



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de Estabilidad de Taludes en la
3ª Sección del Bosque de Chapultepec.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A:

VELÁZQUEZ ÁNGELES OMAR

DIRECTOR: ING. JAVIER MANCERA ALEJÁNDREZ



Ciudad Universitaria, México D.F., Octubre 2013.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi hermano, por ser mi mayor inspiración.

A mi mamá, por entenderme y ayudarme siempre.

A mi papá, por darme el apoyo que él no pudo tener.

A mis tíos, que nos respaldaron en momentos de necesidad.

A mis primos, por compartir grandes y felices momentos. quiénes conozco y quiénes me conocen desde pequeños.

A mis amigos, que han compartido su tiempo, atenciones y cariño conmigo en los salones de clase y fuera de ellos.

A mis profesores, de quiénes aprendí, no siempre por las buenas, muchas cosas de lo académico y sobre todo, de la vida.

A los ingenieros de mi Facultad, por enseñarme a disfrutar y amar esta importante y distinguida profesión, en especial a Leovigildo Javier Cepeda Dávila (q.e.p.d) quien me mostró que esta es mi vocación.

A la Facultad de Ingeniería y la UNAM, de las que estoy profundamente orgulloso de pertenecer y con las que tengo un deber de por vida.

A mis sinodales, por compartir su tiempo y valiosos conocimientos a fin de contribuir con esta importante etapa de mi vida.

*A quiénes colaboraron en el proyecto de fondo mixto **CONACYT-GDF** del que deriva este trabajo, por trabajar en esta noble y valiosa labor.*

A cualquiera que haya olvidado mencionar en estas breves líneas y merezca mi profundo y humilde agradecimiento.

Por último, y sin afán de sonar ególatra, a mí mismo, por demostrarme que, con trabajo y preparación, puedo conseguir lo que me proponga .



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA 3ª SECCIÓN DEL BOSQUE DE CHAPULTEPEC.

ÍNDICE.	I
RESUMEN (Abstract)	III
1 - INTRODUCCION.	1
1.1 - Antecedentes.	1
1.2 - Planteamiento del problema.	2
1.3 - Objetivo.	2
2 - MARCO FÍSICO.	3
2.1 - Geomorfología.	3
2.2 - Geología Regional.	4
2.2.1 - Cuenca del Valle de México.	4
2.2.2 - Sierra de las Cruces.	7
2.3 - Geología Local.	8
2.3.1 - Cerro de San Miguel.	8
2.3.2 - Formación Tarango.	9
2.4 - Zona de estudio.	11
2.4.1 - Localización de la zona de estudio.	11
2.4.2 - Geomorfología de Chapultepec.	12
2.4.3 - Litología presente.	13
2.4.4 - Estratigrafía de la zona.	13
3 - MARCO TEÓRICO.	15
3.1 - Divisiones geotécnicas del Valle de México.	15
3.2 - Estabilidad de Taludes.	16

Í N D I C E Y R E S U M E N .





3.2.1 - Definiciones y tipos de talud.	17
3.2.2 - Mecanismos de falla más comunes.	17
3.2.3 - Definiciones de las propiedades índices.	22
3.3 - Factores que afectan la estabilidad de un talud.	24
3.4 - Tipos de análisis de estabilidad.	26
4 - GEOTECNIA APLICADA.	28
4.1 - Metodología en campo.	28
4.1.1 - Censo de Taludes.	30
4.1.2 - Jerarquización preliminar.	32
4.1.3 - Levantamiento estructural.	33
4.1.4 - Zonificación Geotécnica.	36
4.1.5 - Clasificación del macizo rocoso con RMR.	46
4.1.6 - Cartografía de rasgos levantados.	53
4.2 - Pruebas de campo y laboratorio.	54
4.2.1 - Resistencia a la compresión simple.	56
4.2.2 - Características de la matriz rocosa para calcular la estabilidad.	60
4.3 Análisis de estabilidad de taludes.	65
5 - ANÁLISIS DE RESULTADOS.	68
5.1 - Mecanismos de falla encontrados.	81
5.2 - Volúmenes de roca susceptibles a deslizar.	83
6 - CONCLUSIONES.	86
7 - BIBLIOGRAFÍA.	92





Resumen.

Gracias a un proyecto de fondo mixto CONACYT-GDF, la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de la Facultad de Ingeniería, realiza estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos en el Bosque de Chapultepec. El estudio de las condiciones presentes en la zona poniente de la Ciudad de México es importante para un buen análisis de estabilidad, tanto de los colapsos del terreno en la 2ª sección del Bosque causados por minas antiguas mal rellenadas, como en los taludes de la 3ª sección.

Este trabajo se enfoca en el análisis de estabilidad de los taludes presentes en la 3ª sección del Bosque de Chapultepec, que geomorfológicamente se encuentra en la falda centro-oriental de la Sierra de las Cruces, donde los depósitos que afloran en la zona de estudio son principalmente tobas cristalovítreas de composición ácida, las cuales pertenecen a las capas superiores de la formación Tarango que fueron excavadas a fin de hacer calles para el tránsito de vehículos y peatones por la zona.

Además de la labor de campo, se hicieron pruebas de laboratorio de muestras inalteradas, principalmente de compresión simple, que sirven, entre otras cosas, para realizar una zonificación geotécnica de las capas por el método RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1989), ambos procesos se describen con detalle. Y también se describe de manera general la teoría para los análisis de estabilidad realizados.

Con los marcos físico y teórico establecidos, se hicieron los análisis de estabilidad de los taludes más representativos de la 3ª sección, con la ayuda de dos paquetes de cómputo, pues se hicieron dos consideraciones: la primera, que todo el talud se comporta como roca; y la segunda, que todo el talud se comporta como suelo, esto porque el valor de la resistencia mecánica de las Unidades geotécnicas está en el rango entre roca y suelo. Los resultados se expresan numérica y gráficamente, y se discuten las razones que llevaron a los resultados obtenidos, así como su validez.

En los análisis no se descarta la formación de bloques delimitados por fracturas planas, pues aunque el tipo de litología hace que el fracturamiento sea escaso, los taludes de la zona de estudio presentan discontinuidades bien delimitadas que, aunque no sean continuas, condicionan la estabilidad de bloques típicos en taludes que se comportan como macizos rocosos.

En el caso particular del segundo análisis, que parece ser el más representativo del comportamiento general de las Unidades geotécnicas de los taludes, se supuso además una saturación de las unidades, esto por el tipo de depósitos que son poco consolidados y de granulometría generalmente de arenas con algo de gravas que seguramente tienen una permeabilidad considerable.

Se estableció el grado de estabilidad de los taludes y las condiciones que comprometen este estado. Por último se hacen sugerencias sobre las medidas a llevar a cabo para detener los agentes desestabilizadores y para favorecer los factores que mantienen este delicado equilibrio.





Abstract.

Thanks to a CONACYT-GDF (Science and Technology National Committee-Mexico City Government) mix-found project, the UNAM (Autonomous National University of Mexico) through his *Facultad de Ingeniería* (Engineering College), made geological, geophysics and geotechnical studies in the Chapultepec Forest. Is important the study of the actual conditions in the west side of Mexico City for a good stability analysis, for the ground collapses in the 2nd section of the Forest caused for the poorly-refilled old mines and de slopes in the 3rd section.

This work focus in the slope stability analysis in the 3rd section on the Chapultepec Forest, which geomorphologically locates in the mid-east hillside of the *Sierra de las Cruces* (Las Cruces Range), where the outcrop layers in the study zone are acid-composed cristalo-vitreous tuffs, which belong to the top-layers of the Tarango formation, excavated for the construction of paths for vehicles and pedestrians by the zone.

Besides the field work, were done unaltered samples laboratory tests, mainly simple compression to, among other issues, do a geotechnical zoning done with the Bieniawski RMR (Rock Mass Rating) method (1989), both processes are described in detail. Also is described the basic theory of stability analyses.

With the physical and theory framework established, were made the stability analysis for the 3rd section most representatives slopes, aided by two different software, because were made two suppositions: first, all the slope behaves like rock; and second, all the slope behaves like soil, because the mechanic strength values of the Geotechnical Unities is in the rank between rock and soil. The results is expressed numerical and graphically and is discussed his reasons and validity.

In the analyses there's not discarded the rock block formation delimited by flat joins, because although the type of lithology characterize by low-grade joining, the study zone slopes have well-defined discontinuities which, although haven't continuity, condition the stability of typical blocks in rock-mass-like slopes.

In the particular case of second analysis, than looks like the most representative of the Geotechnical Unities general behavior of the slope, was made also a saturation supposition of the Unities, this because the type of deposits are poorly consolidated and has a general grain-size of sands with some gravel than surely has good permeability.

Was established the slopes stability grade and the conditions than affect that state. Finally have done suggestions about the actions to do to stop the destabilizing agents and favor the factors that maintain this delicate balance.

Í N D I C E . Y R E S U M E N .





ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN EL BOSQUE DE CHAPULTEPEC 3ª SECCIÓN.

1 - INTRODUCCIÓN.

1.1 - Antecedentes.

A mediados de siglo XX, los materiales presentes en el piedemonte de las lomas de la zona poniente de la Ciudad de México han sido explotados para fines de construcción. Esta explotación no fue sistemática lo cual originó una serie de minas, algunas subterráneas, que quedaron abandonadas y sobre las cuales actualmente se ha asentado parte de la mancha urbana de la ciudad, principalmente casas e importantes obras de infraestructura.

En la zona poniente, además de la sismicidad regional del centro y sur del país, el sistema de fallas locales induce un factor adicional al peligro sísmico de la zona. Si bien es cierto que los sismos de subducción afectan al centro del país, en menor proporción se cuentan con estudios del movimiento sísmico esperado por fallas superficiales. El Servicio Sismológico Nacional (SSN) ya ha reportado sismos locales en la zona poniente, sin embargo aún no se cuentan con un monitoreo y estudio a fondo sobre el origen de estas fallas.

Por otro lado, la morfología de la zona poniente es complicada, por ello, la presencia de taludes y minas no caracterizadas, incrementa el nivel de riesgo geológico. Desde 1993 a la fecha, la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Delegación Álvaro Obregón (DAO) del Gobierno del Distrito Federal (GDF) han realizado convenios de colaboración para estudiar el problema asociado a taludes y minas en la Delegación. Así pues, la Facultad de Ingeniería de la UNAM a través de su Departamento de Geología ha realizado desde hace años una gran variedad de estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos para llevar a cabo una interpretación integral de los resultados. El proyecto en turno es de Fondo Mixto CONACYT-GDF, clave de registro 121119, número de Convocatoria: M0031-2009-01, denominado *“Estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos para caracterizar y determinar la presencia de*





inestabilidades en el subsuelo en los taludes de la 3a. Sección del Bosque de Chapultepec", del cual deriva este trabajo.

1.2 - Planteamiento del problema.

En la 3ª sección del Bosque de Chapultepec el relieve es característico de la zona de Lomas acorde a la zonificación geotécnica de la Ciudad de México, de la que se hablará más adelante, es pues una zona donde la topografía no es regular y se requieren vías de comunicación, muchas veces los cortes hechos con maquinaria son los que quedarán por el resto de la vida útil de la obra, y el problema radica que en el momento de realizarlos no se tiene la visión a futuro de lo que pueda ocasionar una posible inestabilidad en los cortes expuestos, comprometiendo la seguridad de quienes transitan por la zona.

Por ello, estabilizar los cortes realizados para la construcción de las vialidades, que de ahora en adelante se denominará talud, es de suma importancia para garantizar la seguridad de conductores y peatones que transitan por esa zona, ya sea los miles de personas que viven en los alrededores o los millones de paseantes que cada año visitan las tres secciones del Bosque de Chapultepec como el sitio de interés y esparcimiento público más grande de la Ciudad de México.

1.3 - Objetivo.

Establecer la metodología del trabajo de campo y de los procedimientos realizados en laboratorio y así usar los parámetros obtenidos para analizar la estabilidad de los taludes más representativos por medio de métodos de análisis de equilibrio límite, apoyado por paquetes de cómputo especializado.





2 - MARCO FÍSICO.

Inicialmente se describe la geomorfología y geología general de la zona centro de México, posteriormente se presenta la Geología Local, en donde se describen las características principales de la Sierra de las Cruces ubicada al poniente del Valle de México. Finalmente se habla de la geología del bosque de Chapultepec, poniendo énfasis en la zona de los taludes estudiados en este trabajo.

2.1 - Geomorfología.

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es considerada un arco volcánico continental, con una edad del Mioceno al Reciente (diversos autores; en García-Palomo *et al.* 2008). Su longitud es de unos 1000 km y su ancho varía de 50 a 250 km. El relieve de la FVTM consiste en una serie de elevaciones montañosas y planicies escalonadas que se extienden desde las costas del Pacífico en el estado de Nayarit, hasta las costas del Golfo de México en el estado de Veracruz. El origen de la FVTM está relacionado con la subducción de la placa de Cocos y la de Rivera debajo de la placa de Norteamérica. Entre las cuencas de Puebla y México están alineados, de sur a norte, los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Telapón y Tláloc y entre las cuencas de México y Toluca está la Sierra de Las Cruces.

La Sierra de Las Cruces es un conjunto montañoso, con una elevación que llega a los 3,800 metros sobre el nivel del mar (msnm) y constituye el límite entre las dos cuencas de mayor altitud dentro de la FVTM, la Cuenca de México (2,240 msnm) y la de Toluca (2,400 msnm). Tiene dos unidades geomorfológicas mayores: el relieve de montaña y el de piedemonte. El primero lo conforman terrenos rocosos que se localizan a partir de los 2,950 msnm. La segunda unidad, el piedemonte es diferente en cada uno de sus flancos, el piedemonte del lado del Valle de México posee 17 km de longitud en un desnivel de 560 metros, mientras que en la vertiente opuesta (Toluca), su longitud es de 6 km y su diferencia de cotas es de 350 metros.

Hacia el norte, la cuenca se abre formando una llanura con una altura promedio de 2,200 msnm, ocupada en parte por el actual Lago de Texcoco. Hacia el sur, la topografía está caracterizada por una extensión cubierta por derrames de lava



sobrepuestos, con numerosos aparatos volcánicos jóvenes, menos de un millón de años. En esta zona destacan los cerros Chichinautzin (3,490 msnm) y el del Ajusco (3,937 msnm). Hacia el oriente, se encuentra el parteaguas formado por la Sierra Nevada y su prolongación hacia el norte, donde destaca la Sierra de Río Frío. Los picos más elevados de la Sierra Nevada son el Popocatepetl (5,450 msnm) y el Iztaccíhuatl (5,286 msnm) (García-Palomo, *et al*, 2008).

2.2 - Geología Regional.

Se explica en términos generales la geología básica de la Cuenca del Valle de México que sirve de marco regional y referencia para entender mejor el entorno y comportamiento geomecánico y geotécnico de las unidades que predominan en la cuenca y también en la Sierra de las Cruces.

2.2.1 - Cuenca del Valle de México.

La Cuenca del Valle de México se ubica entre los paralelos 19°10' y 20°15' norte y los meridianos 98° 15' y 99° 30' oeste, posee una extensión de 9,600 km², e incluye parte del Estado de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla.

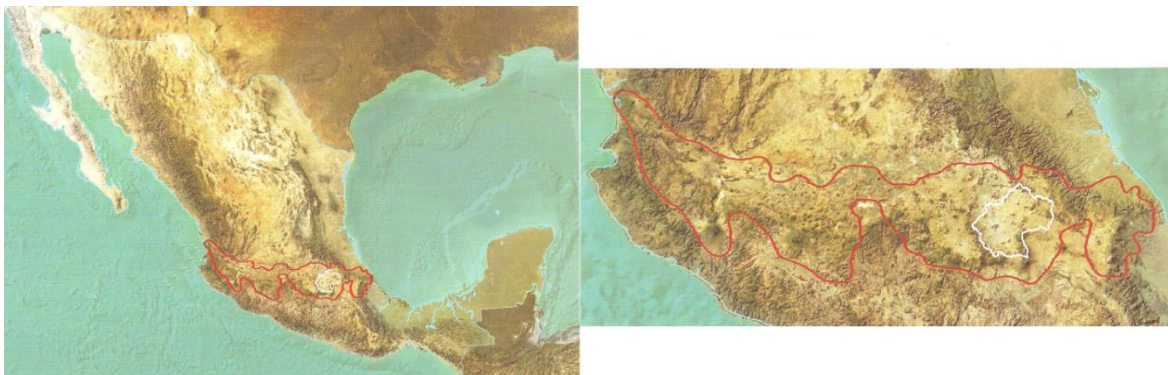


Fig. 1. Ubicación de la FVTM y de la Cuenca del Valle de México en ella (Santoyo *et al*. 2005).

Es una cuenca endorreica lacustre, que pertenece a la FVTM (figura 1) y está delimitada por varias sierras montañosas: Al norte, las Sierras de Tezontlalpan y Pachuca; al sur la Sierra Ajusco-Chichinautzin; al este las Sierras Nevada, Río Frío y Calculalpan; y al oeste se ubican las Sierras de Monte Alto y Monte Bajo y las Cruces. En su parte central se ubica la Sierra de Guadalupe, y en su porción sur está la Sierra de Santa Catarina ambas con dirección aproximada este-oeste, lo anterior

se puede observar en la figura 2. Estas condiciones favorecieron la formación de los lagos de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac.

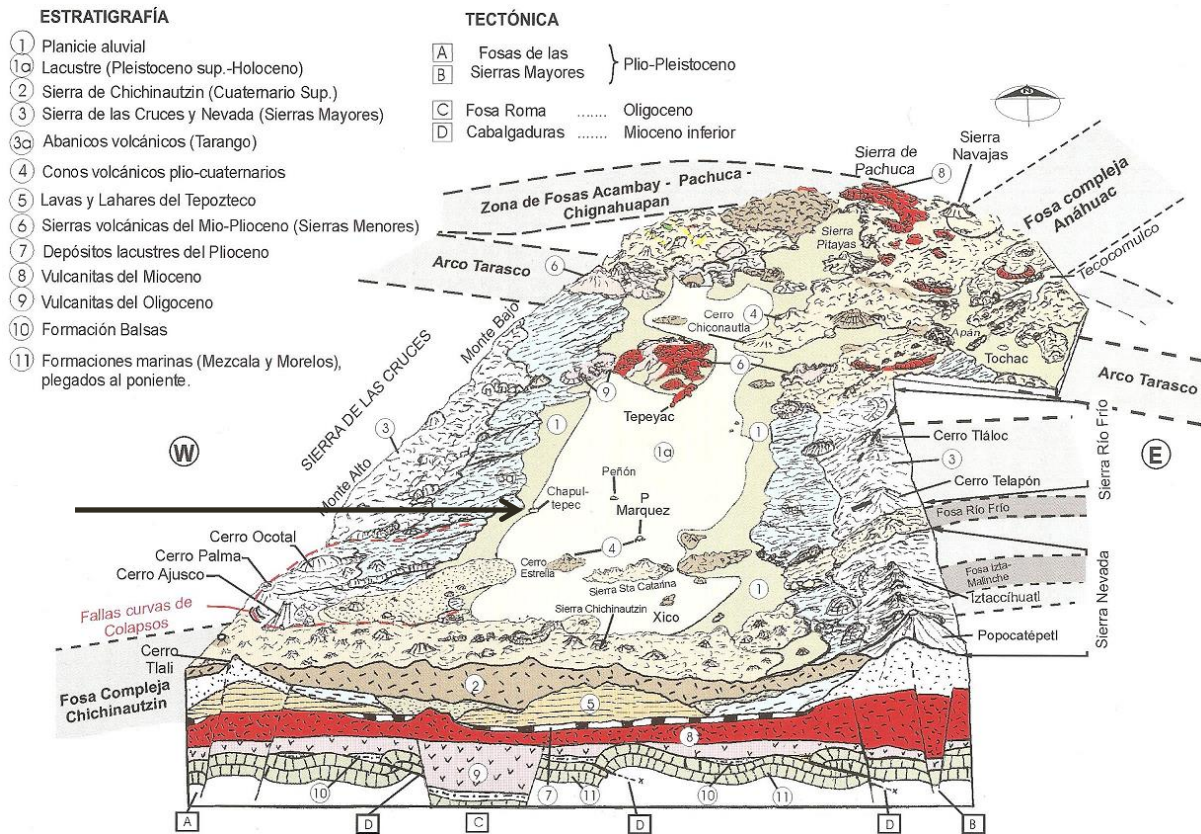


Fig. 2. Rasgos morfológicos, geológicos y tectónicos más importantes de la Cuenca de México, se señala Chapultepec. Algunos términos del autor están en desuso. (Santoyo *et al.* 2005).

La secuencia estratigráfica general de la Cuenca de México (Santoyo *et al.* 2005) consiste, de lo más reciente a lo más antiguo, en depósitos aluviales, fluviales y lacustres del Paleógeno-Neógeno y del Reciente, así como depósitos volcánicos correspondientes a las Sierras mayores y menores que rodean el valle, además de lavas y lahares del Tepozteco, vulcanitas del Mioceno-Oligoceno que en conjunto con la Formación Balsas, cubren discordantemente a las Formaciones Mezcala y Morelos, que son depósitos calcáreo-arcillosos y calcáreos del Cretácico.

En el Mioceno Inferior y Medio (20 - 12 Ma), hubo actividad tectónica, que dio lugar a un sistema estructural de fallas y fracturas NNW-SSE, generado por los esfuerzos compresivos de la placa de Cocos contra la placa Norteamericana (Aguayo y Marín, 1989). Posteriormente en el Mioceno Superior (12 - 5 Ma) hubo

actividad volcánica que generó desde andesitas y riolacitas hasta andesitas básicas y dacitas, lo cual formó las Sierras de Guadalupe, Tepetzotlán y Tepozán. Esta secuencia volcánica, se denomina “Grupo de las Sierras Menores”.

En el Plioceno (5 - 2.5 Ma) existió una nueva reactivación tectónica, que formó sistemas de fallas y fracturas conjugados con direcciones NW - SE y NE - SW, los cuales formaron horst y grabens (Aguayo y Marín, 1989). La actividad volcánica se manifestó en toda la Cuenca con la emisión de andesitas y dacitas porfídicas en las Sierras Nevada y Río Frío, al este, así como en la Sierra de las Cruces y Zempoala, al oeste. A lo anterior se les conoce como el “Grupo de Sierras Mayores”.

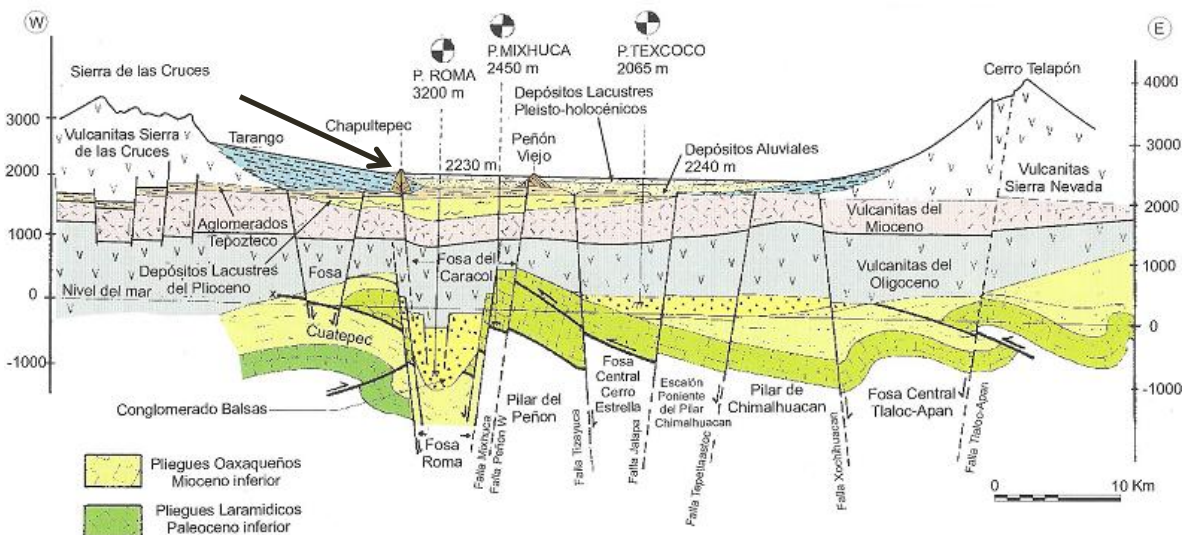


Fig. 3. Sección general de la Cuenca de México Este-Oeste, se señala la zona de estudio. La imagen del autor incluye términos en desuso. (Santoyo *et al.* 2005)

En el Reciente, los derrames basálticos fueron abundantes, dando lugar a la acumulación de más de 1,000 km³ de rocas volcánicas que constituyen la Sierra del Chichinautzin. Posteriormente, el valle se cerró entre el Popocatepetl (este), y la Sierra de Zempoala (sur) y las cabeceras del sistema hidrográfico al norte; por esta causa la Cuenca de México se azolvó de manera muy rápida debido al aporte considerable de acarros fluviales que posteriormente fueron sepultados por las lavas del Ajusco. Hacia el centro de la cuenca los sedimentos limo-arenosos se interstratificaron con cenizas volcánicas y pómez de la Sierra Ajusco-Chichinautzin.



En las últimas glaciaciones y etapas de deshielo, el nivel del lago tuvo muchas variaciones, lo cual quedó registrado en la zona de San Juan de Aragón, ahí el espesor de arcilla lacustre es de 90 metros y se acuña hacia el oeste, al igual que en la zona de las Lomas de Chapultepec. El espesor de la arcilla lacustre varía desde unos cuantos centímetros en el perímetro de la Cuenca hasta 100 a 200 metros en zonas del lago de Xochimilco, en Chalco y en el de Texcoco.

2.2.2 - Sierra de las Cruces (SC).

La SC se ubica entre las coordenadas 18°59' a 19°43' latitud norte y 99°00' a 99°40' longitud Oeste, forma el parteaguas entre las cuencas de Toluca de México. Su longitud es de 110 km y su ancho varía de 47 km (norte) a 27 km (sur). Se formó por la emisión de derrames de lava, extrusión de domos, emplazamiento de flujos piroclásticos, flujos de detritos y lodo, así como depósitos de avalanchas de escombros, bloques y cenizas llamados lahares (García-Palomo *et al.*, 2008).

Diversos autores consideran que la formación de la sierra inicia en el Plioceno Superior como consecuencia de tres episodios volcánicos, el último de los cuales, estuvo activo hasta el Holoceno. Acerca de la edad, se han realizado estudios radiométricos y paleomagnéticos en la SC, que han establecido una edad que varía entre 3.71 ± 0.40 Ma y 0.39 ± 0.16 Ma (Mooser *et al.*, 1974 en García Palomo *et al.* 2008). Aunque algunas edades radiométricas definen edades del Mioceno, la actividad volcánica principal ocurrió durante el Plioceno Superior - Pleistoceno.

Estructuralmente, la SC se caracteriza por tener tres sistemas de fallas que son N-S, NE-SW y E-W. El sistema N-S es el más antiguo y ha sido reactivado en diferentes periodos, esto se basa en el hecho de que las fallas cortan a flujos de bloques y cenizas con edades de 600.000, 430.000, y 270.000 años. El segundo sistema de fallas es el NE-SW, se trata de estructuras reactivadas que dieron origen a fallas laterales izquierdas durante el Mioceno Superior en la región de Apán, Hidalgo, y posteriormente originó fallas normales durante el Pleistoceno. El tercer sistema está regionalmente asociado a la zona de fallas de Acambay-Morelia (García-Palomo, *et al.* 2008). Esta zona de fallas se caracteriza por la presencia de





grabens delimitados por horst, los cuales son conocidos como las fosas de Chapala, Cuitzeo, Acambay, Barrientos, Tláhuac- Tulyehualco y Aljibes.

2.3 - Geología Local.

Para enmarcar la geología de la zona de interés, se habla acerca del Cerro San Miguel, el más cercano a la zona de estudio y a continuación se describe la formación Tarango. También se explican las generalidades de los estudios estratigráficos, así como generalidades de la parte geológica y lo realizado en el proyecto que es necesario como antecedente para abordar el capítulo siguiente.

2.3.1 - Cerro San Miguel.

La geología en la Zona Poniente del Distrito Federal está representada por los eventos volcánicos esta estructura. Resaltan fallas curvas de gran longitud que surcan a las lomas del Poniente de la Ciudad (Santoyo *et al.* 2005), estas corresponden a un gran arreglo del mismo origen, lo cual se comprobó cuando al establecer que las fallas del sureste del cráter del cerro San Miguel son la continuación de las del Cerro La Palma y juntas representan colapsos de antiguas calderas. Este volcán emitió flujos piroclásticos conocidos como toba Cuquita (aproximadamente 600,000 años de antigüedad), Xolopo (430,000 años) y Arenas Azules (270,000 años) relacionados con el sistema de estructuras N–S de la SC.

Es posible reconocer las trazas de estas estructuras vulcanotectónicas cuasi-elipsoidales (figura 4), de estas el mayor producto es el Ajusco. La estructura circular denominada Ajusco – Cuajimalpa – Tacubaya, tiene una influencia morfológica sumamente notoria y genera hundimientos de unos 20 metros al sur de la carretera México-Toluca aproximadamente por el kilómetro 16. Las estructuras menores concéntricas de los colapsos conforman elipses menores. A grandes rasgos se considera a la barranca de Magdalena Contreras como el núcleo de todos los colapsos. Destaca la relativa juventud de estos colapsos, pues todos son posteriores a los desplazamientos del arco Chichinautzin, cuyas fallas principales, (Santa Catarina y Padierna), cortan solamente al elemento más antiguo del Cerro San Miguel situado al sur de la delegación Magdalena Contreras.



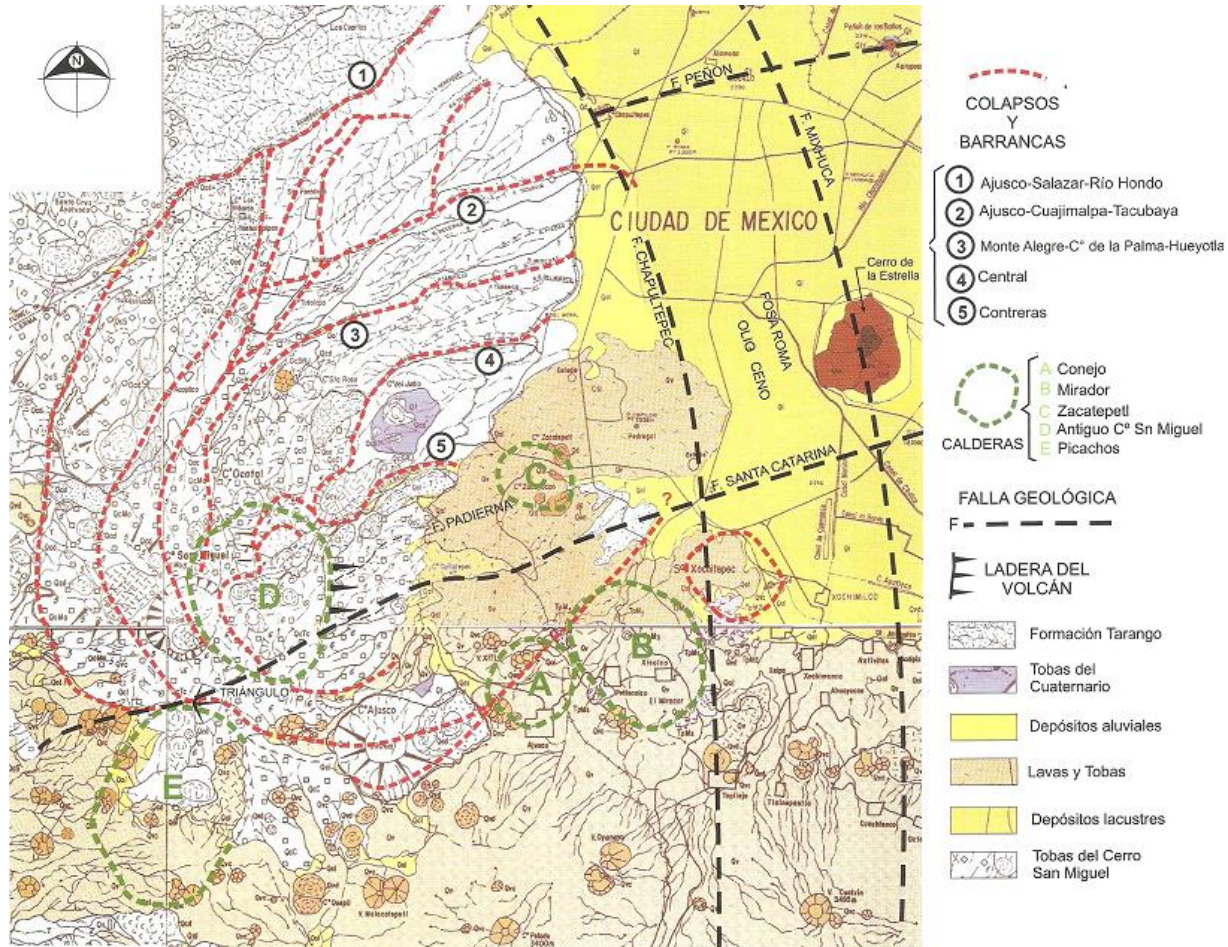


Fig. 4. Colapsos, barrancas y calderas del Cerro de San Miguel. Chapultepec se localiza cerca la intersección de las Falla Chapultepec y Falla Peñón (Santoyo *et al.* 2005).

2.3.2 - Formación Tarango.

Bryan en 1948 le llamó así, de manera informal, a los depósitos volcánicos expuestos a unos 4 km. al sureste del pueblo de Mixcoac, Distrito Federal, ya que no cumple con las condiciones referentes a la definición de sus límites inferior y superior. El espesor de la formación varía conforme a su posición respecto a la sierra más cercana, en algunas partes se aprecian espesores de hasta 400 metros. Se reconoce esta formación en los alrededores de Mixcoac, D.F., en la región de Tula - Ixmiquilpan y al norte del Valle del Mezquital, Hidalgo; así como en el área del Tajo de Nochistongo, Estado de México (Juárez-Arriaga y López-Palomino, 2009).

En las faldas de las sierras que circundan a la Cuenca de México se depositaron abanicos aluviales y lahares, intercalados con capas de pómez, ceniza,

suelo, grava y arena de origen fluvial, a todo este complejo volcano-sedimentario, se le conoce como formación Tarango (Juárez-Arriaga y López-Palomino, 2009), está cubierta por el Grupo Chichinautzin en la porción suroeste de la Ciudad de México, que comprende derrames del Xitle en la zona del Pedregal de San Ángel.

	ESPESOR PROMEDIO [m]	SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
T A R A N G O S U P E R I O R	VARIABLE	S-To	Suelos Tototzingo, color oscuro con alto contenido de materia orgánica
	VARIABLE	S-Ta	Suelos Tacubaya, color pardo claro con bandas de Caliche.
	0.50	Ap-G-Ar	Arena Pumítica de grano grueso muy arcillosa e intemperizada.
	VARIABLE	S-Ta	Estos suelos son residuales de Tobas arco-arcillosas.
	2.50 - 10.00	Lh	Lahares compuestos por aglomerados bien compactados de dastos andesíticos principalmente, subredondeados a subangulosos, emplazados en una matriz muy escasa, sin embargo en las inmediaciones de los aparatos volcánicos estos depósitos presentan una matriz arenosa, su color es gris oscuro mal clasificado, presentando arena gruesa, boleos y bloques.
	10.00	Ag-D	Aglomerados de dastos generalmente subangulosos de composición dacítica, emplazados en una matriz arno-limosa de la misma composición.
	0.70	A+D	Toba arco-limosa color pardo oscuro, compacta con dastos dacíticos.
	1.50	Ap-G	Arena Pumítica de grano grueso color pardo claro muy disgregable de compactidad baja y solo en su base presenta matriz arcillosa.
	1.50	Ar-P	Toba arco-limosa color pardo oscuro, bien compacta con dastos pumíticos y fósiles.
	2.50	Ap-M	Arena Pumítica de grano medio bien clasificada y disgregable con lineaciones de arcilla, sin matriz y un espesor muy constante. <u>Horizonte Explotable.</u>
T A R A N G O I N F E R I O R	1.50	TU	Tobs arno-limosa mal clasificada color pardo claro, compacta con dastos de punitas.
	1.30	Ap-Ar	Arena Pumítica ligeramente compacta con matriz arcillosa, regularmente clasificada de grano medio y grueso.
	15.00	To	Toba arco-limosa mal clasificada con dastos de Andesitas, punitas, dacitas, la composición de la matriz es ácida, color rosáceo (arenas rosas).
I N F E R I O R	1.00	Ap-inf	Arena pumítica mal clasificada, contaminada de arcilla con intercalaciones de tobas rosadas.
	20.00	Ag-V	Aglomerados volcánicos mal clasificados con dastos subangulosos y subredondeados de composición volcánica variable y bien compactados.

Fig. 5. Columna estratigráfica de la formación Tarango en la Ciudad de México (FI-UNAM, 2011)

Como las capas inferiores de la Formación Tarango sobreyacen y, en algunas partes, están intercalados con los derrames de la secuencia volcánica de la Sierra de las Cruces, se le asigna una edad del Plioceno Superior. Además la ceniza de esta formación están en contacto con las primeras emisiones volcánicas de la Sierra de Chichinautzin, por tanto, la secuencia superior de la Tarango es del Plioceno-Pleistoceno. Los depósitos sobreyacen discordantemente a rocas carbonatadas del Cretácico, y también a rocas volcánicas del Paleógeno-Neógeno. (Cervantes-Medel y

Armienta, 2004). La columna estratigráfica varía según la zona donde se estudie, para el caso de la Ciudad de México, se puede sintetizar en la figura 5.

2.4 - Zona de estudio.

La zona de estudio se localiza en la parte sur poniente del Valle de México, justo en la zona de Lomas de Chapultepec, aquí están los depósitos más recientes de la Cuenca del Valle de México del poniente, entre ellos, la formación Tarango.

2.4.1 - Localización de la zona de estudio.

Al sur poniente del Valle de México, se encuentra el Bosque de Chapultepec, sus coordenadas geográficas son latitud $19^{\circ} 25'$ norte y longitud $99^{\circ} 14'$ Oeste, la zona de taludes se encuentra en la Tercera Sección del Bosque (figura 6), que se localiza en la parte poniente del bosque, al oeste del panteón de Dolores, al sur de Lomas de Chapultepec y al norte de Avenida Constituyentes.

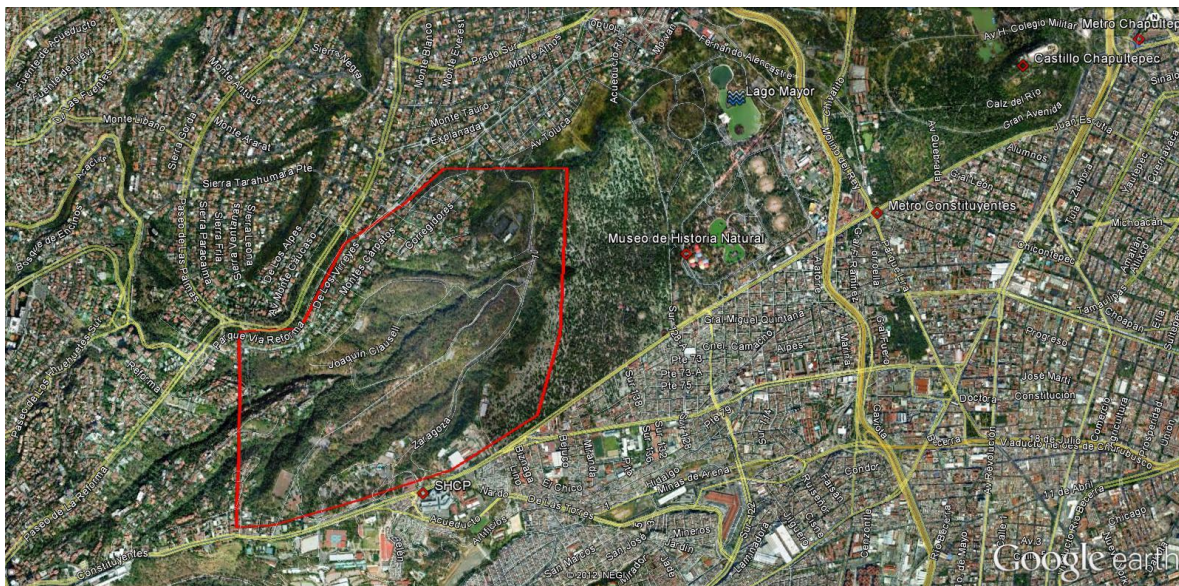


Fig. 6. Ubicación de la zona de taludes (en rojo) en la 3ª sección del Bosque de Chapultepec.

Desde el poniente de la Ciudad de México, la manera más fácil de llegar es incorporarse al Anillo Periférico Poniente (Boulevard Manuel Ávila Camacho) tomarla hasta llegar a Avenida Constituyentes e incorporarse en dirección poniente, posteriormente dar vuelta al norte hacia Virreyes por la calle Zaragoza (la incorporación está justo pasando el Rancho del Charro, a la altura del CECyT N°4), y

se da vuelta al poniente para incorporarse a los circuitos de los taludes, ya sea la calle José María Velazco en la parte sur de taludes o Joaquín Claussell en la norte.

2.4.2 - Geomorfología de Chapultepec.

En general, la zona del Bosque de Chapultepec se encuentra en la transición entre la parte de lomas y la zona llana, pero siendo más específicos, la zona en cuestión pertenece a una zona de escarpes, pues aunque parezca que la 1ª y la 2ª sección pertenecen a una zona plana por su topografía uniforme, en realidad son escarpes, esto es porque estas secciones del Bosque fueron en algún tiempo minas donde se explotaba material para construcción y hace algunas décadas esta zona fue rellenada y se le dio un relieve plano, lo que le hace parecer un terreno llano, pero esta característica es artificial. La 3ª Sección del Bosque presenta características particulares de un piedemonte joven: laderas escarpadas con poca acción erosiva, abundante vegetación y escasa presencia de depósitos aluviales en sus escarpes, que es congruente con lo reciente de los flujos vulcano-sedimentarios.

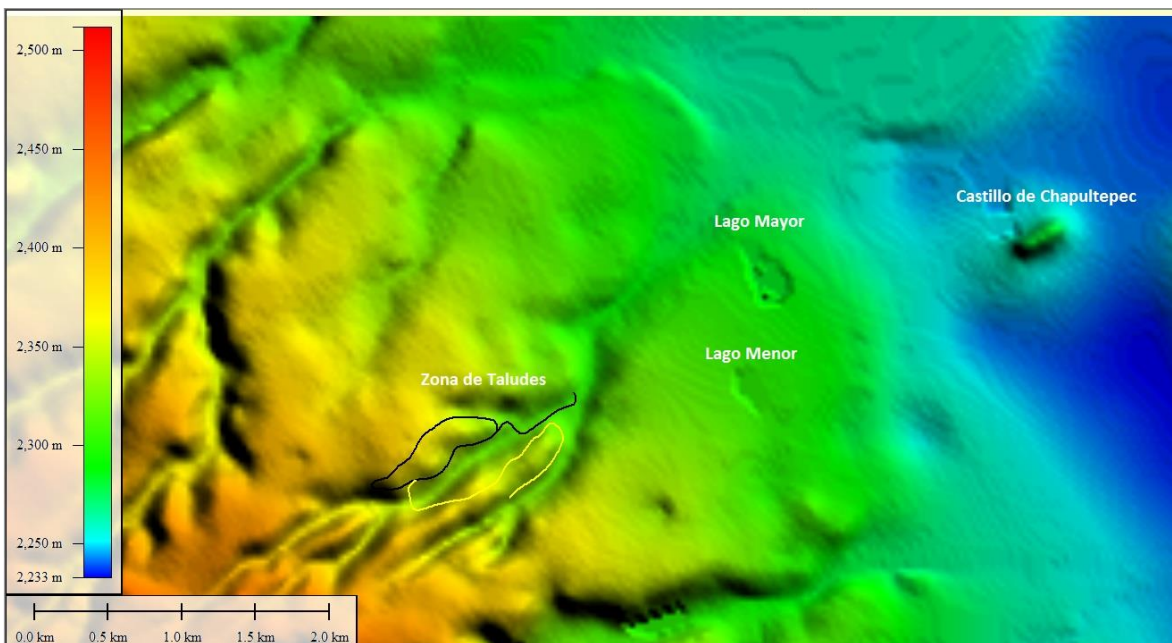


Fig. 7. Imagen hipsométrica de la Zona de Chapultepec.

En el relieve de la zona, es evidente la cañada oriental de la Sierra de las Cruces que en esta parte se conocen como las colonias de Lomas de Chapultepec. En la imagen hipsométrica también se aprecia el punto donde se encuentra el



Castillo de Chapultepec que es un pequeño peñón que sobresale de la zona topográficamente plana que en la figura 7 se distingue de tonos azules. Además se aprecian otros rasgos de la actividad antrópica, específicamente los Lagos Mayor y Menor, que son cuerpos de agua creados artificialmente, lo cual fue posterior al ya mencionado relleno de la antigua zona de minas.

2.4.3 Litología presente.

En la 3ª Sección del Bosque de Chapultepec, se presentan afloramientos donde la mayor parte son depósitos piroclásticos poco litificados, es decir, son rocas vulcano-sedimentarias, aunque, como se verá más adelante, su comportamiento mecánico no es totalmente el de una roca. La mayor parte de estos depósitos corresponden a tobas vítreo-cristalinas o cristalovítreas y algunas que contiene un pequeño porcentaje de fragmentos de roca volcánica, el cual no rebasa el 10%.

Su composición química es generalmente ácida, algunas intermedias, y presenta algunos fragmentos líticos de composición básica, su composición ácida es principalmente riolítica y en algunos casos dacítica. La composición se vuelve ligeramente básica con la presencia de fragmentos líticos basálticos, los cuales a menudo están oxidados. Los depósitos son frecuentemente de color pardo rojizo debido a la composición ácida o a la presencia de óxidos Fe y Mg.

2.4.4 - Estratigrafía de la zona.

La distribución de capas, bloques y fragmentos de tobas en la zona de taludes es casi total, es difícil encontrar otro tipo de roca en la estratigrafía local. Para facilitar el entendimiento de la distribución de los depósitos en la zona, los criterios principales son la granulometría y composición específica de las tobas, este es un análisis muy escueto en comparación con el detalle del informe técnico inédito del proyecto (FI-UNAM, 2011). Entre la granulometría predominante en los depósitos que conforman las tobas encontramos arenas pumicíticas, principalmente de granulometría gruesa a media, las cuales conforman la matriz de las capas y en pocos depósitos, las tobas presentan clastos del tamaño de gravas y alcanzar los 30 cm de diámetro. La escasa litificación hace muy difícil la presencia de cementante.



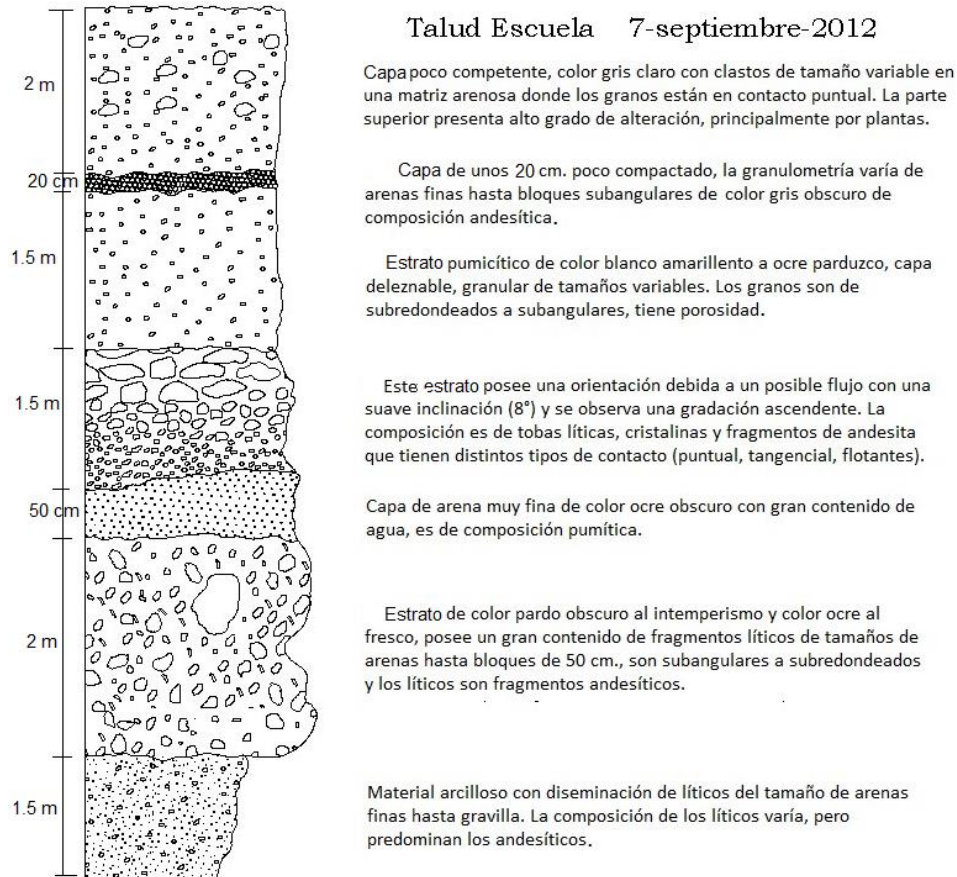


Fig. 8. Sección estratigráfica de uno de los taludes de la zona de estudio (FI-UNAM, 2011).

La fracción fina en las tobas, correspondiente al tamaño de limos y arcillas, varía del 1% al 12%, siendo muy pocos los depósitos que rebasan esta cantidad, y sólo en un par de los observados en el talud que presenta la mayor alteración en la 3ª sección, la fracción fina llega al 25%. Esto se debe a que los aluminosilicatos, al alterarse, conforman la fracción arcillosa, además de que la cantidad de ceniza que contienen las tobas es mínima. Mientras que los limos pudieron formarse de dos maneras: la disgregación mecánica de fracciones más gruesas o la oxidación de los pocos elementos ferro-magnesianos en los componentes líticos en las tobas.

Por último cabe recordar que el enfoque de esta tesis es geotécnico, si el lector requiere de un mayor detalle de lo expuesto en este capítulo, puede consultar la tesis *“Caracterización mineral de muestras pétreas mediante la aplicación de microscopía óptica de polarización de los Taludes en la Tercera Sección del Bosque de Chapultepec”*, la cual también deriva de este proyecto de fondo mixto CONACYT-GDF.

3 - MARCO TEÓRICO.

3.1 - Divisiones geotécnicas del Valle de México.

De acuerdo con el artículo 170 del Capítulo VIII del Título Sexto del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2004), la Ciudad de México para construcción de estructuras se divide en tres zonas (figura 9) acorde a sus características, esta clasificación no es determinante para los lineamientos de construcción. Como la zona de estudio se localiza en la denominada Zona de Lomas, ésta se describe a detalle, y las otras dos se describen a grandes rasgos.

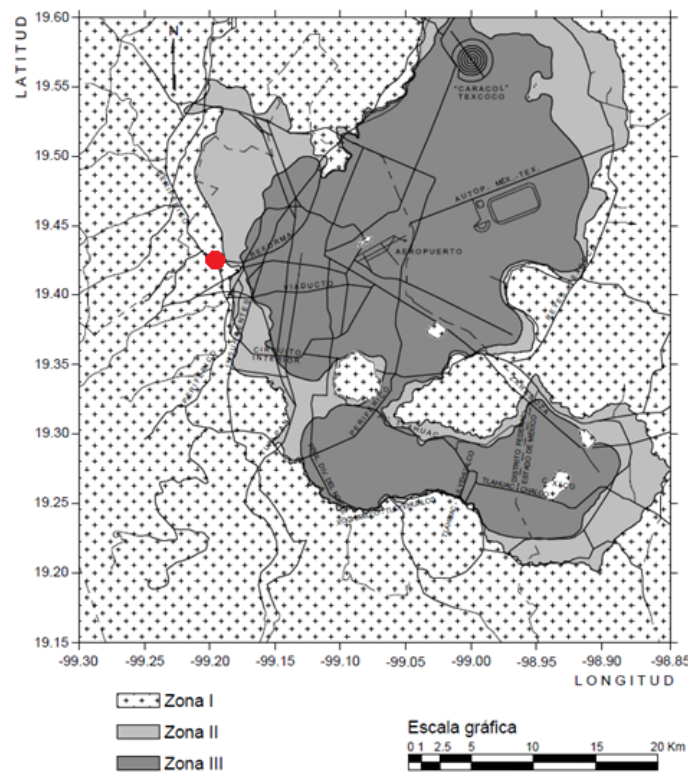


Fig. 9. Zonificación Geotécnica en la Ciudad de México, con la zona de estudio en rojo. (GDF, 2004).

Zona de Lomas (Zona I).

También denominada como Zona I. está formada por rocas o suelos, generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de



oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados (GDF, 2004).

Para construcciones ligeras a medianas, es decir, $< 4 \text{ Ton/m}^2$ de presión, < 100 metros de perímetro de obra, < 2.5 metros de desplante; los estudios previos requeridos a la construcción en la zona son la detección por procedimientos directos, eventualmente apoyados en métodos indirectos, de rellenos sueltos, galerías de minas y otras irregularidades, así como pozos a cielo abierto para determinar la estratigrafía y propiedades de los materiales. Y para construcciones pesadas se debe considerar además sondeos o pozos profundos a cielo abierto para determinar la estratigrafía y propiedades de los materiales. La profundidad de la exploración con respecto al nivel de desplante será al menos igual al ancho en planta del elemento de cimentación, pero deberá abarcar todos los estratos sueltos o compresibles que puedan afectar la cimentación (GDF, 2004).

Zona de Transición (Zona II).

En esta zona los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros (GDF, 2004).

Zona de Lago (Zona III).

Esta se denomina también Zona III. Está integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m (GDF, 2004).

3.2 - Estabilidad de Taludes.

Antes de continuar con los detalles propios de la Ingeniería Geológica y de Geotecnia, se definen brevemente los términos utilizados de ahora en adelante.



3.2.1 - Definiciones y tipos de Talud.

Las obras de infraestructura lineal y en general cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente o alcanzar una profundidad deseada por debajo de la superficie del terreno requieren excavación de taludes, estos se construyen de modo que tengan la pendiente lo más pronunciada que permita la resistencia del terreno y así tener el aprovechamiento óptimo del espacio pero sin sacrificar estabilidad y, desde luego, seguridad. Todos los estudios necesarios para la determinar la estabilidad de taludes se realizan en función de las condiciones requeridas: durabilidad, relación costo-seguridad, riesgo y otros que se contemplen en cada proyecto específico (González de Vallejo *et al.*, 2002).

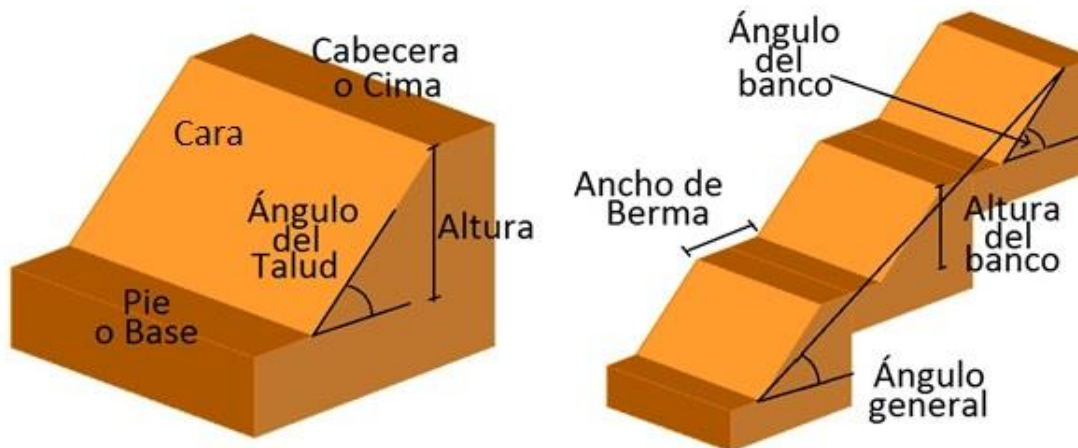


Fig. 10. Partes principales de un talud continuo o con bermas.

En general los podemos dividir en dos clasificaciones acorde a su durabilidad: los taludes **permanentes** son los que se necesita sean estables a largo plazo, mientras que aquellos que tienen un carácter **temporal** son más utilizados en la minería. En la excavación de taludes mineros, los criterios económicos influyen, pues es muy frecuente que se asuma cierto grado de riesgo, sacrificando algo de estabilidad. Mientras que en ingeniería civil, la tolerancia al riesgo es nula, pues los taludes mal diseñados pueden afectar las estructuras de su entorno.

3.2.2 - Mecanismos de falla más comunes.

Los distintos tipos de fracturas están en función del grado de fracturamiento del macizo rocoso y por la orientación y distribución de estas con respecto al talud,

de modo que la estabilidad queda definida por los parámetros resistentes de las discontinuidades de la matriz rocosa (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Por deslizamiento. (Falla plana)

Son las que se producen a favor de una superficie de discontinuidad. Básicamente se requiere la presencia de un plano de discontinuidad con una orientación igual o similar al mismo y además cumpliendo con la condición de que el ángulo de inclinación del plano sea menor que el del talud y además que sea mayor que al ángulo de fricción del material que conforma el talud, es decir: $(\psi > \alpha > \phi)$. En taludes excavados paralelos a los planos de estratificación, se pueden dar roturas planas por deslizamiento de los estratos, son típicas en macizos de rocas estratificadas o foliadas donde los planos se generan a favor de las discontinuidades.

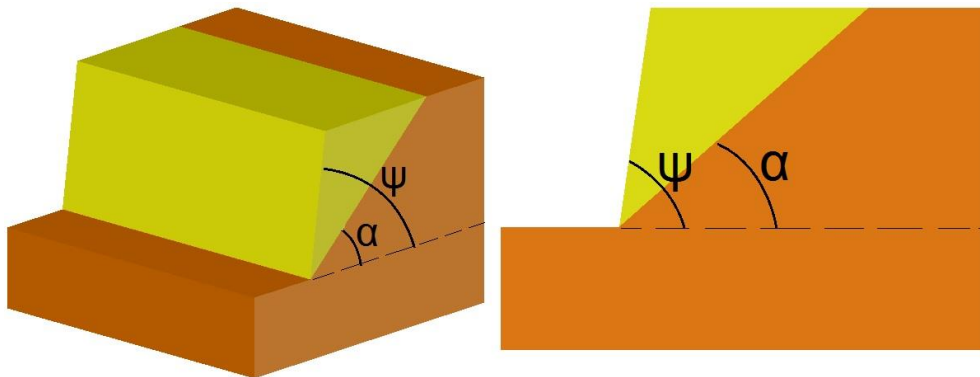


Fig. 11. Condiciones que definen una falla plana.

Falla rotacional o circular.

Cuando el talud se conforma por suelo o por roca sumamente alterada y fracturada, las superficies de fractura rompen generalmente a favor de superficies curvas que varían acorde a la forma y estratigrafía del talud. Lo usual es que sea en forma circular con su extremo inferior al pie del talud, esto se da cuando el terreno es homogéneo. En ocasiones tiene forma semicircular y tiende a pasar por debajo del pie del talud, lo que se conoce como deslizamiento profundo.

Cuando las capas de suelo no son homogéneas se dan roturas en superficies poligonales. Las fracturas a través de un plano único de discontinuidad son muy

difíciles de encontrar. En ocasiones se dan varios tramos rectos que vistos en perspectiva asemejan a una superficie de discontinuidad que tiende a ser circular.

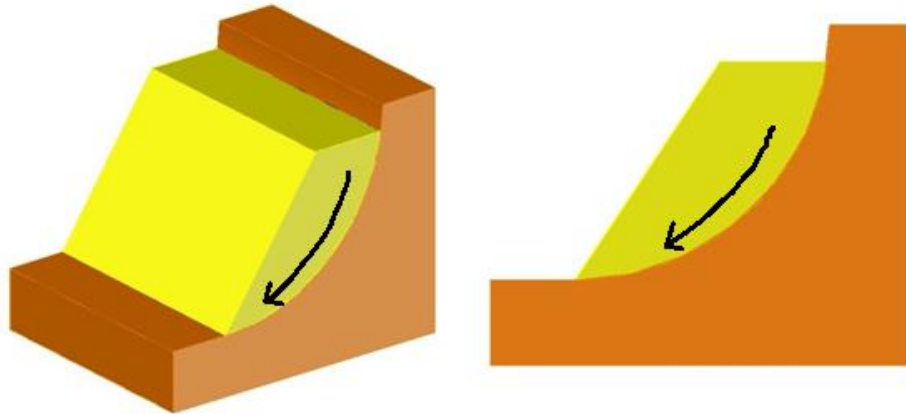


Fig. 12. Falla rotacional, típicas en taludes tipo suelo.

Falla en Cuña.

La intersección de dos planos se representa en el espacio como una línea, un deslizamiento de bloque en forma de cuña se da cuando esa línea llamada vector de salida de cuña, se inclina en la misma dirección que el talud y su orientación es casi perpendicular al mismo.

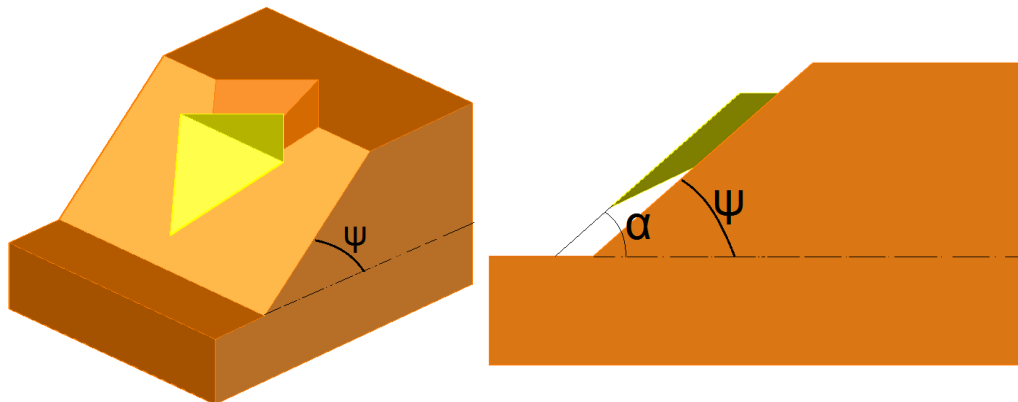


Fig. 13. Características que definen una falla en cuña.

Para que se dé este mecanismo, los dos planos deben aflorar en la superficie del talud y se deben cumplir iguales condiciones que para la rotura plana ($\psi > \alpha > \phi$) siendo que en este caso α es la inclinación de la línea de intersección de ambos planos. Este tipo de rotura es común en gran parte de los macizos rocosos, pues la

mayoría de ellos presentan varias familias de discontinuidades, cuya orientación, espaciado, continuidad e intensidad definen las características principales de la cuña.

Falla por Volteo.

Usualmente los estratos aparecen en bloques con sistema de fracturamiento ortogonal, es decir, que tienden a conformarse en prismas.

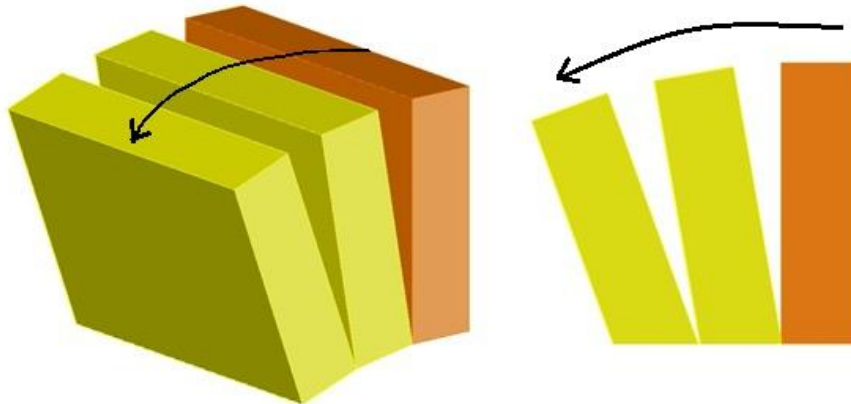


Fig. 14. Disposición de bloques en fallas por volteo.

Este tipo de bloques en particular se producen cuando en el macizo rocoso la o las discontinuidades tienen un buzamiento opuesto al del talud y una dirección igual o similar a este, de modo que el peso de los bloques genera un momento que los hace volcar, donde el centro de rotación es la base de dicho bloque.

Falla por Resistencia.

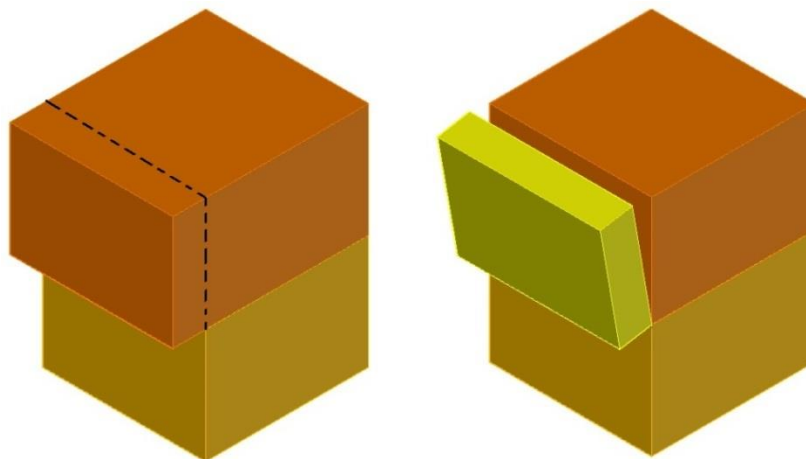


Fig. 15. Cuando la parte voladiza no resiste más, se genera la falla por resistencia.

Cuando una capa de roca se encuentra sobre otra que es menos competente mecánicamente, lo usual es que queden bloques voladizos de la primera roca, a estos se les suele llamar bloques en *cantiléver*, esto es común cuando la capa inferior ha perdido resistencia por meteorización. Cuando un bloque queda en *cantiléver*, este se queda así hasta que la misma resistencia de esa roca (cohesión) no pueda soportar ya el peso de la parte que ha quedado sin soporte inferior, lo cual si se combina con un fracturamiento paralelo al corte del talud, desencadenará en una falla por resistencia.

Falla por pandeo.

Se produce cuando la discontinuidad es paralela a la cara del talud y cuando este ángulo es mayor al del coeficiente de fricción de la roca que conforma en talud. La rotura puede ocurrir con o sin flexión del estrato, y si se flexiona y la unidad es frágil, esta se rompe en dos o más bloques.

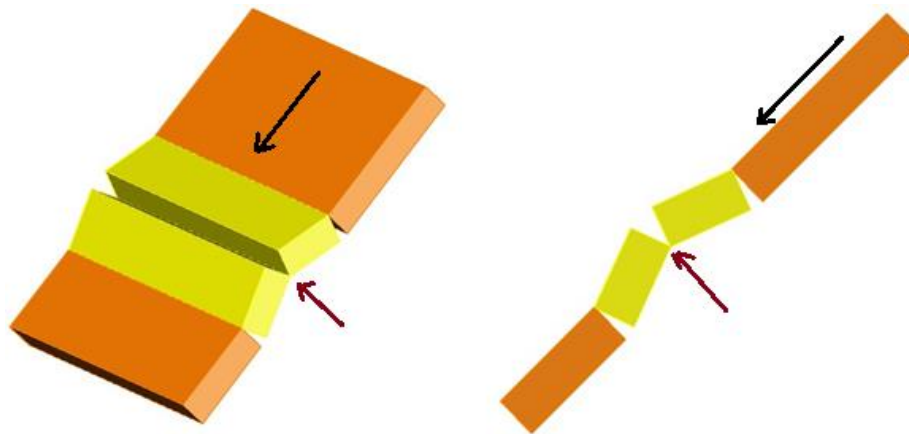


Fig. 16. Esquemas de rotura por pandeo.

Otra condición necesaria es que los estratos sean suficientemente esbeltos en relación con el tamaño del talud para poder curvarse, pandearse o romperse. Los factores que pueden provocar este tipo de falla son altura excesiva del talud, existencia de fuerzas externas aplicadas sobre el estrato, geometría desfavorable del talud, orientación de las discontinuidades, presencia de agua, etc. Cuando se da este mecanismo en pequeña escala, en un solo estrato, por ejemplo, con fracturamiento casi vertical, se denomina falla por esbeltez.



3.2.3 - Definiciones de las propiedades índices.

Para determinar estos parámetros se debe cuidar la correcta toma de muestras en campo, estas deben ser lo más parecido a las condiciones *in situ* del terreno, a estas se les llama muestras inalteradas. Los suelos se originan por procesos de alteración y disgregación de las rocas provocadas por fenómenos externos ya sea mecánicos, químicos o biológicos, este ciclo se cierra cuando se transforma, por litificación, en rocas sedimentarias. Numéricamente, podemos decir que la diferencia es que el suelo sólo soporta una carga uniaxial de 1 MPa sin deformarse (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2005; González de Vallejo *et al.*, 2002).

Propiedades físicas	Propiedades mecánicas
Peso específico (γ)	Resistencia a la compresión simple
Contenido de humedad	Cohesión (c)
Durabilidad y alterabilidad	Ángulo de fricción (ϕ)

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas más utilizadas.

La **matriz rocosa** o roca intacta, es el material que en teoría no presenta discontinuidades, cuando menos a simple vista y a pesar de considerarse continua presenta un comportamiento heterogéneo ligado a su composición mineralógica y su arreglo a nivel mineral y microfracturamiento. Mientras que **macizo rocoso** es el conjunto de los bloques de matriz rocosa y de las discontinuidades de cualquier tipo que afectan el macizo rocoso.

Una **discontinuidad** es cualquier plano de origen mecánico o sedimentario que separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso. Se le llama fractura cuando no hay desplazamiento tangencial a la superficie, y una falla cuando ya lo hay. Su comportamiento mecánico queda caracterizado por su resistencia al corte o, si es el caso, por la del material que la rellena.

La **resistencia al corte** (τ), en términos simples, es la fuerza que se opone al desplazamiento tangencial en una superficie de discontinuidad, esta depende fundamentalmente del coeficiente de fricción del material y en menor medida, de la cohesión del mismo. Matemáticamente intervienen el esfuerzo efectivo normal al





plano de discontinuidad σ'_n , además del ángulo de fricción del material y su cohesión, según la definición del criterio de Mohr-Coulomb: $\tau = c + \sigma'_n \tan(\varphi)$

La **cohesión** (c) es la fuerza de unión entre las mismas partículas minerales que forman la roca, mientras que el ángulo de fricción (φ) es la fuerza friccional de determinado material. Físicamente se representa como el ángulo máximo de inclinación de un plano de discontinuidad en que un bloque puesto sobre otro del mismo material, permanece estático, sin deslizar.

Entre las propiedades mecánicas, la **resistencia a la compresión simple** o resistencia uniaxial es el máximo esfuerzo que soporta la matriz rocosa sometida a una compresión sobre un solo eje, por lo general, esto se hace sobre una probeta cilíndrica sin confinar en el laboratorio, esto se representa con la expresión:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} = \frac{\text{Fuerza compresiva aplicada}}{\text{Área de aplicación}}$$

Esta propiedad también podría estimarse a partir de índices obtenidos en ensayos de campo, (carga puntual, esclerómetro o Martillo de Schmidt) estos índices permiten una aproximación inicial al valor de la resistencia de la roca.

Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	GSL (1970)	Bieniawski (1973)	Ejemplos
< 1			Suelos	
1 a 5	Muy Blanda	Blanda (> 1.25)		
5 a 12.5	Blanda	Moderadamente Blanda	Muy Baja	Sal, lutita, limolita, marga, toba, carbón.
12.5 a 25				
25 a 50	Moderadamente dura	Moderadamente Dura	Baja	Esquisto, pizarra.
50 a 100	Dura	Dura	Media	Mármol, granito (algo alterado), arenisca y caliza porosas
100 a 200	Muy Dura	Muy Dura	Alta	Gneiss, granito, arenisca muy cementada, caliza, dolomía.
200 a 250				
> 250	Extremadamente dura	Extremadamente Dura	Muy Alta	Cuarcita, gabro, basalto.

Tabla 2. Clasificación del terreno a partir de su resistencia a la compresión simple acorde a diversas clasificaciones. (González de Vallejo *et al.* 2002. *modificada*).





Existen varias clasificaciones basadas en la resistencia a la compresión simple de las rocas, por ejemplo, la de la ISRM (*International Society of Rock Mechanics*), la GLS (*Geological Society of London*) y la más utilizada en mecánica de rocas, el RMR de Bieniawski (1989). Este último se utilizará para caracterizar las unidades geotécnicas encontradas en los taludes y se describirá a detalle más adelante.

3.3 - Factores que afectan la estabilidad de un talud.

Las condiciones que definen la estabilidad de un talud se pueden catalogar en factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos (planos y zonas de debilidad), factores hidrogeológicos (presencia de agua) y factores geotécnicos (resistencia y deformabilidad del terreno). Los factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos se denominan factores condicionantes y son intrínsecos de los geomateriales. Junto con estos factores condicionantes (también llamados pasivos) existen factores denominados desencadenantes (o activos) que provocan la rotura cuando se han cumplido una serie de condiciones (González de Vallejo *et al.*, 2002).

Factores condicionantes	Factores desencadenantes
Estratigrafía y litología.	Sobrecargas estáticas.
Estructura geológica. (Discontinuidades)	Cargas dinámicas.
Condiciones hidrogeológicas en los materiales.	Cambios en las condiciones hidrogeológicas.
Propiedades físicas, resistivas y deformación.	Factores climáticos.
Tensiones naturales.	Variación en la geometría.

Tabla 3. Factores condicionantes y desencadenantes en la estabilidad de taludes. (González de Vallejo *et al.* 2002. *modificada*).

Estratigrafía y litología. La naturaleza del material que conforma el talud está sumamente relacionada con el tipo de inestabilidad que puede sufrir. En el caso de los taludes de la 3ª sección, las tobas al ser depósitos vulcano-sedimentarios, tienden a comportarse como suelo cuando se alteran.

Estructura geológica y discontinuidades. La combinación de los elementos estructurales con los parámetros geométricos del talud, así como su orientación, definen los problemas de estabilidad que se pueden presentar en el talud. Como





veremos más adelante, la pendiente tan pronunciada de estos taludes es sumamente condicionante de la estabilidad.

Condiciones hidrogeológicas. La mayor parte de las inestabilidades se producen por la influencia del agua en el terreno, tales como la generación de presiones intersticiales, o los arrastres y erosión superficial o interna de los materiales que conforman el talud. Cuando hay agua presente su influencia principal es la reducción de la resistencia al corte de los planos de discontinuidad al disminuir el esfuerzo normal efectivo σ'_n al ejercer una fuerza adicional u llamada presión de poro o presión intersticial:

$$\tau = c + \sigma'_n \tan(\varphi) = c + (\sigma_n - u) \tan(\varphi)$$

Aunque no haya nivel freático presente, la saturación posterior a una lluvia tiene influencia en la estabilidad.

Propiedades físicas, resistivas y de deformación. La posible falla de un talud depende de los parámetros resistentes del material: cohesión y ángulo de fricción. En estos taludes, la resistencia general de los depósitos depende básicamente de la cohesión, pero el ángulo de fricción siempre influye, en especial cuando el material ya se ha disgregado o se han desprendido bloques.

Esfuerzos naturales. La liberación de los esfuerzos en un macizo rocoso tras la excavación de un talud puede originar tal descompresión que el material se transforma y fragmenta por las zonas más débiles y se comporta como un suelo (González de Vallejo *et al.* 2002). El estado de esfuerzos de un talud depende de su configuración geométrica y del estado de esfuerzos del macizo rocoso previo a la excavación. Si un macizo rocoso está sometido a esfuerzos (de tipo tectónico, por ejemplo), al realizarse una excavación tiene lugar la liberación y redistribución de estas, dicha modificación del estado de fuerzas previo contribuye a la pérdida de resistencia del material. Este pareciera ser uno de los factores que más influye en la inestabilidad de los taludes de la 3ª sección del Bosque de Chapultepec.



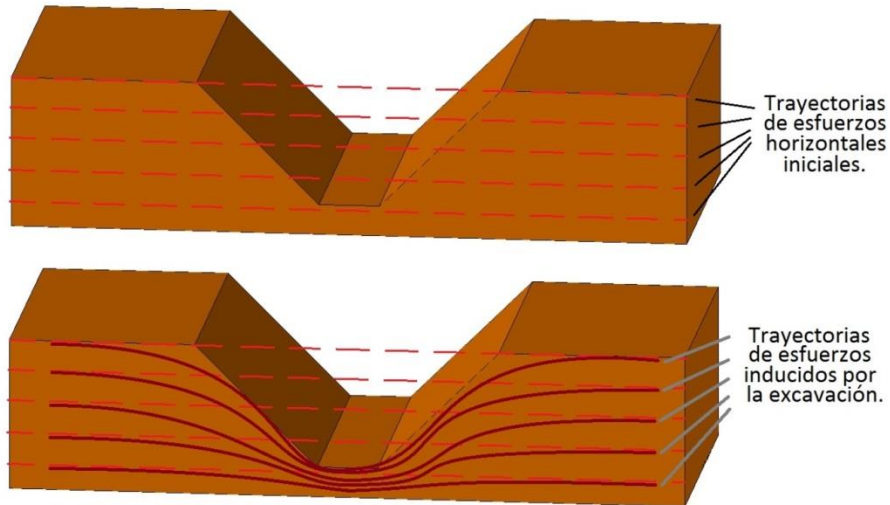


Fig. 17. Las trayectorias de los esfuerzos se modifican al excavar.

Factores desencadenantes. Las sobrecargas estáticas y las cargas dinámicas que se ejercen sobre los taludes modifican las distribuciones de las fuerzas y pueden provocar condiciones de inestabilidad. Entre las primeras están el peso de las estructuras o edificaciones u otro tipo de cargas tales como rellenos, paso de vehículos pesados, etc. que cuando se ejercen sobre la cabecera de los taludes aportan una carga adicional que puede contribuir al aumento de las fuerzas desestabilizadoras. En la 3ª sección del Bosque, no hay construcciones en la cima de los taludes, y el paso de vehículos es al pie de estos, por lo que las cargas dinámicas en los taludes en mínima

Las cargas dinámicas se deben en general a los movimientos sísmicos, ya sean naturales o inducidos y a las vibraciones generadas por voladuras cercanas al talud. El principal efecto en los macizos rocosos fracturados es la apertura de las discontinuidades preexistentes, que derivan en la reducción de su resistencia la corte y la generación y caída de bloques de roca. Al ser la Ciudad de México una zona de actividad sísmica moderada, este se vuelve un factor sumamente condicionante de la estabilidad.

3.4 Tipos de Análisis de Estabilidad.

Los análisis de estabilidad se realizan al diseñar taludes o cuando estos ya presentan una inestabilidad. Se debe elegir un factor de seguridad adecuado, que



depende de la finalidad de la excavación y del carácter temporal o definitivo del talud. El factor de seguridad puede definirse de manera simple, como el cociente de las fuerzas resistivas que rigen el talud, sobre las fuerzas actuantes que pueden desestabilizarlo, puede expresarse de la siguiente manera:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{\text{Fuerzas Resistivas}}{\text{Fuerzas Actuantes}} \quad FS = \frac{F_R}{F_A}$$

Para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad por lo general debe estar por encima del 1.5 e inclusive llegar a ser mayor a 2.0, esto dependiendo del nivel de seguridad exigida y de la fiabilidad de los datos geotécnicos; para taludes temporales el factor de seguridad ronda el 1.3 y pueden considerarse valores inferiores acorde a las necesidades (González de Vallejo *et al.* 2002). Los análisis permiten definir la geometría de la excavación o las fuerzas estabilizadoras que deben ser aplicadas para lograr el factor de seguridad requerido. En caso de los taludes inestables, los análisis permiten diseñar las medidas de corrección o estabilización adecuadas para evitar movimientos.

Los métodos de análisis donde se establece esta condición matemática en que se busca un balance entre las fuerzas resistivas y actuantes, se denominan **métodos de equilibrio límite**, y son en los que se basa la mayoría de los métodos usados en geotecnia. Existen también otros, pero en este trabajo sólo se usan los de equilibrio límite y su teoría se explica muy general y brevemente más adelante.

Así, los métodos de equilibrio límite comparan las fuerzas resistivas sobre las activas donde el F.S. = 1 es la situación de equilibrio. Una forma de análisis, por ejemplo, es plantear los bloques de roca sobre el macizo rocoso en un diagrama de cuerpo libre y realizar los cálculos estáticos y dinámicos acorde a la mecánica clásica, en estos métodos se basan muchos paquetes de cómputo para geotecnia. Más adelante se describe los elementos necesarios para el análisis y su aplicación en casos particulares en los taludes de la 3ª sección del Bosque de Chapultepec.





4 - GEOTECNIA APLICADA.

Con los datos registrados, las pruebas de campo, resultados obtenidos y los parámetros establecidos para determinar las propiedades, podemos comenzar a analizar geotécnicamente los taludes estudiados, no sin antes describir el procedimiento y la metodología realizada tanto para las pruebas, como para el levantamiento de datos y la descripción de los taludes.

4.1 - Metodología en campo.

Las descripciones de tipo geotécnico deben abarcar observaciones y medidas adicionales a las geológicas, por ello es necesario establecer una metodología sistemática y que estandarice la terminología y que cada observación sea lo menos subjetiva posible. Los levantamientos no fueron únicamente de tipo geotécnicos, el proyecto de fondo mixto CONACYT-GDF incluye otro tipo de estudios, pero en este trabajo se describe sólo la metodología de los levantamientos geotécnicos que sirve para el estudio de estabilidad de taludes.

Lo primero fue establecer la secuencia en que se realizarían los levantamientos en la zona de taludes, estos se hicieron acorde a un censo que se explica más adelante. Además, en cada talud se recabaron datos necesarios para el análisis geotécnico, estos incluyen la ubicación regional, características globales del talud, así como imágenes y croquis de localización, además de las características de las discontinuidades, las cuales se mencionan en la tabla 4. El procedimiento para recabar la información general de los taludes fue el siguiente:

- Ubicar cada uno de los taludes, especificando su punto inicial y final por medio de un receptor GPS Garmin e-Trex 10, utilizando el datum **WGS 84**, pues el **ITRF92** (que es el que usa el INEGI) no está disponible en este dispositivo, pero el datum utilizado tiene una gran aproximación.
- La longitud de cada talud se obtuvo acorde a las dimensiones de cada talud: utilizando distanciómetro y también de manera indirectamente con la ubicación GPS de los dos puntos que lo delimitan.





- Su orientación general se obtuvo con la cartografía y se corroboró en campo con el uso de brújula, y para su echado se sacaron varios valores en distintos puntos y se obtuvo el promedio para cada talud.
- La presencia de agua y tipo de vegetación se determinaron solo en el aspecto cuantitativo, tratando de denotar la densidad de vegetación y una escala relativa de la presencia de agua.
- Los bloques caídos de roca se midieron con cinta y se cuantificó el volumen de los más grandes.
- Las imágenes para cada talud incluyen fotografías tomadas con cámara digital y algunos esquemas donde se dibuja la altura exagerada con respecto a la longitud, así como la distribución básica de las rocas presentes.

# de Discontinuidad	Resistencia de la matriz rocosa	Intensidad de fracturamiento	Tipo (Fractura, estrato)	Longitud	Azimut del echado
Echado	Abertura	Relleno	Separación	Agua	Grietas

Tabla 4. Parámetros recabados para describir las discontinuidades.

La toma de datos de las discontinuidades sirvió además para realizar un análisis estructural de la zona, pero su objetivo principal fue utilizarlo para la clasificación RMR. Los datos levantados fueron los siguientes:

- El número de discontinuidad, se tomó en el orden acorde al sentido del cadenamamiento. Se procuró que fuera lo más representativa posible, guardando la proporción de la cantidad de estructuras de cierta orientación (familia) para detectar adecuadamente la dirección de los esfuerzos en el respectivo talud.
- La resistencia de la matriz rocosa se obtuvo con base a una escala comparativa para establecer una jerarquización de resistencia relativa. Los valores asignados están en la tabla 5.
- La intensidad del fracturamiento especifica la cantidad relativa de fracturas presentes del mismo tipo en la parte del talud donde se sacó el dato.
- El tipo de discontinuidad denota si es que estamos hablando de una fractura o un plano de estratificación.





- La longitud se midió con cinta métrica y con distanciómetro en el caso de las que quedan muy alto en el talud.

Valor	Resistencia Estimada.
0	Extremadamente blanda. Se puede hincar la uña en el material.
1	Muy Blanda. Se puede hundir la navaja entre la matriz.
2	Blanda. Se puede hincar la punta del martillo de geólogo.
3	Media. Se requiere de un golpe del matillo para romper la roca.
4	Dura. Son necesarios de 2 a 4 golpes para romperla.
5	Muy Dura. Se requieren más de 5 golpes para poder quebrar.
6	Extremadamente Dura. Sólo se puede rayar la superficie.

Tabla 5. Valor de resistencia estimada de forma relativa. (González de Vallejo *et al.* 2002 *modif.*)

- El azimut del echado se refiere al rumbo en que se inclina el plano de discontinuidad, no al rumbo del plano. El azimut del echado es ortogonal al rumbo del plano y es 90° mayor (regla de la mano derecha).
- La intensidad del echado, que es la cantidad de grados que se inclina el plano de discontinuidad con respecto a un plano hipotético horizontal.
- La abertura se mide con cinta y es la separación perpendicular promedio entre los planos que forman la discontinuidad.
- Para el relleno se especifica si contiene algún material de tipo cohesivo (arcillas o limos) o de tipo friccionante (arenas) o de algún otro tipo; o, si no lo tiene.
- La separación especifica la distancia perpendicular promedio que hay entre dos discontinuidades de orientación similar.
- En la presencia de agua debe anotarse en qué condiciones, y si es posible, en que cantidad está presente. Si no hay un flujo que pueda medirse, debe indicarse la cantidad aproximada de saturación o si simplemente no hay agua presente.

4.1.1 - Censo de Taludes.

Para sistematizar el progreso del trabajo incluyendo la recolección de datos y el posterior análisis de las zonas, se realizó un censo de los taludes, en el cual se fueron identificando por medio de caminamientos sobre los circuitos de la 3ª Sección del Bosque de Chapultepec cuya ubicación ya se estableció en el apartado 2.4.1.



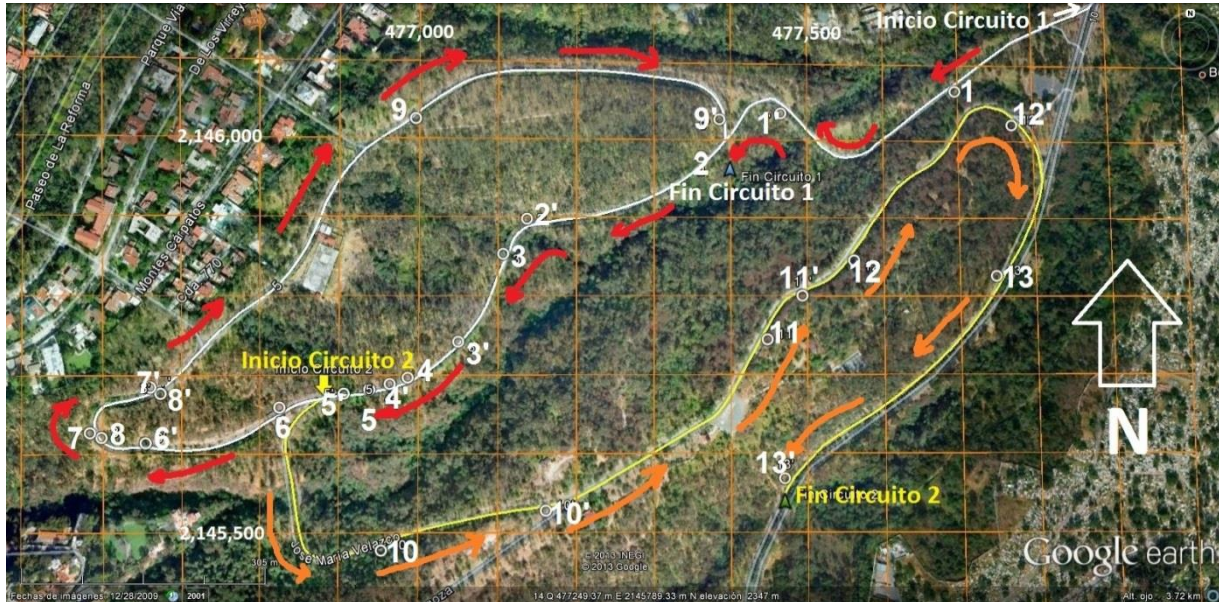


Fig. 18. Se indica inicio, fin y el sentido del circuito 1 (blanco) y el circuito 2 (amarillo), así como los 13 taludes censados.

Para comenzar el censo de los taludes se partió del entronque de la Calle Zaragoza y Joaquín Claussell que se estableció como el inicio del Circuito 1, de ahí se siguió hacia el poniente circulando en sentido de las manecillas del reloj hasta regresar al trazo nuevamente, este es el fin del Circuito 1 (figura 18). El inicio del Circuito 2 está en la incorporación a José María Velazco desde Joaquín Claussell, siguiendo toda esta calle hasta incorporarse de nuevo a la calle Zaragoza girando hacia la derecha, hasta poco antes de llegar a la cañada que hay sobre dicha vialidad, aquí está el fin del Circuito 2, que también es el fin del último talud censado.

Los datos recabados en este censo se muestran en la tabla 6, donde se indica a que Circuito pertenece cada talud numerado. Incluye el punto en el que inicia y termina cada talud, tanto su ubicación GPS como la distancia en el circuito a la que se encuentran en el respectivo cadenamamiento de cada circuito, por ejemplo, el talud 1 comienza en el km. 0+300 del Circuito 1 y termina en el km. 0+580 del mismo, su longitud se obtiene restando el kilometraje final del inicial.

La numeración se asignó acorde al orden en que aparecen en el respectivo Circuito, se muestra también el nombre que se le ha asignado a los taludes, este nombre no obedece a ninguna razón particular sino a alguna observación al azar propia del lugar al realizar el levantamiento. La ubicación GPS está con sus



respectivas coordenadas en UTM (huso 14 Q) y adicionalmente se indica de qué lado se observa el talud en el sentido de circulación del respectivo Circuito.

Circuito	#	Nombre Talud	Inicia			Termina			Lado obs.
			cadena miento	x	y	cadena miento	x	y	
1 Longitud: 2700 m. Inicio: 477,880 2,146,255 Fin: 477,390 2,146,000	1	Hípico	0+300	477,640	2,146,042	0+580	477,540	2,145,992	izquierdo
	2	Cañada	0+700	477,337	2,145,949	0+950	477,133	2,145,888	derecho
	3	Cañada 2	1+000	477,095	2,145,805	1+120	477,035	2,145,729	derecho
	4	Bahía	1+200	476,988	2,145,686	1+220	476,942	2,145,683	derecho
	5	Desviación	1+240	476,873	2,145,672	1+270	476,859	2,145,666	derecho
	6	Drenes	1+350	476,841	2,145,661	1+550	476,658	2,145,611	derecho
	7	Prueba op.	1+610	476,586	2,145,627	1+750	476,666	2,145,685	izquierdo
	8	Prueba	1+630	476,600	2,145,621	1+750	476,678	2,145,677	derecho
	9	Escuela	2+250	476,996	2,146,025	2+650	477,386	2,146,029	derecho
2 Long: 2010 m. Inicio: 476,870 2,145,670 Fin: T 13	10	Caídos	0+250	476,952	2,145,478	0+500	477,162	2,145,529	derecho
	11	Planta	0+850	477,446	2,145,744	0+925	477,491	2,145,800	derecho
	12	Curva	1+100	477,558	2,145,845	1+425	477,772	2,145,800	derecho
	13	Alto	1+600	477,750	2,145,826	2+000	477,470	2,145,565	derecho

Tabla 6. Censo de los taludes en la 3ª sección del Bosque de Chapultepec.

4.1.2 - Jerarquización preliminar.

No puede realizarse un análisis formal de riesgo de la zona de taludes hasta que se hayan realizado todos los estudios pertinentes en cada uno de ellos, pero para fines prácticos, se realizó una jerarquización preliminar de los taludes tomando en cuenta observaciones generales de los taludes, tales como la cantidad y volumen de los bloques caídos que se observan a los pies de los taludes, y también considerando el grado de peligro según la afluencia de vehículos por cada calle donde están los taludes y desde luego las dimensiones totales de los mismos.

Así se estableció que los taludes a estudiar con detenimiento serían el último del Circuito 1, el número 9 llamado “Escuela”, además del número 10 y el número 13, primero y último del Circuito 2, llamados “Caídos” y “Alto” respectivamente. Estos son los que se describen a detalle e incluyen análisis de estabilidad. Las razones generales por las que estos tres taludes se catalogaron como los más relevantes son la cantidad y tamaño de los caídos, la dimensión del talud y la afluencia de vehículos





por la respectiva calle donde se encuentran. Las características particulares de cada talud se especifican cuando se describa cada talud en particular.

4.1.3 - Levantamiento estructural.

La geología estructural se relaciona directamente con la geotecnia pues además de que permite inferir la orientación de fracturas “ocultas” en el terreno, también indica si la zona es propensa a sufrir un determinado mecanismo de falla aunque este no se haya manifestado aún. Al realizar un levantamiento estructural, se puede deducir el sistema de esfuerzos principales en el terreno o determinar si el fracturamiento no tiene relación ligada con actividad regional, sino con algún factor local. El procedimiento para la toma de datos estructurales ya se describió antes, ahora se presentan los resultados de dicho levantamiento en un mapa de distribución de fracturas, los levantamientos se realizaron en los taludes con mayor cantidad de discontinuidades visibles y en una zona no registrada en el censo.

Para el Talud 13 llamado “Alto”, se tomaron 83 datos, donde poco menos del 20% de estos corresponden a datos de estratificación y el resto a fracturas. La mayoría de los rasgos medidos fueron de fracturas donde la roca ya ha cedido o donde están a punto de ceder. En su roseta se aprecia una familia de fracturas cuya inclinación es en dirección de la inclinación del talud, aproximadamente S 40° E y con una inclinación promedio de 65° (SE 40°/65°) y la familia que es paralela al rumbo del talud corresponde a la estratificación de las unidades, esta familia es NE 50°/5°. Analizando la roseta, no destaca el dominio de algún otra familia, además cabe resaltar que la cantidad de fracturas encontradas en los 400 metros del talud es sumamente baja y la variación en la orientación de estas fracturas es considerable, 30° en la mayoría de casos.

En el talud 9 denominado “Escuela”, se levantaron poco más de 100 datos donde cerca de 80 datos corresponden a fracturas, la mayoría de estos datos fueron tomados en una concavidad presente en el talud, donde se encuentra la zona de mayor inestabilidad. Las fracturas con orientación paralela al del talud son las primeras en ceder, de manera similar a la roseta anterior, podemos observar que una



familia de fracturas tiene su inclinación en la misma dirección del talud, en este caso es NE $10^{\circ}/70^{\circ}$, mientras que la estratificación de las unidades varía siendo generalmente SE o SW con una inclinación muy suave no mayor a 13° . Podemos ver que no hay relación con las direcciones preferenciales de la roseta anterior.

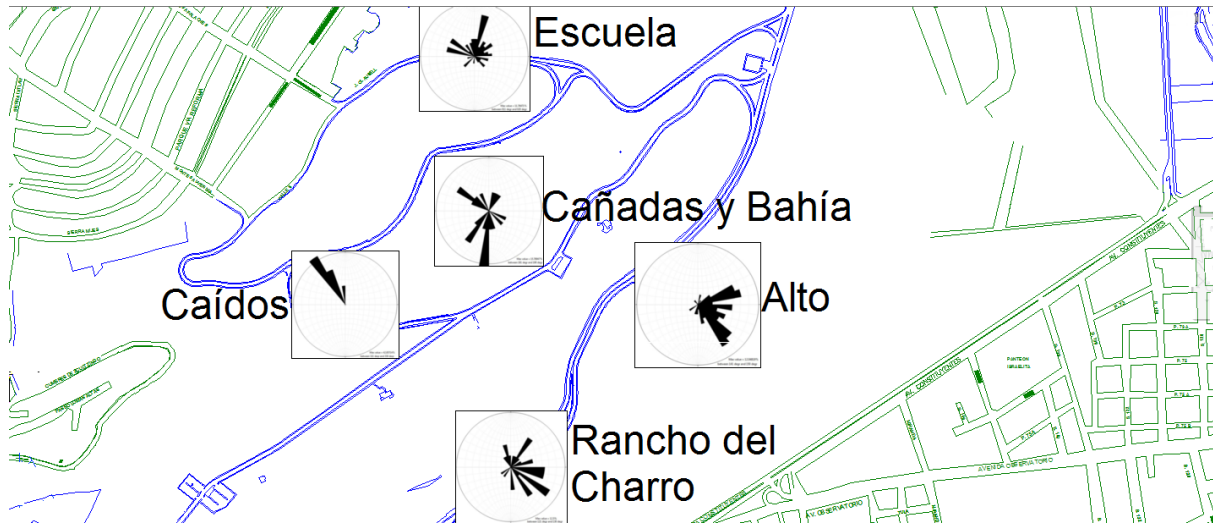


Fig. 19. Mapa de distribución de fracturas de la zona de taludes de la 3ª sección del Bosque.

La roseta de la parte central corresponde a levantamientos realizados en los primeros 4 taludes del Circuito 1 denominados “Hípico”, “Cañada”, “Cañada 2” y “Bahía” (ver tabla 6), en estos taludes de pequeñas dimensiones, se levantaron 40 datos, su orientación es muy dispar de las rosetas anteriores, las fracturas son muy pocas y se concentran en una sola capa. La dirección preferencial tiene una dirección aproximada SW $10^{\circ}/60^{\circ}$, y alcanzan a sobresalir otra dirección, ortogonal a la anterior. Cabe señalar que los taludes 5, 6, 7 y 8 de este circuito, no presentan las dimensiones ni el fracturamiento suficiente como para considerarse estructuralmente relevantes en este análisis (el 6 ya presenta un tratamiento de drenes).

La roseta del talud 10 “Caídos” representa sólo a las fracturas que generan los grandes bloques inestables o que ya han cedido, que son poco menos de 20, no hay más datos levantados, porque las unidades en este afloramiento presentan un fracturamiento muy escaso y las pocas estructuras que hay, se comportan igual que en los taludes “Alto” y “Escuela”, en el sentido de que están en dirección de la inclinación del talud, en este caso NW $20^{\circ}/75^{\circ}$. Se aprecia que no hay relación entre



las orientaciones de las rosetas analizadas hasta ahora, sin embargo lo que tienen en común es que cada uno de los taludes presenta un rumbo preferencial de fracturamiento en dirección de su respectiva inclinación.

La última roseta del mapa pertenece a un afloramiento que se encuentra en la parte más al sur de la 3ª sección, aparte de los circuitos de los taludes, se localiza justo a un lado del Rancho del Charro, a unos metros de Constituyentes, y el otro del lado opuesto, cerca del hoy cerrado Parque Acuático “Atlantis”. En esta parte se levantaron sólo 33 datos pues no hay más que escasas fracturas presentes en una sola de las unidades de esta zona. Podemos observar que la distribución de las fracturas está muy dispersa aunque en general podemos decir que es SE.

Zona	# Datos	Familias	Orientaciones
Talud Alto	83	2	SE 40° / 65° - NE 50° / 10°
Talud Escuela	100	2	NE 10° / 70° - S / 10°
Cañadas	40	2	SW 10° / 60° - NW 60° / 70°
Talud Caídos	20	1	NW 20° / 75°
Rancho	33	1	SE 30°-60° / 50°-60°

Tabla 7. Síntesis del análisis estructural de la 3ª sección del bosque de Chapultepec.

En el análisis en conjunto todos los estereogramas, no destaca una dirección preferencial del fracturamiento, es pues un arreglo aleatorio, además la cantidad de fracturas es muy reducida acorde a las dimensiones de los afloramientos encontrados en esta zona de taludes de la 3ª Sección de Chapultepec, y si tomamos en cuenta el tipo de depósitos, su edad y su resistencia mecánica general, podemos decir que los esfuerzos estructurales regionales NNE-SSW de la falda oriente central de la Sierra de las Cruces descritas previamente en el capítulo 2 (García-Palomo *et al.* 2008), que es donde se localiza Chapultepec no influyen en estos depósitos, al menos no en las capas superiores que son las que afloran, lo cual es comprensible por lo reciente de las unidades, estas se depositaron después de los grandes procesos orogénicos que han afectado el centro del país, además su grado bajo de consolidación y la granulometría de estas, hace que al estar sujetas a esfuerzos regionales de tipo tectónico o algún otro, estas unidades se comporten de manera dúctil y “absorban” dichos esfuerzos.





Mientras que sí es evidente que el fracturamiento tiene orientación paralela con respecto a la orientación de cada talud, esto se observa claramente en el mapa de distribución de fracturas (figura 19), lo cual es indicador de que la inestabilidad de los taludes tiene relación directa con el proceso de excavación, tal y como sucede cuando se afecta el estado de esfuerzos de una zona rocosa, al liberar presiones en el terreno tras la excavación de un talud se origina una descompresión que hace que el material se cierto modo se reacomode y se fragmente por las zonas más débiles que pueden ser las estratificaciones o planos de discontinuidad formados por los espacios entre los granos y pasa a comportarse como un suelo, sobre todo cuando son rocas sedimentarias o vulcano-sedimentarias, como es el caso de esta zona.

4.1.4 - Zonificación Geotécnica.

Para conocer el comportamiento mecánico de las tobas expuestas en los taludes, se realizó una zonificación de los tres más representativos usando perfiles esquemáticos, los cuales tienen la escala vertical exagerada 5 veces (5:1), esto se hizo para apreciar mejor la distribución de las unidades ya que su respectiva longitud es mucho mayor que su altura.

TALUD 9: ESCUELA.

Se localiza al final del Circuito 1, en el sector norte, se le llamó así pues es el más cercano a la escuela localizada en Lomas de Chapultepec que se encuentra hacia el noroeste de la figura 20, al otro lado de la calle frente al Helipuerto Virreyes. En la imagen se distingue una forma ligeramente curva, con una orientación sensiblemente Este-Oeste. El inicio se localiza a unos 80 metros de la calle Montes Apalaches, a una elevación aproximada de unos 2,373 msnm, aquí la altura del talud es mínima y va aumentando gradualmente mientras que el nivel de la calle va bajando de tal modo que el punto final se localiza 30 metros por debajo del inicial.

En los primeros 200 metros, el talud tiene una altura promedio de 3 metros y solo aparece la capa superior, y unos metros más adelante encontramos una concavidad donde están la mayor parte de los caídos, dicha concavidad tiene unos 150 m² medidos en la cara del talud y el volumen aproximado de roca desprendida



es de unos 750 m³, la oquedad se aprecia en la figura 21. Luego de esta concavidad, se aprecian con claridad las primeras unidades (figura 22) y la altura promedio del talud se eleva hasta los 8 metros y así sigue hasta el final del talud, donde la altura máxima es de 12 metros y luego disminuye súbitamente en los últimos 10 metros de longitud, llegando a cero en el punto indicado como “fin” en la figura 20. En la parte final de este talud, se encuentra la mayor altura del talud y es en esa parte donde las capas de roca se aprecian con mayor claridad, salvo la superior que aquí no aflora.



Fig. 20. Ubicación del Talud Escuela en el primer Circuito de la 3ª Sección del Bosque.



Fig. 21. Aquí, el talud debería ser continuo con una altura de 5 a 6 metros.

La zonificación realizada corresponde a la calidad mecánica de las unidades presentes, pues aunque la litología es la misma o cambia sólo la edad del depósito,



la resistencia relativa de las capas varia y por tanto, se deben distinguir entre sí. Cabe recordar que los perfiles longitudinales presentados son esquemas que se han exagerado verticalmente 5 veces, lo que hace que los ángulos de inclinación del talud mismo se distorsionen. Se ha dividido este Talud “Escuela” en 4 unidades geotécnicas, las cuales se describen comenzando por la inferior.

Unidad E4. Corresponde a la de granulometría más fina, es la más profunda y la más afectada por meteorización, presenta una resistencia estimada de muy blanda a extremadamente blanda (0 a 1 en la escala relativa de la tabla 5), pues en pruebas de campo la navaja puede hundirse por completo, además de que puede hundirse la uña del pulgar. La unidad tiene estructura masiva, aunque en algunos lugares se aprecian laminaciones pero con baja frecuencia y no influyen en el comportamiento mecánico de la unidad. En el talud, se puede observar que es la menos competente de las 4 unidades, ya que es la que más fácilmente se disgrega y en algunas partes se aprecia que ya no sostiene la carga de las unidades superiores pues se ha dejado los bloques superiores voladizos.

Unidad E3. Se caracteriza por tener una matriz de granos del tamaño de arena fina a gruesa, con poca cantidad de elementos gruesos (gravilla) aproximadamente un 5% o menos, y presenta un horizonte con laminación que indica diversos periodos de depósito. Cuando se hacen las pruebas de resistencia comparativa la definimos como una unidad blanda (2 en la escala relativa), en esta observamos que la navaja se entierra por completo, mientras que apenas puede ser disgregada con los dedos y en algunas partes sólo con la navaja. Se presenta de manera masiva y el patrón de fracturamiento es de baja intensidad (en comparación con la anterior que es mayor), hablando de resistencia estimada, esta es la 3ª unidad más resistente de este afloramiento.

Unidad E2. Es muy parecida a la anterior, con la diferencia que tiene mayor cantidad de granos gruesos (entre 10% y 15%) y en sus tamaños que son mayores (hasta 2 cm). Esta poco compactada y poco cementada, la Unidad no puede disgregarse con los dedos y la navaja se hunde sólo un poco. Aunque esta unidad es más resistente que la anterior se puede calificar como blanda, es masiva y



presenta un fracturamiento más intenso que la unidad anterior, y la pérdida de soporte de las capas inferiores propicia los caídos.

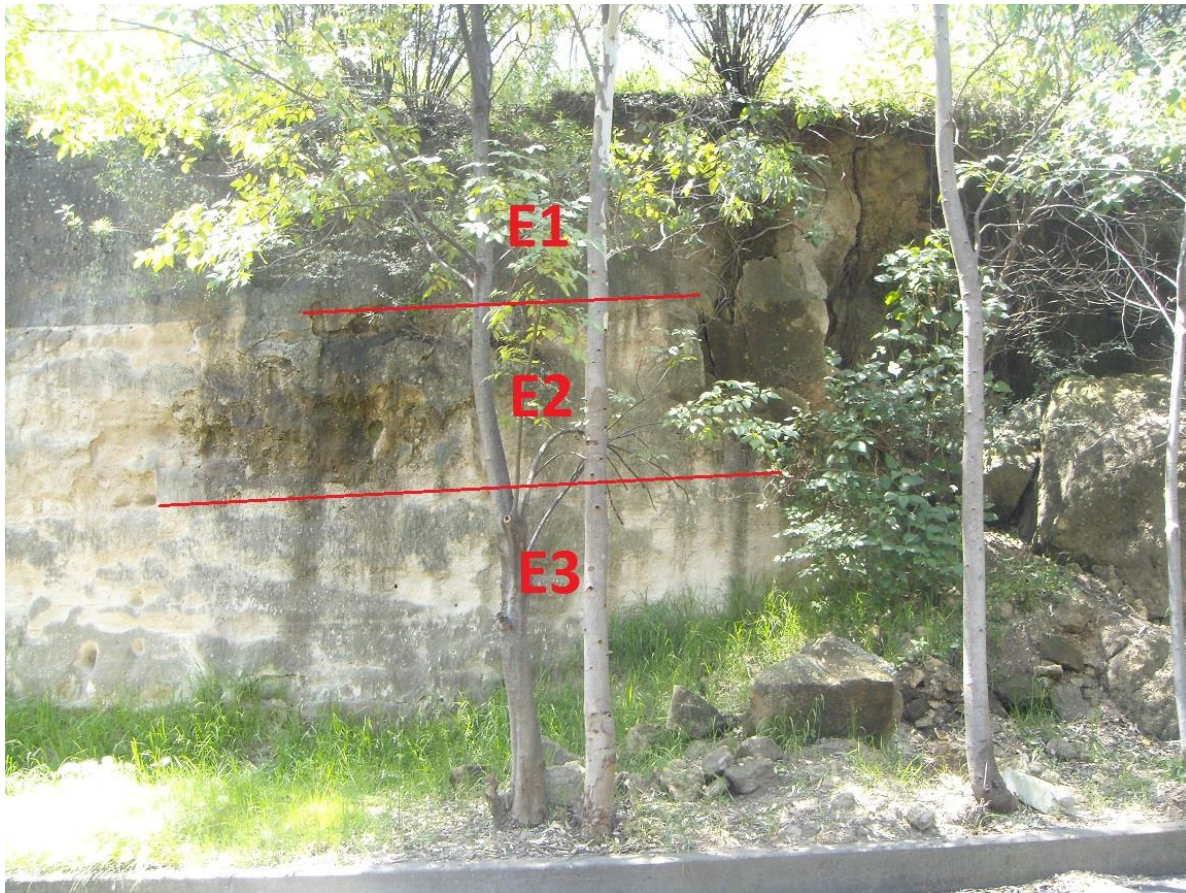


Fig. 22. La parte del talud donde termina la concavidad, se marcan las 3 primeras unidades.

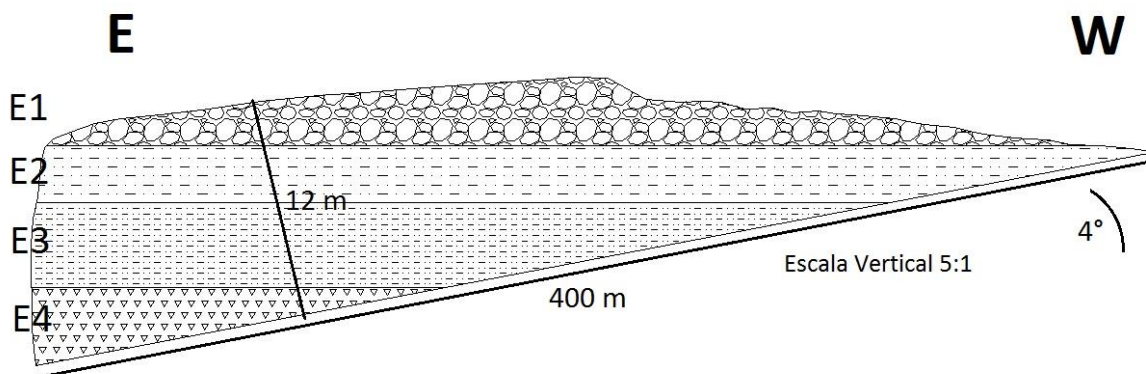


Fig. 23. Perfil esquemático de la sección del talud "Escuela" mostrando las 4 unidades geotécnicas.

Unidad E1. Se halla por encima de las demás, se encuentra a lo largo de casi todo el talud, salvo los últimos metros de la parte final. En esta los clastos son, en



promedio mucho más grandes que la anterior, hasta 30 cm, y la matriz también es más gruesa, haciendo las pruebas de campo se determinó su resistencia de media a blanda (2 a 3), siendo que la navaja se hunde sólo un centímetro y no puede disgregarse más que con la misma. Es la unidad más resistente de las cuatro y además es la que presenta menor grado de fracturamiento, el cual solo se encuentra en zonas aisladas y parece no tener un patrón.

TALUD 10: CAÍDOS

Se localiza al inicio del Circuito 2, en la calle llamada José María Velazco pasando el puente que pasa por encima de la cañada que atraviesa la zona de taludes (figura 24), se denominó así porque es el que presenta la mayor frecuencia de bloques desprendidos y además tiene un bloque inestable de dimensiones considerables y con alta susceptibilidad de caer.

Comienza al terminar la curva luego de pasar la cañada y sigue a lo largo de toda esta parte de la calle José María Velazco y concluye justo en la intersección con la calle siguiente. Esta calle tiene una pendiente de 4 grados que asciende en dirección del recorrido. En la parte inicial hay una sección de 2 metros de alto y 20 metros de largo, es estable y no presenta fracturas salvo algunas aleatorias y escasas, esta parte más que un talud independiente es una representación del mismo talud donde la zona que divide estas dos “partes” tiene una elevación mínima.

A 30 metros más adelante, la altura del talud se incrementa a 2.5 metros a lo largo de los siguientes 20 metros, aquí encontramos los primeros caídos (figura 26 a) y 10 metros más adelante comienza una concavidad muy similar a la encontrada en el Talud “Escuela”, la cual tiene una longitud de 50 metros medida sobre la acera y considerando la altura que alcanza el talud en esta porción se estimó un volumen total faltante de unos 500 m³.

Dicha oquedad no se puede observar bien a menos que se interne entre los árboles y es aquí donde están la mayor parte de los bloques que han caído, además de que se aprecia que en algún momento se extrajo material del talud a modo de una cantera rudimentaria, que seguramente tenía como fin utilizar el material como



agregado pétreo para concreto, esta actividad dejó una “cueva” que ahora sirve de refugio de perros callejeros (silvestres).

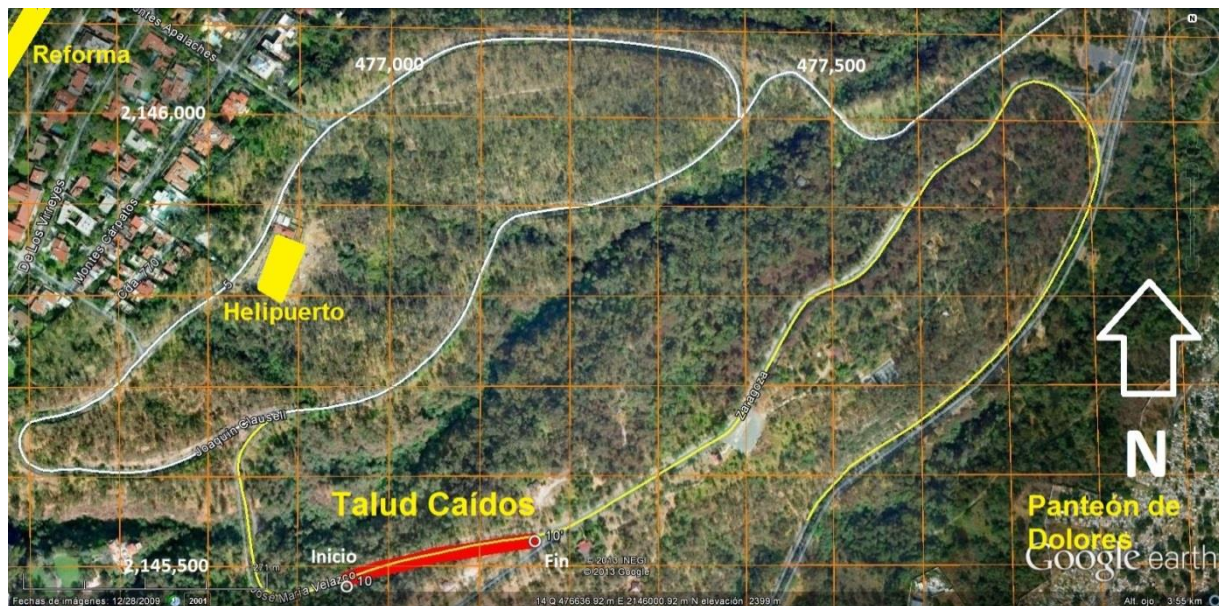


Fig. 24. Ubicación del Talud CAIDOS en el segundo circuito de la 3ª sección del Bosque.

Al terminar la concavidad (figura 26 b) se halla la parte más alta, donde hay caídos de hasta 1 m³ y aquí alcanza su máxima altura, 8 metros, desde este punto el nivel superior del talud permanece prácticamente horizontal, y tomando en cuenta que la calle presenta una pendiente ascendente, se aprecia que la altura del talud se reduce gradualmente hasta llegar a cero justo unos 10 metros antes de llegar a la intersección con la calle siguiente.



Fig. 25. Imagen panorámica de la segunda mitad del talud. La cima conserva al mismo nivel, lo que acorta su altura es la pendiente del trazo de la calle.

No hay una sección del talud donde se puedan observar todas las litologías presentes, esto se debe a la pendiente que tiene la calle, tal como se ilustra en la sección esquemática de este talud, en la figura 27. La disposición final de las



unidades geotécnicas se aprecia en ese perfil longitudinal, de modo que la zonificación de este Talud “Caídos” contempla 3 unidades que, de la inferior a la superior, son las siguientes.

Unidad C3. Es la de granulometría más fina, pero a diferencia de los otros taludes, esta no es la menos resistente, pues presenta una resistencia estimada blanda (2 en la escala de la tabla 5), esto en base en las pruebas de campo donde la navaja sólo puede hundirse medio centímetro y no puede disgregarse con la uña. Posee estructura masiva, y en algunos lugares se aprecian laminaciones esporádicas y no influyen en su estructura general. Es difícil encontrar el contacto entre esta unidad y la que le sobreyace, para hacerlo se debe explorar en la concavidad en la cual se encuentra que esta unidad forma parte del suelo donde crecen los árboles en esta concavidad.

Unidad C2. La concavidad empieza justo donde esta unidad inicia, lo cual indica que esta es la menos competente de las unidades, esto se confirma con las estimaciones de resistencia, pues la navaja puede hundirse por completo y puede disgregarse con los dedos lo cual permite calificarla como una unidad muy blanda (1 de la escala). Tiene una matriz de granulometría media con granos del tamaño de arena fina a media, con gran cantidad de fragmentos líticos que llegan hasta 20 centímetros de circunferencia los cuales conforman un 15% de la unidad. El fracturamiento es muy escaso y las pocas fracturas presentes se deben a fallas por resistencia de la roca.

Unidad C1. La granulometría promedio es mayor a la de las unidades anteriores y está un poco más litificada, la proporción de granos gruesos es menor pero de tamaños mayores (gravilla) y la matriz es más fina. Con las pruebas de resistencia estimada, se clasifica como una unidad blanda a media (2 a 3 en la escala), la cual es masiva en su parte inferior y presenta pseudoestratificación y menor cantidad de elementos gruesos en la parte superior y tal como se ha visto en los taludes anteriores. El fracturamiento que tiene esta unidad se debe a la pérdida de sostenimiento de la capa inferior, provocando fallamiento por resistencia. En la



parte superior de esta unidad hay una capa menos resistente, pero esta no se clasificó por separado, pues es un suelo residual y no otra capa del talud.



Fig. 26. a) Zona con los primeros bloques desprendidos y donde comienza la concavidad, es la unidad C3. b) Se marcan las unidades C1 y C2 donde termina la concavidad.

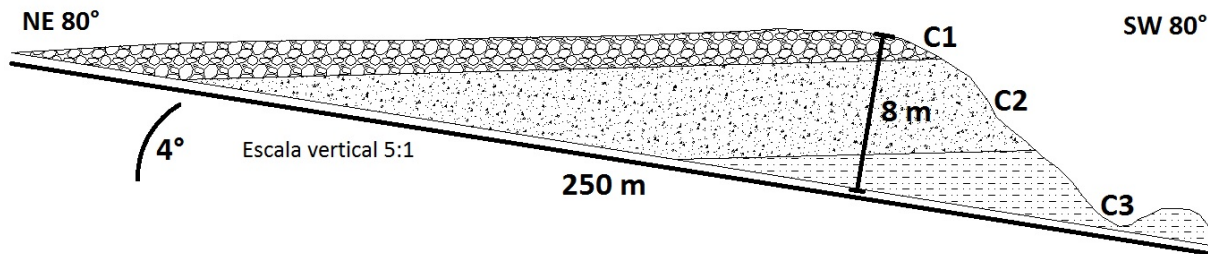


Fig. 27. Perfil esquemático del talud "Caídos" mostrando las 3 unidades geotécnicas.

TALUD 13: ALTO

Se localiza al final del Circuito 2, en la Calle Zaragoza, la que comunica las avenidas México y Constituyentes, nombrado así porque es el que posee la mayor altura de los taludes censados, pues llega a los 18 metros. Este talud comienza unos 500 metros al sur de la entrada al centro hípico localizado sobre la misma Calle Zaragoza, en esta parte la altura en apenas de 1 metro durante los primeros 50 metros, aumenta a los 2 metros en los siguientes 100 metros, y de este punto aumenta gradualmente hasta su parte más alta que está a 280 metros de distancia del punto inicial, justo donde se localiza la bahía vehicular y termina 120 metros más adelante. Su altura disminuye gradualmente hasta 50 metros antes del puente que pasa sobre la barranca, la cual tiene una profundidad de hasta 30 metros.

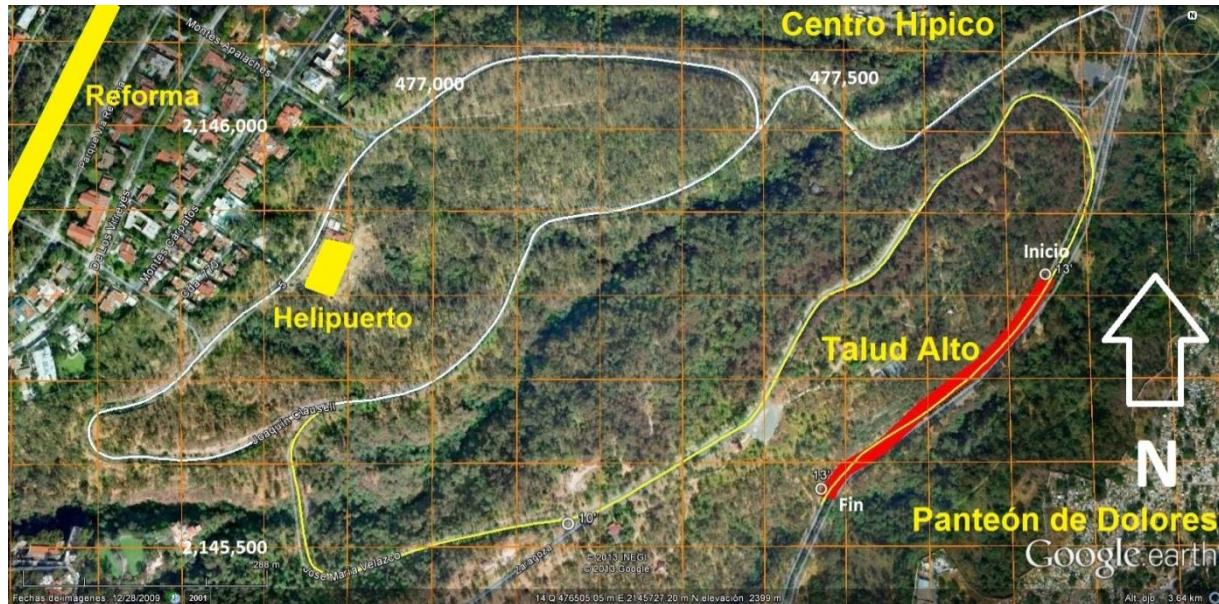


Fig. 28. Ubicación del Talud ALTO en el segundo circuito de la 3ª sección del Bosque.

La parte inicial del talud tiene poca altura, y la cantidad de caídos ahí presente es muy poca. Sólo en una porción, de unos 30 metros de longitud, hay fracturas que dieron origen a bloques inestables en forma de lajas que tienen de 10 a 20 cm. de espesor, este comportamiento sólo se observa en esta parte. Poco más allá de la mitad del talud, a unos 300 metros del inicio, es donde está la mayor altura, 18 metros, y es en esa parte donde las unidades superiores de roca se aprecian con mayor claridad, (figura 29) se distinguen 3 con características diferentes, esto se aprecia mejor en la sección esquemática de la zonificación (figura 30).

La capa superior solo se encuentra en la parte más alta del talud y conforma un horizonte delgado de un metro y medio de espesor. Es en esta parte se localiza la mayor parte de los caídos, que pertenecen a la unidad que subyace a la anterior, y es la de mayor espesor. Los caídos de roca no son muy grandes, desde grava y no más de 0.5 m³ de volumen, estos se hallan en la parte más alta, donde está la bahía vehicular y son mucho menos que en los taludes anteriores. El talud disminuye su altura gradualmente en los últimos 100 metros, el talud termina unos 20 metros antes de comenzar el puente vehicular que pasa sobre una barranca, el fin del talud se indica en la figura 28. Este Talud “Alto” se divide en 3 zonas, representadas en el respectivo perfil esquemático, de la inferior a la superior son las siguientes:



Unidad A3. Es la que tiene la granulometría más fina, muy similar a la **E4** del Talud Escuela, esta se presenta en un pequeño espesor, que parece ser continúa por debajo del nivel de la acera. Su resistencia estimada va de muy blanda a extremadamente blanda (0 a 1 en la escala de la tabla 5), ya que en pruebas de campo la navaja puede hundirse por completo y también puede hundirse la uña del pulgar y al hacerlo la unidad se disgrega. En general presenta estructura masiva, aunque no puede describirse por completo pues como ya se mencionó es apenas un poco lo que aflora de ésta unidad. Es la menos competente de las tres unidades de este talud y es claro que no sostiene la carga de la unidad superior dejando los bloques en *cantiléver* lo que genera la mayor parte de los caídos presentes.

Unidad A2. Su matriz es de granos finos que van de arena fina a limos con una cantidad baja de elementos gruesos como gravas, menos de un 5%. Al realizar las pruebas de resistencia estimada se define como una unidad blanda a media (2 a 3 en la escala), pues de la navaja se entierra sólo la punta, además de que sólo puede ser disgregada con golpes del martillo. Tiene estructura masiva y el patrón de fracturamiento es de baja intensidad salvo en una sección de unos 20 metros cerca del inicio del talud, en la escala resistencia relativa, la podemos calificar como la 2ª más resistente del talud. Es muy parecida a la **E2** del Talud Escuela.

Unidad A1. Es sutilmente diferente a la anterior, principalmente en la cantidad de granos gruesos (hasta 10%) y que son ligeramente más grandes. Esta poco compactada y no está cementada, haciendo las pruebas de campo se determinó su resistencia como blanda (2 en la escala), pues la navaja se hunde sólo un centímetro al hincarla y no puede disgregarse con los dedos. Es la unidad más resistente del talud aunque sólo está presente en la parte más alta y en una capa muy delgada.

El comportamiento en general es como el talud Escuela, pues las unidades en orden ascendente corresponden al orden relativo de resistencia, entre más reciente, más resistente, aunque la A1 no es tan parecida a la E1 del talud Escuela (es un poco menos resistente), la A2 es muy similar al E2 y, la A3 corresponde, en resistencia, a la E4 que es la menos resistente de Talud Escuela.





Fig. 29. La parte más alta del talud, se aprecian las 2 unidades superiores y se infiere la inferior.

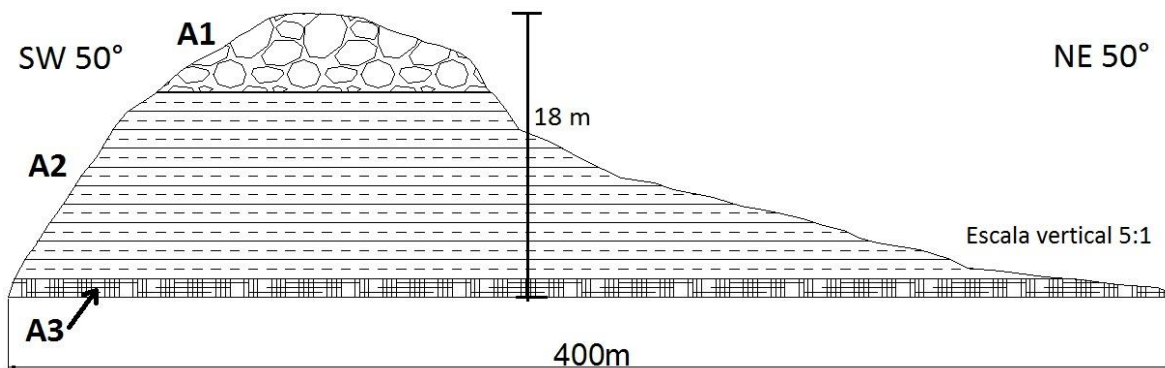


Fig. 30. Perfil esquemático del talud "Alto" mostrando las 3 unidades geotécnicas.

4.1.5 - Clasificación del macizo rocoso con RMR.

El método estandarizado de Bieniawski (1989) denominado *Rock Mass Rating* o RMR hace consideraciones con respecto a las condiciones generales de las discontinuidades junto con su resistencia a la compresión uniaxial, el RQD y la presencia de agua, los parámetros y la asignación de la puntuación pueden resumirse en la tabla 9. A cada parámetro se le asigna una "calificación" cuya suma final determina el valor del RMR. Los parámetros que considera la clasificación son:



1) Resistencia de la matriz rocosa. Es la resistencia a la compresión simple explicada anteriormente en el apartado 3.2.3. Esta se obtuvo con pruebas realizadas en el laboratorio de Geotecnia “Francisco Zamora Millán” de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El procedimiento completo se describe más adelante en el tema 4.2.

2) RQD. Por sus siglas en inglés, *Rock Quality Designation* (Deere, 1968) es la calidad general del macizo rocoso, es decir, de todo el conjunto de bloques de roca y sus respectivas discontinuidades. Para determinar este parámetro generalmente se utilizan núcleos de barrenación de al menos 1.5 metros, donde se suma la longitud de los segmentos que midan más de 10 cm. y se dividen entre la longitud total del núcleo; este valor se expresa como un porcentaje.

$$RQD = \frac{\Sigma \text{Piezas} \geq 10\text{cm.}}{\text{Longitud total núcleo}} \times 100\%$$

En el caso de este estudio, no hay núcleos disponibles, por lo que se utilizó un método indirecto para determinar la intensidad del fracturamiento. En este caso se usó el método de Palmstrom (1982) llamado “Conteo volumétrico de fracturas”. Consiste en una ecuación donde interviene la cantidad de fracturas por metro cúbico del macizo rocoso y se expresa: $RQD = 115 - 3.3 J_v$ donde: $J_v = \sum_{i=1}^j \left(\frac{1}{S}\right)$

El valor de J_v determina el espaciamiento promedio entre fracturas, midiendo el espaciamiento promedio (S) que es la distancia perpendicular entre los planos de discontinuidad, esto se hace para cada una de las “j” familias de discontinuidades y se obtiene un promedio.

3) Separación entre fracturas. Cuando se caracterizan las discontinuidades, se deben describir y cuantificar parámetros como su separación, (parámetro “S” del párrafo anterior). Para esto se aprovecharon los datos recabados al hacer el levantamiento estructural que a su vez sirve para hacer la caracterización estructural.

4) Propiedades de las discontinuidades. La longitud o continuidad promedio de las discontinuidades es la extensión lineal de cada fractura, esta se promedia salvo que varíe mucho las longitudes entre familias. La abertura que es la separación entre





las paredes de la fractura medida de manera normal (perpendicular) al plano de discontinuidad. Su grado de rugosidad se estima visualmente, se basa en el desgaste de la superficie de rotura Si es que hay relleno, se debe especificar de qué tipo y en qué cantidad. Y el grado de alteración de la superficie de discontinuidad se estima de manera comparativa.

5) Presencia de agua. Este parámetro es sumamente importante, la presencia de agua en la roca, se puede calificar mejor si se conoce el caudal o las condiciones de presión de agua – esfuerzos en la roca, aunque lo más común y sencillo es describir la presencia del líquido de manera cualitativa.

Resistencia de la Matriz Rocosa (MPa)	Ensayo de Carga Puntual	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1			
		> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25a 5	5a1	< 1
1	Compresión Simple							
	Puntuación	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD	100%-90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
	Puntuación	20	17	13	6	3		
3	Separación entre fracturas	> 2 m.	2 a 0.6 m.	0.6 a 0.2 m.	0.2 a 0.06 m.	< 0.06 m.		
	Puntuación	20	15	10	8	5		
	Longitud de discontinuidades	< 1 m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m		
	Puntuación	6	4	2	1	0		
	Abertura	cerrada	< 0.1 mm	0.1–1.0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
4	Rugosidad	muy rug.	Rugosa	ligeramente	ondulada	suave		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
	Relleno	ninguno	duro <5mm	duro >5mm	blando<5mm	blando, >5 mm		
	Puntuación	6	4	3	2	0		
	Alteración	Inalterada	ligera	moderada	alta	muy alta		
	Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Caudal por 10 m. de túnel	nulo	< 10 l/min	10–25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
	Presión/Esfuerzo principal	0	0 – 0.1	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	> 0.5		
	Estado general	seco	Ligero	húmedo	goteando	agua fluyendo		
	Puntuación	15	10	7	4	0		

Tabla 9. Determinación del RMR de Bieniawski.

Generalmente en la estimación del RMR deben de hacerse correcciones del valor obtenido según la orientación de las discontinuidades, pero en el caso particular de los taludes, las fracturas no son tan numerosas como para hacerse dicha





deducción, esto se debe a que la mayoría de las fracturas presentes son consecuencia de la pérdida de resistencia de las unidades inferiores luego de la excavación de los taludes, desde luego que lo reciente de los depósitos influye también, esto se refleja en la poca influencia de los rasgos regionales de la parte centro oriental de la Sierra de las Cruces NNE-SSW (García-Palomo *et al.* 2008). Los valores de RMR y la calidad del macizo rocoso se expresan en la tabla 10.

Clasificación	I	II	III	IV	V
Calidad	Muy Buena	Buena	Media	Mala	Muy Mala
Puntuación	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20

Tabla 10. Clasificación RMR de Bieniawski (1989).

En el caso particular de estos taludes, el RQD pareciera no ser la clasificación adecuada, pues estos depósitos se comportan como suelo en varios casos. Sin embargo, los límites entre las unidades se distinguen con claridad, además de que las tobas en zonas sin alteración, poseen tal grado de consolidación que sus características mecánicas son las de una roca y es por eso que el RQD se utilizó para calificar cada una de las unidades geotécnicas descritas. Esta clasificación se realizó solamente para los 3 taludes representativos de la zona, y para apreciar mejor las diferencias en la calidad de las unidades, a la clasificación RMR convencional, se la añadió una subdivisión a la categoría "III" de 41 a 60, donde se establecieron 4 subcategorías como "a", "b", "c" y "d" cada una con valores entre los 41 a 45, 46 a 50, 51 a 55 y 56 a 60 respectivamente.

RMR Talud 9: ESCUELA

Se le asignó un valor de RMR a cada Unidad geotécnica del talud "Escuela" y se analizaron las relaciones entre las mismas. La puntuación para cada unidad se expresa en la tabla 11.

E4:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
5 a 1 MPa.	> 25%	< a 0.06 metros	10 a 20 m.	0.1 a 1 mm.	rugosa	blando, >5 mm	modera.	seco	Total
1	3	5	1	3	5	2	3	15	37



E3:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
5 a 1 MPa.	> 25%	0.2 a 0.06 metros	3 a 10 m.	> 1 mm.	rugosa	duro <5mm	ligera	ligero	Total
1	3	8	2	5	5	4	5	10	43

E2:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
5 a 1 MPa.	> 25%	0.6 a 0.2 metros	1 a 3 m.	0.1 a 1 mm.	rugosa	duro <5mm	ligera	seco	Total
1	3	10	4	3	5	4	5	15	50

E1:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
25 a 5 MPa.	> 25%	0.6 a 0.2 metros	1 a 3 m.	0.1 a 1 mm.	Muy rugosa	duro <5mm	ligera	seco	Total
2	3	10	4	3	6	4	5	15	52

Tabla 11. Valores de RMR obtenidos para cada unidad del Talud "Escuela".

Se observa que aunque las unidades E2 y E3 tienen resistencia muy similares, la E2 tiene una mejor calidad, debido a la mayor resistencia relativa de sus estratos y al hecho de que se siente considerablemente más densa, y aunque las unidades van mejorando en calidad conforme se asciende estratigráficamente, la cantidad y tamaño de los bloques más grande corresponde a las más resistentes, esto es porque en este talud, cada unidad es menos resistente que la que le sobreyace, y la pérdida de soporte es la principal causa de los caídos en este talud generando fallas por resistencia de las unidades más competentes.

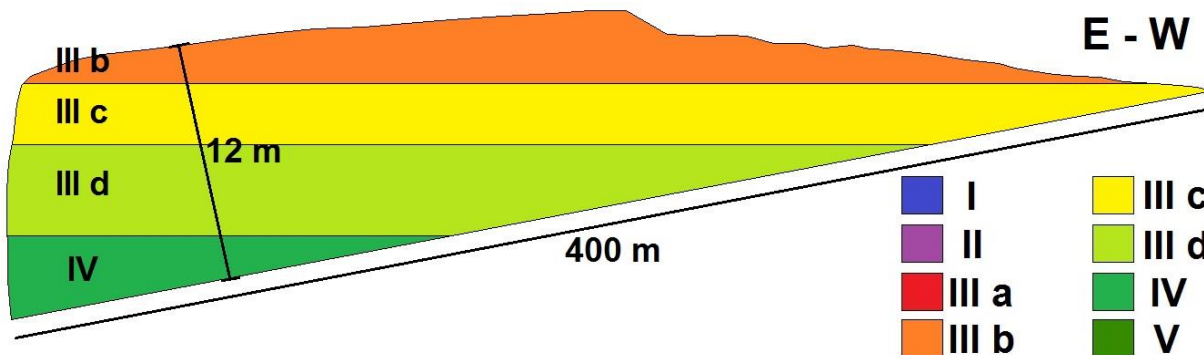


Fig. 31. Asignación del RMR para las unidades del Talud "Escuela".

Esto se refleja en el tipo y cantidad de bloques desprendidos que se presentan en la base de este: los bloques de mayor tamaño son los de la E1, llegando a ser de hasta 5 m³, mientras que la unidad E4 que es la menos resistente, se disgrega en



sus componentes más pequeños formando depósitos de limos y arenas muy finas a las faldas del talud y la unidad E2 tiene bloques de tamaños que varían entre un par de cm y hasta 20 cm, y los de la unidad E3 son del tamaño de gravas. No existe un patrón dominante que sea el causante de la mayoría de los caídos, aunque si existen fracturas particulares en zonas específicas. Por ejemplo, en la E3, algunas las fracturas que tienen rumbo similar al del talud, y una inclinación apenas unos 10 o 15 grados menor a la del mismo, son las causadas por las fallas por resistencia que ocurren cuando se pierde el soporte de la unidad inferior (E4) causando los caídos.

Talud 10: CAÍDOS.

Para las unidades geotécnicas del talud “Caídos”, también se realizó una clasificación acorde a su RMR, y los valores se observan en la tabla 12.

C3:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
1 a 5 MPa.	> 25%	< a 0.06 metros	1 a 3 m.	0.1 a 1 mm.	rugosa	duro, >5 mm	modera.	seco	Total
1	3	5	4	3	5	3	3	15	42

C2:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
1 a 5 MPa.	> 25%	< a 0.6 metros	3 a 10 m.	> 5 mm.	ligera	duro >5 mm	modera.	seco	Total
1	3	5	2	0	3	3	3	15	35

C1:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
1 a 5 MPa.	> 25%	0.2 a 0.06 metros	1 a 3 m.	0.1 a 1 mm.	Muy rugosa	sin	ligera	seco	Total
1	3	8	4	3	6	6	5	15	51

Tabla 12. Valores de RMR obtenidos para cada unidad del Talud “Caídos”.

De la misma manera que en el talud anterior, la mayor parte de las fracturas se deben a pérdida de sostenimiento de unidades inferiores, lo que deja bloques voladizos que fallan por resistencia de la roca, la cual por ser un depósito tan reciente y tener un grado de consolidación muy bajo, falla muy fácilmente por la misma razón. En el caso de este talud, la unidad inferior no es la menos resistente, sino que la unidad que deja de sostener el peso es la C2 y la que falla por resistencia



es la C1 que, aunque es la más resistente de las tres, es la más afectada y la que tiene los bloques desprendidos más grandes, además de la enorme concavidad al inicio del talud ocasionada por la explotación de la unidad C2 como agregado para construcción, incrementa la inestabilidad y falta de sostenimiento de la unidad C1.

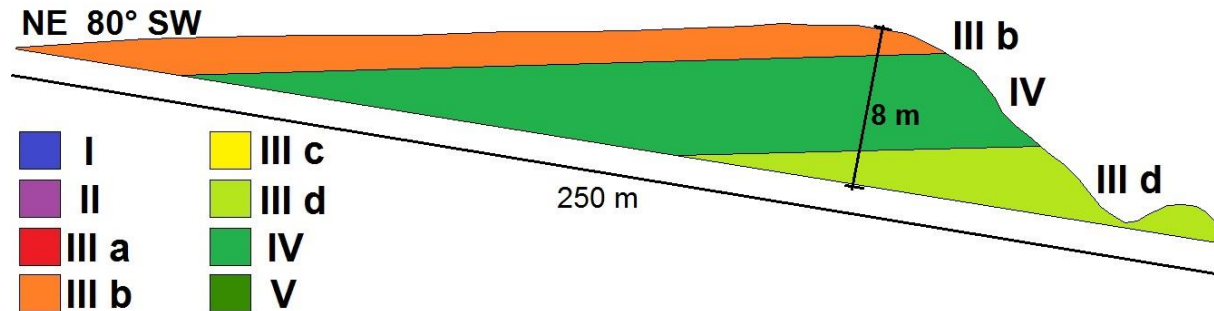


Fig. 32. Asignación del RMR para las unidades del Talud "Caídos".

Talud 13: ALTO.

Al igual que para los taludes anteriores, se asignó una calificación de la calidad de la roca para cada unidad geotécnica, que se describe en la tabla 13.

A3:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
1 a 5 MPa.	> 25%	< a 0.6 metros	10 a 20 m.	0.1 a 1 mm.	ligera	blando, >5 mm	modera.	seco	Total
1	3	5	1	3	3	2	3	15	36

A2:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
1 a 5 MPa.	> 25%	0.2 a 0.06 metros	3 a 10 m.	0.1 a 1 mm.	rugosa	duro, <5mm	ligera	seco	Total
1	3	8	2	3	5	4	5	15	46

A1:

Resistencia	RQD	Separación	Longitud	Abertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
5 a 25 MPa.	> 25%	0.6 a 0.2 metros	1 a 3 m.	0.1 a 1 mm.	rugosa	duro, <5mm	ligera	seco	Total
2	3	10	4	3	5	4	5	15	51

Tabla 13. Valores de RMR para cada unidad del talud "Alto"

Comparando éste con el Talud "Escuela" se aprecia que la unidad inferior, en este caso la A3 es menos resistente que las que le cubren, especialmente la A2 con

la que está en contacto, la cual presenta la mayoría de los bloques desprendidos y se debe a que la A3 es menos resistente y esta pérdida de soporte es la principal causa de los caídos, mientras que para la Unidad A1 la presencia de fracturas es prácticamente nula, además de que su volumen es tan escaso, que su carga no influye en la unidad inferior. Al igual que en el talud “Escuela”, los caídos de mayor tamaño y frecuencia presentes aquí son de la unidad que sobreyace a la menos resistente, aunque en comparación con dicho talud, se encuentran en mucho menor cantidad y son de mucho menor tamaño, pues estos son de la unidad A2 que es menos resistente en comparación con la E1 del “Escuela”. Tampoco existe un patrón dominante de fracturamiento que se refleje como generador de los caídos, pero como es de esperarse, si existen fracturas específicas en ciertas zonas que ocasionen bloques bien definidos, aunque en comparación con los taludes anteriores, son mucho menos frecuentes.

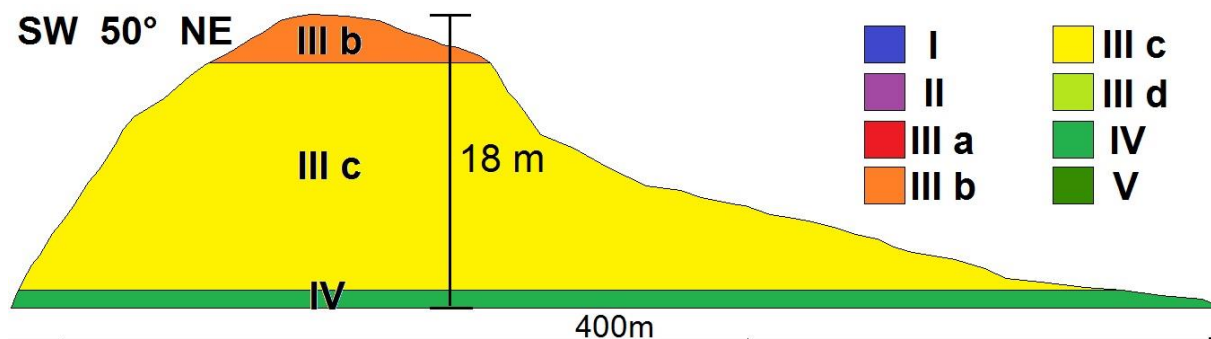


Fig. 33. Asignación del RMR para las unidades del talud “Caídos”.

4.1.6 - Cartografía de rasgos levantados.

Además de los bloques en cuña, también hay bloques que pertenecen al mecanismo de falla plana, esto es claro al recordar la distribución de las discontinuidades en el mapa de la figura 19. En la zona de taludes correspondiente a la 3ª Sección del Bosque de Chapultepec, los datos cartografiados levantados (de interés geotécnico), son de las estructuras encontradas en los taludes, tanto fracturas como planos de estratificación, de esto se derivan dos mapas principales, el primero es el de distribución de fracturas anteriormente mostrado (figura 19), que nos indica indirectamente la orientación de los mecanismos de falla plana, y el segundo es el de vectores de salida de cuñas, que se muestra en la figura 34. Como se puede

observar, las direcciones son, salvo algunas excepciones, perpendiculares a la dirección del respectivo talud, y la mayoría son en dirección de su echado. Para la elaboración de este, se utilizó el mapa de distribución de fracturas, además de un levantamiento realizado exclusivamente para reconocer este mecanismo de cuña.

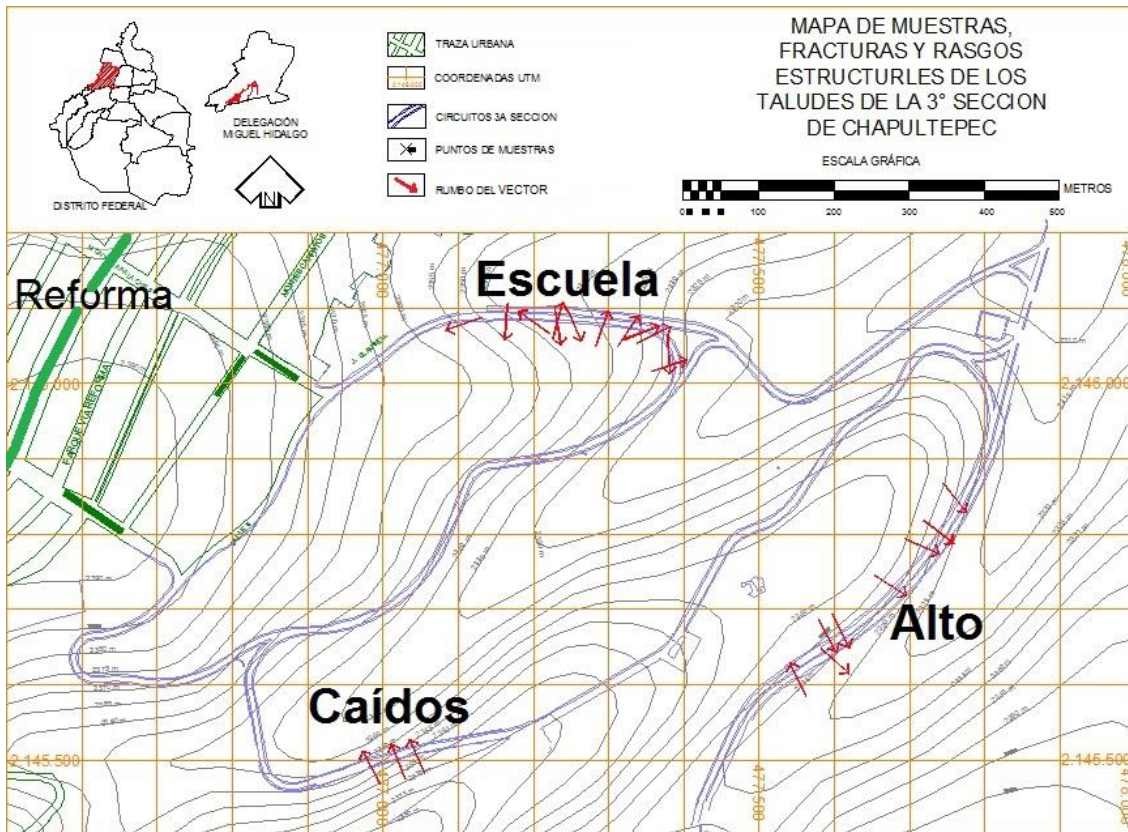


Fig. 34. Mapa que muestra la dirección de salida de las cuñas estimadas estructuralmente.

4.2 - Pruebas de campo y laboratorio.

Los valores de resistencia utilizados para la caracterización del macizo rocoso se utilizaron como una primera clasificación de la resistencia en una escala comparativa entre las mismas unidades presentes en los taludes estudiados. Sin embargo, para tener una mejor certeza de los valores reales, se realizaron pruebas en el laboratorio entre las que destaca una prueba de resistencia a la compresión simple elaborada en un equipo de deformación controlada en el laboratorio de Geotecnia “Francisco Zamora Millán” de la Facultad de Ingeniería, y adicionalmente se realizaron pruebas para conocer la cohesión (c), el contenido de agua ($\omega\%$), el peso específico (γ) y la densidad de sólidos (S_s) del material.



Aunque las pruebas de resistencia a la compresión simple solo se hicieron para el Talud Escuela, se hizo una correlación con las unidades geotécnicas de los otros dos taludes ya que existe relación mecánica con los otros 2 taludes más representativos basada en la resistencia relativa de las pruebas de campo. De tal modo estas pruebas sirven para darle valores numéricos absolutos a los datos que antes eran relativos y estos pueden extrapolarse (bajo ciertos criterios) a las resistencias de las unidades de los otros taludes. Las unidades del Talud Escuela a las que se les realizaron las pruebas fueron la E2, E3 y E4, la unidad E1 no pudo muestrearse porque el tamaño de los clastos hace casi imposible sacar una muestra de modo que pueda labrarse una probeta adecuada para estas pruebas.

Las pruebas de campo incluyen además de la escala relativa de resistencia, explicada en el apartado de metodología de campo (tabla 5), el procedimiento para obtener las muestras que se utilizaron para hacer las pruebas, que fue el siguiente:

- Se aprovecharon las características de los afloramientos para obtener las muestras directamente de la cara del talud, cuando normalmente se deben hacer trincheras en el suelo para obtener muestras en bloque.

Muestra	Coordenada x	Coordenada y
E2	477 194	2 146 078
E3	477 215	2 146 082
E4	477 327	2 146 069

Tabla 14. Ubicación de las muestras del talud “Escuela”, en coordenadas UTM (huso 14 Q).

- Estas muestras en bloque se labraron a modo de obtener un prisma, siempre conservando la orientación, principalmente la verticalidad que tenía en campo.
- Una vez tallado el bloque, este se cubrió con película plástica seguido de una capa de papel periódico húmedo para conservar su contenido de humedad lo más parecido posible a sus condiciones *in situ*, luego de lo cual se cubrió de más película plástica para preservarla lo mejor posible las condiciones mecánicas antes de desprenderlo de la pared del talud. Con el bloque ya desprendido, se repitió el procedimiento de cubrirlo con película plástica y así poder transportarlo con el mayor cuidado posible para evitar alterar sus propiedades en campo.





Fig. 35. Tallado y empaquetado de las muestras en bloque en campo.

4.2.1 - Resistencia a la Compresión Simple.

Las pruebas de laboratorio iniciaron con el tallado de las probetas para la prueba de resistencia a la compresión simple. El procedimiento fue el siguiente:

- Luego de descubrir las muestras en bloque por la parte superior, se comenzó a labrar un pequeño prisma semicircular de unos 20 cm de alto y unos 10 cm de ancho el cual se desprendió para proseguir con el tallado. En todo momento se debe respetar la orientación *in situ*, es decir, mantener la misma posición en vertical que tenía en campo.



Fig. 36. El procedimiento del tallado de las probetas para la muestra de compresión simple.

- Se labran los lados para darle forma de una probeta en prisma circular que debe cumplir con la característica de tener una altura entre 2 y 2.5 veces su diámetro.
- Una vez obtenidas las probetas, estas se miden y se pesan, de modo que se obtienen tres diámetros (superior, central e inferior) y tres alturas. Esto no sólo

sirve para obtener los factores que han de usarse en los cálculos, también de estas se obtiene el valor del peso específico de las muestras.

La probeta se coloca en la máquina de deformación controlada (figura 37). La disposición de la probeta y de los instrumentos que se usan en el ensayo de compresión simple con deformación controlada es la siguiente:

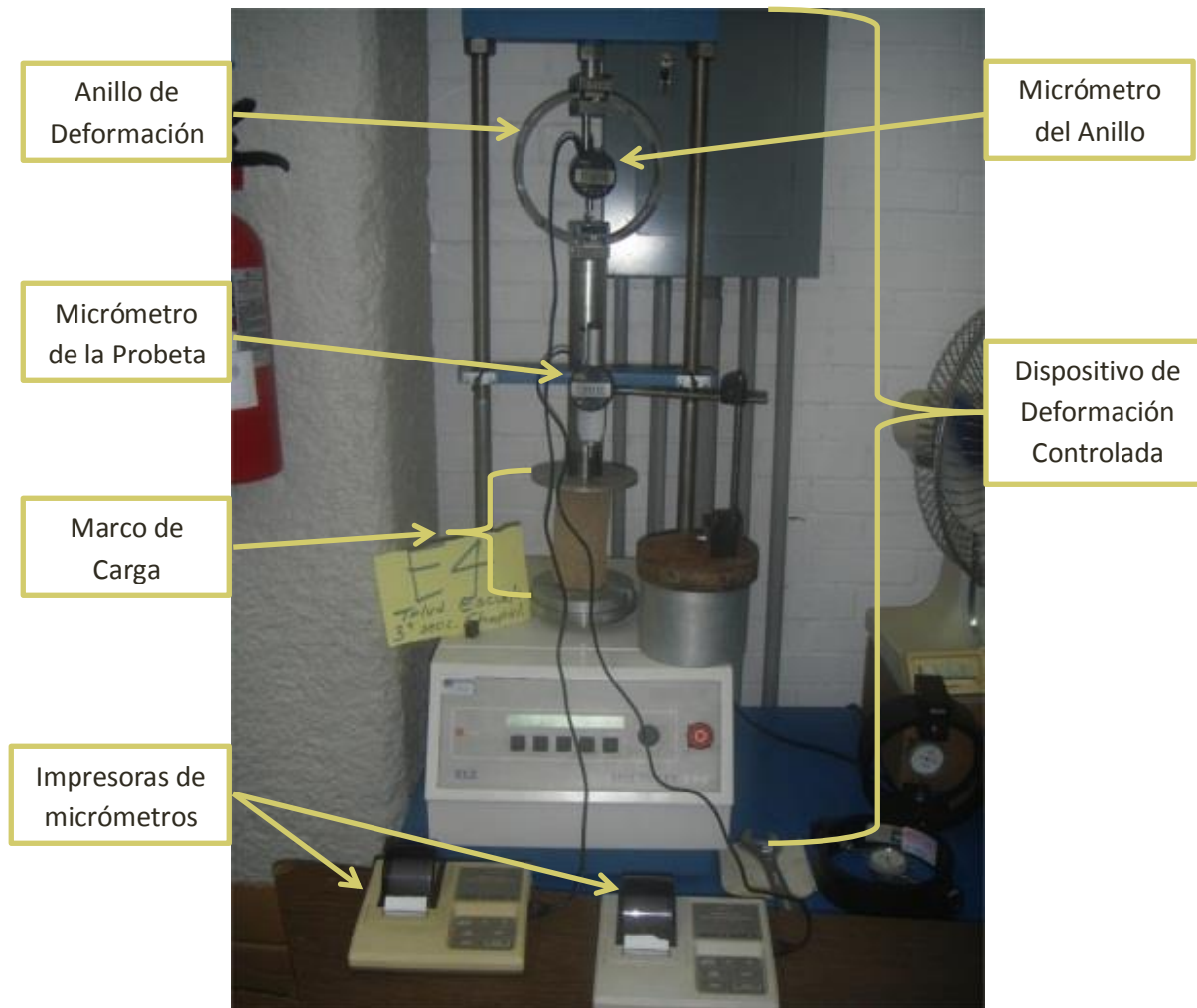


Fig. 37. Dispositivos utilizados en la prueba de compresión simple con deformación controlada.

- Anillo de deformación. Mientras la probeta se va deformando a un ritmo de 1 mm por minuto, preestablecido por norma de la ASTM (*American Society for Testing and Materials*), este anillo se deforma también, y así se puede determinar la carga que se ejerce sobre la probeta, pues cada anillo tiene su propia constante de deformación (K).



- Micrómetro del anillo. Para saber cuánto se deforma dicho anillo, se utiliza un micrómetro digital que va tomando lecturas de la deformación en mm, estos datos junto con la constante K, permiten saber cuál es la carga ejercida.
- Marco de carga. Al colocar la probeta, esta debe asegurarse con placas de acero en forma de plato en su base y encima de ella, estas sirven para colocar el micrómetro de lápiz que es el que mide la deformación axial de la probeta.
- Micrómetro de la probeta. Este mide la deformación axial de la probeta, pues mide que tanto baja el marco de carga que se coloca justo encima de la probeta desde que comienza el experimento, hasta que cede la deformación.
- Impresoras de micrómetros. Cada uno de los micrómetros digitales tiene su propia impresora que permite capturar al instante la lectura de los micrómetros, esto es sumamente conveniente, pues los datos se toman cada cierto tiempo, en intervalos muy cerrados (de 5, 10 y 15 segundos), y a cada dato de deformación del anillo, le debe corresponder uno de la deformación de la probeta el cual debe tomarse exactamente en el mismo segundo.
- Dispositivo de deformación controlada. Al colocar la probeta, esta puede ajustarse con los platos de acero que sea necesarios y ajustar así el marco de carga para que la compresión cumpla con la velocidad establecida por la ASTM.

Al conocer las deformaciones del anillo, de la probeta y la constante del anillo, así como las dimensiones de la probeta, se pueden realizar los cálculos. Con las lecturas del micrómetro del anillo, se puede conocer la deformación (δ) del anillo y con su constante, se puede conocer la carga que se ejerce sobre la probeta en cualquier instante (i). De modo que para cada lectura la deformación es:

$$\delta_i = |\text{lectura inicial} - \text{lectura actual}|$$

Y para conocer la carga en cada instante, simplemente se multiplica la constante del anillo por la deformación: $P_i = K \delta_i$, en este caso:

$$P_i = 152.63 \frac{Kg}{mm} (\delta_i)$$



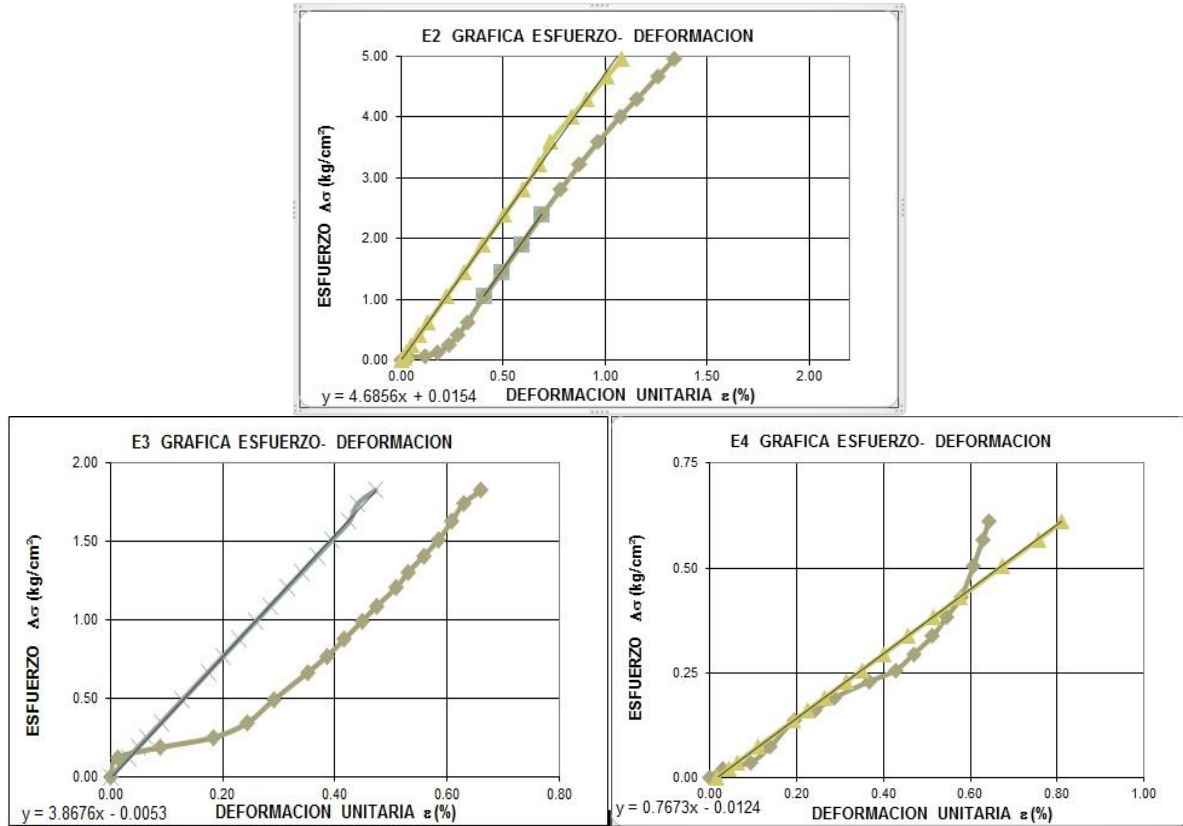


Fig. 38. Gráficas ajustadas de $\epsilon - \sigma$ de las muestras del talud Escuela.

4.2.2 - Características de la Matriz Rocosa para calcular la estabilidad.

Peso específico (γ)

Esta propiedad se calcula directamente usando los valores de diámetro promedio (D_p), que es el promedio del diámetro superior (D_s), el diámetro central (D_c) y el diámetro inferior (D_i); y los valores de altura promedio (H_p) obtenido de tres valores medidos (H_1 , H_2 y H_3) a cada una de las probetas. De esto se obtiene su volumen (V), y conociendo su peso (W), se obtienen los valores de peso específico para cada unidad. Los valores usados y obtenidos se resumen en la tabla 16.

Unidad	D_s	D_c	D_i	D_p	H_1	H_2	H_3	H_p	W [g]	V [cm ³]	γ
E2	7.21	7.23	7.31	7.25	14.51	14.5	14.55	14.52	804.24	597.78	1.35
E3	7.35	7.48	7.49	7.44	15.53	15.46	15.39	15.46	643.15	676.06	0.95
E4	8.09	7.98	8.08	8.05	16.37	16.28	16.31	16.32	971.07	823.45	1.18

Tabla 16. Valores utilizados para obtener el Peso Específico.



$$\gamma = \frac{W}{V} \left[\frac{g}{cm^3} \right] \quad \gamma_{muestra} = \frac{W_{muestra}}{V_{muestra}} = \frac{W_{muestra}}{\left(\frac{\pi D_{prom}^2}{4} \right) H_{prom}} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Los valores de peso específico corresponden a las unidades E2, E3 y E4 en condiciones *in situ*. Para conocer el valor de los componentes individuales de cada Unidad, se requiere realizar un proceso adicional llamado densidad de sólidos, que además nos permite conocer el volumen de vacíos de cada una de las unidades.

Densidad de sólidos (Ss).

Es el cociente de la densidad de los sólidos, sobre la densidad del agua. El procedimiento para llevar a cabo la prueba de densidad de sólidos es el siguiente:

- Obtener dos partes de aproximadamente 100 g de muestra del material restante del tallado de las probetas de cada unidad.
- Este debe desmoronarse a manera de que no queden “grumos” de material apelmazado y se remoldea con agua para integrarlo de manera homogénea y desbaratar los grumos que queden.
- Luego se agita con agua en un mezclador por aproximadamente 5 minutos para homogeneizar el material.
- Para la prueba se usan dos matraces para cada material, esto para hacer un promedio y a la vez cerciorarse de que son consistentes los valores. Estos deben estar completamente limpios y lavados con alcohol.
- Cada matraz llenado a su línea de aforo tiene cierta masa a determinada temperatura (m_{mw}), por lo que deben utilizarse matraces calibrados y estos no deben tocarse con las manos ni con ningún otro material que no sea papel tipo servilleta para no afectar esta lectura.
- Cada matraz debe llenarse hasta poco antes del comienzo del cuello con el material homogenizado teniendo cuidado de que no quede material en el cuello del matraz.
- Adicionalmente debe llenarse otro matraz sólo con agua, ya que esta, al igual que los que contienen material, serán desairados, esta agua servirá para llenar los matraces una vez que todo el material esté desairado.



- El proceso para desairar los matraces consiste en sumergirlos en agua a unos 30° C y cerrarlos con tapones con mangueras conectados a una bomba de vacío que sacará la mayor cantidad de aire posible del agua y del material. El proceso dura aproximadamente una hora y deben agitarse los matraces para que las partículas no se queden al fondo sin desairarse.
- Posteriormente, deben medirse 3 temperaturas en las partes inferior, media y superior del cuerpo del matraz, estas no deben variar más de 0.1° C si es así, se agita ligeramente para homogenizar la temperatura. Esta temperatura sirve para conocer la masa del matraz aforado.
- Una vez logrado esto, se llena el matraz hasta su línea de aforo poniéndolo de costado y con mucho cuidado para evitar que se añada aire. Luego se limpia perfectamente el interior del cuello por encima de la línea de aforo.



Fig. 39. Homogenizado del material, desairado de matraces y peso del material seco.

- Hecho esto, se pesa el matraz para obtener la masa del matraz + la del agua + la del material (m_{mws}) luego de esto, se puede tocar el matraz como se desee.
- Se utiliza para cada matraz con muestra, una charola previamente pesada (m_c) en la cual se va a verter la mezcla teniendo cuidado de que todo el material caiga en dicha charola hasta que el matraz quede limpio, se puede usar agua para ello.
- Estas charolas se pesan para obtener la masa de la charola + la mezcla (m_{cs}) que posteriormente se pondrá 24 horas en un horno a 105° C para ser pesadas y así obtener la masa del suelo seco: $m_s = m_{cs} - m_c$.
- Se usa una expresión donde intervienen, la masa del material seco sobre la masa matraz + la del agua + la del material y la masa del matraz aforado, este último valor se obtiene de la curva de calibración del respectivo matraz:



$$S_s = \frac{m_s}{m_{mw} + m_s - m_{mws}}$$

Unidad	$T_{prom.}$ [°C]	m_{mw} [g]	m_{mws} [g]	m_c [g]	m_{cs} [g]	m_s [g]	S_s
E2	36.5	655.56	675.58	525.35	622.13	96.78	2.253
	36.3	679.78	743.33	511.50	615.81	104.31	2.261
E3	36.76	653.88	705.67	525.46	612.55	87.09	2.467
	36.56	655.37	708.33	517.45	606.42	88.97	2.471
E4	36.26	655.60	715.49	525.31	623.85	98.54	2.549
	35.73	655.53	717.47	495.43	597.49	102.06	2.543

Tabla 17. Valores utilizados para obtener la Densidad de Sólidos de las muestras.

Relación de vacíos (e) y porosidad (n%).

Con los valores de peso específico (γ) y densidad de sólidos (S_s) podemos calcular la relación de vacíos, que es el volumen de vacíos (V_v) sobre el volumen de sólidos (V_s), y la porosidad total (no confundir con porosidad efectiva ni con la permeabilidad) que se obtiene del cociente del volumen de vacíos sobre el volumen total de la muestra (V_m). Si de la prueba anterior se obtienen los volúmenes antes citados, la relación de vacíos y la porosidad, que se relacionan directamente, se pueden calcular con las expresiones:

$$e = \frac{V_v}{V_s}; n(\%) = \frac{V_v}{V_m}; V_m = V_v + V_s \therefore e = \frac{n}{1-n}; n = \frac{e}{1+e}$$

Se pueden observar los valores de (e) y (n%) en la tabla 18.

Unidad	V_m [cm³]	V_v [cm³]	V_s [cm³]	e	n (%)
E2	48.64	21.37	27.27	0.78	43.93
E3	38.91	24.16	14.75	1.64	62.09
E4	81.08	44.38	36.71	1.21	54.73

Tabla 18. Valores utilizados para obtener la relación de vacíos y la porosidad.

Contenido de agua (ω %).

Para este parámetro se usó también parte del material derivado del tallado de las probetas, con el procedimiento siguiente:





Para obtener la resistencia a la compresión, se debe obtener la deformación, pero de manera unitaria, es decir, en función de su altura, esta deformación (ϵ) para cada instante (i) se obtiene: $\epsilon_i = \frac{\delta_i}{H_{prom}}$

Donde la altura promedio, es el promedio de las tres alturas tomadas a la probeta. Para obtener la presión sobre la probeta (σ) para cada instante (i) se debe dividir la carga (P) ejercida sobre el área (A) de la probeta. Pero durante la prueba, el área de la probeta no es constante, pues conforme se deforma axialmente, también lo hace tangencialmente. Esto se debe a que al acortarse la probeta verticalmente, esta se está ensanchando horizontalmente, pues el volumen permanece constante durante todo el experimento. De este modo, el área sobre la que debe dividirse la presión es un área corregida (A_c) que para cada instante (i) está definida en función del área media (A_m): $A_{c_i} = \frac{A_m}{1-\epsilon_i}$ donde el área media es: $A_m = \frac{A_s+4A_c+A_i}{6}$

Al medir el área media, se le da mayor importancia al diámetro medio, pues durante la deformación, es este el que más se modifica. Habiendo corregido el área para cada instante de la prueba, ya se puede graficar la resistencia a la compresión (σ) contra la deformación unitaria (ϵ) para cada instante (i) del experimento:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A_{c_i}} \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \quad \epsilon_i = \frac{\delta_i}{H_{prom}}$$

Cohesión (c).

Con los valores de la resistencia máxima de cada una de las muestras, la cohesión se calcula directamente de esta prueba de compresión uniaxial, simplemente dividiéndose el valor máximo de carga q_r entre 2.

Unidad	σ [Kg/cm ²]	σ [MPa]	C $\left[\frac{kg}{cm^2} \right]$
E2	5.119	0.502	2.559
E3	1.883	0.185	0.942
E4	0.610	0.060	0.305

Tabla 15. Valores máximos de Compresión Simple y de Cohesión.



- Se pesaron 3 cápsulas contenedoras, cada una para las tres muestras correspondientes a las unidades E2, E3 y E4. Así se obtiene el peso de la cápsula (W_{cap}) para cada muestra.
- Se colocó cierta cantidad del material producto del tallado de cada probeta en su respectiva cápsula, así se obtiene el peso de la cápsula más el peso el material húmedo (W_{cap+SH}) correspondiente a cada unidad.



Fig. 40. Procedimiento para obtener el Peso Específico y el Contenido de Agua.

- Las tres cápsulas se colocaron en un horno a 105° centígrados durante 24 horas.
- Se pesan de nueva cuenta las tres cápsulas con material y así es como se obtuvo el peso de la cápsula más el peso del material seco (W_{cap+SS}).
- La expresión matemática para obtener el contenido de agua es un porcentaje de la relación del peso del agua en la muestra sobre el peso del material seco:

$$\omega\% = \frac{W_{agua}}{W_{seco}} = \frac{W_{cap+SH} - W_{cap+SS}}{W_{cap+SS} - W_{cap}}$$

Unidad	W_{cap} [g]	W_{cap+SH} [g]	W_{cap+SS} [g]	W_{agua} [g]	W_{seco} [g]	$\omega\%$
E2	113.72	179.16	175.27	3.89	61.55	6.32
E3	117.08	154.06	150.37	3.69	33.29	11.08
E4	113.87	209.49	207.33	2.16	93.46	2.31

Tabla 19. Valores utilizados para obtener el contenido de agua de las muestras.

Ángulo de fricción (ϕ).

Para establecer los valores del ángulo de fricción, (sin haberse realizado pruebas de compresión triaxial) se tomaron como referencia valores de un estudio



realizado en la zona poniente de la Ciudad de México (Deméneghi y Sanginés, 2000) teniendo en consideración la granulometría de las unidades, su resistencia a la compresión y cohesión además de los valores teóricos considerados por varios autores para el tipo de litología y tamaño de los granos en el caso del material no consolidado y depósitos vulcano-sedimentarios, especialmente de tobas.

Así, se tomaron en cuenta los valores expresados en la tabla 20, junto con una recopilación de los valores finales obtenidos de las pruebas de laboratorio realizadas para las unidades geotécnicas ensayadas del talud “Escuela” y para los valores de la unidad no ensayada (E1), se infirieron en base a los valores obtenidos y a su granulometría y grado relativo de resistencia y consolidación.

Unidad	σ $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	c $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	γ_{roca} $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	γ_s $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	ω %	n (%)	ψ (°)
E1	6.0	3.0	1.5 - 1.8	2.2 - 2.5	10 - 20	25 - 30	38
E2	5.119	2.559	1.35	2.25	6.32	43.93	36
E3	1.883	0.942	0.95	2.47	11.08	62.09	34
E4	0.610	0.305	1.18	2.54	2.31	54.73	32

Tabla 20. Propiedades físicas y mecánicas de las unidades del talud Escuela.

4.3 Análisis de Estabilidad de Taludes.

Para realizar el análisis de estabilidad de los taludes más representativos, se utilizaron dos programas de cómputo de amplia aplicación en la geotecnia, el *ROCKPACK III* y el *SLIDE*. El primero de ellos utiliza un análisis cinemático simple, suponiendo que los bloques son continuos y que las unidades en general cumplen con el comportamiento de una roca, mientras que el segundo supone superficies circulares típicas en taludes tipo suelo.

El *ROCKPACK III* analiza los tipos de falla plana y en cuña, mientras que el *SLIDE* sirve para el mecanismo rotacional (ver apartado 3.2.2). La razón por la que se utilizan ambos análisis es porque aunque el fracturamiento es escaso, en puntos específicos de los taludes, condiciona la estabilidad, y las unidades en general, se comportan como suelos, lo cual se corrobora con los resultados de resistencia σ de las unidades ensayadas (> 1 MPa).



Cada uno de los programas tiene características adicionales, pero no es objetivo de este trabajo presentarlas, lo que se busca es plantear las condiciones más desfavorables con los datos obtenidos. A continuación, se explican a grandes rasgos, la función principal de cada uno de los programas.

ROCKPACK.- Utiliza el análisis cinemático simple (Wyllie y Mah, 2005), que tiene como elementos principales el ángulo de fricción, el arreglo geométrico de los planos de discontinuidades y la geometría misma del talud. Φ se representa en los estereogramas como un círculo donde el valor se incrementa hacia el centro del estereograma, mientras que la orientación de talud y de las familias de discontinuidades se representan como planos. Al trazado de estos elementos se le llama prueba de Markland. La falla de cada tipo se da cuando se cumplen las condiciones expresadas en la figura 41, donde la orientación del talud es E-W.

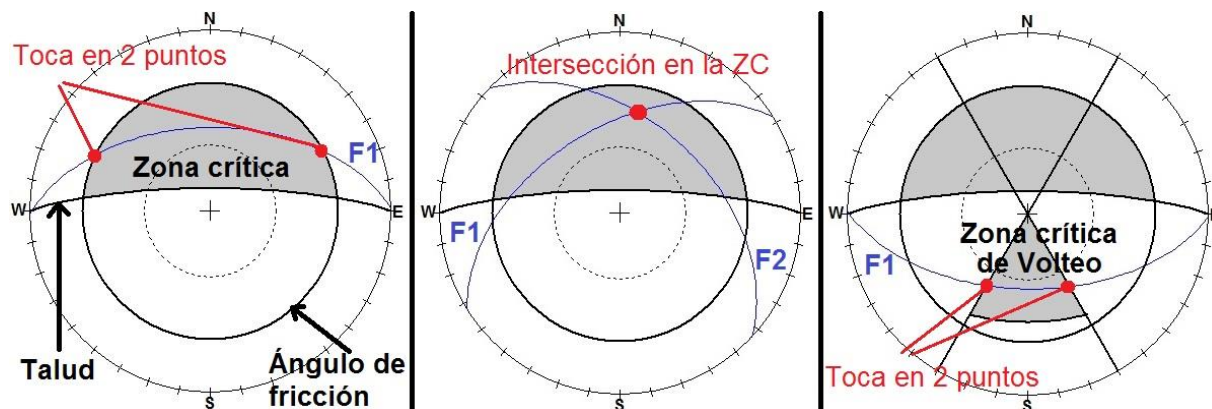


Fig. 41. Esquemas donde se aprecian los mecanismos de falla plana, de cuña y por volteo.

SLIDE.- Usa el análisis por fallamiento en superficies rotacionales, típicas en taludes tipo suelo. Utiliza métodos diversos, la teoría de estos métodos es sumamente extensa y no es la intención de este trabajo explicarla, pero a grandes rasgos podemos resumirlo de la siguiente manera: El bloque que se mueve, al hacerlo en una superficie circular, posee un centro de rotación "O" con un radio "R" y este bloque se divide en un número "n" de rebanadas o dovelas, donde el análisis se realiza al definir las fuerzas entre las dovelas y de estas con el talud. Con los elementos que intervienen en cada dovela, hay distintos tipos de análisis. Por ejemplo, el método de Bishop adapta la expresión del factor de seguridad con la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{Fr}{Fa} = \frac{\Sigma[c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \varphi] \left[\frac{1}{M_i(\theta)} \right]}{\Sigma[W_i \sin \theta]}; \quad M_i(\theta) = \cos \theta \left(1 + \frac{\tan \varphi \tan \alpha}{FS} \right)$$

Donde los valores de $\tan \varphi / FS$ se obtienen de modelos graficados donde se plasman valores de $M_i(\theta)$ contra valores de θ .

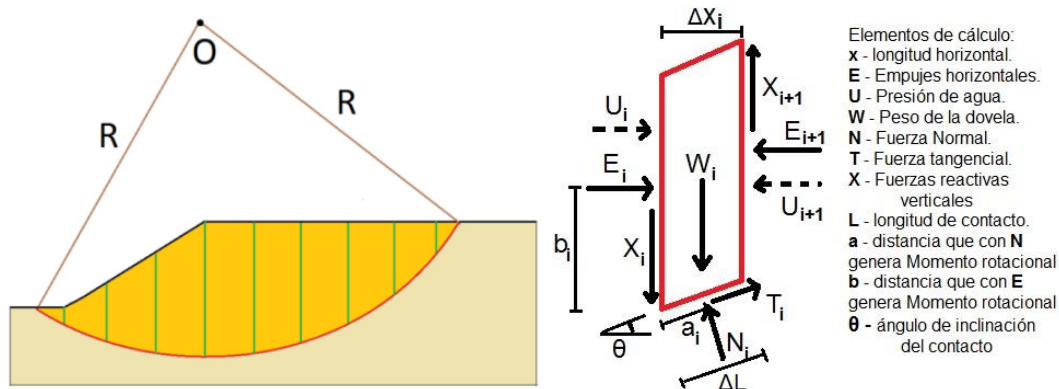


Fig. 42. a) Esquema simplificado de los elementos utilizados para el análisis por falla rotacional.
b) Fuerzas que influyen en cada una de las n_i dovelas.

Pueden considerarse varios horizontes existentes, con sus respectivos valores de coeficiente de fricción, cohesión y peso específico (φ , c , γ). El fin del programa es calcular el factor de seguridad para todas las posibles superficies circulares que puedan graficarse para cada uno de los posibles centros de rotación expresados en una matriz de puntos. El resultado es el esquema de las superficies que se desee conocer (aquellas con factor ≤ 2 , por ejemplo) y la dispersión isométrica de los valores del factor de seguridad en la matriz de los centros de rotación.

Adicionalmente pueden establecerse diversas consideraciones, tanto para las factores condicionantes del talud, como la disposición, inclinación y espesor de los estratos presentes y red de flujo de agua subterránea; así como para factores desencadenantes, como cargas dinámicas, cálculo de cargas sísmicas (a partir del coeficiente sísmico de la región) y adicionalmente permite hacer el análisis de estabilidad con la disposición de instrumentos de soporte artificial en el talud. En este trabajo, sólo se usan los datos obtenidos que se mencionaron anteriormente, además de una suposición adicional que se explica más adelante: la hipotética saturación de las unidades.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Como se había mencionado en el apartado de geología estructural, la cantidad de datos levantados es muy baja en comparación con las dimensiones generales de los taludes, en especial de los más representativos, pero eso no es motivo para descartar el fracturamiento plano, en cuña y por volteo de estos taludes, por lo que se toma en cuenta también el análisis de los taludes bajo la suposición de que se comportan como roca. Ahora veremos los resultados arrojados del análisis de estabilidad, deteniéndonos en cada uno de los tres taludes representativos, observando primero el análisis realizado como roca (*ROCKPACK III*) y posteriormente como suelo (*SLIDE*) el cual parece ser es el más adecuado.

Aunque los tres taludes tienen un solo rumbo preferencial de sus fracturas, para cada talud se remarcan las tres direcciones principales para contemplar las posibles direcciones de cuñas, aunque estas sean muy escasas.

Talud Escuela.

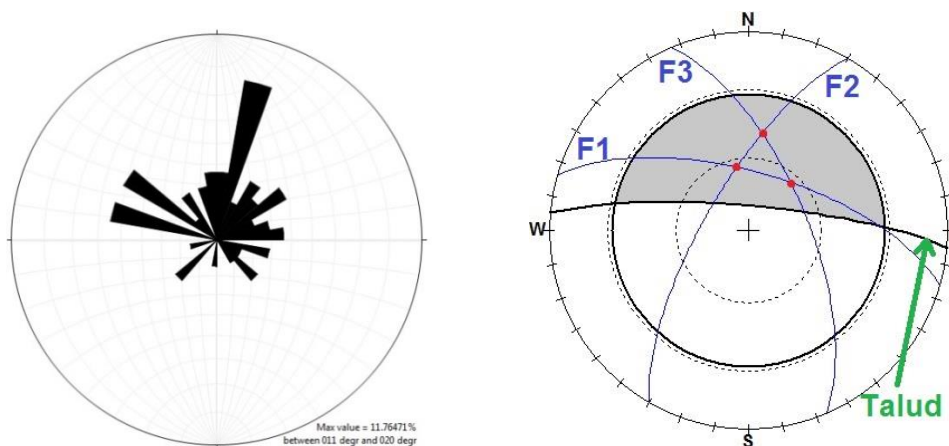


Fig. 43. Roseta de rumbos y análisis con ROCKPACK del talud Escuela.

Las fracturas afectan principalmente a la unidad E2, y las fracturas de la unidad E3 se deben al fallamiento por resistencia cuando pierde sostenimiento de la unidad inferior, E4. Además del sistema principal $15^{\circ}/70^{\circ}$ que es muy similar a la orientación del talud, $05^{\circ}/80^{\circ}$ (figura 43) y que forma fallamiento en superficies planas que son las predominantes, también se grafican otras dos familias no tan importantes como la primera, pero que influyen en algunas zonas específicas, estas son $300^{\circ}/60^{\circ}$

y 60°/65° que forman cuñas entre sí y con la familia anterior, sus vectores tiene una inclinación que varía de 60° a 70° y direcciones de 350°, 10° y 40° respectivamente.

Estructura	Azimut	Echado	Plana	Cuña	Volteo
Talud	05°	85°	-	-	-
F1	15°	70°	SI	Con F2 y F3	NO
F2	300°	60°	NO	Con F1 y F3	NO
F3	60°	65°	NO	Con F1 y F2	NO

Tabla 21. Síntesis del comportamiento de las familias de discontinuidades en el Talud Escuela.

Talud Caídos.

Este talud tiene una cantidad muy baja de fracturas, poco más de veinte en un talud de 250 metros de lado, y la mayoría de ellos están en una sola Unidad geotécnica, y como se aprecia en la roseta de la figura 44, forma sistemas de fallamiento plano para las discontinuidades de rumbo similar al echado del talud, es decir, $350^\circ \pm 20^\circ / 65^\circ$, este es el que afecta principalmente al talud, mientras que también tenemos un sistema de cuñas formado por este último en conjunto con la familia $320^\circ/70^\circ$ que nos da cuñas de rumbo 340° con su vector buzando unos 65° .

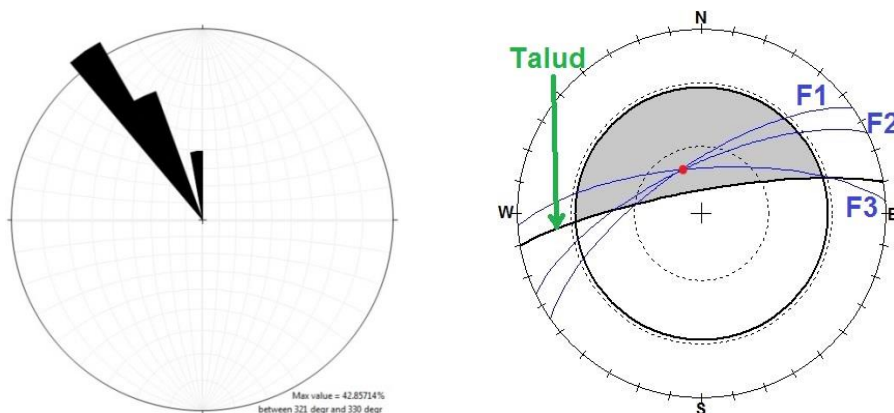


Fig. 44. Roseta de rumbos y análisis con ROCKPACK del talud Caídos.

Estructura	Azimut	Echado	Plana	Cuña	Volteo
Talud	350°	85°	-	-	-
F1	325°	65°	NO	Con F2 y F3	NO
F2	335°	65°	NO	Con F1 y F3	NO
F3	355°	70°	SI	Con F2 y F3	NO

Tabla 22. Síntesis del comportamiento de las familias de discontinuidades en el Talud Caídos.

Talud Alto.

En la roseta de la figura 45 son evidentes las familias $140^{\circ}/70^{\circ}$ y la $70^{\circ}/65^{\circ}$, mientras que adicionalmente se dibuja una que es $100^{\circ}/70^{\circ}$ de modo de condensar las familias entre las dos anteriores. Estas familias en el talud cuya orientación es $135^{\circ}/80^{\circ}$ forman cuñas cuyos vectores tienen rumbos de 90° , 105° y 125° con una inclinación promedio de 70° , pero el mecanismo principal en este talud es el que tiene rumbo similar al del talud y forma desde luego, fallamiento plano.

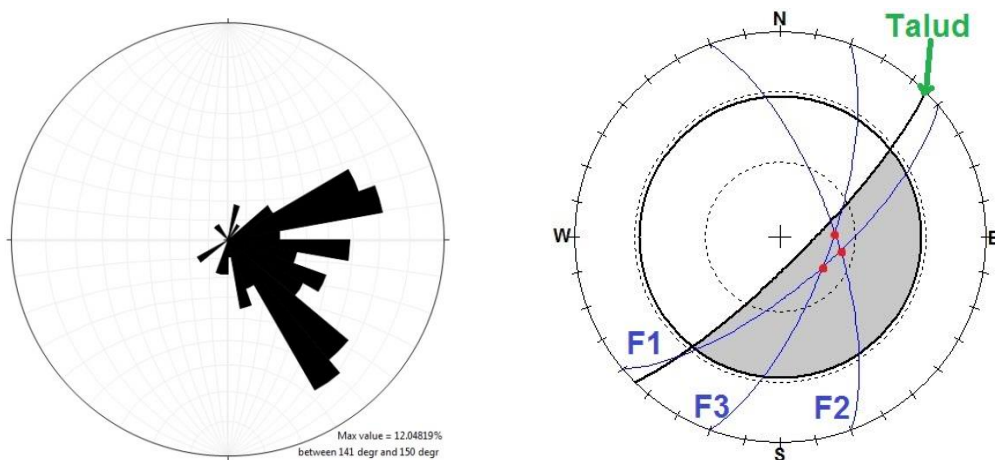


Fig. 45. Roseta de rumbos y análisis con ROCKPACK del talud Alto.

Estructura	Azimut	Echado	Plana	Cuña	Volteo
Talud	135°	85°	-	-	-
F1	140°	65°	SI	Con F2 y F3	NO
F2	70°	65°	NO	Con F1 y F3	NO
F3	110°	70°	NO	Con F2 y F3	NO

Tabla 23. Síntesis del comportamiento de las familias de discontinuidades en el Talud Alto.

Para todos los casos, las cuñas son de orientación tan similar a la inclinación de las fracturas, que cualquier cuña dada en el talud, será en la misma dirección de la mayoría de los bloques de falla plana y el volumen de cada cuña será siempre menor al del bloque plano que tenga la misma orientación que su vector de salida.

Análisis de bloques específicos por la teoría del equilibrio límite.

El análisis consiste en plantear el bloque inestable y el talud en un diagrama de cuerpo libre, donde se calcula por medio de las fuerzas que intervengan sobre el

bloque, el factor de seguridad ya definido con anterioridad. Para el caso más simple, el fallamiento plano, el método es como sigue: Dadas las variables de altura (H), inclinación de la discontinuidad (θ), inclinación del talud (ψ), peso específico del bloque (γ), cohesión (c) y ángulo de fricción de la roca (ϕ), expresadas en la figura 46, el procedimiento para realizar el análisis es el siguiente: Encontrar (T), (t), (L) y (h) para obtener el Área (A):

$$T = \frac{H}{\tan\theta}; \quad t = \frac{H}{\tan\psi}; \quad h = \text{sen}\theta(T - t); \quad L = \frac{H}{\text{sen}\theta}$$

$$A = \frac{1}{2}hL = \frac{\text{sen}\theta(T - t)H}{2\text{sen}\theta} = \frac{(T - t)H}{2} = \frac{H^2}{2\tan\theta} - \frac{H^2}{2\tan\psi} = \frac{H^2}{2\tan\theta} - \frac{H^2}{2\tan\psi}$$

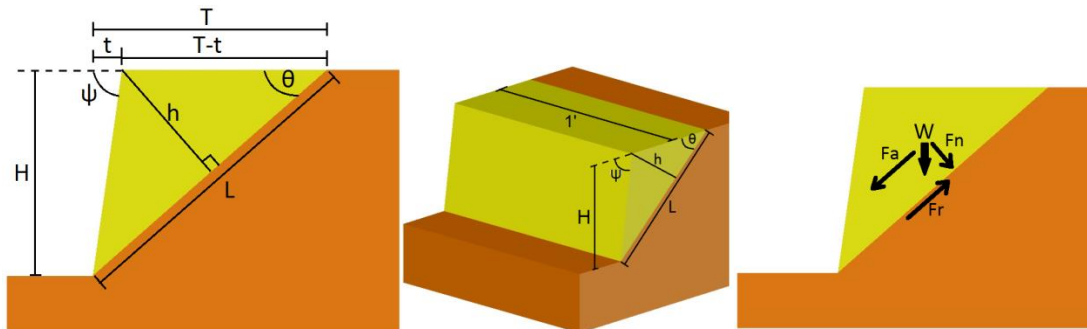


Fig. 46. Esquema donde se aprecian los elementos para el análisis de equilibrio límite.

Una vez obtenida (A), se puede obtener el Volumen del bloque inestable: $V = A 1' [m^3]$, donde 1' es el llamado "talud unitario" que es la distancia longitudinal del talud, si se analiza un bloque específico, es entonces el ancho de dicho bloque. El peso del bloque se calcula multiplicando por el peso específico de la roca: $W = V\gamma [Ton]$. Las fuerzas actuantes sobre del bloque son la Fuerza activa (Fa), Fuerza normal (Fn) y Fuerza resistiva (Fr), estas se calculan de la siguiente manera:

$$Fa = W\text{sen}\theta; \quad Fn = W\text{cos}\theta; \quad Fr = c a + Fn \tan\phi = ca + (W\text{cos}\theta)\tan\phi$$

Donde (a) es el área del plano de contacto entre el bloque y el talud, este se calcula con la expresión: $a = L \times 1'$. Cuando estamos en un medio saturado, es necesario calcular la fuerza "U" (que se resta de $W \text{cos}\theta$, cuando esta se conoce). Así, el factor de seguridad se calcula como el cociente de las fuerzas resistivas (Fr) sobre las activas (Fa):

$$FS = \frac{Fr}{Fa} = \frac{c a + (W \cos\theta) \tan\phi}{W \sin\theta}$$

El procedimiento es el mismo para cualquier bloque, lo que cambia son las condiciones geométricas (H), (θ) y (ψ), y las propiedades índice (γ), (c) y (ϕ) de las unidades presentes en el bloque. Antes de analizar los resultados, cabe resaltar que el valor del ancho del talud, llamado $1'$, no afecta el valor del factor de seguridad, pero es útil cuando se quiere considerar el volumen exacto del bloque inestable.

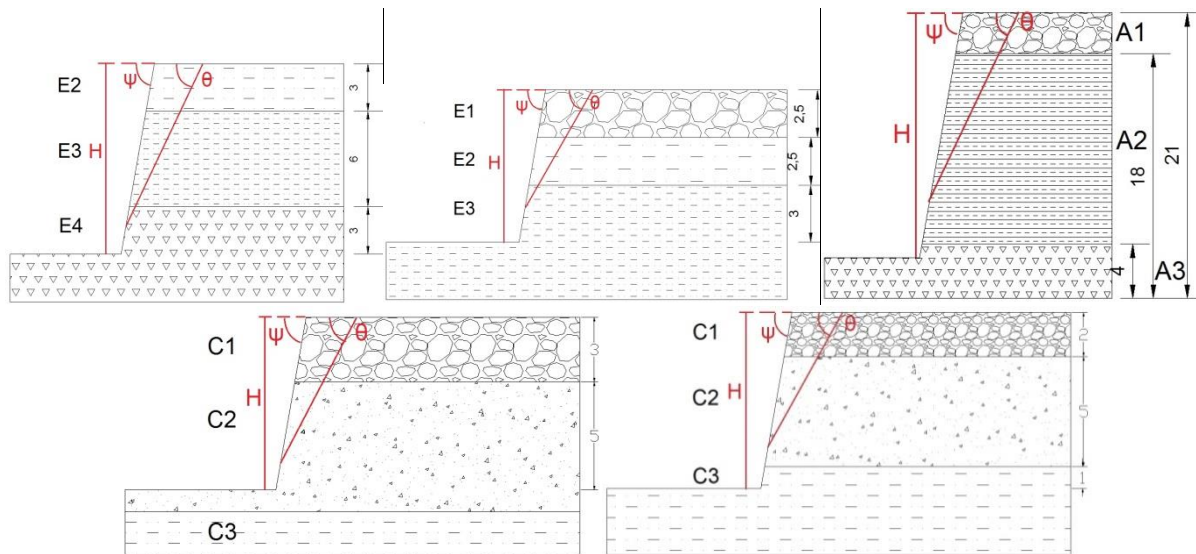


Fig. 47. Esquemas de la distribución de los elementos para el análisis de equilibrio límite para: la parte más alta del Talud Escuela, la concavidad del Talud Escuela, el Talud Alto, la concavidad del talud Caídos y la parte más alta del Talud Caídos.

Al observar la inclinación promedio de las discontinuidades presentes en los taludes, se observa que es mucho mayor que el ángulo de fricción de cualquiera de las unidades presentes (incluso que cualquier roca) por lo que es evidente que si la estructura es continua a través del talud y no hay elemento que sirva de sostén, el bloque ya ha deslizado. Por ello, el análisis de estabilidad en este caso, se enfoca a aquellos donde la cohesión aún influye, ya que si la fractura no es continua desde la cima hasta la cara del talud, la estabilidad depende de las fuerzas cohesivas.

Cuando la cohesión ya no actúa sobre el bloque, queda condicionado solamente por el valor del ángulo de fricción, y como se ha establecido, la mayoría de las discontinuidades son de gran ángulo, entonces, una vez que el material pierde



toda su cohesión, este falla. La tabla 24 presenta los 5 bloques más representativos de cada uno de los tres taludes estudiados a detalle, donde se supone que la cohesión aún actúa sobre los bloques. Esta tabla además funciona como un análisis de sensibilidad que muestra que parámetros influyen mayormente en el Factor de Seguridad. Para los cálculos se usó un valor de cohesión que fuese representativo de todas las unidades, así se tomó el 50% del valor promedio de la suma de las unidades más resistentes, que redondeado da un valor de 1 kg/cm².

#	H	θ	ψ	c	φ	1'	γ	T	t	L	a	h	A	V	W	Fa	Fn	Fr	FS
Es cue la	8.0	80.0	85.0	1.0	37.0	1.0	1.4	1.4	0.7	8.1	8.1	0.7	2.8	2.8	3.8	3.8	0.7	8.6	2.28
	9.0	76.0	85.0	1.0	36.0	1.0	1.3	2.2	0.8	9.3	9.3	1.4	6.6	6.6	8.2	7.9	2.0	10.7	1.35
	10.0	72.0	86.0	1.0	35.0	1.0	1.2	3.2	0.7	10.5	10.5	2.4	12.7	12.7	15.3	14.6	4.7	13.8	0.95
	11.0	68.0	87.0	1.0	34.0	1.0	1.5	4.4	0.6	11.9	11.9	3.6	21.3	21.3	31.9	29.6	12.0	19.9	0.67
	12.0	64.0	87.0	1.0	33.0	1.0	1.0	5.9	0.6	13.4	13.4	4.7	31.3	31.3	31.3	28.2	13.7	22.3	0.79
Caí dos	8.0	50.0	80.0	1.0	35.0	1.0	1.3	6.7	1.4	10.4	10.4	4.1	21.2	21.2	27.6	21.1	17.7	22.9	1.08
	7.5	55.0	81.0	1.0	34.0	1.0	1.3	5.3	1.2	9.2	9.2	3.3	15.2	15.2	19.6	16.1	11.2	16.7	1.04
	7.0	60.0	83.0	1.0	33.0	1.0	1.3	4.0	0.9	8.1	8.1	2.8	11.1	11.1	14.0	12.2	7.0	12.6	1.04
	6.5	65.0	85.0	1.0	32.0	1.0	1.2	3.0	0.6	7.2	7.2	2.2	8.0	8.0	9.9	9.0	4.2	9.8	1.09
	6.0	70.0	87.0	1.0	31.0	1.0	1.2	2.2	0.3	6.4	6.4	1.8	5.6	5.6	6.8	6.4	2.3	7.8	1.21
Al to	15.0	50.0	80.0	1.0	35.0	1.0	1.0	12.6	2.6	19.6	19.6	7.6	74.6	74.6	74.6	57.1	47.9	53.1	0.93
	16.0	60.0	81.5	1.0	35.0	1.0	1.0	9.2	2.4	18.5	18.5	5.9	54.8	54.8	54.8	47.4	27.4	37.7	0.79
	16.7	66.7	82.5	1.0	35.0	1.0	1.0	7.2	2.2	18.1	18.1	4.6	41.6	41.6	41.6	38.2	16.5	29.7	0.78
	17.0	70.0	83.0	1.0	35.0	1.0	1.0	6.2	2.1	18.1	18.1	3.9	34.9	34.9	34.9	32.7	11.9	26.4	0.81
	18.0	78.0	84.5	1.0	35.0	1.0	1.0	3.8	1.7	18.4	18.4	2.0	18.8	18.8	18.8	18.4	3.9	21.1	1.15

Tabla 24. Cálculos realizados en Excel del método de equilibrio límite para falla plana.

Se observa que haciendo este análisis, el factor que más condiciona la estabilidad del talud (además de la cohesión) es la altura del talud, pues es en el talud “Alto” donde tenemos los valores menores de Factor de Seguridad, lo cual nos indica que en ese talud la cohesión juega un papel importante, pues de los tres taludes más representativos, es el que presenta menor cantidad y volumen de bloques caídos, lo cual también nos indica de manera indirecta que el fracturamiento en la parte más alta de este talud “Alto” es mínimo y en algunas partes, nulo.

Para buena parte de los bloques, el valor del F.S. está por debajo de 1, y los demás apenas y están por encima, de esto se deduce que las fracturas de gran ángulo medidas en los taludes sólo afloran en la cara del talud y no son continuas





hasta la cima de los mismos, pues si lo fueran, ya abrían caído. Esto es evidente al analizar los valores de F.S. del Talud “Alto”, que es el más estable de los tres y sin embargo, presenta los valores más bajos porque la mayoría de las estructuras fueron medidas en la parte de menor altura del talud, y la parte más alta casi no presenta fracturas, y las que eran continuas, hicieron que los bloques inestables cedieran.

Análisis de taludes con *SLIDE*.

Para este análisis, se usaron los valores de “ σ ”, “ ϕ ” y “ c ” obtenidos en el laboratorio, los cuales pertenecen a muestras inalteradas. Un análisis más realista del comportamiento de los taludes consiste en hacer la evaluación del factor de seguridad con otras consideraciones. Así pues, es conveniente hacer la suposición de cómo se comportan las Unidades con el medio saturado, esto debido al hecho de que las unidades se conforman por tobas poco consolidadas y en una gran precipitación estas pueden (durante algunos minutos) comportarse como un medio saturado. Para el caso de las unidades E2, E3 y E4 del talud Escuela, estas fueron tomadas de la cara del talud, (sólo se retiró la parte meteorizada), por lo que los valores obtenidos corresponden a las condiciones mecánicas más desfavorables.

Cabe recordar que a falta de análisis a detalle de los demás taludes, los valores de las unidades del talud Escuela se extrapolaron a las de los otros taludes, esto se hizo en base a la escala de resistencia relativa elaborada para el levantamiento de datos general. Además, cada análisis incluye el trazado de las superficies con menor factor de seguridad para cada caso, esto es de mucha ayuda sobre todo para saber que unidad o que sección del talud es la más vulnerable, y las figuras incluyen las alturas promedio de los estratos. Por último, se indica el valor de la superficie con menor Factor de Seguridad señalado también el centro de rotación.

Talud Escuela.

Este talud se dividió en dos secciones, debido a su inclinación. El primer perfil corresponde a la parte media, que es donde se encuentra la concavidad y el segundo pertenece a la parte final del talud que es la más alta.



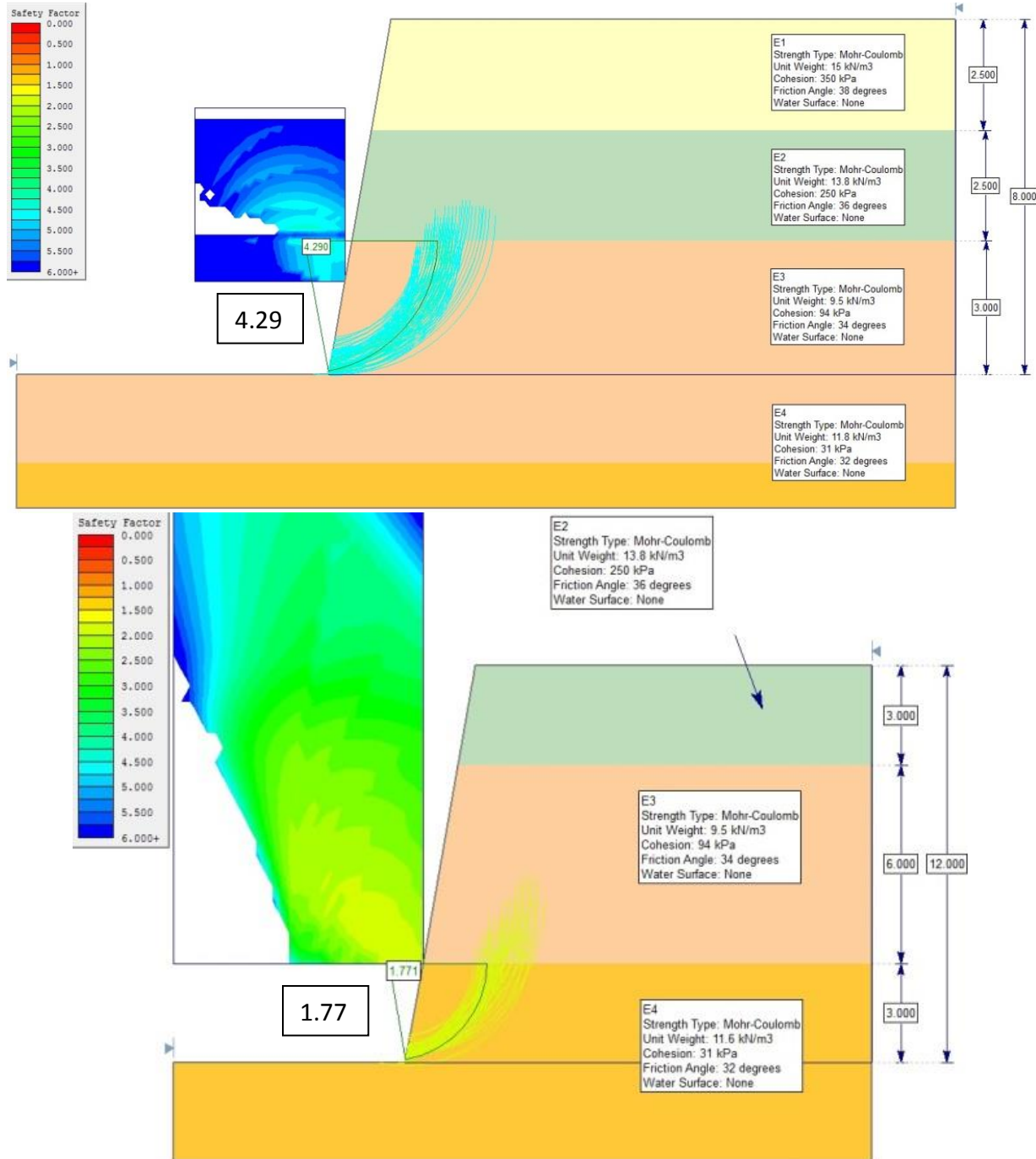


Fig. 48. Análisis con SLIDE del talud Escuela, con los parámetros máximos estimados.

Se observa que en la zona donde la unidad E3 está al pie del talud, este es mucho más estable, con los factores de seguridad más grandes y las superficies de deslizamiento más amplias, sobre todo si es un espesor considerable. Mientras que si es la unidad E4 la que está al pie del talud, las superficies son más pequeñas

limitándose casi exclusivamente a esta unidad y además el valor promedio del factor de seguridad se reduce considerablemente, aunque aún es bueno (> 1.5).

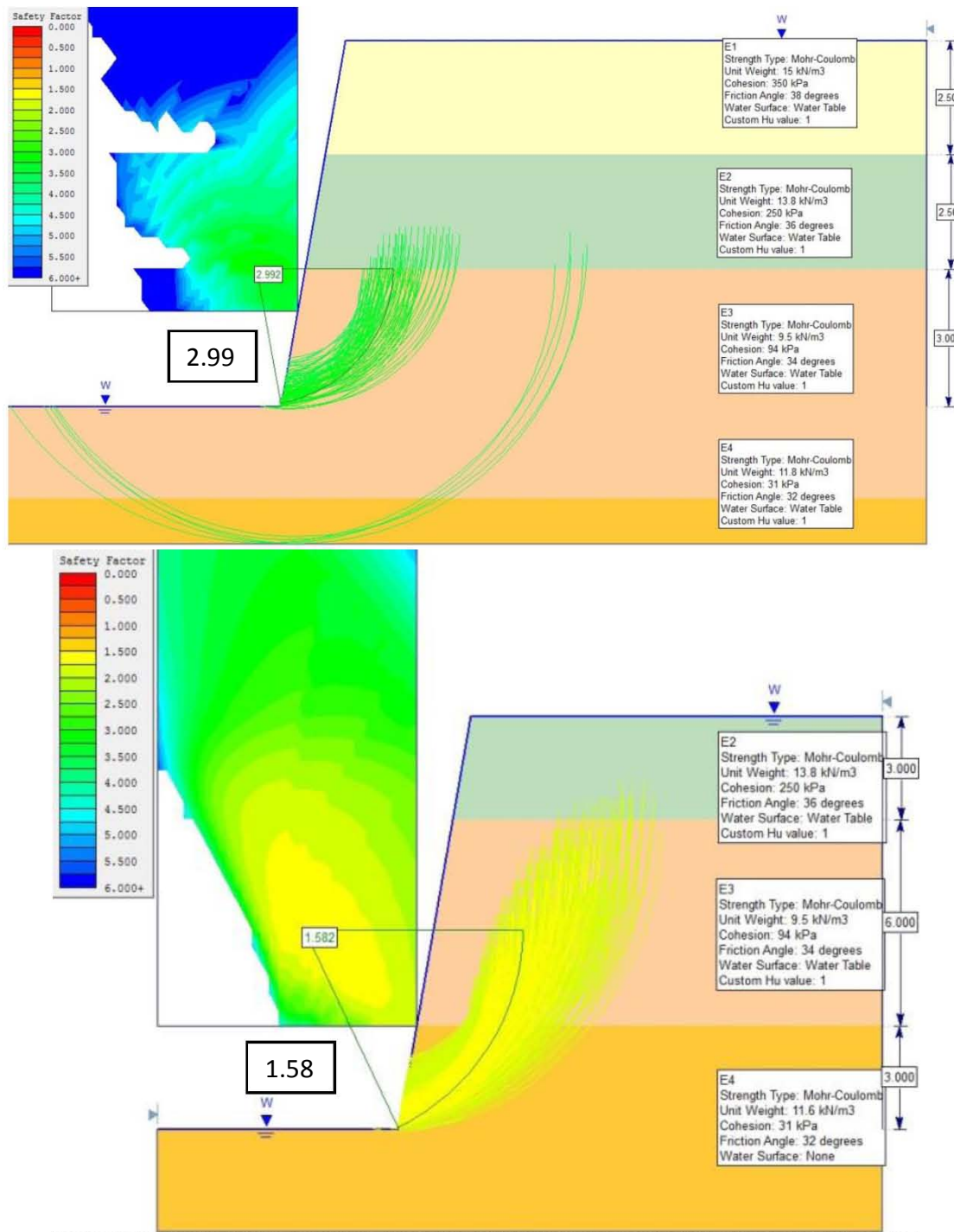


Fig. 49. Análisis con SLIDE del talud Escuela, con las unidades saturadas.

Pero recordemos que este primer análisis no contempla un medio saturado, el análisis siguiente se muestra en la figura 49. Aquí se observa que los factores de

seguridad son menores, al grado de al saturar también la unidad E4 en la parte final del talud, el factor de seguridad queda por debajo de uno (0.7), lo que significa que si esa parte está se satura por completo, dará como resultado el deslizamiento de las capas, pero por la granulometría de la unidad E4, que incluye finos (> 15%), su permeabilidad efectiva debe ser baja y por tanto difícilmente se saturaría en una lluvia, razón por la cual, se ve estable en campo y no se saturó en el análisis.

Talud Caídos.

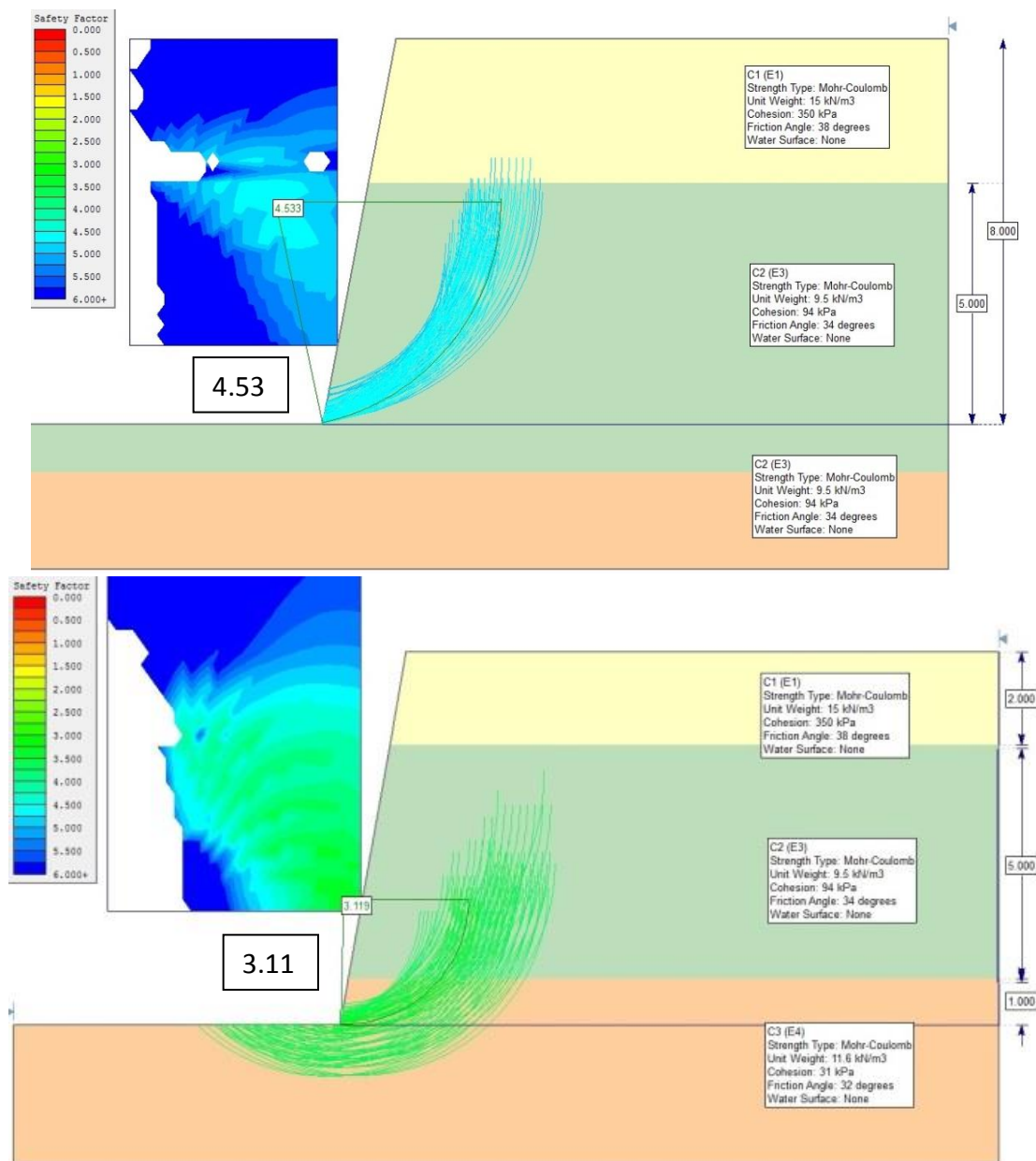


Fig. 50. Análisis con SLIDE del talud Caídos, con los parámetros máximos estimados.

Al igual que el talud anterior, en este se presenta el análisis en 2 perfiles independientes, por su longitud e inclinación. El primero (figura 50) es representativo del inicio hasta pocos metros después de la concavidad presente en el Talud, mientras que el segundo es más general, y sirve para el análisis del resto del talud, sobre todo para las secciones donde la unidad menos resistente presenta poco espesor al pie del talud, unos cuantos centímetros.

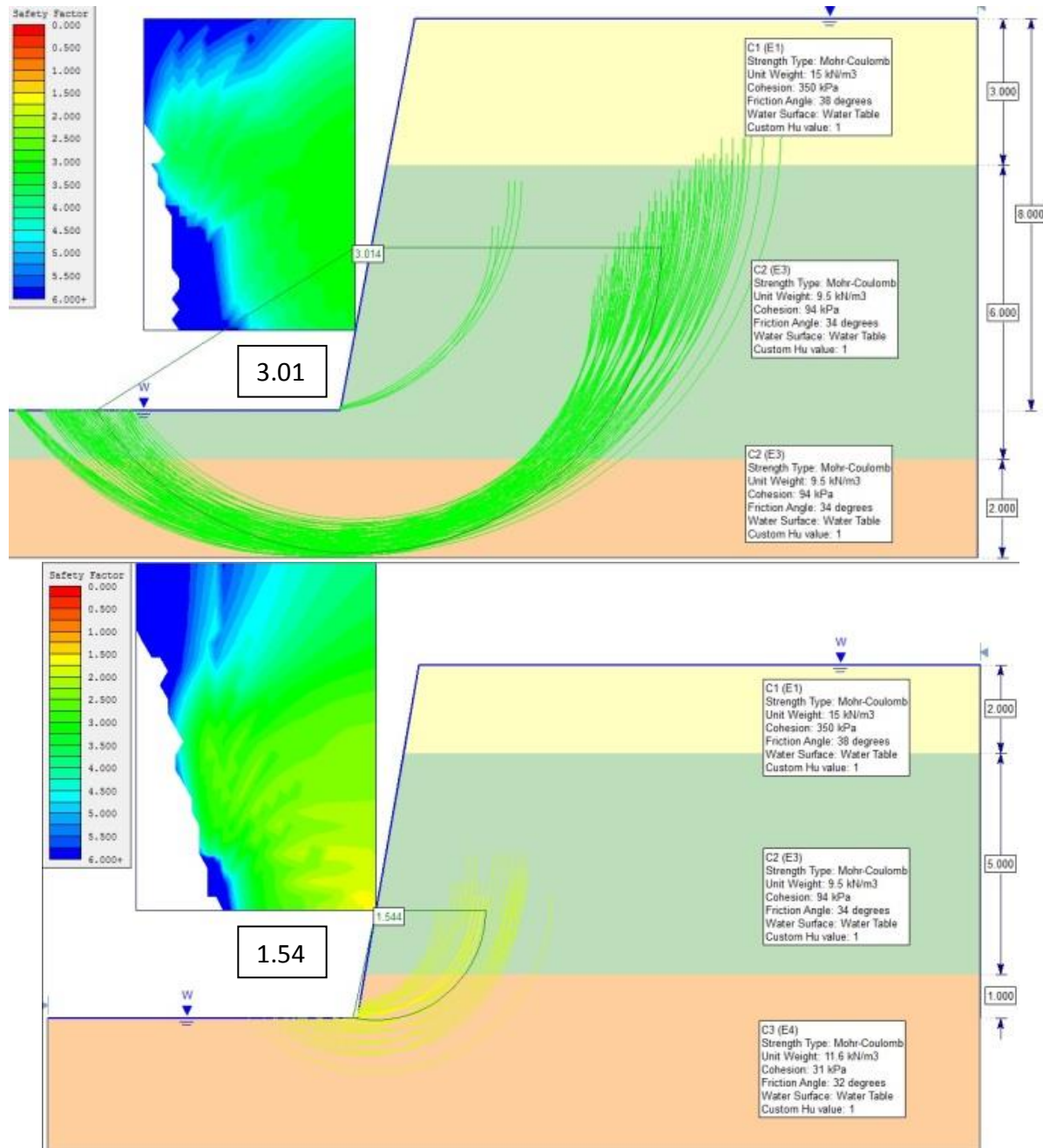


Fig. 51. Análisis con SLIDE del talud Caídos, con las unidades saturadas.



Se observa que cuando la unidad C3 no aflora en la cara del talud, las superficies de rotura susceptibles de darse en este talud son mayores y con un factor de seguridad mayor, mientras que en el caso general del talud, que es donde se “asoma” en la parte inferior la unidad C3, esta genera superficies de rotura más pequeñas que son mucho más susceptibles de deslizar que cuando C3 no aflora. En este primer análisis los valores son muy altos, desde luego por no considerarlos saturados, además de que la dimensión vertical de este talud, es la menor de los tres taludes más representativos.

Haciendo el análisis con las unidades saturadas, el comportamiento es muy similar al análisis anterior. La parte del talud donde la unidad inferior (C3) aflora al pie del talud, genera superficies donde la componente rotacional afecta principalmente a dicha unidad y afloran al pie, y es aquí donde el factor de seguridad es menor. Mientras que para el otro caso (primero de la figura 51) la unidad C2 ofrece mayor resistencia y superficies más amplias de deslizamiento profundo y el factor de seguridad es mayor. Los valores del factor de seguridad son buenos (> 1.5), pero distan de lo ideal (≥ 2), además hay que tener en cuenta es este talud, la presencia de fracturas verticales que generan un bloque que se describe en el tema 5.2.

Talud Alto.

A diferencia de los taludes anteriores, este no tiene inclinación, es decir, su nivel base es prácticamente horizontal, además de que la parte más alta, tiene los estratos casi horizontales y no es tan larga como el resto del talud, y esto se refleja en el hecho de que la capa menos resistente posee el mismo espesor durante todo el talud, por lo que no es necesario hacer más de un perfil para el análisis de estabilidad, que corresponde a la parte más alta de este talud.

Como en los casos anteriores, es el estrato de menor resistencia es el que genera las superficies de rotura con el menor factor de seguridad, tal como se aprecia en la figura 52, donde la mayoría de las superficies con el menor valor del factor de seguridad tienen su parte rotacional en la unidad A3 y generan deslizamiento profundo, el cual nos da valores por encima de lo aceptable.



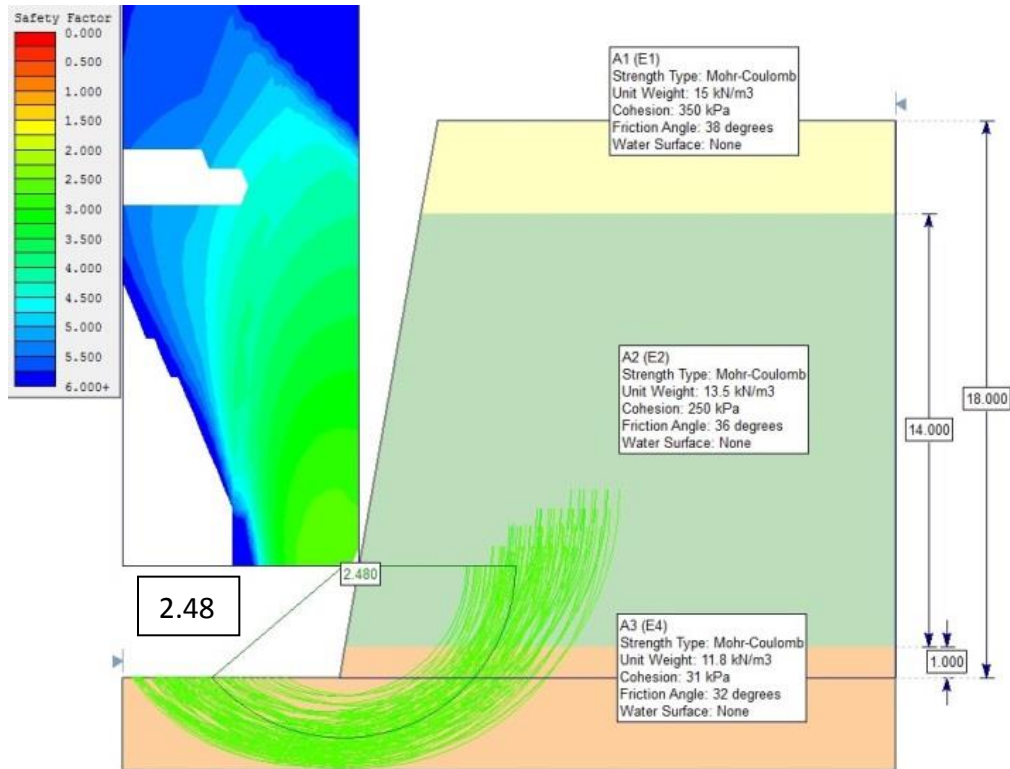


Fig. 52. Análisis con SLIDE del talud Alto, con los parámetros máximos estimados.

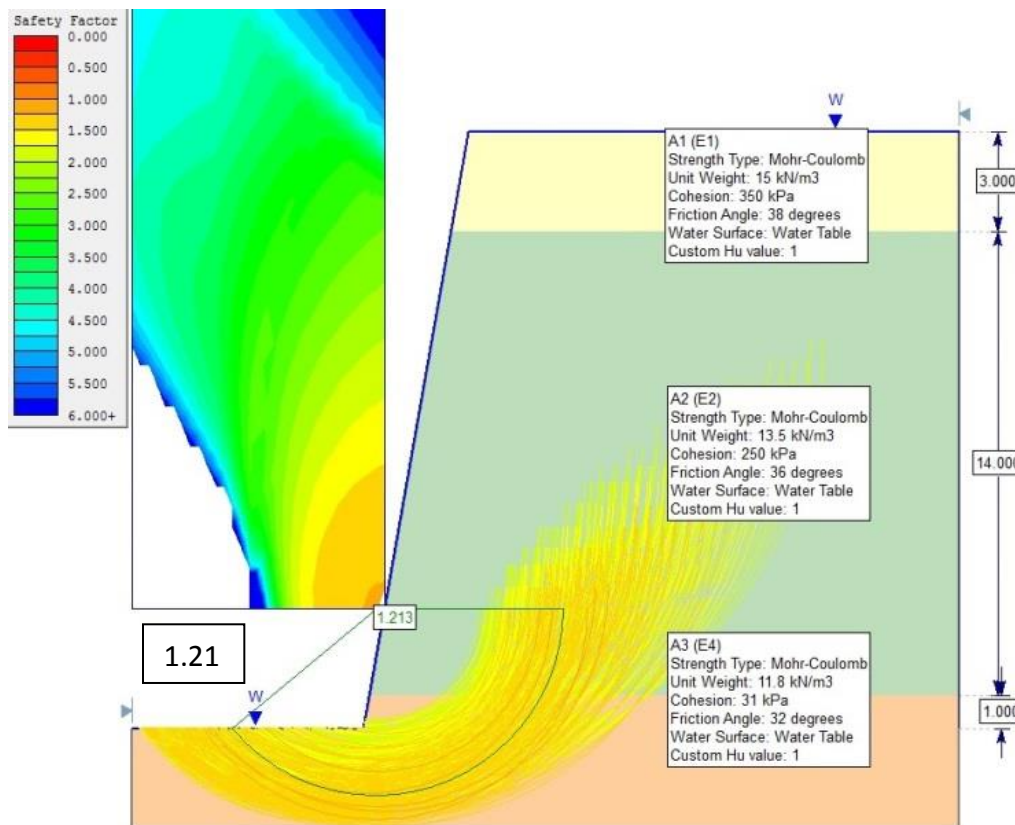


Fig. 53. Análisis con SLIDE del talud Alto, con las unidades saturadas.



Cuando analizamos el talud con las Unidades saturadas, podemos ver que, aunque el espesor de la unidad menos competente es muy pequeño, la altura del talud justo en su parte central hace que el factor de seguridad sea relativamente pequeño en comparación con el talud anterior, el Caídos. Aun así el valor mínimo del factor de seguridad para este caso (figura 53), está ligeramente por debajo de lo aceptable para un talud permanente (1.3), además recordemos que este talud presenta escaso fracturamiento y por tanto, los valores para las unidades de este talud seguramente están ligeramente subestimados.

5.1 Mecanismos de falla encontrados.

Las pocas fracturas presentes en los taludes generan fallamiento en superficies planas, las cuales tienen una inclinación promedio de apenas 10° a 15° menos que la inclinación de cada talud, y los mecanismos de falla en cuña son muy puntuales, además de que la mayoría son muy pequeños, con la excepción del caso del talud Caídos, e influyen poco en la estabilidad general de cada talud.

La mayoría de los mecanismos interpretados son aquellos que no pueden verse a simple vista, el comportamiento de las unidades, que es más como suelos que como rocas, hace evidente que el fallamiento rotacional es el que rige el comportamiento de los taludes de la zona, al menos teóricamente. Esto no quiere decir que las superficies de deslizamiento sean todas circulares y que abarquen toda la altura del talud, como se aprecia en los perfiles de análisis con SLIDE (figuras 48-53) la componente rotacional se concentra en las unidades menos competentes.

Esto en la realidad funciona de la siguiente manera: la capa menos competente va perdiendo resistencia, se va deslizando muy lentamente, conforme una parte, muy pequeña, de esa capa sobresale de la cara del talud, esta se erosiona, se disgrega y queda al pie del talud en partículas muy pequeñas, mientras el resto de esta unidad falla por esbeltez (parecido a la falla por pandeo). Al suceder esto, las unidades superiores van perdiendo su soporte inferior y van quedando bloques en *cantiléver* y también se van asentando de modo que la cima del talud se va hundiendo. La acumulación de volúmenes cada vez más grandes de estas capas



superiores hacen que en determinado momento se vea superada la cohesión de estas capas que quedaron voladizas o que se fueron asentando, fallen de forma casi paralela a la cara del talud, de ahí el origen de la mayoría de las fracturas halladas en la zona.

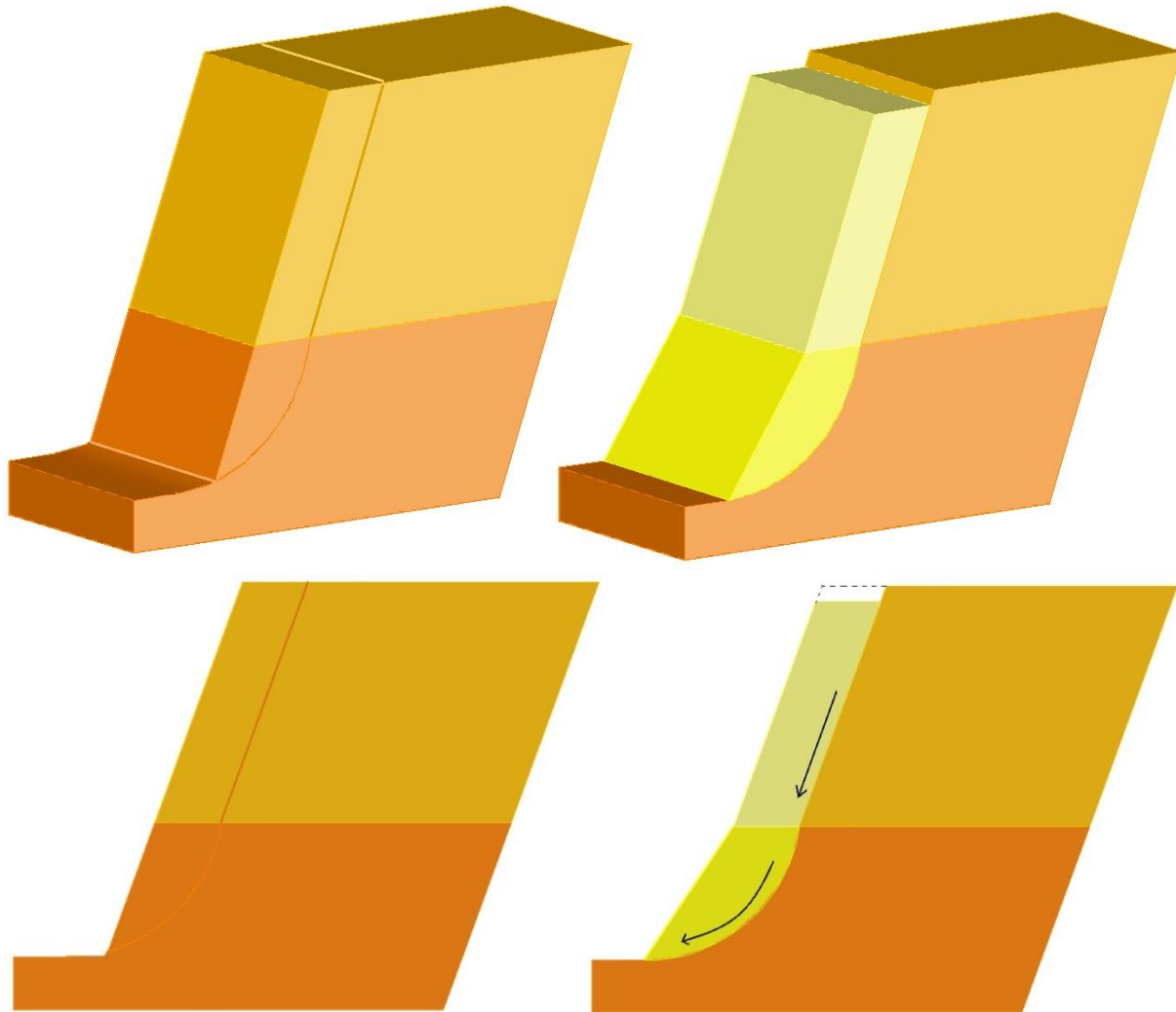


Fig. 54. Esquema que explica el mecanismo compuesto que predominan en los taludes.

Dicho de otra manera, el fallamiento rotacional de superficies muy pequeñas con factores de seguridad muy bajos localizadas en estratos de resistencia muy baja, son los que hacen perder el sostenimiento inferior a capas que fallan por resistencia una vez que sus fuerzas cohesivas no pueden resistir más, pero al ser fallas de inclinación similar a la del talud, estas no se deslizan de inmediato, sino que pueden quedar “atorradas” por el mismo peso de los bloques que se forman y estos a su vez



pueden fragmentarse en bloques más pequeños pues ahora están más expuestos al intemperismo, y estos nuevos bloques pueden fallar por falla plana, por pandeo o por volteo generando desprendimiento de bloques que, según sea el caso, puede ocasionar de nuevo el proceso de pérdida de sostenimiento de una tercera unidad por encima de las anteriores y desencadenar un fallamiento de bloques aún mayores, pues ahora la pérdida de las unidades inferiores es mayor; algo así como un efecto dominó.

5.2 Volúmenes de roca susceptibles a deslizar.

Como ya se explicó, los mecanismos de falla presentes son compuestos, lo que hace muy complicado estimar los volúmenes de roca inestable en los taludes. Además, antes de pensar en la inestabilidad en el talud, hay que tomar en cuenta la cantidad de bloques y partículas menores que están al pie de los taludes, principalmente del Talud Escuela (# 9) y el Caídos (# 10), que además, presentan oquedades considerables de unos 500 m³ donde el volumen de bloques caídos es muy grande. Este material, además de obstaculizar el libre tránsito por las aceras y generar un riesgo de rodamiento hacia la calle, se acumula en las cunetas de drenaje al pie de los taludes y las azolva, lo cual impide el correcto flujo del agua superficial lo que favorece el deterioro de las unidades inferiores que al meteorizarse, pierden resistencia e induce el inicio del mecanismo explicado en el apartado anterior.

Dicho de otro modo, el volumen de roca más inestable, sobre todo en los Taludes Escuela y Caídos, está condicionado por el espaciamiento de las fracturas que son casi paralelas a la cara del talud, pues es este el que condiciona la dimensión de los bloques que, al ser de inclinación similar al cuerpo del talud, pueden llegar a ser del tamaño de la parte expuesta con un espesor igual al del espaciamiento. Desde luego que el modo más preciso de delimitar el volumen de estos bloques es apoyándonos de la teoría del equilibrio límite.

Si se delimitan las zonas más vulnerables que son donde está este fallamiento presente, que como ya se sabe es donde la unidad al pie del talud es la menos competente, y si se toma en cuenta que el espaciamiento promedio en el talud





Escuela es de 40 cm y en el talud Caídos es de 50 cm entonces es posible estimar los siguientes volúmenes de roca susceptible de deslizar:

Talud Escuela. Cabe recordar que en la parte final del talud, que es donde E4 posee el mayor espesor, el factor de seguridad está en el rango entre lo mínimo y lo aceptable (1.5) y las 2 unidades por encima de la E4 en esa zona son sumamente vulnerables a la más mínima perturbación de ese equilibrio entre fuerzas resistivas y actuantes. Si la altura de las unidades E2 y E3 en esa zona es de 10 metros, la zona donde E4 está al pie del talud y aflora un espesor considerable (< 1 m) es de 150 metros a lo largo del talud, lo que hace que el frente del talud que es vulnerable es de unos 1500 m², y como el espaciamiento promedio es de 40 cm, el volumen aproximado de material inestable es de 600 m³, esto tan sólo considerando que la primera fractura inmediata haya cedido, pues si el fracturamiento es más profundo, este volumen puede fácilmente duplicarse.

En cuanto al talud Caídos, el espaciamiento es un poco más grande, de unos 50 cm, con una longitud de 150 metros, pero hacia el final del talud este disminuye su altura, pues la pendiente del trazo de la calle va aumentando, lo que hace que el frente del talud en esa zona vulnerable sea de 600 m², lo que aunado con el espaciamiento promedio en ese talud, que es de 50 cm, nos da un volumen aproximado de 300 m³, y como ya se explicó, esto bajo la suposición de que sea la primera fractura de cada sección del talud la que genere la inestabilidad, si es la segunda, el volumen se duplica prácticamente.

TALUD	Escuela	Caídos	Alto
Volumen Inestable	600 m ³	300 m ³	50 m ³

Tabla 25. Volúmenes de roca susceptibles a deslizar en cada uno de los 3 taludes representativos.

En este talud hay un bloque de dimensiones considerables, el cual es inestable, aunque la orientación casi vertical de las discontinuidades que lo delimitan hace que no tenga riesgo de deslizarse, sin embargo, si la base de este bloque se disgrega por la meteorización, o simplemente si algún agente ocasiona la separación



del bloque del talud, el bloque terminará volcando aunque la inclinación sea en dirección del talud, esto se aprecia en la figura 55.

El Talud Alto sólo presenta bloques inestables en la parte más alta, donde está la unidad A1, los cuales representan un área frontal de unos 100 m², y con el espaciamiento promedio de 50 cm, la inestabilidad es de 50 m³ aproximadamente. Además este talud presenta fracturas verticales (o casi) en pares que delimitan bloques, los cuales forman cuñas muy específicas, el primero inmediatamente al terminar la concavidad, este es de unos 10 m².

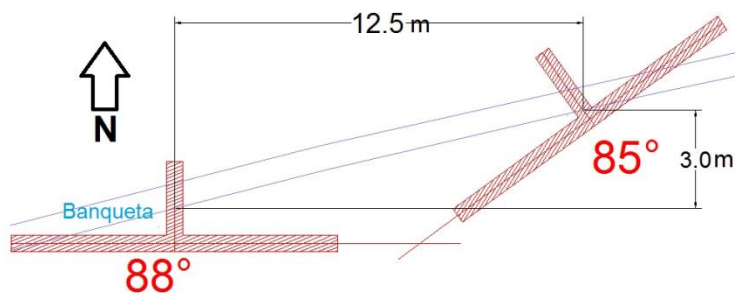


Fig. 55. Parte del mapa estructural que muestra un bloque en cuña del talud Caídos de 50 m³. La imagen muestra las discontinuidades que lo delimitan (vistas desde el norte sobre la banqueta).



6 - CONCLUSIONES.

1.- La zona de estudio perteneciente a la 3ª Sección del Bosque de Chapultepec se ubica en la zona geotécnica de Lomas, esto es debido a que forma parte de la ladera oriente de la Sierra de las Cruces que es el parteaguas occidental de la Cuenca de México. Así mismo, la litoestratigrafía presente en los taludes de la 3ª Sección corresponden a las unidades de los últimos eventos volcánicos de la formación Tarango, las cuales son en su mayoría tobas cristalo-vítreas y vítreo-cristalinas de composición ácida con un grado de consolidación de medio a bajo.

2.-El levantamiento estructural y su posterior análisis; sirve para afirmar que las fracturas expuestas en los taludes de la 3ª Sección del Bosque de Chapultepec, no presentan una dirección preferencial en su conjunto, por lo que no tiene relación con el comportamiento estructural de la falda centro-oriental de la Sierra de las Cruces descrita por García Palomo *et al.* (2008). Lo que si se aprecia es que las estructuras de primer orden, como las fracturas están relacionadas directamente con el rumbo de los taludes, lo cual nos indica que el rumbo de las fracturas coincide sensiblemente con el rumbo de la excavación de los mismos, esto se debe al reacomodo de esfuerzos locales, causado principalmente por la descompresión de los depósitos generado por el volumen de terreno retirado tras el proceso de excavación en la zona.

3.- Las pruebas de laboratorio a partir de las muestras inalteradas en el Talud Escuela demuestran ser confiables, pues se llevaron a cabo acorde a estándares de laboratorio (ASTM) y la obtención de las muestras fue minuciosa, conservando lo mejor posible las propiedades *in situ* de los depósitos, además de que los resultados obtenidos en estas pruebas son consistentes con valores estadísticos de tobas pertenecientes a la zona poniente de la Ciudad de México (Deméneghi y Sanginés, 2000). Pueden realizarse más estudios para afinar los resultados, mientras tanto, estos valores obtenidos sirven de muy buena referencia no solo para tobas, sino también para depósitos piroclásticos no consolidados de la zona centro poniente de la Ciudad de México, pues los valores de resistencia a la compresión simple están en el rango de valores de los suelos.





4.- La secuencia litoestratigráfica estudiada en la zona de taludes, no manifiesta el fracturamiento regional de la Sierra de las Cruces, ni ningún otro rasgo estructural es visible en las partes expuestas, esto se debe principalmente a que estas Unidades geotécnicas se comportan mecánicamente como suelos, y además, como lo muestran las pruebas de resistencia uniaxial, estas presentan cierto grado de cohesión, en magnitudes del orden hasta de 2.5 kg/cm^2 , haciendo que en términos geotécnicos, se clasifiquen como suelos cohesivos, principalmente arenosos con algo de grava y son mal gradados, cuyo porcentaje de finos (limos y/o arcilla) varía de 5% a 15%.

5.- Posterior a la excavación de los Taludes expuestos en la zona de estudio, ésta influyó en la estabilidad de las Unidades Geotécnicas caracterizadas, pertenecientes a las capas superiores de la formación Tarango, esto se dio al modificarse los esfuerzos naturales del terreno, principalmente los horizontales, esto ocasionó, además de la falta de carga por el volumen excavado de lo que ya se habló anteriormente, que se condicionara el tipo y orientación general del fracturamiento en la zona, aunque este no fue tan numeroso, pues además de lo reciente que son, el tipo de depósitos se comportaron de manera elástica “absorbiendo” gran parte de los esfuerzos regionales que pudieran estar presentes.

6.- Los depósitos más competentes que corresponden, en general, a los de granulometría más gruesa, son los que presentan el mayor grado de fracturamiento, esto se debe a que las unidades menos competentes se disgregan poco a poco sin llegar a manifestar fracturas, dejando en las unidades superiores bloques en *cantiléver* y haciendo que estas fallen por resistencia. Se concluye entonces que, a mayor resistencia de las unidades, mayor es el tamaño de los bloques que se pueden formar tras el fallamiento de la respectiva unidad. La primera medida para disminuir la inestabilidad es aminorar el deterioro de estas unidades poco competentes, que están casi siempre por debajo de unidades más competentes y al disgregarse comprometen su estabilidad.

7.- El análisis de estabilidad por falla plana y en cuña (*ROCKPACK III*); es muy restrictivo, pues no se puede tomar en cuenta el fracturamiento general de una





talud para el análisis de un sitio específico, además se debe tener en cuenta que las fracturas de ángulo mayor al ángulo de fricción, que son la mayoría, no han cedido por que no son continuas a lo largo de todo el talud, y cuando estas sean completamente continuas a todo lo largo del talud, inevitablemente cederán. Este funciona más como un análisis de sensibilidad donde se deduce que dada la alta inclinación promedio de la mayoría de las fracturas, estas deslizaran cuando el valor de la cohesión no sea suficiente para sostener el peso del bloque inestable, generalmente, cuando el valor de la cohesión sea menor de 1 kg/cm².

8.- El análisis de los taludes como tipo suelo (*SLIDE*) es más representativo del comportamiento general de estos, pues el tipo de depósitos y su resistencia mecánica corresponde a la de un suelo. Aún con las condiciones más desfavorables, es decir, las muestras obtenidas de la cara del talud y el análisis adicional realizado al considerar todas las unidades saturadas, da como resultado que los valores del factor de seguridad en todos los casos está por encima de lo aceptable para taludes permanentes ($FS < 1.3$) aunque algunos valores se quedan aún por debajo de un valor bueno, es decir, mayor de $FS = 1.5$, y sólo en las partes donde no aflora una Unidad geotécnica tan poco competente como la E4 (Talud Escuela), se tienen los valores óptimos de estabilidad, es decir, $F.S. \geq 2.0$.

9.- Para los casos de deslizamiento circular, se supuso la condición más desfavorable de que las unidades estuvieran completamente saturadas, esto para dilucidar el peor escenario, y aun así, todas las superficies teóricas de deslizamiento están por encima del valor de 1.5, un buen valor para taludes permanentes, pero se requiere precisar si es cierta la conjetura de que las unidades con porcentaje de finos mayor a 15% no se saturan en una lluvia, pues de no ser así, las secciones donde esta unidad presenta un espesor considerable, sobre todo la parte final del Talud Escuela, darían como resultado factores de seguridad ligeramente por debajo de 1, lo que haría a estas partes inestables tras una lluvia intensa y prolongada.

10.- La 3ª sección del Bosque de Chapultepec aunque se encuentra en la Zona I acorde a la zonificación geotécnica del valle de México, sigue siendo vulnerable a la acción de los sismos propios de la zona centro del país, y a pesar de





que el basamento ígneo no amplía los movimientos telúricos (tal como lo hacen los depósitos lacustres del valle de México), al hacer los cálculos de estabilidad, el F.S. disminuye haciendo que los valores que están un poco por encima de los aceptable (1.3), en un sismo estarán apenas unas centésimas por encima de 1.

Aun estando la mayoría de los valores por encima de lo aceptable, se ha demostrado que varios factores pueden disminuir esos valores, por lo que es imperativo tomar acciones para frenar y, en dado caso, revertir una posible inestabilidad general de los taludes, por lo cual se sugiere llevar a cabo las siguientes recomendaciones.

RECOMENDACIONES.

1.- El entendimiento geológico y geotécnico de la zona no puede completarse sólo con analizar los taludes de las vialidades de la 3ª sección del Bosque, se requiere un estudio también en los taludes y barrancas aledañas, como los que están cerca de Av. Constituyentes o en la colonia Lomas de Chapultepec. Estos últimos, al ser más grandes y ser ajenos a la influencia antropogénica, sirven como una mejor referencia del comportamiento natural de las unidades presentes en esta zona. Además de que para fines de investigación, el estudio de estas barrancas es el que permitirá definir con precisión la correlación estratigráfica entre los depósitos de la 3ª y la 2ª sección del Bosque, donde ya se tienen caracterizadas algunas minas antiguas que generaron grandes socavones. Además hace falta un dato confiable sobre la precipitación promedio, pues una lluvia intensa además de saturar temporalmente las unidades, actuará como una pequeña pero significativa carga dinámica temporal.

2.- La acción inmediata a llevar a cabo es el desazolve de las canaletas de drenaje al pie de los taludes, desde luego que previo a esto se requiere desalojar todo el material que ya se ha disgregado al pie de los taludes, incluyendo los bloques de gran volumen, ya que estos no solo azolvan las canaletas, sino que en algunos casos, sobre todo en el talud Escuela, hay grandes volúmenes en la banqueta que hace muy difícil el tránsito de peatones por esas zonas. El desazolve permitirá un





más eficiente desalojo del agua lo que disminuirá el grado de alteración de las unidades al pie de los taludes. Posteriormente debe buscarse una medida que aminore aún más la disgregación de estas unidades.

Entre estas puede considerarse la aplicación de un repellido en la cara del talud que sirva para detener la meteorización (NO sirve de sostenimiento) o incluso de un pequeño muro que dé cierto sostenimiento, no para todo el talud, sólo para evitar la erosión y el graneo de esta unidad. Las dos anteriores pueden incluir la instalación de drenes que faciliten la evacuación de agua que pueda infiltrarse tras una lluvia. Mientras se realiza esto, o si no se pudiera llevar a cabo, plantar arbustos al pie de los taludes también disminuye el efecto de la meteorización de las unidades, desde luego que en menor medida.

3.- Lo anterior no garantiza la estabilidad a largo plazo de los taludes, pues aunque las unidades de granulometría más gruesa son más resistentes a la erosión, estas también se disgregan pues el grado de exposición a los elementos es el mismo para todas las unidades presentes, además de que como ya se concluyó, una lluvia intensa y la actividad sísmica comprometen seriamente la estabilidad de estos taludes. Tomando en cuenta lo anterior, hay dos posibilidades en cuanto a métodos de tratamiento mayor para garantizar la estabilidad de estos taludes, las cuales dependen de la efectividad de la primera acción preventiva recomendada. Los dos escenarios son los siguientes:

A) Si se detiene el deterioro de las unidades menos competentes: Una vez llevado a cabo el desazolve y si es que la erosión de las unidades de poca resistencia al pie de los taludes se aminora o se detiene, eso disminuirá o inclusive eliminará el mecanismo de falla por resistencia de las unidades más competentes, haciendo que estas sólo presenten graneo y desprendimiento de bloques por fracturas preexistentes. En este escenario lo primero que debe hacerse es desprender los bloques inestables, ya que estabilizarlos sería muy complicado, pues dada su poca resistencia no sería efectivo un anclaje (aunque en bloques muy grandes se podría usar *soil nailing*).





Una vez hecho esto, lo más recomendable es usar malla de protección con enrejado de triple torsión y lámina plástica, que se ancla al terreno con barras de acero corrugado y se asegura con cables de acero desde la cima del talud. Este es un tratamiento de acción pasiva, es decir, que no actúa sino hasta que se desencadena un desprendimiento de bloque. Matemáticamente implica que la malla disminuye las fuerzas activas (F_a) en la expresión del Factor de Seguridad ($FS = F_r / F_a$), a diferencia de un método de acción activa que aumenta las fuerzas resistivas (F_r), tal como lo haría un ancla, que en esta caso no es muy recomendable, pues la perforación alteraría el estado de equilibrio de los taludes.

B) Si no se puede aminorar el deterioro de las unidades menos competentes. Si se siguen disgregando los depósitos menos resistentes, el peso de las unidades superiores y el gran ángulo de los taludes en la zona (promedio de 80°), harán que con el tiempo aumente la cantidad y el volumen de los bloques desprendidos y la afectación sería tan grande que ningún método de sostenimiento artificial tendrá efecto. Ante tal escenario, la acción más adecuada sería plantear una nueva geometría de los taludes, lo cual implica principalmente reducir el ángulo de inclinación de la cara del talud, lo cual no sólo reduciría la presencia de fracturas de gran ángulo, sino que también quitaría una enorme carga sobre las unidades menos competentes que conforman los taludes.

Desde luego que esto implicaría además de un gran trabajo en términos de tiempo y recursos, el hecho de que se deben remover un cierto número de árboles de la cima de los taludes, lo cual no es una decisión que se pueda tomar a la ligera, pero se debe contemplar que si no se toma ninguna acción y se desencadena un gran desprendimiento de bloques y/o un deslizamiento de parte de las unidades del talud, de cualquier manera los árboles en la cima de ese talud eventualmente caerán. Esta acción seguramente requeriría de un plan de reforestación para reubicar los árboles removidos.





BIBLIOGRAFÍA.

Aguayo Camargo, J.E., Marín Córdova, S., Sánchez Díaz, F. **1989**. *Evolución Geológica de la Cuenca de México. "Simposio sobre tópicos geológicos de la cuenca del valle de México"*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C.

Bieniawski, Z.T. **1989**. *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons, Inc. Canada. 250 pp.

Cervantes-Medel, A. Armienta, M.A., **2004**, Influence of faulting on groundwater quality in Valle del Mezquital, Mexico: *Geofísica Internacional*, 43(3), 477-493.

De Pablo-Galán, L., De Pablo, J.J., Chávez-García, M.L., **2001**, *Diagenesis and shear rheology of a Recent Pleistocene volcanogenic sequence, Mexican Basin. Implications to swelling and stability*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18(2), 175-185.

Deere, D. **1968**. *Geological Considerations Rock Mechanics in Engineering Practice*. Ed. R.G. Stage and D.C. Zienkiewicz, Wiley. Nueva York, p. 1-20.

Deméneghi, A. y Sanginés, H. **2000**. "Análisis estadístico de propiedades de los suelos de la zona poniente de la ciudad de México", XX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, vol. 2, págs. 379-385, Oaxaca, Oax. Sociedad de Mecánica de Suelos, Noviembre de 2000.

Facultad de Ingeniería, UNAM (FI-UNAM). **2011**. *Estudios Geológicos, Geofísicos y Geotécnicos para caracterizar y determinar la presencia de inestabilidades en el subsuelo y en los taludes de la 2ª y 3ª Sección del Bosque de Chapultepec*, Informe Inédito. Fondo Mixto CONACYT-GDF. Clave de registro 121119, número de Convocatoria: M0031-2009-01

García-Palomo, A., Zamorano, J.J., López-Miguel, C., Galván-García, A., Carlos-Valerio, V., Ortega, R., Macías, J.L. **2008**. *El arreglo morfoestructural de la Sierra de las Cruces, México central*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 25, núm. 1, p. 158-178





Gobierno del Distrito Federal (GDF). **2004**. *Reglamento de construcciones del Distrito Federal*. Jefatura de Gobierno, Administración Pública del Distrito Federal. 257 Artículos en 11 Títulos.

González de Vallejo, L. Ferrer, M. Ortuño, L. Oteo, C. **2002**. *Ingeniería Geológica* Pearson Educación, Madrid. 744 pp.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), **2011**. *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) 2.0*. (Descargas de MDE). Versión 2012.10.04 1200 <<<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>>> Consultado de Agosto de 2012 a Marzo de 2013.

Juárez-Arriaga, E. y López-Palomino, I. **2009**. *Tarango, formación*. Léxico estratigráfico de México, Servicio Geológico Mexicano.

Juárez Badillo, E. Rico Rodríguez, A. **2005** *Mecánica de Suelos. Tomo 1: Fundamentos de la mecánica de suelos*. Limusa, México, 644 pp.

Palmstrom, A. **1982**. *The Volumetric Joint Count –A Useful and Simple Measure of the Degree of Jointing*, IVth Int. Congress IAEG, Nueva Delhi, p. 221-228.

Santoyo Villa, E. Ovando-Shelley, E. Mooser H., F. León Plata, E. **2005**. *Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. TGC Geotecnia e Ingeniería S.A. de C.V. México. 172 pp.

Wyllie, D.C. & Mah, C.W. **2005**. *Rock Slope Engineering. Civil and Mining*. Spoon Press, 4a Edición. Nueva York, 431 pp.

