados en los piezómetros instalados, se obtuvieron magnitudes máximas entre 18,42 y 20,57 ton/m², valores que superan el valor de la cohesión en los planos de falla de la roca lodosa, el cual varió entre 0,4 ton/m² y 1,2 ton/m², esta condición indica que las presiones de poros inciden de manera directa en la resistencia al corte, considerada residual en los planos de falla.

Lo anterior en este trabajo se ha relacionado con el efecto de levantamiento que se presentó en la banca de la vía durante los años de 1999 y 2000, efecto que posiblemente se presentó debido a la pérdida gradual de resistencia al corte por altas presiones de poros en la superficie de falla, facilitando su desplazamiento y posterior deformación en la zona de la banca de la vía.

21.5 Comportamiento de las obras correctivas

21.5.1 Proceso constructivo y seguimiento geotécnico

Durante la presente investigación académica se logró establecer que el comportamiento del terreno y de las obras correctivas adoptadas para la solución del deslizamiento de El Cune se ajustan al diseño y las hipótesis planteadas en los estudios detallados realizados durante el 2009 (G &C).

Igualmente se destaca el programa de instrumentación desarrollado en el sitio para el control de variables, mediante la instrumentación se ha logrado establecer medidas de control de deformaciones durante el proceso constructivo de las obras desde el punto de vista geotécnico y estructural. Todas las deformaciones tanto del terreno como de las obras construidas en el periodo de observación han estado en rangos admisibles de deformación y han garantizado la estabilidad del deslizamiento, logrando un valor de seguridad adecuado.

Desde el punto de vista geotécnico se considera que se tendrán tres aportes importantes hacia la estabilidad definidos por los siguientes componentes de las obras:

Drenaje profundo Controla el exceso de las presiones de poros en el deslizamiento.

Estructuras de contención Control de las deformaciones del terreno hacia la estructura principal del falso túnel.

Rellenos de contrapeso Soporte en la base de ladera y control de levantamiento de la banca.

Estructuras secundarias del falso túnel (puntales y solera): Controlarán posibles excesos en las presiones de tierras durante la vida útil de la estructura.

21.5.2 Aporte del Drenaje profundo en la estabilidad del deslizamiento

Como obras de drenaje en el cuerpo del deslizamiento se construyeron 4 pozos de abatimiento (caissons drenantes) de 1,5 m de diámetro (y 20,5 m de profundidad) y una galería de drenaje de 220,0 m de longitud (de 240,0m diseñados), mediante estas estructuras de drenaje se ha logrado un abatimiento de 6 m en el nivel freático, estableciendo un control del flujo subsuperficial y profundo en el cuerpo del deslizamiento.

El drenaje ha permitido interceptar las superficies de falla localizadas tanto en el contacto deposito coluvial/roca como en el sustrato rocoso compuesto por rocas lodosas. Principalmente con la ejecución de obras de drenaje profundo se ha logrado la disminución de presiones de poros que contribuían a disminuir los parámetros de resistencia al corte en las superficies potenciales de falla.

Desde el mes de Abril/10, fecha en la que se avanzó en la excavación de los pozos de abatimiento (“caissons” drenantes) se observó una disminución importante en las tasas de movimiento del terreno, igualmente una vez se llegó al contacto Coluvión roca lodosa (registrado a 23,0 m de profundidad) se registraba alta presión hidrostática evidenciada en el levantamiento local del fondo y las paredes de la excavación. Por esta razón el autor del presente trabajo destaca la acción benéfica y eficiente de las estructuras de drenaje profundo construidas en el cuerpo del deslizamiento.

La galería de drenaje igualmente ha cumplido su función drenante, interceptando zonas débiles dentro del macizo rocoso con alta permeabilidad se mencionan dentro de éstas los tramos comprendidos entre las abscisas K0+050 a K0+075, K178+000 y K0+210, en estos sectores en particular se obtuvieron flujos subterráneos importantes que fue necesario captar con drenes horizontales perforados desde la sección principal de la galería. La galería de drenaje (durante el periodo de observación) ya se había conectado con el fondo de los pozos de abatimiento Nos. 3 y 2, quedando pendiente la conexión con el pozo No. 1 localizado hacia el tramo final de excavación de la galería.

Con base en lo anterior, como resultado de las observaciones realizadas por el autor se establece que como contribuyente importante en la estabilidad en este mecanismo de falla complejo constituido por rocas lodosas y coluviones está el drenaje profundo mediante estructuras que garanticen el drenaje eficiente de las superficies de falla y zonas con alta permeabilidad secundaria.

21.6 Factores de seguridad durante el proceso Constructivo de las Obras

Tabla 17. Factores de Seguridad durante el Proceso constructivo de las Obras

ETAPA	DESCRIPCIÓN	(SIN DRENAJE)	(CON DRENAJE)
0	Sin Obras	0,98	-
1	Movimiento de tierras	1,18	1,23
2	Elementos Verticales	1,59	1,64
3	Excavación + losa superior	1,49	1,51
4	Bóveda superior	1,49	1,51
5	Relleno Boveda superior	1,70	1,74
6	Excavación Frontal+Losa inferior	1,95	1,95
7	Bóveda Inferior	2,04	2,11
8	Relleno Bóveda Inferior	2,21	2,29
9	Etapas Final	2,61	2,63

Se establece que a partir de la construcción de los elementos verticales en el cuerpo del deslizamiento se mejora la estabilidad, previa construcción de los rellenos de contrapeso en la base. El incremento en el factor de seguridad entre la etapa inicial (sin obras) y la final (Después de construcción) es del 62 %, incremento que muestra el aporte de las obras diseñadas para el control de la inestabilidad en el deslizamiento El Cune.

21.7 Aplicaciones al manejo del riesgo

El tema de riesgo se ha establecido con base en los valores umbrales medidos en el terreno y que han causado inestabilidad durante el proceso constructivo de las obras. Se han tenido en cuenta los siguientes parámetros:

21.7.1 Umbrales de precipitación

El nivel de riesgo se ha calculado con base en el Método de Aboshi, basado en precipitaciones máximas en 24 horas y lluvia precedente de los 15 días. Con este método los valores de precipitación que han causado inestabilidad durante la construcción. Tabla 17.

Tabla 18 Umbrales de precipitación – manifestaciones en el terreno

LLUVIA MÁXIMA EN 24 HORAS (mm)	MANIFESTACIONES EN EL TERRENO
58	Incremento importante en las tasas de desplazamiento del terreno
70	Se producen desprendimientos superficiales de terreno y se generan grietas de tracción.
100	Este valor de lluvia genera desplazamientos importantes en el cuerpo del deslizamiento. En el caso particular generó un deslizamiento local en un tramo de los rellenos de contrapeso.

Con base en las mediciones llevadas a cabo en el sitio, se ha establecido un valor de alerta correspondiente a una **precipitación de 40 mm en 24 horas**.

21.7.2 Meses en los que se presentaron las mayores tasas de desplazamiento del terreno

Tabla 19. Periodos de máximas precipitaciones Vs. lluvias máximas, año 2010.

PERIODO	LLUVIA MÁXIMA REGISTRADA (24 HORAS)
15 de MARZO al 6 de MAYO (53 días)	<u>70 mm</u>
15 de MAYO al 6 de JUNIO (23 días)	<u>56 mm</u>
30 de SEPTIEMBRE al 30 de NOVIEMBRE (62 días)	52 mm 58 mm 100 mm

En especial en estos periodos de tiempo se deberán extremar las medidas de seguridad en el sitio, ya que son periodos considerados críticos desde el punto de vista de estabilidad. Se recomienda realizar mantenimiento preventivo de todas las estructuras de drenaje como mínimo 15 días antes de estos periodos de registro. En este lapso de tiempo (138 días/año) la responsabilidad del control de la estabilidad es de las estructuras de drenaje profundo pozos de abatimiento y la galería drenante.

21.8 Aporte al conocimiento de deslizamientos en rocas lodosas

1. Es necesario continuar con el estudio del comportamiento de las rocas lodosas en Colombia, históricamente se han presentado problemas de inestabilidad en proyectos de infraestructura con pérdidas económicas importantes. Actualmente se han estudiado ejes de proyectos viales en laderas compuestas por rocas lodosas y coluviones. Lo anterior amerita que se continúe con el estudio del comportamiento geotécnico de las rocas lodosas, dando continuidad a proyectos de grado que aporten al conocimiento de estos materiales y su incidencia en la estabilidad de proyectos de infraestructura.
2. En el deslizamiento El Cune existió un periodo donde no se tuvo claridad del mecanismo de falla, debido a la complejidad del movimiento. La meteorización y alteración de los materiales daban la impresión de procesos de flujo y deslizamientos locales superficiales que no permitieron establecer que en la ladera se había formado un deslizamiento de superficie de falla profunda. Durante dicho periodo se trató de prevenir y corregir la inestabilidad con obras que no aportaron mucho a la solución del problema.
3. Se hace énfasis en la importancia de entender los mecanismos de falla en las rocas lodosas y coluviones, se destaca el aporte de la estructura secundaria y los estados de alteración de la roca en la formación de planos de debilidad y superficies de falla. Se menciona (en El Cune) que debido a las características geológicas del depósito y

su historia geológica, se dieron las condiciones para que se presentara el mecanismo de falla progresiva (Bjerrum, 1966), principalmente en el periodo comprendido entre los años 1997 y 1999.

4. En los estudios y diseños en rocas lodosas es muy importante contar con exploración del subsuelo e instrumentación suficiente para definir de forma clara las profundidades de las superficies de falla de los deslizamientos. En el caso particular del deslizamiento de El Cune se realizaron perforaciones de 50 m con el fin de registrar las superficies de falla, se instalaron inclinómetros y piezómetros para definir tasas de desplazamiento y posición de los niveles piezométricos. Lo anterior se logró (con estudios geotécnicos detallados) hasta el año 2008, después de convivir con un periodo largo de inestabilidad en la ladera.
5. Se deben realizar estudios de los comportamientos de los planos de discontinuidades de la roca, enfocados desde los puntos de vista: de resistencia al corte, composición mineralógica e interacción química de los elementos constituyentes; con el fin de definir procesos de alteración que tiendan a degradar los materiales y facilitar la inestabilidad en planos de discontinuidades existentes.
6. En el deslizamiento de El Cune las presiones de poros medidas con altas y aportan a la disminución de resistencia en los planos de discontinuidades. El drenaje profundo ha sido fundamental para controlar las presiones y aportar a la estabilidad en el deslizamiento y la ladera.

21.9 Recomendaciones para realizar seguimiento geotécnico después de construcción.

A continuación se mencionan algunas recomendaciones básicas a tener en cuenta en programas de seguimiento geotécnico en el sitio de estudio:

1. Mantener en lo posible la instrumentación existente, continuando con lecturas periódicas después de construcción, se sugieren dos lecturas semanales durante un periodo de seis (6) meses, una vez obtenida esta información se deberá realizar un análisis de las tasas de movimiento obtenidas y establecer tendencias de comportamiento tanto del terreno como de la estructura (pantallas y fondo del túnel).
2. Cuando se logre la geometría final del terreno, se deberán instalar nuevos inclinómetros y piezómetros localizados sobre ejes estratégicos en el cuerpo del deslizamiento, se plantean tres secciones longitudinales y tres transversales, en las que se realice monitoreo permanente de presiones de poros y deformaciones.
3. Continuar con las mediciones de lluvias diarias (24 horas), se plantea el uso de las curvas de Aboshi, para definir el nivel de riesgo debido a la influencia de las lluvias en la estabilidad del terreno.

4. Instalar instrumentación suficiente dentro de la sección principal del falso túnel con el fin de ver el comportamiento de deformaciones en el tiempo. La frecuencia de estas mediciones deben ser permanentes.
5. Realizar evaluaciones anuales detalladas de los datos de instrumentación, observando principalmente si las tasas de desplazamiento tienden a la disminución en el tiempo o siguen en asenso, en caso que sea de incremento se deberá evaluar la posibilidad de construir obras complementarias de drenaje (mayor cantidad de pozos) y posteriormente opciones de refuerzo en el falso túnel.

22 AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a las siguientes personas y entidades:

Geól. Juan Montero Olarte. Director del Proyecto

Por la dedicación en la investigación geotécnica del deslizamiento de El Cune, como Director de proyectos de tesis grado de la Universidad Nacional (Ings. Carlos H. Castro y Jorge A. Osorio, 2004), en los cuales se plantearon las bases para el entender el problema de inestabilidad. Igualmente se valora la incidencia de sus conceptos técnicos y académicos en la comprensión de la evolución del deslizamiento, en el planteamiento de las obras correctivas y en el seguimiento realizado en el presente trabajo de grado.

Concesión Sabana de Occidente. Ing. Camilo Maya

Por permitir y apoyar, en nombre de la Concesión Sabana de Occidente esta investigación académica, lo cual permitió estudiar el comportamiento del deslizamiento durante el proceso constructivo de las obras, identificando los principales factores que inciden en la estabilidad del deslizamiento y las obras llevadas cabo. La información recopilada se considera la base para continuar actividades académicas tendientes a mejorar el conocimiento de nuestros materiales, procesos de inestabilidad y las soluciones de Ingeniería.

Geotecnia y Cimentaciones Ltda. Ing. Juan Carlos Afanador e Ing. Carlos Vargas.

Por permitir compartir información y hallazgos geotécnicos durante el proceso constructivo de las obras. Se plantearon sugerencias y observaciones académicas que permitieron realizar ajustes en el proyecto.

Sociedad Colombiana de Geotecnia.

Por el apoyo económico recibido y la colaboración en el desarrollo de la Investigación. Esta contribución fue fundamental para la logística del trabajo de grado.

Grupo de Rocas Lodosas Sociedad Colombiana de Geotecnia-(GRL-SCG)

Por el intercambio de conocimiento y trabajo conjunto en el tema de rocas lodosas de la Cordillera Oriental de Colombia. El autor de la tesis le agradece al Ing. Mario Camilo Torres S, por compartir de manera desinteresada la Información de su tesis Doctoral- U. Nacional; y a los colegas del grupo Geol. Juan Montero y Geól Ricardo Cortés, por su aporte al mejor conocimiento de las rocas lodosas. Toda esta información contribuyó

positivamente en el estudio y recopilación de aspectos importantes del comportamiento de las rocas lodosas, principalmente en los temas de caracterización y terminología.

23 REFERENCIAS

Geotecnia y Cimentaciones Ltda. Suministró la información geotécnica durante la ejecución del presente proyecto de grado.

Consorcio Túnel de El Cune Mayo 2009. Diseño Geotécnico de Estructuras y sitios Inestables para las soluciones a las inestabilidades presentes desde la variante de Utica hasta el Intercambiador de Villeta de la carretera Bogotá-Siberia-El Vino-La Vega-Villeta Ruta Nacional 50 Tramo 08 en el Departamento de Cundinamarca. Sitio Inestable El Cune K80+910-K81+110.

Montero J, Torres S., M.C, Cortés R. Palomino S., C. Proyecto rocas lodosas cordillera Oriental de Colombia XIII congreso & VII seminario colombiano de Geotecnia, Manizales sept de 2010.

Torres S., M.C. (2006). Síntesis del Estado del Conocimiento sobre el Comportamiento Esfuerzo-Deformación y Degradabilidad de Rocas Lodosas. VI Congreso Suramericano de Rocas, Sociedad Colombiana de Geotecnia. Cartagena (Col). ISBN 958-33-9677-X, pp. 477-491.

Torres S., M.C. et al. (2008). Avances recientes en la caracterización de rocas lodosas de los Andes. I Simposio Suramericano de Excavaciones en Roca. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Bogotá (Col). 1-4 septiembre de 2008. ISBN 978-958-98770-0-5, pp. 239-248.

Consorcio Villeta (2007). Estudios Geotécnicos para la construcción de la variante de Villeta, estabilización del paso nacional por Villeta, Planta de Ecopetrol y otros sitios críticos o declarados en situación de Emergencia por fenómenos de remoción en masa. Sitio 1-Deslizamiento de El Cune. Noviembre de 2007.

González García A. J. & Montero Olarte J. (2007). El Cune slide in mudstones and shales in Colombia: History and analyses. 11th Congress of the International Society for rock Mechanics. Lisboa, Portugal 2007.

APC Ltda. Ingenieros Consultores (2005). Estudios para la estabilización del deslizamiento El Cune. Carretera Honda-Villeta-Tobiagrande-Bogotá. Informe Final.

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (2005). Propuesta de solución para el paso permanente en el sitio El Cune de la carretera Honda-Villeta-Tobiagrande-Bogotá, ruta 50 Tramo 5008. Febrero de 2005.

Celis Armando (2004). Concepto Técnico Deslizamiento El Cune PR64+350 PR64+570 de la carretera Honda-Villeta-Tobiagrande-Bogotá, ruta 50 Tramo 5008. Diciembre DE 2004.

Montero Juan, González Álvaro, Castro Hector, Osorio Jorge (2004), Seguimiento de la inestabilidad en el sitio El Cune. X Congreso – V Seminario Colombiano de Geotecnia. Agosto de 2004.

Carlos H. Castro (2004). Tesis de grado para optar al título de Especialista en geotecnia con énfasis en Vías. Seguimiento de la Inestabilidad en el sector de El Cune PR 64+000 PR 65+850, vía Honda Bogotá y Evaluación de soluciones Implantadas entre los años 1994 y 2002. Febrero de 2005.

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (2003). Estudio de diagnóstico de la emergencia entre el PR 64+000 y el PR 65+850 El Cune de la carretera Honda-Villeta-Tobiagrande-Santafé de Bogotá ruta 50, tramo 5008. Octubre de 2003.

Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá (2002). Estudio de diagnóstico de la emergencia entre el PR 64+000 y el PR 65+850 El Cune de la carretera Honda-Villeta-Tobiagrande-Santafé de Bogotá ruta 50, tramo 5008. Agosto de 2002.

Montero J., Torres S. M.C., Palomino S., C, Cortés del Valle R (2010). Rocas lodosas en la Cordillera Oriental de Colombia. XIII Congreso Colombiano de Geotecnia, Manizales 21 al 25 de Septiembre de 2010.

Alarcón, A., Ángel, G., Isaza, A. (1976). Bases para el estudio de lutitas en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Palomino S., C.A. (2000). Zonificación Geotécnica de la vía Tobiagrande Puerto Salgar- Proyecto de grado-Especialización en Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia.

Tovar V., R. D. (2008). Influencia de ciclos de humedecimiento y secado en la resistencia al corte de rocas arcillosas. Tesis de grado para optar al título de Magister en Ingeniería-Geotecnia.

Bjerrum L. (1967), Progressive Failure in Slopes of Overconsolidated Plastic Clay and clay shales. J. Soil Mech.&Found. Division, ASCE, Vol 93, pp 3-49.

Fleming R.W, Spencer G.S., Bank D. C (1970). Empirical behavior of clay shale slope US Army Engineer. Nuclear Catering Group (NCG) Technical report 13 pp1-93-.

Aboshi T. Concentrated rainfall and slope failure, manual for zonation on areas susceptible to rain induced slope failure, asian technical committee on geotechnology for natural hazard, ISSMFE, Japanese Geotechnical society, 1977.

Peck R. B. (1969). Advantage and limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics. 9th. Rankine Lecture.

Osterberg (1989). Necessary Redundancy in Geotechnical Engineering. Twenty First Terzaghi Lecture, JGE asce Vol 115 (11)

Londe P. (1982). Concepts and Instruments for Improved Monitoring. JGE ASCE Vol 108 (6).

Turner A. Keith,. Shuster R. L (1996), Landslides Invesgation and Mitigation Special report 247, National Academy of Sciencies.USA.
