

Entre Santa Tecla y Colón (El Salvador)

Estudio geotécnico de los desmontes de la Carretera Panamericana (CA-1)

En este artículo se resumen los trabajos llevados a cabo con objeto de definir las características geológicas y geotécnicas de los diecinueve desmontes existentes en la Carretera Panamericana CA-1 entre Santa Tecla y Colón, en la zona conocida como *Los Chorros*, particularizando en el estudio de dos de ellos que pueden considerarse representativos del resto.

Fuente: FERNÁNDEZ MARTÍN, José Miguel GALERA FERNÁNDEZ, y Juan Manuel HURTADO SÓLA. GEOCONTROL, S.A.

Pedro VELASCO POSADA. ITASCA, S.L.

Palabras clave: ANCLAJE, CARACTERIZACIÓN, DESLIZAMIENTO, DESMONTE, RIESGO, ROTURA, SEGURIDAD, TALUD, TERREMOTO.

El terremoto producido en El Salvador el 13 de enero de 2001 y sus posteriores réplicas, principalmente la del 13 de febrero del mismo año, produjeron dramáticas consecuencias tanto humanas, por la pérdida de casi dos millares de vidas, como económicas, por la destrucción de numerosas infraestructuras del país.

Una de las principales causas de estos daños fueron los deslizamientos asociados a estos sismos.

En concreto, estos deslizamientos de tierras y algunos desprendimientos de bloques rocosos, afectaron a la *Carretera Panamericana (CA-1)* que constituye la infraestructura más importante del país, fundamentalmente en el sector de la Cordillera del Bál-samo, al oeste de la capital, y en las cercanías de San Vicente, hacia oriente.

Sin duda, la zona más afectada fue la primera, situada entre las poblaciones de Santa Tecla y Colón, que coincide con la intersección de la CA-1 y la Cordillera del Bál-samo, a través de la hendidura creada por el río Colón.

Esta zona es conocida como sector de *Los Chorros* al situarse en ella un popular balneario del mismo nombre.

Este tramo de la *panamericana* constituye el nexo de unión de la capital con todo occidente (Santa Ana, Sonsonate y Ahuachapán).

En la *Foto 1* se muestra una panorámica de esta carretera, tomada desde la coronación de uno de los taludes.

Como consecuencia del terremoto, dicha carretera presentó numerosos problemas, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Deslizamientos de piel casi generalizados a lo largo de la traza extendidos principalmente aunque no exclusivamente a lo largo de la Sierra de Bál-samo, que en su mayor medida afectan a las cabezas de los taludes constituidos por terrenos no consolidados (piroclásticos y epiclásticos). Algunos de estos deslizamientos llegan a tener el carácter de *fluxión de suelos*, con la pérdida casi absoluta de los valores de resistencia del terreno. En este sentido y en condiciones suficientes de humedad, al ser movilizado por el terremoto, el terreno pierde la cohesión y su ángulo de fricción interna disminuye drásticamente, pasando a comportarse casi de forma fluida.
- Algunos deslizamientos rotacionales, aunque pocos y muy localizados.
- Algunos deslizamientos de rellenos antrópicos realizados en los últimos años sin compactación alguna, lo que les confiere un elevado riesgo de rotura.
- Avalanchas y arrastres masivos de lodo consecuencia de la fluxión de los suelos más sueltos en zonas puntuales, habiendo invadido en algunos puntos la propia calzada.
- En la zona correspondiente a las laderas del volcán de El Salvador, en la margen derecha del río Colón, no se detectan este tipo de fenómenos, como consecuencia de la presencia de coladas de lava, hoy basalto, que cohesionan las tobas existentes. En estas laderas es más grave, en cambio, la caída de grandes bloques, pues las coladas están muy diclasadas.



Foto 1.- Panorámica de la Carretera Panamericana (CA-1).

- Algunos desprendimientos por vuelco de bloques de roca basáltica.
- Aterramiento de la red de drenaje general.
- Probable colapso estructural de los actuales drenajes transversales de la carretera.
- Roturas y derrumbes puntuales de muros y muretes.

Trabajos realizados

En primer lugar se recopiló toda la información geológica y geotécnica disponible sobre el área de estudio, tanto en el aspecto cartográfico, como esquemas, informes o memorias.

La campaña de campo fue realizada entre los días 18 y 27 de octubre de 2001. Los trabajos realizados pueden sintetizarse en las siguientes tareas:

- Cartografía geológico-geotécnica.
- Levantamiento geotécnico de detalle de taludes.
- Levantamiento de estaciones geomecánicas.

La **cartografía geológico-geotécnica** se realizó a escala 1/2.000 sobre un franja de terreno de unos 250-300 m de anchura, centrados en la carretera. Para ello se partió de un estudio fotogeológico sobre pares estereoscópicos 1/15.000.

El levantamiento de taludes se realizó a escala 1/500, obteniéndose para cada talud existente los siguientes datos:

- Datos geométricos (altura, inclinación, bermas, dirección, etc.).
- Litologías.
- Medidas de las discontinuidades estructurales, con indicación de su espaciado, continuidad, apertura, rugosidad, presencia de agua y relleno.
- Caracterización geomecánica del macizo rocoso mediante el índice **RMR**.
- Evaluación del comportamiento del talud y de su estabilidad, con indicación de las patologías existentes.
- Perfil geotécnico transversal y longitudinal del talud.

Se realizaron **estaciones geomecánicas** en las que, además de la caracterización del macizo rocoso mediante la clasificación **RMR** y del levantamiento y medida de discontinuidades estructurales, se efectuaron sistemáticamente ensayos geotécnicos *in situ*, mediante esclerómetro *Schmidt* en los basaltos de naturaleza rocosa y mediante un penetrómetro de bolsillo en las tobas, tipo suelo.

Todas estas labores previas permitieron la definición de una campaña de prospecciones de campo y ensayos de laboratorio posterior, que puede resumirse en los siguientes trabajos:

- 10 perfiles de sismica de refracción.
- Toma de muestras inalteradas o parafinadas para su posterior ensayo de laboratorio.
- Realización de nueve ensayos de corte *in situ*

Como fruto de todos estos trabajos se obtuvieron las propiedades geotécnicas representativas para cada uno de los litotipos existentes.

Marco geológico

Geotectónicamente, El Salvador se sitúa en la zona más occidental de la placa del Caribe, próximo a la zona de subducción de la placa de Cocos. En la **Fig. 1** se muestra el contexto tectónico de este país.

Esta disposición condiciona sobremanera su geología, ya que queda atravesado por la cadena de volcanes paralelos a la fosa de subducción, que han generado la inmensa mayoría de los materiales que constituyen El Salvador.

Consecuentemente, El Salvador es un país extremadamente joven. Una cuarta parte del territorio nacional es de edad pleistocena, mientras que, casi las tres cuartas partes restantes están cubiertas por rocas de edad terciaria, predominando la época pliocena. Las capas de edad cretácica, que cubren aproximadamente un 5% del territorio salvadoreño no juegan un papel importante para la constitución geológica total del territorio nacional. Solamente estas últimas capas son de origen sedimentario marino, mientras que todas las demás rocas, con pocas excepciones, están originadas por fenómenos ígneos.

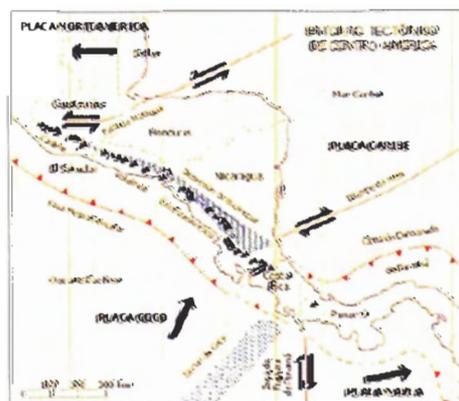


Fig. 1.- Contexto tectónico de El Salvador.

Centrándose en la zona de estudio la formación más antigua, de edad pliocena, (*Formación Balsamo*) se compone de dos unidades principales, intercalaciones de epiclásticas (sedimentos lacustres) y piroclastos a base (*Facies Claro*), y rocas volcánicas andesíticas-basálticas a techo. El foco volcánico de la formación no se conoce con exactitud, situándose al SW del área de estudio.

La formación más reciente, de edad holocena-pleistocena, *Formación San Salvador*, se compone de base a techo por rocas piroclásticas y epiclásticas (tobas color café), intercalaciones de coladas basálticas con niveles de cenizas, y rocas piroclásticas y epiclásticas (tierra blanca). El principal foco volcánico responsable de la deposición de la formación es el volcán San Salvador.

Los terremotos en la región están originados por la colisión en esta zona de la placa de Cocos con la del Caribe. En el encuentro de ambas placas se forma una zona de subducción, donde la litosfera oceánica se introduce bajo la continental, con una velocidad de unos 6 cm/año, una de las más altas en el movimiento de las placas litosféricas. En esta zona se pueden generar movimientos sísmicos con mecanismos focales compresivos y magnitudes cercanas a los 8 grados en la escala *Richter*.

El Salvador se ve afectado, además, por otros terremotos localizados en la cadena volcánica paralela a la costa en su interior. A pesar de que estos terremotos no alcanzan, en general, magnitudes superiores a 6,5 grados, suelen ser los que más daños generan, debido a su foco superficial y su coincidencia con los núcleos poblados. No obstante, el terremoto del 13 de enero de 2001 se asocia a la zona de subducción.

En este contexto tectónico se generan cuatro familias principales de fracturas en la zona de estudio. La aparentemente más antigua posee una dirección Este-Oeste y genera los escarpes Norte de la cordillera costera. Las familias Norte-Sur son menos importantes, aparecen localmente y con una longitud limitada. Las familias de fracturas más jóvenes son las de dirección Noroeste, subordinadamente Noreste, que presentan características morfológicas fácilmente reconocibles.

En determinadas áreas parece que las cuatro familias presentan importancia similar, lo que sugiere que cada familia se ha generado en distintas épocas, pero han sido reactivadas repetidamente por el movimiento de otras familias.

La familia de dirección Noroeste parece tener actividad tectónica muy reciente.

Los volcanes jóvenes de la zona parecen

estar relacionados con las fallas de dirección Este intersectadas con las de dirección Noroeste.

Los buzamientos de las fracturas oscilan entre los 65° y la vertical, con movimientos puramente distensivos o con cierta componente transtensiva.

El principal curso fluvial en la zona de estudio es el río Colón, encajado a favor de una falla de dirección NNW-SSE.

El drenaje se efectúa principalmente de forma superficial, favorecido por las importantes pendientes de la zona.

Los materiales volcánicos no rocosos presentan una permeabilidad muy variada, ya que mientras las tobas actúan de un modo prácticamente impermeable; por el contrario, los niveles de piroclastos y cenizas, presentan una permeabilidad elevada, y son fácilmente deleznable, una vez eliminada la tierra vegetal, por las fuertes lluvias. Por ello, los flujos de agua tienden a desplazarse según la estratificación, ocasionando goteos e incluso rezumes en alguno de los taludes presentes.

Los materiales volcánicos rocosos, basaltos y andesitas, se consideran impermeables en cuanto a su matriz rocosa, presentando cierta permeabilidad a favor de las diaclasas de enfriamiento presentes, lo que aumenta la inestabilidad de los bloques generados.

Descripción de los desmontes

El tramo estudiado de la carretera Panamericana CA-1 está comprendido entre Santa Tecla y Colón, en la zona conocida como *Los Chorros*, atravesando la Cordillera del Bálsamo.

Desde el punto de vista geológico la carretera en ese tramo se sitúa entre los materiales volcánicos de la Formación Bálsamo, al Sur, y los materiales más jóvenes, de la Formación San Salvador. Morfológicamente, el desfiladero en el que se encaja el río Colón corresponde a una falla de dirección NNW-SSE que afecta a los materiales del Bálsamo y que quedan cubiertos por los piroclastos y epiclastos procedentes del episodio San Salvador, cuyo cono volcánico se sitúa justo al NE del tramo objeto de estudio.

Desde el punto de vista mecánico los materiales del Bálsamo se presentan con peores propiedades resistentes, teniendo además, un mayor número de microfallas y un buzamiento generalizado de los materiales de entre 10° y 30° hacia el NE.

Los materiales de la formación San Salvador se presentan con buzamientos más suaves, menores a 10° en sentido SW. Además, condicionados por la existencia de una

colada andesítica, se presentan más consolidados, a pesar de ser más recientes.

Desde el punto de vista geomecánico se diferenciaron en este estudio tres grandes unidades:

- **Tobas color claro**, pertenecientes a la Formación Bálsamo, en general poco consolidadas y con frecuentes intercalaciones de escorias piroclásticas, sin cohesión, de hasta un metro de espesor.
- **Tobas color café**, pertenecientes a la Formación San Salvador, que habitualmente se presentan consolidadas, salvo al inicio del tramo en Santa Tecla. Estas tobas presentan también niveles piroclásticos, si bien son menos frecuentes.
- **Coladas andesíticas**, pertenecen a la Formación San Salvador, en la que se aprecia un tramo brechoide en la base, que genera almagres en las tobas supra-yacentes; un segundo tramo, más a techo, con estructuras laminares de flujo; y un tercer tramo, superior, más masivo con episodios piroclásticos asociados.

Como se ha puesto de manifiesto en la breve descripción geológica anterior, se pueden diferenciar tres tipos de taludes en función del material geológico en que se sitúan y que, consecuentemente, generan problemáticas de estabilidad bien diferenciadas.

Esta diferenciación permitió establecer una tramificación de acuerdo con los siguientes puntos kilométricos:

- **pk 0+000 al 2+600**: desmontes 1 a 12, en los que predominan los materiales tobáceos del Bálsamo.
- **pk 2+600 al 4+200**: desmontes 13 a 16, en los que afloran las tobas consolidadas de la Formación San Salvador.
- **pk 4+200 al 5+500**: desmontes 17 a 19, en el que predominan los materiales rocosos de la colada andesítica.

En cada uno de estos desmontes se evaluaron las condiciones de estabilidad existentes realizándose un completo inventario de los mismos y un análisis preliminar que determinó el diseño final tras los cálculos tensodeformacionales realizados.

Como se hace habitualmente en ingeniería para cuantificar el nivel de seguridad de un talud, se procede al cálculo del factor de seguridad, que en este caso se obtuvo mediante la técnica de reducción de la resistencia al corte del terreno. Con estos métodos obtiene de forma intrínseca la superficie potencial de deslizamiento, sin tener que hacer hipótesis sobre su extensión o geometría.

De acuerdo con la normativa salvadoreña (*Norma Técnica para el Diseño de Cimentaciones y Estabilidad de Taludes, M.O.P., 1994*), los factores de seguridad fueron calculados tanto frente a fuerzas estáticas como considerando los efectos sísmicos. Los criterios de admisibilidad marcados en dicha norma establecen un factor de seguridad mínimo de 1.4, para cargas estáticas, y de 1.1, en caso de sismo.

Puesto que se dispone de un acelerograma real de 7.8 de magnitud, registrado durante el sismo del 13 de enero de 2001, se optó por introducir dicho acelerograma como condición de contorno en los modelos de cálculo dinámico.

El acelerograma de cálculo se presenta en la **Fig. 2**, y en él se muestra la aceleración horizontal en m/s frente al tiempo en segundos; las máximas aceleraciones horizontal de pico alcanzan valores comprendidos entre 0,15 g y 0,20 g, y la duración del sismo es del orden de 1 minuto.

Para el cálculo de los factores de seguridad mediante modelización numérica se emplearon dos programas, ambos de *Itasca Consulting Group Inc.*, (Minneapolis, Minnesota, USA):

- **FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)** que es adecuado para la simulación de medios continuos tales como suelos y macizos rocosos con más de cuatro familias de discontinuidades.
- **UDEC (Universal Distinct Element Code)** adecuado para la simulación de medios discontinuos como macizos rocosos diaclasados, con menos de cuatro familias de discontinuidades, donde los mecanismos de deformación vienen claramente determinados por las discontinuidades entre bloques de roca.

A modo de ejemplo, a continuación se exponen los cálculos realizados para dos desmontes de tipología claramente diferenciable: el primero de ellos puede asimilarse a un medio continuo, mientras que el segundo caso corresponde a un macizo rocoso diaclasado y se ha analizado con un código apropiado a esta casuística.

Análisis de estabilidad en un medio continuo

Este tipo de simulación se ha empleado en aquellos taludes donde predominaban las tobas volcánicas con niveles intercalados de escorias de la Formación Bálsamo. A modo de ejemplo se exponen a continuación los resultados obtenidos para el talud **T-4D**.

La altura máxima de este desmonte es de

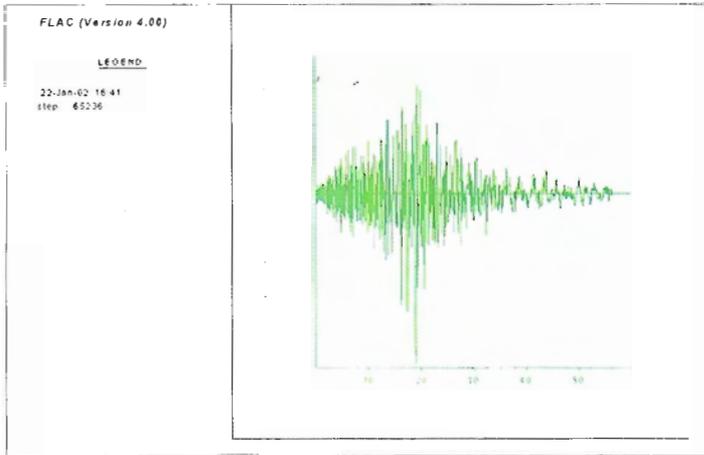


Fig. 2.- Acelerograma del sismo del 13 de enero de 2001, de 7,8 de magnitud, adoptado como acelerograma de diseño.

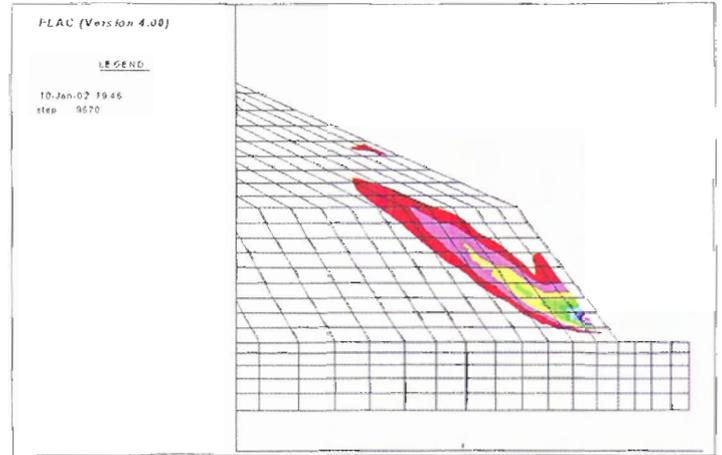


Fig. 3.- Superficie potencial de deslizamiento para el talud T-4D sin refuerzo.

25 m y presenta una inclinación media de 75°. Los materiales afectados son tobas con intercalaciones de pumitas.

Se han observado deslizamientos rotacionales en el talud y en su cabecera, así como formación de regueros y cárcavas a pesar de la cobertura vegetal. En la *Foto 2* se muestra un aspecto de este talud.

Se calculó en primer lugar el factor de seguridad del talud sin ninguna medida de refuerzo, para obtener la superficie potencial de rotura y poder estimar de forma preliminar la longitud mínima de los anclajes.

El factor de seguridad calculado fue de 1,30, y la superficie potencial de deslizamiento obtenida se presenta en la *Fig. 3*.

Con objeto de aumentar la estabilidad del

talud se modelizaron dos esquemas de anclajes que se describen a continuación:

Una fila de anclajes colocada aproximadamente a 1/3 de la coronación del talud; la longitud libre de los anclajes para esta configuración es de 15,5 m.

Dos filas de anclajes, la superior situada a 7 m bajo la coronación del talud, con 17,5 m de longitud libre, y la inferior situada 10,5 m sobre el pie del talud, con 11,5 m de longitud libre.

Se calcularon los factores de seguridad para distintas cargas de anclaje con ambas configuraciones, presentándose los resultados sintetizados en la *Fig. 4*.

En esta figura se representa en abscisas la carga unitaria por metro de talud proporcionada por los anclajes, y en ordenadas el factor de seguridad alcanzado en condiciones estáticas.

A la vista de dicha figura se deduce que proporcionando 50 t/m se alcanza un factor de seguridad estático superior a 1,4. Se ha calculado también el factor de seguridad en

condiciones dinámicas para los dos mismos casos de 1 y 2 filas de anclajes proporcionando 50 ton/m, obteniéndose un valor de 1,11.

Como consecuencia de este análisis sería suficiente proporcionar al talud una carga de 50 t/m para tener un factor de seguridad aceptable. La elección de 1 ó 2 filas de anclajes es un criterio constructivo que dependerá de la capacidad del anclaje para transmitir toda la carga al terreno a través del bulbo de anclaje.

Análisis de estabilidad en un medio discontinuo

Como ejemplo de la comprobación de la estabilidad de los taludes en roca se ha seleccionado un perfil correspondiente al talud T-19, entre los pk 4+800 y 5+140. En este caso la estabilidad venía fundamentalmente determinada por la resistencia al corte



Foto 2.- Aspecto del talud T4-D. P.K. 0+590 al 0+690.

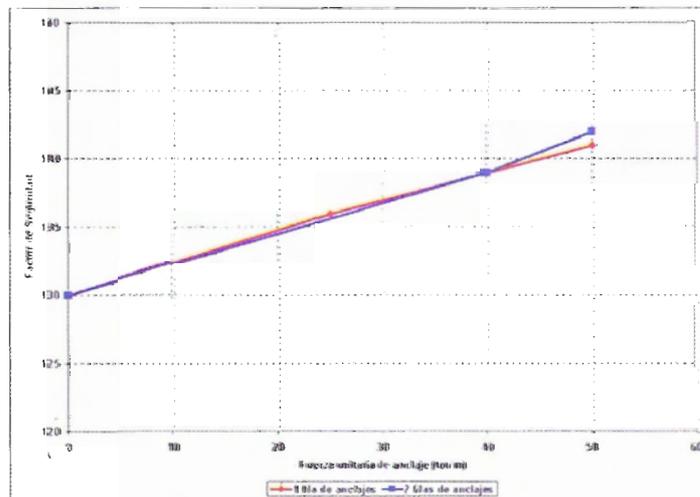


Fig. 4.- Relación Factor de Seguridad vs. fuerza unitaria de anclaje sobre el talud.

de las juntas, por lo que se confeccionó un modelo numérico con el programa *UDEC* en el que se incorporaron explícitamente las familias de juntas existentes, a las que se les asignó un comportamiento elástico-plástico con una ley de *Mohr-Coulomb*.

El desmante está formado por una alternancia de tobas y escorias en la base y una colada andesítica en su parte superior. La altura máxima es de 34 m y su inclinación media de 70°.

Se han observado procesos de vuelco por flexión y vuelco de bloques, así como desprendimientos de bloques de tamaño considerable.

En las *Foto 3, 4 y 5* se muestran diversos aspectos de este talud.

En primer lugar se realizó un análisis preliminar de estabilidad del talud frente a deslizamientos translationales, vuelcos y posible formación de cuñas inestables. Para ello se utilizó como herramienta la proyección

estereográfica y se concluyó que sólo existía riesgo de caídas por vuelco, tal y como se refleja en la *Fig. 5*.

Posteriormente se llevó a la práctica un análisis numérico. En la *Fig 6* se presenta el modelo de cálculo realizado: en ella se aprecian los bloques con los que se simuló el comportamiento de la roca fracturada, mientras que encima y debajo de esta roca se asumió la existencia de material asimilable a un medio continuo, y por lo tanto donde el efecto de las juntas no es tan significativo.

La superficie potencial de deslizamiento calculada se presenta en la *Fig. 7*: en esta figura se observa cómo se independiza un bloque a favor de la familia subparalela a la cara del talud, pero favorecida por la presencia en la base de otra familia de 45° de buzamiento, que descalza los bloques por el pie.

Puesto que el factor de seguridad de 1.25 obtenido no es aceptable, se introdujo en el

modelo un esquema de bulones de acero de 20 mm de diámetro y 6 m de longitud, distribuidos en una malla de 2 m L x 2 m T. En la *Fig. 8* se ilustra este esquema de bulones.

Con este refuerzo, se ha obtenido un factor de seguridad de 2.2 en condiciones estáticas. La situación límite se ilustra en la *Fig. 9*, en la que se observa cómo el deslizamiento potencial se produciría prácticamente de forma simultánea en la cara del talud y en el terreno suprayacente.

Las cargas calculadas sobre los bulones resultaron de 3.7 t/ml.

Conclusiones

El estudio realizado tiene por objeto identificar los riesgos geotécnicos de los taludes existentes en el tramo entre Santa Tecla y Colón de la Carretera Panamericana, en El

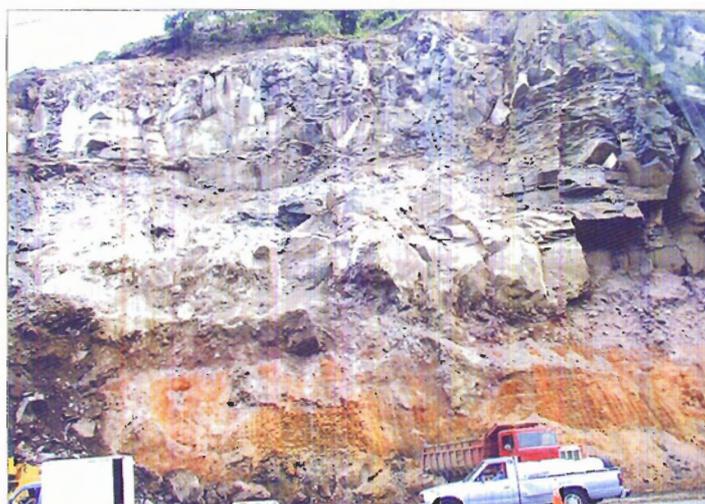


Foto 3.- Aspecto de la colada sobre las tobas.



Foto 4.- panorámica del talud T-19. pk 4+800 al 5+140.



Foto 5.- Saneo de bloques en el talud.

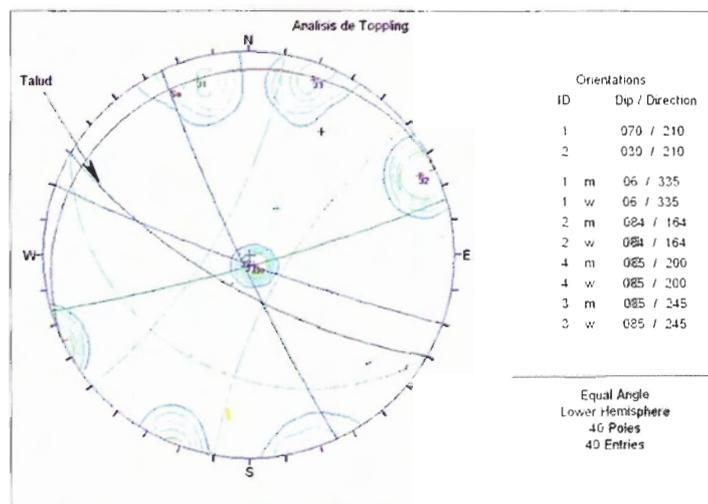


Fig. 5.- Análisis de vuelco del talud T-19.

ESTABILIZACIÓN

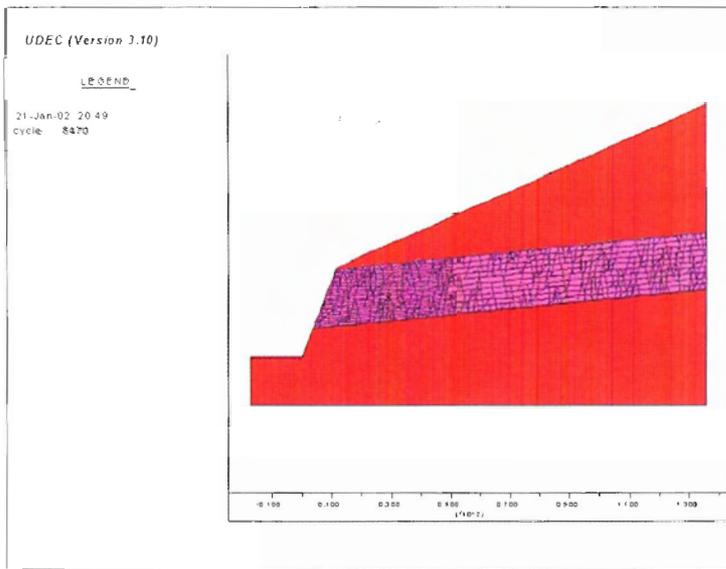


Fig. 6.- Modelo de cálculo UDEC para el talud T-19.

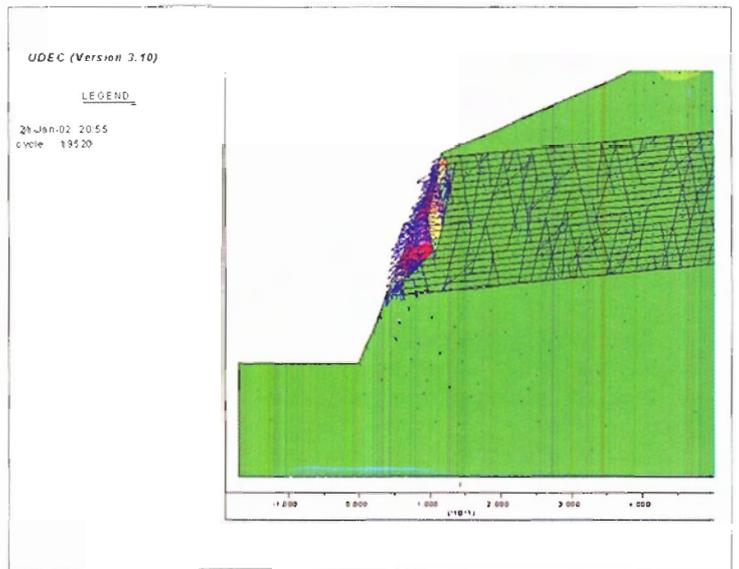


Fig. 7.- Superficie potencial de deslizamiento para el talud T-19.

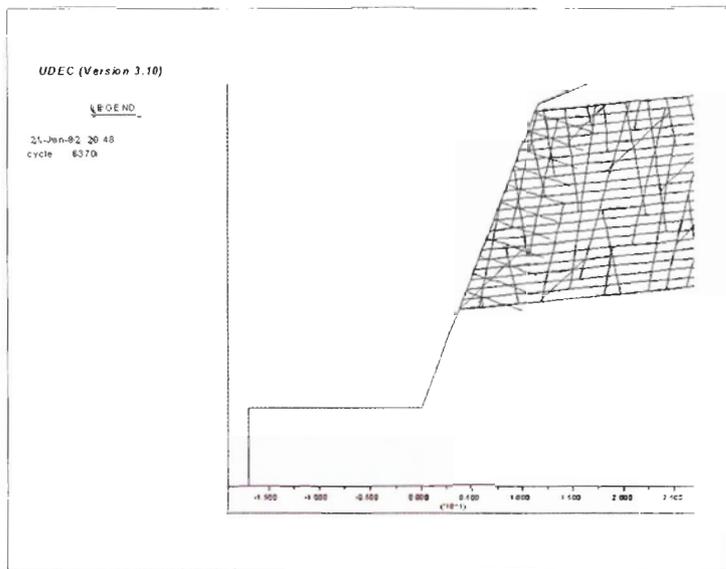


Fig. 8.- Esquema de refuerzo a base de bulonado del talud T-19.

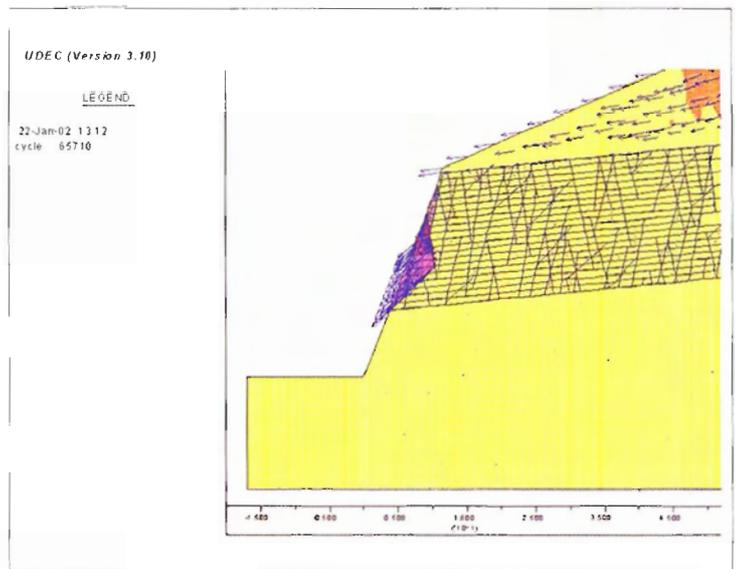


Fig. 9.- Superficie potencial de rotura para el Talud 19 reforzado con bulones de $L= 6$ m espaciados 2 mT x 2 mL.

Salvador y determinar las medidas necesarias que garanticen su seguridad.

En el tiempo transcurrido desde el pasado mes de enero de 2001, el Ministerio de Obras Públicas (MOP) salvadoreño ha actuado en este tramo procediendo al saneo y a la consolidación de los principales puntos de riesgo, terraplenes, drenajes e inclusive ampliación de carriles.

Las actuaciones que se están llevando a cabo se han basado en algunas de las recomendaciones recogidas en un informe preliminar elaborado en marzo del mismo año.

Consideramos que todas estas medidas han tenido su eficacia y han permitido poner de nuevo en servicio la carretera aunque

con circulación alternativa e intermitente de los vehículos.

La situación de cada uno de los taludes existentes no puede considerarse homogénea, lo que implicó la elaboración de un estudio individualizado y su jerarquización en virtud de los riesgos potenciales existentes. Por ello, las diferentes propuestas de actuación que se recogen en el trabajo realizado, se elaboraron teniendo presentes los riesgos, la eficacia y los costes de cada solución.

De esta manera el proyectista podrá evaluar la conveniencia y la oportunidad de cada solución óptima y recomendar al MOP aquello que considere óptimo.

A su vez el MOP, podrá ejecutar dichas medidas de forma global o individualizada, como y cuando lo estime oportuno, al haberse jerarquizado las actuaciones a realizar.