

FUNDACIÓN



TERCERA CONFERENCIA MAGISTRAL "PROFESOR RAÚL J. MARSAL"

EL COMPORTAMIENTO DE LA ROCA EN TALUDES

THE BEHAVIOR OF ROCKS IN SLOPES

Richard E. Goodman

29

CUADERNOS FICA

M É X I C O
1 9 9 8

Consejo Directivo de Fundación ICA.

Presidente.

Ing. Bernardo Quintana.

Vicepresidentes.

Dr. José Sarukhán Kérmez

Dr. Guillermo Soberón Acevedo

Ing. Guillermo Guerrero Villalobos

Ing. Raúl López Roldán

Director Ejecutivo.

Ing. Fernando O. Luna Rojas

Cuerpos Colegiados de los Programas Operativos.

Comité de Becas.

Ing. José Manuel Covarrubias Solís

Dr. Francisco Yeomans Reyna

Ing. Miguel Angel Parra Mena

Comité de Premios.

Dr. Luis Esteva Maraboto

M.I. Mario Ignacio Gómez Mejía

Ing. Gregorio Farias Longoria

Comité de Publicaciones.

Ing. José Iber Rojas

Dr. Oscar González Cuevas

Dr. Horacio Ramírez de Alba

M.I. Gabriel Moreno Pecero

Ing. Santiago Martínez Hernández

Comité de Investigación.

Dr. José Luis Fernández Zayas

Dr. Bonifacio Peña Pardo

Dr. Ramón Padilla Mora

Dr. Roberto Meli P.

FUNDACIÓN



TERCERA CONFERENCIA MAGISTRAL "PROFESOR RAÚL J. MARSAL"

EL COMPORTAMIENTO DE LA ROCA EN TALUDES

THE BEHAVIOR OF ROCKS IN SLOPES

Richard E. Goodman

29

CUADERNOS FICA

M É X I C O
1 9 9 8

**Derechos Reservados 1998
Fundación ICA, A.C.**

**Av. del Parque 91
Colonia Nápoles
03810 México, D.F.
Tel 669 39 85, 272 99 91 y 272 99 15
Ext. 4000-4001
Fax. 4083**

**e-mail: lunaf@fundacion-ica.org.mx
<http://www.fundacion-ica.org.mx>**

**ISBN 968-7508 51-5
ISSN 1405-387X**

Impreso en México.

ÍNDICE

Presentación.
Alfredo Sánchez Gómez.

Semblanza del Profesor Raúl J. Marsal.
Raúl Cuellar Borja.

Presentación del Conferencista.
Tomás Lugo Ibarra.

Conferencia magistral "Raúl J. Marsal"
El Comportamiento de la roca en taludes
(The Behavior of rocks in slopes)
Richard E. Goodman

Referencias.
Figuras.

Presentación.

Alfredo Sánchez Gómez
Presidente de la SMMR.

La Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas instituyó en el año de 1994 la “Conferencia Magistral Profesor Raúl J. Marsal”, con el objeto de honrar la memoria de este destacado profesionista.

Sus aportaciones a la ingeniería geotécnica mexicana y mundial están presentes en las grandes obras de infraestructura de nuestro país y en su labor docente, en la formación de varias generaciones de ingenieros de esta especialidad, tanto en la academia como en el ejercicio profesional. La relevancia de sus trabajos contribuyó de manera fundamental en la solución de algunos de los problemas sociales y económicos prioritarios para el desarrollo del país.

La tercera de estas conferencias es dictada por el Profesor Richard E. Goodman, quien al igual que el Profesor Marsal, tiene una amplia trayectoria profesional y docente en los Estados Unidos de América, exponiendo aspectos técnicos de gran actualidad para nuestra especialidad.

La Fundación ICA ha sido fundamental para la realización de este evento, por lo que la XII Mesa Directiva agradece cumplidamente el respaldo recibido.

**Semblanza del profesor Raúl J. Marsal Córdoba (1915 - 1990).
Su participación en la Ingeniería Civil y en la Geotecnia.**

***Raúl Cuéllar Borja.
Comisión Nacional del Agua***

Es para un modesto servidor de ustedes, motivo de gran satisfacción personal que la actual Mesa Directiva de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas me haya conferido el honor de presentar a ustedes en esta ocasión una semblanza del Doctor, Ingeniero Raúl J. Marsal Córdoba, a quién puede considerársele sin duda alguna dentro del grupo selecto de los Ingenieros Civiles ilustres y creativos que han participado en el desarrollo tecnológico e industrial de nuestro país en la segunda mitad de este siglo 20, y será siempre digno de nuestra admiración y respeto.

Tal como ha descrito el Ing. Luis Ramírez de Arellano, en su semblanza de 1993, el ingeniero Raúl Marsal arribó a México en 1945, con una sólida preparación profesional después de haber realizado brillantes estudios de licenciatura en su natal Argentina que le hicieron merecedor al premio Enrique Ader en 1941, por su calidad de desempeño académico y profesional y después de haber realizado estudios de Maestría en Mecánica de Suelos en el Instituto Tecnológico de Massachusetts con el Profesor Taylor y estudios de doctorado en la Universidad de Harvard, con los Profesores Terzaghi y Casagrande.

Como un reconocimiento a las enseñanzas del Profesor Raúl J. Marsal, mencionare a destacados ingenieros que colaboraron con él y los cuales siguiendo su ejemplo y a través de una intensa labor conjunta de investigación y práctica de la ingeniería han constituido la base de apoyo tecnológico para la realización de grandes obras hidráulicas y de generación eléctrica en el País, así como de otros grandes proyectos como el Metro y los colectores de drenaje profundo de la ciudad de México, al igual que de la construcción de puentes, carreteras, ferrocarriles y obras portuarias.

Durante el transcurso de sus primeros 15 años en México, entre 1945 y 1960, el Ingeniero Marsal investigó extensamente el comportamiento estructural de las arcillas del Valle de México, con la participación conjunta de los Ingenieros Fernando Hiriart Balderrama y Raúl Sandoval Landázuri; todos ellos pioneros en la utilización de la mecánica de suelos a la ingeniería de cimentaciones en la Cd. de México, cuya complejidad contrarrestada por sus estudios y aplicaciones fue haciéndose cada vez más entendible. Los resultados de estos trabajos pueden consultarse en su primer gran libro "El Subsuelo de la Ciudad de México", elaborando conjuntamente con el Ing. Marcos Mazari y presentando en el 1er. Congreso Panamericano de

Mecánica de Suelos y Cimentaciones en 1960 en la ciudad de México, publicado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

En este período el Ingeniero Marsal contó con el apoyo de organizaciones gubernamentales como la Secretaría de Recursos Hidráulicos, en donde trabajó como ingeniero especialista en el diseño de presas, bajo la dirección del Jefe del Consultivo Técnico de ese entonces, Ingeniero Antonio Coria Maldonado, teniendo como compañero de trabajo e investigación al Profesor Ingeniero Enrique Taméz González, asimismo, con el apoyo de organizaciones educativas como el Instituto de Ingeniería de la UNAM y privadas como el Grupo de Ingenieros Civiles Asociados (ICA), del cual fue socio fundador bajo invitación de su presidente Ingeniero Bernardo Quintana Arrijoja, quién le brindó siempre el apoyo logístico para el desarrollo de sus trabajos e investigaciones. Ese ejemplo de la participación de técnicos en este Grupo de Constructores se ha extendido hasta la fecha a través de excelentes ingenieros.

Tuve la oportunidad de colaborar durante 24 años muy de cerca con el Ingeniero Raúl J. Marsal en la Comisión Federal de Electricidad, en varias facetas de la ingeniería civil y en diferentes épocas entre 1962 y 1986, período en el cual el Ingeniero Marsal ocupó durante 12 años el puesto de Asesor Técnico del Sr. Subdirector General Ing. Fernando Hiriart B. y posteriormente 6 años más con el mismo puesto de Asesor Técnico nuevamente del Ing. Hiriart B., ahora como Director General. Esto me permite presentar a ustedes algunos ejemplos de sus trabajos de Geotecnia relacionados con la ingeniería de proyectos hidráulicos e hidroeléctricos.

En una primera etapa durante 1962-1965 trabajé bajo su dirección participando en un pequeño grupo de ingenieros en el diseño, fabricación y operación de aparatos para ensaye de enrocamientos, entre ellos, una cámara triaxial esférica de 4 m de diámetro para el ensaye de especímenes de 113 cm de diámetro y tamaño máximo de partículas de 20 cm, la cual por sí sola constituyó un proyecto completo, en paralelo con el diseño e instalación de instrumentos de medición de la cortina de El Infiernillo, Michoacán, con el objeto de determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos granulares, para su aplicación al diseño estructural de esa cortina de materiales graduados de 150 metros de altura, así como para conocer su comportamiento estructural. Era sorprendente para nosotros, no sólo en la competencia de diseño estructural metálico y mecánico-eléctrico que desarrollaba el Ingeniero Marsal, sino su capacidad creativa en la concepción tanto de los aparatos de prueba ó de medición, los cuales a veces eran concebidos, diseñados y dibujados en magníficos croquis a escala, solamente entre un sábado por la tarde y el domingo.

Los resultados de esta investigación se aplicaron para verificar la estabilidad de los taludes de La Presa Infiernillo hacia mediados de 1964, habiéndose terminado la construcción de la misma hacia fines de 1963. Se inicia así una

nueva tecnología de la mecánica de suelos aplicada a la ingeniería de presas de materiales graduados y enrocamientos, la cual se prolongó en forma exitosa durante 25 años más, hasta la sensible partida de este mundo del Ingeniero Marsal en 1990. De esta manera, se estudiaron tanto las propiedades de resistencia de los suelos granulares como el comportamiento estructural de todas las grandes presas de este tipo, tanto en México como en algunos otros países. Así, podemos citar las Presas siguientes: Malpaso, La Angostura, Chicoasén y Peñitas en Chiapas, La Villita en Michoacán; El Granero en Chihuahua, Las Tórtolas en Durango, El Guineo y El Caracol en Guerrero, Bacurato y Comedero en Sinaloa, Las Piedras en Jalisco y finalmente Aguamilpa en Nayarit. En el extranjero se estudiaron las presas de La Mica en Canadá, Chivor en Colombia y Napa en Estados Unidos.

Es muy importante señalar que durante el período de 1960-1990 el Ingeniero Raúl J. Marsal contó con el apoyo consistente de Directores e Ingenieros de Diseño y Construcción, tanto de la Comisión Federal de Electricidad, como de la Secretaría de Recursos Hidráulicos para el desarrollo y aplicación de toda esta tecnología de diseño y construcción de presas. Me parece justo mencionar entre ellos los nombres de los Ingenieros Manuel Moreno Torres, Fernando Hiriart Balderrama, Rogelio Canales Lozano, Aurelio Benassini y recientemente al Ing. Guillermo Guerrero Villalobos. Por otro lado, el Profesor Marsal, haciendo extensiva su investigación a Universidades y compañeros de trabajo del Cuerpo de Consultores del Banco Mundial, participaron activamente en sus investigaciones el Dr. Arturo Casagrande, de la Universidad de Harvard, el Ing. Luis Ramírez de Arellano, el Dr. Daniel Reséndiz Núñez, el Ing. Jesús Alberro Aramburu de la Universidad Nacional Autónoma de México. Por parte de la Universidad de California Berkeley el Dr. H. Bolton Seed y el Ingeniero C. K. Chan realizaron investigaciones en paralelo sobre las características de resistencia y deformabilidad de los suelos granulares. Mención especial por su alta calidad técnica de participación en la interpretación del comportamiento estructural de presas de materiales graduados y enrocamientos merece el Dr. Stanley D. Wilson, miembro del Cuerpo de Consultores del Banco Mundial, con quién el Ing. Marsal formó un equipo de trabajo de alto nivel resolutivo. En el año 1964 la Universidad Nacional Autónoma de México, otorgó al Ing. Raúl J. Marsal Córdoba el Grado Honorífico de Doctor Honoris Causa.

Dentro de el período de 1960-1990, en el intervalo 1968-1979, como encargado de la Oficina de Mecánica de Rocas de la Comisión Federal de Electricidad tuve una segunda oportunidad de trabajar otra vez muy de cerca con el Ing. Raúl J. Marsal en el desarrollo y aplicaciones de esta disciplina en varias de las Presas antes mencionadas, bajo la dirección técnica y vigilancia continua, tanto del mismo Ingeniero Marsal, como de los Ingenieros Fernando Hiriart y Luis Ramírez de Arellano, más el apoyo técnico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, así como del Cuerpo de Consultores del Banco Mundial, por medio de los Especialistas en Geotecnia

como el Dr. Stanley D. Wilson, el Ingeniero Geólogo Thomas F. Thompson y el Dr. Donald U. Deere.

En este período con el apoyo técnico de todos estos destacados Ingenieros se logró el desarrollo de tecnologías en varios de los campos de aplicación de la mecánica de rocas tanto en ensayos de campo y laboratorio como en el diseño e instalación de instrumentos de medición, en paralelo con el desarrollo de métodos numéricos analíticos sobre la estabilidad de taludes y cavidades subterráneas.

Se destacan los estudios realizados en el diseño de soporte y revestimientos de túneles, así como el comportamiento de las grandes excavaciones subterráneas y a cielo abierto de macizos rocosos, primeramente en los Proyectos Hidroeléctricos de la Angostura y Chicoasén en Chiapas y posteriormente en El Caracol, Guerrero, Zimapán, Hidalgo. y Aguamilpa en Nayarit. Adicionalmente, se lograron avances tecnológicos en el tratamiento de los macizos rocosos, con la participación inicial de los Ingenieros André Pautre y Francis Sabarly de la Firma de Consultores Geoconseil de Francia y continuados posteriormente por el Dr. Bernard Schneider de la misma firma de Consultores y recientemente por los Doctores Giovanni Lombardi y Don U. Deere del Cuerpo de Consultores del Banco Mundial. Los resultados de estos trabajos de Geotecnia tanto de investigación como de aplicación de las Ingenierías de la mecánica de suelos y mecánica de rocas a proyectos hidráulicos están plasmados en dos grandes libros dirigidos por el Ingeniero Marsal como son "Presas de Tierra y Enrocamiento", con el Dr. Daniel Reséndiz y la colaboración de Jesús Alberro, G. Auvinet, A. Benassini, V. Casales, S.W. Covarrubias, Fernando Hiriart, E. Mendoza, E. Moreno, W. Pohlenz; L. Ramírez de Arellano, Miguel P. Romo y E. Rosenblueth, Editorial Limusa, 1975 y "Comportamiento de Presas Construidas en México, con J. Alberro y A. Dawson, y otros, como contribución de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, La Comisión Federal de Electricidad y la UNAM al XII Congreso Internacional de Grandes Presas, México 1976.

En este mismo período de 1960-1990 por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, con el apoyo técnico del Instituto de Ingeniería de la UNAM se realizaron investigaciones importantes sobre el diseño y comportamiento de terraplenes y cortes profundos, en roca así como la investigación experimental de laboratorio y campo de la estructura de rodamiento y pruebas dinámicas en aeropistas.

En el lapso 1959-1965 el Ingeniero Marsal colaboró con el Grupo de Consultores del Banco Mundial, participando en el diseño y comportamiento estructural de taludes de macizos rocosos tratados a base de anclas postensadas de 100 toneladas, para estabilizar la zona de la estructura de control del vertedor de demasías de la Presa El Infiernillo, Michoacán, con 1500 anclas y las laderas de los empotramientos de la cortina de concreto

arco-bóveda de Santa Rosa en Jalisco también con 1500 anclas, destacándose los anclajes postensados Polensky del espolón de atraque de concreto de la Presa La Soledad, en Mazatepec, Puebla, también de doble curvatura. Estas anclas cuentan con una excelente protección anticorrosiva y se encuentran en buen estado físico después de más de 35 años.

Adicionalmente por primera vez en México se instalaron extensómetros eléctricos para medir desplazamientos. En este mismo proyecto hidroeléctrico de Mazatepec durante 1962, el Profesor Ing. Roberto Sánchez Trejo, en ese entonces investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM, realizó un ensaye de presión hidrostática en una cámara de 500 m de longitud del túnel de conducción a presión, de 4 m de diámetro y 8 Km de longitud, en forma exitosa, determinando la permeabilidad aparente y deformabilidad del conjunto revestimiento-roca, constituyéndose este ensaye en el inicio de la Mecánica de Rocas en México. Se reconoce aquí el primer ensaye de cámara a presión en túneles realizado en México por el Ing. Raúl López Calvillo de la Comisión Federal de Electricidad en la Planta Hidroeléctrica de El Encanto, en Puebla en 1947, desafortunadamente sin resultados satisfactorios.

En el período comprendido entre 1985-1986, como encargado del Departamento de Evaluación Técnico-Económica de Proyectos Hidroeléctricos dentro del Grupo de Anteproyectos Hidroeléctricos de la CFE, tuve la fortuna de participar por nueva cuenta bajo la dirección técnica, diligente y rigorista de los Ingenieros Raúl J. Marsal y Fernando Hiriart, en la planeación y el desarrollo del Potencial Hidroeléctrico de México, aprendiendo la forma de trabajo interdisciplinario de equipo, aplicando las técnicas de las disciplinas básicas de la ingeniería civil como son la Hidráulica, la Geotecnia y las Estructuras.

Según palabras del Ing. Fernando Hiriart B., el 14 de mayo de 1980 en el Homenaje al Profesor Marsal al Mérito Profesional en la Comisión Federal de Electricidad, el Profesor Raúl J. Marsal Córdoba además de investigador eminente, contribuyó a formar muchos ingenieros e investigadores y también realizó una obra notable como ingeniero civil. Adicionalmente señala su alta capacidad de trabajo tanto individual como en equipo, dando ideas y contribuyendo en la toma de decisiones para la construcción de grandes obras. Así mismo, señala también que la aplicación del resultado de sus investigaciones han sido invaluable para resolver muchos y muy importantes problemas prácticos. Por ese contexto, el Ing. Hiriart consideró al Profesor Marsal como un ingeniero completo. Aquí cabe mencionar, con todo respeto, el sentimiento recíproco del Ing. Marsal hacia el Ing. Fernando Hiriart.

Finalmente en mayo de 1990, como Asesor Técnico de la Comisión Nacional del Agua, tuve la oportunidad de colaborar por última vez con el Ing. Raúl J. Marsal, sólo a unos cuantos meses antes de su deceso, en el Proyecto El

Purgatorio, para el abastecimiento de agua potable a la Ciudad de Guadalajara, para estudiar la trayectoria superficial y subterránea de la conducción a presión de 2.5 km de largo. Aún cuando su salud se encontraba ya en una fase crítica y con su capacidad física reducida, su mente continuaba lúcida y a pesar de condiciones atmosféricas adversas nos fue posible realizar prácticamente todo el recorrido de campo programado y realizar una reunión técnica, curiosamente en un restorán bajo las notas musicales de un mariachi, como sello de la mexicanidad profesada por el Ingeniero Marsal.

Solamente me queda guardar un profundo agradecimiento hacia el Ingeniero Raúl J. Marsal Córdoba por todo cuanto valen las enseñanzas recibidas y el apoyo técnico y moral deferente hacia un servidor de ustedes.

Muchas Gracias

Presentación del conferencista Profesor Richard E. Goodman.

Tomás Lugo-Ibarra
Comisión Nacional del Agua.

Reviste para un servidor una gran satisfacción presentar en el nombre de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas al profesor Richard E. Goodman, invitado a dictar la Tercera Conferencia Magistral Profesor Raúl J. Marsal.

Es profesor emérito de la Universidad de California, en Berkeley, quien por más de treinta años realizó una fructífera y reconocida labor en la enseñanza e investigación en el campo de la mecánica de rocas e ingeniería geológica, aportando innumerables contribuciones en la práctica de la ingeniería civil y minería.

El Dr. Richard Goodman recibió su primer grado en geología en el año de 1955 y de maestría en ingeniería civil en el año de 1958, ambos de la Universidad de *Cornell*; posteriormente obtuvo su doctorado en ingeniería geológica en 1963, en la *Universidad de California, en Berkeley*, iniciado su labor académica en el Departamento de Ingeniería Civil, como profesor asistente, para después convertirse en profesor titular en 1974. Trabajó en la universidad por más de 30 años como investigador y profesor titular de varias asignaturas relacionadas con la mecánica de rocas e ingeniería geológica.

Durante ese largo tiempo dirigió más de cuarenta tesis doctorales en temas de investigación relacionados a la clasificación y propiedades mecánicas de los macizos rocosos, instrumentación de campo, pruebas de laboratorio, estabilidad de las excavaciones subterráneas y a cielo abierto, análisis numérico y finalmente con temas relacionados a la teoría de bloques, que representa una de las más elegantes y refinadas técnicas de análisis tridimensional, que se aplica en macizos rocosos fracturados. También desarrolló el *Joint Element* para el análisis numérico de medios discontinuos.

El Doctor Goodman ha publicado más de 150 artículos técnicos en diversas revistas de reconocido prestigio internacional. Ha sido por muchos años árbitro en la revista "*Rock Mechanics and Mining Sciences*", que tradicionalmente ha publicado los temas más importantes e innovadores en el campo de la mecánica de rocas durante los últimos años.

El Profesor Goodman también ha publicado cinco libros titulados *Methods of geological engineering* (1976, 1987), primera y segunda ediciones; *Introduction to rock mechanics* (1989); *Block theory and its applications to rock engineering* (1985); *engineering geology, rock in engineering*

construction (1993); y finalmente un libro titulado *the engineer as an artist, life and work of Karl Terzaghi* (1998), que justamente acaba de terminar de escribir y se encuentra en impresión. Sus libros se han utilizado ampliamente en los cursos relacionados con la mecánica de rocas, en México y en todo el mundo.

Ha sido consultor para diversas organizaciones, como empresas y gobiernos y colaborador en universidades e institutos de investigación. Ha viajado a países de América, Europa, y Asia, dictando conferencias y realizando trabajos de consultoría e investigación, sobre el diseño de presas y estabilidad de estructuras superficiales y subterráneas.

En el año de 1995, fue invitado por la Sociedad Geotécnica Británica (*The British Geotechnical Society*) a dictar la 35th Conferencia Rankine, en el Imperial College de Londres, donde expuso brillantemente la conferencia titulada "Las Bases de la Teoría de Bloques y sus Aplicaciones". Recientemente fue homenajeado en los Estados Unidos por la *International Society for Rock Mechanics (ISRM)* y el grupo nacional en USA por sus logros y contribuciones en el campo de la mecánica de rocas, así como por su trayectoria académica en la Universidad de California. Durante su extensa carrera profesional, ha sido honrado con numerosos premios y reconocimientos, habiendo sido nombrado en 1991, miembro de la Academia de Ingeniería de los Estados Unidos, culminando así una larga trayectoria de trabajo e investigación.

Actualmente es socio-investigador del Instituto Geotécnico de Noruega (*Norwegian Geotechnical Institute*), prestigiado instituto, cuyo trabajo de investigación, representa logros importantes en la geología aplicada y geotecnia.

El profesor Goodman, Dick, como le llaman sus colegas y compañeros, posee la admirada virtud, que en estos tiempos es raro encontrar, de reconocer, agradecer y apreciar generosamente la ayuda que a través de los años ha recibido de otras personas y organizaciones, principalmente en lo relacionado con su trabajo profesional.

Posee también el apreciado don de la enseñanza sin limitaciones y la rara habilidad y creatividad para proponer trabajos de investigación, que en corto tiempo se convierten herramientas de uso común en la práctica de la ingeniería. El Profesor Hudson, escribió alguna vez que "*las más brillantes y elegantes explicaciones y experimentos que había observado fueron desarrollados por Richard Goodman.*" Algunos de estos se encuentran expuestos en su libro de texto: *Introduction to Rock Mechanics*.

Conocí al Profesor Goodman hace 14 años y desde entonces he mantenido un estrecho contacto con él. Cuando impartía sus cátedras en Berkeley,

tome algunos cursos del programa de graduados, particularmente los relacionados con la teoría de bloques.

Recuerdo que fue tal su entusiasmo cuando le presente el trabajo que habíamos realizado para estudiar la estabilidad del sitio de la casa de máquinas del Proyecto Aguamilpa, de la Comisión Federal de Electricidad, que rápidamente me proporcionó todo el trabajo de investigación que hasta esa fecha se había realizado en Berkeley, como artículos técnicos, tesis doctorales, el *software* y hasta el regalo de una computadora, proporcionada por otro eminente investigador, el Dr. Gen-hua Shi. En aquella ocasión el comentó que era muy importante que yo continuara mis investigaciones en México y que por lo tanto debería de contar con las herramientas de trabajo “básicas”.

Richard E. Goodman es una personalidad polifacética, ya que no solamente ha destacado en las ciencias y en la ingeniería, sino también en las artes, él es un estupendo músico, concertista de piano y cantante de opera. Durante algunos años participó activamente como Director Artístico de la Opera de Berkeley, montando obras tan famosas como “El Barbero de Sevilla”, “Don Giovanni” y “La Bohemia”, donde tuve la fortuna de verlo actuar.

En alguna ocasión estábamos reunidos en un restaurante de Berkeley y él me comentó que la mecánica de rocas y la ingeniería eran su pasatiempo favorito, pero que su verdadera pasión y obsesión era la opera; él opinaba en ese momento que la opera se asemejaba en gran medida a la dirección y manejo de un importante proyecto de ingeniería, como la conceptualización, diseño y construcción de una gran presa.

En el medio académico, de investigación y de la práctica profesional en los Estados Unidos y Europa, se han vertido comentarios en el sentido de que el Profesor Goodman posee uno de los más altos “índices de conexión” (este no es un índice de ingeniería), es decir, cada vez más investigadores, ingenieros, y estudiantes, usan sus teorías, referencias y libros de texto, durante su trabajo cotidiano.

A nombre de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas y sus agremiados, le damos una cordial bienvenida al Profesor Richard E. Goodman.

**Tercera conferencia magistral Profesor Raúl J. Marsal.
El comportamiento de la roca en taludes**

Richard E. Goodman

La mayoría de la gente que va por una autopista en un auto cerrado no tiene la oportunidad de observar los taludes de roca que se encuentran en el camino, sin embargo, los conductores de motocicleta, de autos convertibles y ciclistas seguramente tienen la oportunidad de hacerlo. Es probable que estos últimos al llegar a su destino se pregunten si formaron parte de un juego gigante de ruleta rusa. A ellos les podría parecer que las salientes de roca con grietas abiertas y bloques a punto de deslizarse, son partes desmontables de la montaña que tienen la misma probabilidad de mantenerse en su sitio, como de derrumbarse sobre la carretera. Desafortunadamente, el determinar si esto va o no a ocurrir, es una tarea que no se presta fácilmente al análisis; sin importar cuantos programas de computación o análisis de estabilidad se realicen, la estabilidad de estas rocas sólo estará asegurada si se toman medidas adecuadas de protección o estabilización. Cuando se piensa acerca del diseño de estas medidas, el macizo rocoso puede ser comparado a un colegio de adolescentes. ¿Cómo se comportarán?, ¿cuándo causarán problemas? En virtud de que cerrar el colegio no es una medida viable, lo único aceptable es intentar predecir el comportamiento y los percances a los que son susceptibles los muchachos y estar preparado para actuar en consecuencia.

Debido a que la estructura y la composición de las rocas pueden variar dentro de límites muy amplios, la variedad de tipos de comportamiento que se observan también es muy amplia. La mayoría de cursos y textos en la materia (incluyendo los del conferencista) simplifican en extremo el amplio espectro de mecanismos de fallamiento, con el objeto de facilitar el trabajo de un principiante en este campo. Aquellos que ya han estado en la práctica en medios geológicos, reconocerán fácilmente esta estrategia y adoptarán su más prudente y amplio enfoque en la materia. Sin embargo, es posible que aquellos que tengan poca experiencia, intenten establecer modelos de comportamiento simples, en donde en realidad los modos de falla son más complejos, lo cual puede llevar a resultados poco halagadores. La intención de esta conferencia es llevarlos por un viaje a través de una lista extensa de tipos de fallamiento en taludes y señalar las características observables que distinguen unos de otros.

Este trabajo se enfoca principalmente a taludes en rocas, tanto blandas como duras (aunque mantener este enfoque puede ser difícil en algunos materiales, en los cuales la distinción entre suelo y roca es imprecisa, particularmente cerca de la superficie). El ingeniero geotecnista tiene un interés permanente en los taludes en suelos o rocas, ya sea como parte del medio ambiente natural en el cual trabaja, o como un elemento esencial de una obra por construirse, encima o incluso por debajo del nivel del terreno.

Es importante señalar que un talud en rocas en la superficie y una excavación en el subsuelo, son dos ambientes claramente distintos, siendo el talud en la superficie generalmente menos seguro. Aunque una persona puede sentirse más expuesta al peligro trabajando en el subsuelo, debido a los peligros que implican el trabajar en un ambiente cerrado, las excavaciones en la superficie tienden a ser menos estables debido a que se tienen esfuerzos bajos, materiales con grados de intemperismo más elevados y a la acción del agua.

La distribución de esfuerzos tangenciales alrededor de una abertura subterránea excavada con extremo cuidado, puede ayudar a mantener en su sitio los bloques del techo y las paredes; sin embargo, poca o ninguna tracción superficial actúa en las caras de los bloques en la superficie, en donde el esfuerzo tangencial es muy pequeño. Por otro lado, la teoría de bloques demuestra que los bloques clave que pueden caer hacia una excavación en la superficie, tienden a ser más grandes que aquellos que pueden caer hacia una excavación subterránea; por lo tanto, un derrumbe local comúnmente tiene mayores dimensiones en la superficie que en el subsuelo.

Generalmente, una excavación abierta incluye rocas intemperizadas, cuyas resistencias son mucho menores que la de la roca intacta. Algunas rocas blandas continuarán degradándose debido a alteraciones durante la construcción y posteriormente debido a la acción del agua y del clima, particularmente en regiones con climas cálidos y húmedos. No obstante que las vetas de agua pueden ser interceptadas tanto en la superficie como en el subsuelo, los materiales en la superficie pueden permitir un mayor flujo de agua debido a su mayor porosidad y grado de fracturamiento, a pesar de la menor carga de agua; además, las aguas superficiales forman parte de los problemas que pueden ser causados por las aguas subterráneas. Tanto en la superficie como en el subsuelo, las presiones hidráulicas en discontinuidades y las presiones de poro en rocas fisuradas, estratos de rocas sedimentarias blandas o en el material poroso de relleno de las fallas (el cual se comporta como suelo) pueden con toda seguridad desestabilizar un macizo rocoso. Durante tormentas, las excavaciones en la superficie también tendrán que enfrentarse a problemas debidos a la pérdida de presión capilar o al ablandamiento de materiales arcillosos que inicialmente se encuentran en un estado no-saturado o disecado. Similarmente, la erosión, tanto interna como externa, de materiales limosos derivados de la meteorización, típicos en suelos residuales, pueden llevar a una rápida destrucción del talud.

Los taludes naturales constituyen la cimentación de tuberías de conducción superficiales, de edificios, de los estribos de puentes y empotramientos de presas.

preceden el rompimiento de una laja, como en (d) de la Figura 1D. En ambos casos, la formación de las grietas por tensión implican que la fuerza resistente, previamente sostenida por esfuerzos de tensión, se ha perdido y ha sido reemplazada por una mayor resistencia al corte en las superficies de deslizamiento. En modelos de fricción es posible observar el deslizamiento y las deformaciones internas adicionales, que ocurren simultáneamente junto con la formación de grietas por tensión.

En masas rocosas que presentan mecanismo de volteo las velocidades de volteo distintas entre dos capas adyacentes abren grietas en V amplias y profundas, como en (f) de la Figura 1E. De la misma manera, el movimiento incipiente de un bloque deslizante limitado por discontinuidades, abrirá estas estructuras que servirán como superficies de desprendimiento, como en (k) de la Figura 1H; en este caso, la abertura de las discontinuidades reemplaza a la formación de nuevas grietas de tensión, que ocurren en los deslizamientos sin fracturas, pero los resultados difieren debido a que la abertura de estructuras no causa un incremento automático en los esfuerzos cortantes en la superficie de deslizamiento, debido a que las fracturas de desprendimiento nunca soportaron esfuerzos de tensión.

Los diferentes tipos de fallamiento de taludes en suelo o en rocas dejan huellas características. Por ejemplo, una falla por volteo, como en la Figura 1E, produce no solamente las aberturas profundas entre capas (f) como fue previamente indicado, sino que también expone hacia la parte superior del talud la cresta de las capas de deslizamiento (e). Estos escarpes fueron denominados "escarpes obsecuentes" por Goodman y Bray (1976). Las fallas por volteo también producen una zona de roca quebrada al pie del talud, así como en los taludes detríticos, como se muestra en (g) de la Figura 1E. Los deslizamientos clásicos por hundimiento (*slump*), con rotación inversa, producen notables escarpes en la cresta como en (h) y una zona de corrimiento o sobrecorrimiento en el pie del talud, como en (i) de la Figura 1F. Los movimientos de bloques individuales, delimitados por discontinuidades, dejan en los taludes en roca expresiones de cavidades de estos bloques, como en (j) de la Figura 1G, las cuales han sido denominadas moldes por Hatzor y Goodman (1995). Estos últimos identifican combinaciones de superficies de discontinuidad que se intersectan en un punto en el espacio dentro de la masa rocosa y delimitan un bloque "removible". Si estos bloques se desplazaron bajo la acción de las mismas fuerzas naturales que aún actúan en el talud, los "moldes" identifican los "bloques clave"; debido a que existen varios sistemas de discontinuidades que pueden intersectarse y formar bloques importantes. La identificación de los "malos de la película" es una parte relevante de la información geotécnica.

La Tabla 1 lista las formas de fallamiento típicas en taludes rocosos. Los cinco primeros se desarrollan mejor en rocas blandas, que se comportan como suelos; el sexto ocurre en rocas blandas o duras y los restantes diez

modos de falla son más frecuentes en rocas duras. Ejemplos de materiales típicos en los cuales también son observados estos modos de falla, se indican en la Tabla 1. Los contenidos de esta tabla serán presentados en detalle en los siguientes párrafos.

Los mecanismos simples e idealizados que se presentan en textos de mecánica de rocas (como los de Hoek y Bray (1981) y Goodman (1989)) son: deslizamiento de un bloque en un solo plano; deslizamiento de un bloque en dos planos a lo largo de su línea de intersección (generalmente llamado deslizamiento de cuña); y volteo de múltiples columnas o "*toppling*". Son llamados casos típicos o de "libro", cuando uno de estos tres tipos de comportamiento es el único causante del derrumbe en un talud de roca. Los mecanismos de deslizamiento de bloques o de cuñas son mucho más comunes que el mecanismo de volteo. Sin embargo, aunque a este mecanismo no se le otorgó su debida importancia hasta hace poco tiempo, recientemente se han estudiado varias fallas por volteo, particularmente en pendientes escarpadas de montañas o en excavaciones a cielo abierto. El conferencista trabajó recientemente con tres taludes de roca con falla por volteo, que soportan tuberías de conducción hidroeléctrica, cada una de las cuales fue amenazada por deformaciones profundas del talud.

Si un talud de roca es grande y contiene una variedad de estructuras y tipos de roca, no debe esperarse que una sola forma de fallamiento cubra todos los sectores. Por el contrario, en una masa rocosa en deslizamiento sería razonable encontrar más de uno de los mecanismos de falla simple, actuando simultáneamente; una parte puede estar deslizándose, otra volcándose, otra experimentando erosión e incluso otra sufriendo fracturamiento y destrucción de lo que previamente era una masa de roca continua. Algunos de los principios que gobiernan este comportamiento complejo son los siguientes.

- 1) Los bloques aislados se forman por la intersección de discontinuidades preexistentes y la superficie de la excavación.
- 2) Los bloques orientados desfavorablemente se mueven primero, dejando en su lugar un nuevo espacio hacia el cual los bloques adyacentes pueden moverse; los primeros fueron denominados "bloques clave" por Goodman y Shi (1985).
- 3) El deslizamiento a lo largo de una cara o de un borde de bloque de roca que esté orientado desfavorablemente, ocurrirá si se cumplen las condiciones cinemáticas. La condición más importante es que el bloque sea "removible" en el espacio excavado, implicando que la dirección de movimiento incipiente aflora o tiene salida hacia la excavación.
- 4) Si se impide el movimiento por deslizamiento, se favorece al mismo tiempo el movimiento por rotación. Por lo tanto, cuando las posibilidades de

deslizamiento son impedidas, debido a que los planos de deslizamiento no afloran hacia la excavación, pueden ocurrir mecanismos por volteo, pandeo (*buckling*), hundimiento de bloque (*block slumping*) y fallamiento por torsión o *torsional failure*.

5) Los bloques incompletos que no están totalmente cortados por el sistema de discontinuidades (implicando que no están completamente "aislados"), podrían fallar cuando la formación de nuevas fracturas en la roca los termine de aislar.

Estos principios cubren la mayor parte de los modos de falla de la Tabla 1, la cual examinaremos metódicamente de abajo hacia arriba.

El hundimiento (*slumping*) es la clásica falla por corte con rotación inversa, mejor desarrollada en suelos arcillosos. Solo algunos tipos de masas de roca son suficientemente blandos como para desarrollar un verdadero hundimiento, la mayoría carecen de estructuras o estratos blandos. Los tipos de roca que generan este tipo de fallamiento son ricas en arcilla, ablandadas por relajamiento y por la acción del agua, como por ejemplo esquistos arcillosos ricos en esmectita y rocas tobaceas meteorizadas o alteradas. Las fallas por hundimiento también pueden ocurrir en rocas altamente fisuradas, que contienen tantas discontinuidades que pueden considerarse efectivamente homogéneas, como por ejemplo las que se encuentran en zonas adyacentes a fallas tectónicas, en sedimentos Terciarios y en formaciones rocosas que contienen carbón. En la mayoría de las demás rocas, las fracturas se originan por tensión, más que por ruptura al corte, de manera que es raro encontrar la clásica superficie de falla circular.

La Figura 2A muestra un estilo de falla por hundimiento que se encuentra en formaciones rocosas, en las cuales el material que se desliza es levantado por presiones de agua de un acuífero subyacente, cuyo drenaje hacia el fondo del valle ha sido impedido. La causa principal de este deslizamiento son las altas presiones de poro en la formación que se desliza, la cual actúa como un acuicludo. La Figura 2B muestra un caso similar en el cual las altas presiones de poro son causadas por una capa impermeable en la base del talud, que impide el flujo de las aguas subterráneas. Siguiendo con el mismo concepto, Terzaghi advirtió repetidamente acerca del efecto desestabilizador de las presiones de poro que se producen cuando los estratos sedimentarios impiden el flujo de agua subterránea a través de fracturas con alta permeabilidad.

La erosión puede degradar seriamente un talud en rocas, ya sea por flujo concentrado de aguas superficiales, o debido a erosión interna o tubificación, particularmente en sedimentos limosos poco cementados, en granito altamente meteorizado y en "tucurugüay". La erosión interna y la tubificación pueden ocurrir cuando los taludes naturales o artificiales

contienen material limoso suelto en contacto con una roca dura, con fracturas abiertas, lo cual ocurre sistemáticamente en series de rocas volcánicas y en zonas de falla. Si los suelos erosionables están aguas abajo de una roca con fracturas abiertas, la filtración puede iniciar un proceso de erosión rápida, el cual pone en peligro las rocas adyacentes al cambiar la configuración de la excavación y socavar su soporte. Si los suelos erosionables están aguas arriba de las discontinuidades abiertas, es posible la erosión interna en las fracturas, pero generalmente causa menor daño al talud (aunque puede ser perjudicial para estructuras aguas arriba).

El desprendimiento (*ravelling*) se refiere al relajamiento y erosión progresiva de cantos o bloques de la superficie del talud. Es un proceso de desgaste de masas y erosión gradual por meteorización y transporte gravitacional. Las rocas altamente fracturadas, como son el basalto columnar y las areniscas frágiles que se encuentran sobre lutitas blandas, pueden llegar a formar grandes conos de deyección por este proceso. Dependiendo de la forma de la sección del talud, las partículas en movimiento pueden llegar a convertirse en proyectiles.

El fracturamiento en capas (*sheet jointing*) describe estructuras por extensión que se forman a poca profundidad y paralelas a la superficie. El fracturamiento en capas clásico, que ocurre en rocas graníticas y en areniscas masivas, existe antes de la excavación y es sub-paralelo a la pendiente original del talud. Sin embargo, tiende a formarse un nuevo fracturamiento en capas paralelo al talud, con pendiente fuerte en rocas duras o blandas que estén relativamente sanas. Si la inclinación de este fracturamiento es mayor que el ángulo de fricción entre las paredes de la discontinuidad, como suele ocurrir, el talud es estable solamente por acción de los esfuerzos de tensión en la parte superior de la porción más acantilada de las capas, las cuales en realidad quedan colgando. Las grietas nuevas, como se muestra en la Figura 1D, permiten que estas capas se desprendan. La meteorización de estas capas reduce la resistencia a la tensión (a una velocidad sorprendente en climas húmedos y cálidos), permitiendo su desprendimiento y consecuente caída. La Figura 3 muestra el fallamiento de una capa colgante formada debajo de un talud recientemente excavado. Este deslizamiento es destructivo porque ocurre inesperadamente. Si el talud es alto, el volumen de material puede ser grande, aún si la nueva capa es delgada.

La Figura 4 ilustra un mecanismo de relajamiento de un macizo rocoso (*rock-mass loosening*) que se parece a la formación de fracturamiento en capas y opera en areniscas alternadas con lutitas. Cuando el talud se expande hacia adelante, la arenisca se parte, mientras que la lutita sufre degradación. La capa entera puede fallar más tarde, debido a la acción de agua o hielo, degradación progresiva o como un resultado inadvertido de inyección de lechadas. Ya en 1962 Terzaghi llamó la atención contra la degradación de taludes después de su formación.

En el análisis de falla de taludes es poco frecuente que la roca triturada (*rock crushing*) sea instrumentada, no obstante la acción importante de las discontinuidades en una masa rocosa. La ruptura del puenteo de las discontinuidades en la roca (*rock bridges*) permite el aislamiento de algunos bloques deslizantes, que de otra manera hubieran fallado al inicio de la excavación. Debido a la continuidad finita de la mayoría de las discontinuidades, los deslizamientos importantes inicialmente, pueden no estar aislados totalmente por el sistema de discontinuidades. Después de la excavación, el crecimiento gradual de grietas aumenta los esfuerzos, concentrándolos en la porción no-fracturada del puenteo, conduciendo a un incremento en la velocidad de movimiento y a su consiguiente fallamiento.

El deslizamiento en bloque (*block sliding*) en un plano de debilidad puede ocurrir solamente después de que la masa a deslizarse haya sido completamente aislada. En el caso de una masa de roca con un grupo dominante de juntas de estratificación, el deslizamiento no puede ocurrir a no ser que el aislamiento lateral del bloque se logre por la presencia de arroyos o bien si en los costados ha ocurrido desplazamiento lateral tipo falla por cortante. Esto último se facilita por la ocurrencia de fallas individuales o zonas de cizallamiento que cortan la masa a deslizarse en una dirección más o menos paralela al buzamiento de la superficie de deslizamiento.

Los bloques definidos por tres o más sistemas de fracturamiento sensiblemente paralelos no requieren de ninguna otra estructura o elemento topográfico si definimos que son removibles en el espacio excavado. Una prueba simple de movilidad determinada por el teorema de Shi, es una de las contribuciones más importantes de la teoría de bloques, como fue tratado por Goodman (1995). Los bloques que pueden ser removibles pueden deslizarse en un solo plano o en dos planos que se intersectan, moviéndose a lo largo de una de las aristas del bloque (una línea de intersección entre dos fracturas). También pueden moverse en un modo rotacional, como será descrito a continuación.

Los deslizamientos de cuña (*wedge slides*) ocurren en taludes convexos cortados solamente por dos superficies de discontinuidad no paralelas. En estos casos, los bloques son labrados con aproximadamente cuatro caras por los dos planos de discontinuidad en la roca y por dos planos tangentes a la superficie. Por lo tanto no es necesaria la presencia de superficies laterales para aislar el bloque cuando éste está a punto de deslizarse. En consecuencia, grandes masas deslizantes pueden ser liberadas por la intersección de una zona de cizallamiento o una falla de contacto entre dos miembros o dos formaciones o cualquier otra estructura bien definida, como un plano de estratificación buzante. Un ingeniero o un geólogo a quien se confía la seguridad de taludes en roca tiene que poner atención especial a la interpretación del mapa geológico de un proyecto, para asegurarse que este tipo de intersección no quede expuesta por la excavación proyectada.

El hundimiento de bloques (*block slumping*) describe un modo de rotación inversa donde bloques de roca dura se mueven de su contacto original de cara a cara, a un contacto de borde a cara. Descrito inicialmente por Wittke (1965), el modo de falla de hundimiento de bloques es el tema de una reciente disertación doctoral por Kieffer (1998). La Figura 5, tomada de la tesis de Kieffer, muestra como el hundimiento de varios bloques produce un escarpe que se asemeja en general a aquel que se produce en la falla por hundimiento (rotación) en suelos; sin embargo la anatomía interna es distinta, con bloques independientes que sufren rotación inversa y grandes aperturas tabulares. La Figura 6, también de Kieffer (1998), muestra como los bloques hundidos cambian de acuerdo al grado de fracturamiento transversal. En los tres casos, las capas están impedidas de deslizarse solamente sobre los planos de estratificación sumamente inclinados; en cambio se deslizan simultáneamente sobre la estratificación y un plano de fracturamiento transversal poco inclinado; esto atribuye a los estratos una acción similar a la mecánica de vigas, las cuales se fracturan y deforman.

La Figura 7 muestra un modo similar en el cual un bloque tras otro experimentó hundimiento y se deslizó hacia abajo sin rotar ni cambiar de orientación sobre un estrato subyacente blando. Sin exploración del subsuelo, es posible confundir este talud de bloques de roca, con un talud en un macizo rocoso homogéneo de roca estratificada.

El volteo (*toppling*) es una forma de fallamiento profundo en taludes, en los cuales los bloques o columnas tienen un buzamiento opuesto a la superficie expuesta, de manera que un estrato tiende a quedar colgado y soportado solamente por la resistencia pasiva de las capas de la base del talud. La Figura 8 muestra tres clases de roturas por volteo, nombradas por Goodman and Bray (1976).

El conferencista se ve obligado a confesarles su frustración en intentar comunicar el impacto de este mecanismo de fallamiento a algunos geólogos, cuya aceptación del volteo como un riesgo en taludes se encuentra impedida por su extraña atracción a la explicación de que esto no es nada más que un flujo de rocas (*rock-creep*). Es cierto que un mecanismo de flujo, visto desde la perspectiva de la geología física, incluye una lenta rotación, similar al volteo de estratos muy inclinados, el cual incluye una flexión a poca profundidad. Para el autor, el término flujo implica un movimiento lento y semi-continuo bajo un esfuerzo constante, el cual no lleva necesariamente a un fallamiento. En cambio los fallamientos por volteo pueden ser profundos, grandes y rápidos y pueden incluir roca fresca muy por debajo de la zona de verdadero flujo geológico. Como cualquier deslizamiento, el periodo de movimiento rápido es precedido por movimientos que van acelerando lentamente a medida que el peso de la roca se redistribuye hacia los extremos de los bloques al pie del talud. Después de la rotura principal, el macizo rocoso, ahora roto en flexión, continúa su lento "caminar" cuesta abajo y en esta condición, con seguridad dañaría tuberías de conducción

colocadas erróneamente sobre un macizo rocoso con mecanismo de volteo (un error que aparentemente es muy común).

Las fallas de hundimiento de bloques y volteo pueden producir frentes escarpados de bloques de roca sueltos. Este material de talud suelto puede convertirse en un grave peligro para construcciones ubicadas cuesta abajo.

El colapso de columnas (*column collapse*), o pandeo (*buckling*) describe fallas por compresión de columnas de roca, los cuales se desarrollan típicamente en un rebaje de mina. Como se ilustra en la Figura 9, este modo es distinto al típico pandeo de una columna homogénea rodeada por completo de espacio abierto. El pandeo de un estrato de roca puede ocurrir solamente en una dirección; es más, el inicio del colapso de una columna de roca se desarrolla a partir de alguna imperfección inicial del estrato, como puede ser una flexión menor o una zona blanda en el material, en algún punto de la región de esfuerzo crítico en su parte baja, como fue tratado por Cavers (1981). Es probable que algunos fallamientos atribuidos a pandeo ocurrieron en realidad debido a un hundimiento de bloques, facilitado por un fracturamiento en cruz en la parte inferior de la columna. La Figura 10, de Kieffer (1998) muestra una forma de fallamiento intermedia entre los modos de hundimiento de bloques y pandeo, el cual puede ser denominado hundimiento por bandas plegadas (*kink-band slumping*).

Una serie de fallamientos secundarios de volteo, presentados por Goodman y Bray (1976), están ilustrados en las Figuras 11 y 12. El deslizamiento por volteo al pie, ocurre cuando las capas que están impedidas de deslizarse (porque no afloran al espacio abierto) ocupan la región pasiva de un deslizamiento en bloque. La Figura 11C muestra un ejemplo del caso, que ocurrió por la existencia de una falla en la base de estratos potencialmente deslizables, que no afloraban al espacio abierto. En realidad este es un mecanismo activo/pasivo de dos bloques, en el cual la región pasiva se vuelca en vez de deslizarse.

La Figura 12 muestra dos casos adicionales de deslizamiento por volteo al pie. El deslizamiento a la izquierda del valle (a) tiene un bloque activo compuesto de filitas intemperizadas moviéndose a lo largo de un plano de debilidad a poca profundidad (como por ejemplo sobre una nueva fractura en capas) y se apoya contra un bloque pasivo con estructuras densas de foliación altamente inclinadas hacia el fondo del valle. Obsérvese que la punta del volteo y forma del bloque pasivo no podrían experimentar volteo bajo su propio peso, ya que las columnas de este bloque, antes de entrar en flexión, no son colgantes. En el deslizamiento del lado derecho del valle de la Figura 12, el bloque activo es una unidad metamórfica masiva y el bloque pasivo está formado por una filita con discontinuidades frecuentes, inclinada hacia el talud, en la forma típica de un volteo por peso propio.

En el deslizamiento por volteo en la base, ilustrado en Figura 11B, la transmisión de esfuerzos horizontales de cortante a lo largo de la base de un deslizamiento incipiente, causa el volteo de los estratos con buzamiento fuerte, que forman el cimientado al pie del deslizamiento, lo cual desencadena la destrucción de los cantiles sobreyacentes. El deslizamiento por ruptura en la base, ilustrado en la Figura 13, es similar, pero el bloque pasivo falla como un material de roca intacta blanda. En el caso ilustrado, el esfuerzo cortante transmitido bajo el pie del deslizamiento induce el rompimiento por tensión de la roca de esta formación. El debilitamiento y la destrucción al pie del talud pueden hacer que una masa rocosa que estaba experimentando flujo previamente, sufra un derrumbe completo.

La torsión de bloque (*block torsion*) es una forma de fallamiento de un solo bloque, en el cual una restricción local al desplazamiento hace que el bloque rote a partir de una charnela, en el punto donde el deslizamiento es impedido. Detenido en su deslizamiento, el bloque se mueve rotacionalmente a lo largo de una superficie de contacto. Este mecanismo de falla puede sorprender a un constructor que ancló un bloque, colocándolo cerca de una arista del bloque. La rotación del bloque en una arista es similar, con un movimiento rotacional del bloque hacia adelante, sin que haya contacto en ningún plano. El análisis de este tipo de fallamiento por rotación fue presentado por Wittke (1984) y Mauldon y Goodman (1990).

El último modo de fallamiento en la Tabla 1, estallamiento de roca (*rock bursting*), se refiere a la ruptura de la roca cerca de la superficie debido a los elevados esfuerzos tangenciales. Este modo difiere de la formación de fracturamiento en capas descrito anteriormente, donde el crecimiento de la fractura y la destrucción de la roca son eventos dinámicos. El estallamiento de roca ocurre típicamente en canteras de granito y en regiones con esfuerzos muy altos, pero también puede ocurrir en canteras de mármoles y cuando se excavan taludes en roca dura, en la base de un cañón angosto y profundo.

De esta lista de mecanismos de falla de talud, uno puede apreciar lo importante que es la caracterización del macizo rocoso y su estructura, para poder juzgar el tipo de fallamiento. Para descifrar el modo o modos de fallamiento, las herramientas elementales son el mapeo geológico estructural, la medición de alturas piezométricas y de manantiales a lo largo del talud y la observación de las deformaciones del talud por medio de medición topográfica de puntos fijos en la macizo rocoso y, si es posible, de inclinómetros. La Figura 14 compara la información de dos inclinómetros en un deslizamiento (a) y en un volteo (b). La diferencia más significativa de esta distribución de desplazamientos se debe al hecho de que el deslizamiento incluye esencialmente movimiento de cuerpo rígido de toda la masa que se desliza, en cambio el volteo es un movimiento de inclinación con desplazamientos predominantemente horizontales que decrecen linealmente a medida que la profundidad aumenta.

Una vez que se ha determinado el mecanismo de fallamiento, el grado de seguridad puede ser evaluado usando estática tridimensional, con diagramas de cuerpo libre deducidos del mapa geológico y de las presiones de agua calculadas a través de piezómetros. El análisis de equilibrio límite usando la teoría de bloques, se aplica en particular cuando hay un deslizamiento de un solo bloque de forma tridimensional compleja. La teoría de bloques determina la influencia que tiene la orientación del talud en la forma de falla y en la estabilidad del talud. Con modos de falla bidimensionales, como puede ser volteo, volteo secundario, hundimiento de bloques y deslizamiento simple. Estudios de este tipo están dentro de la capacidad de, por ejemplo, análisis numérico por *UDEC*, *DDA* y *FLAC*. El enfoque numérico permite al analista la comparación del costo relativo de distintas medidas de tratamiento, o permite juzgar la posibilidad de que la erosión subsecuente, excavación o deformación puedan desencadenar un fallamiento global. Goodman y Bray (1976) presentaron un método de equilibrio límite para taludes experimentando volteo; Ke, Thapa y Goodman (1994) extendieron este análisis para incluir el arrastre de suelo sobre la superficie y las presiones de agua entre los bloques. Kieffer (1998) desarrolló un método de equilibrio límite para el análisis de hundimiento múltiple de bloques.

Entre las causas básicas que propician deslizamientos, como fue tratado por Terzaghi (1950), el conferencista considera conveniente distinguir el grupo de causas cinemáticas. Estos son eventos que cambian las condiciones geométricas de frontera en el deslizamiento, a través de la erosión o de la excavación. La Figura 15 muestra algunos ejemplos. En la Figura 15A, la excavación de sedimentos y de material previamente deslizado completa el aislamiento al pie de un antiguo deslizamiento de roca. En la Figura 15B, la excavación de un túnel de grandes dimensiones debajo de una superficie de cizallamiento aflorante, causa una cadena de eventos que liberan el deslizamiento de bloques en los taludes de arriba. Los rebajes mineros en el pie de un talud muy inclinado también pueden causar deslizamientos o volteos (como es el caso del famoso deslizamiento de Turtle Mountain, cerca de Frank, Alberta).

La Figura 15C muestra un caso en el que una nueva excavación en el costado de un cerro hace aflorar la superficie de deslizamiento de un nuevo deslizamiento en bloque. En la Figura 15D, el continuo volteo en la base profunda de una montaña crea nuevos bloques debido a que la inclinación de las juntas transversales aumenta gradualmente. La Figura 15E muestra una condición común en costas rocosas, en las cuales el continuo golpeo de las olas y la erosión al pie de los acantilados rocosos remueven el soporte esencial de la masa rocosa, con riesgo de volteo. De la misma manera, la erosión del mar puede provocar asentamientos y deslizamientos al cambiar las condiciones de frontera a lo largo de la base de la falla potencial.

La Figura 15F muestra como la erosión de una cañada puede aislar deslizamientos de cuñas. Esta es una causa cinemática que es poco entendida y merece más atención. La erosión no sólo remueve el soporte de la tierra y cambia las condiciones hidrológicas, sino también cambia la configuración del talud en roca y aumenta el espacio vacío. La teoría de bloques puede ser usada para calcular el daño potencial que esto puede ocasionar en un caso particular. Se considera que los problemas de taludes en roca son de muchas más variaciones y complejidad de lo que generalmente es aceptado.

El objetivo de esta conferencia no ha sido el brindar una aventura a los fanáticos por las clasificaciones, sino más bien el reconocer el amplio espectro de responsabilidades y posibilidades que tenemos cuando movemos rocas o ubicamos una nueva estructura en un terreno inclinado. Una clasificación en este sentido es tan útil para el ingeniero como fue la apreciación de Karl Terzaghi sobre la variedad de tipos de suelos arcillosos. Como Terzaghi escribió a R. L. Loofbourow en 1953, "*¿cómo pretenden describir lo que saben acerca de las propiedades físicas de rocas, y cómo pueden relacionar sus experiencias con las de otros si no tienen un lenguaje común adecuado?*"

Si vamos al campo, podemos observar que las rocas intentan mostrarnos lo que ocurre dentro de ellas. No quisiéramos recetar la medicina incorrecta porque nuestro diagnóstico es incorrecto, en especial si nos negamos incluso a ver al paciente. Sin embargo, al hacer nuestro examen, podemos seguir el consejo que Terzaghi dio al ingeniero Adolph Ackerman acerca de la observación de deformaciones en el talud de la tubería de conducción de Serre (28 de Junio de 1947): "*La persona a cargo de las observaciones en el campo siempre debe tener en mente que éstas podrían ser recabadas con la misma eficacia por una máquina a no ser que los hallazgos produzcan una reacción en el cerebro del observador, y que estas observaciones sean utilizadas como herramientas para la mejora y la clarificación de las ideas.*"

El conferencista desea agradecer a la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas por brindarle el honor de dar esta conferencia en nombre de una persona tan importante como lo fue el Profesor Raúl J. Marsal. Él también siente la necesidad de expresar su aprecio por su brillante estudiante de pos-grado Scott Kieffer y a los Profesores Gunter Riedmueller y Rainer Poisel por las reveladoras conversaciones frente a muchas laderas. El señor (pronto Doctor) Kieffer gentilmente permitió la reproducción de varias figuras de su admirable disertación doctoral. Finalmente, el conferencista quiere agradecer al señor Adrián Rodríguez-Marek por la traducción al español de esta conferencia, a Tomás Lugo-Ibarra y José Luis Garrido Uribe por su revisión y a ustedes, la audiencia, por su paciencia intentando entender mi irregular pronunciación de su bello idioma español.

Tabla 1. Modos típicos de fallamiento en taludes de rocas

MODO DE FALLA	ROCAS TÍPICAS
Hundimiento (cortante con rotación inversa)	Arcillas-lutitas blandas o intemperizadas; rellenos de falla; tobas blandas.
Erosión/Tubificación	Suelos residuales limosos, especialmente granito desintegrado, rellenos limosos de falla, areniscas no cementadas, sedimentos piroclásticos sin arcilla, no cementados.
Desprendimiento	Brechas y conglomerados pobremente cementados, rocas duras densamente fracturadas.
Deslizamiento sobre "fracturamiento en capas" preexistentes o de nueva formación	"Fracturamiento en capas" preexistentes en granitos y areniscas, fracturas en capas nuevas, en rocas duras intemperizadas sobre taludes muy inclinados, areniscas masivas frágiles y piroclásticos.
Roca triturada o desintegrada	Las rocas suaves forman puente de roca que impide el movimiento de bloques; las rocas rígidas originan el falseamiento por capacidad de carga de rocas suaves o suelos subyacentes, i. e. Tobas pobremente soldadas sobre tobas suaves alteradas.
Deslizamiento de un bloque o múltiples bloques sobre un plano	Rocas duras o suaves con discontinuidades bien definidas, ejemplos: rocas sedimentarias estratificadas, rocas volcánicas de flujo, granito fracturado en bloques, aún si están alterados y rocas metamórficas foliadas.
Deslizamiento de un bloque o múltiples bloques a través de una línea de intersección	Rocas en bloques, con dos sistemas continuos de fracturamiento, como las rocas sedimentarias con fracturamiento ortogonal, rocas falladas, granitos fracturados en bloques y especialmente rocas metamórficas foliadas.
Hundimiento o asentamiento de un bloque o múltiples bloques (rotación inversa sobre una esquina o arista del bloque).	Rocas duras con fracturas persistentes paralelas, buzando hacia el espacio libre, con mayor inclinación que el ángulo del talud y al menos una fractura plana aflora en el corte. Se desarrolla principalmente en pizarras, filitas y esquistos.
Volteo de un bloque o múltiples bloques (rotación hacia adelante sobre un borde o arista)	Rocas duras con fracturas paralelas buzando hacia el macizo rocoso, con o sin fracturamiento ortogonal. Se desarrolla mejor en pizarras, filitas, esquistos y en rocas sedimentarias estratificadas con buzamiento fuerte; también en granitos fracturados en bloques.

Colapso de columnas	Rocas sedimentarias débiles, de estratificación delgada con buzamiento paralelo al talud, sin fracturamiento ortogonal. Se presenta típicamente en lutitas/areniscas, lutitas/pedernal, horizontes de carbón y pizarras, filitas o esquistos.
Deslizamiento por volteo al pie	Rocas típicas al volteo, al pie de un derrumbe o deslizamiento en bloque, particularmente cuando el pie del deslizamiento es una falla.
Deslizamiento por volteo en la base	Rocas típicas al volteo que subyacen a un deslizamiento o deslizamiento de bloque, particularmente donde la base del deslizamiento es una superficie de falla.
Deslizamiento por ruptura en la base	Rocas débiles que se pueden romper bajo un esfuerzo cortante paralelo a la superficie del deslizamiento, donde la superficie aflora en una ladera pronunciada o tajo.
Torsión o rotación de bloques	Macizo rocoso en bloques donde el deslizamiento sobre una superficie potencial de deslizamiento, es impedido por la rugosidad y el puenteo de las fracturas, formando una "bisagra".
Rotación de bloques a través de una esquina	Macizo rocoso en bloques que puede deslizar a lo largo de una línea de intersección, pero son impedidos de hacerlo por la rugosidad y puenteo de las fracturas en donde la esquina aflora.
Estallido de rocas	Movimientos dinámicos violentos y nuevas fracturas debido a esfuerzos <i>in situ</i>; se presenta ocasionalmente en canteras de rocas metamórficas y graníticas sin uso de explosivos.

**Tercera conferencia magistral Profesor Raúl J. Marsal
The behavior of rock in slopes.**

Richard E. Goodman.

Most people speeding down highways in closed cars don't get a good look at the rock cuts through which they pass, but owners of convertibles, motorcycles, and bicycles, certainly do; and they may consequently arrive at their destination wondering if they were participants in a giant game of Russian Roulette. It may seem that hanging ledges with open joints, and ready-to-slide blocks are detachable parts of the mountain which are just as likely to drop into the roadway as not. Unfortunately, determining whether this is true is not easily amenable to analysis and, no matter how many computer programs or stability analyses are run, there is no certainty that stability will have been assured unless adequate stabilization or protective measures have been constructed. In pondering the design of such measures, the rock mass may be likened to a school full of adolescents. How will they behave? Where will they act up? Since closing down the school is rarely a viable option, the only reasonable procedure is to anticipate the styles of behavior and misadventure to which the children are susceptible and be prepared to react responsibly.

Because rock structures and compositions vary within wide limits, the variety of behavioral styles is rich. Most courses and textbooks (including those contributed by the speaker) tend to oversimplify the spectrum of failure modes in order to facilitate the work of a newcomer to the field. Those who have been in practice in varied geological situations will easily recognize this strategy and adopt their own wiser and broader approach to real problems. But those who lack varied experience may try to establish simple models of behavior where more complex modes are at work, with less than comforting results. It is the intent of this lecture to lead a tour through a longer list of slope failure styles, commenting along the route about the observable characteristics that distinguish one from another.

This paper is principally concerned with slopes in rocks, both hard and soft (although retaining this focus can be difficult in some earth materials for which the customary distinction between soils and rock is blurred, particularly near the surface). The geotechnical engineer has an abiding interest in soil and rock slopes, as part of the natural environment of the terrain in which he or she works or as a vital element of a Work to be constructed, above or even below ground.

It must be appreciated that the rock slope environment is distinctly different, and generally less secure, than the underground environment. Although a person may feel more exposed underground, because of the dangers of working in a close space, the surface excavation tends to be less stable because of low stresses, weathered materials, and water.

The continuous flow of tangential stress around a carefully excavated underground opening may retain blocks in place in the walls and roof; however little or no surface traction operates on the faces of blocks at the surface where the tangential stress is usually very small. Furthermore, block theory shows that the key-blocks that can move into a surface excavation tend to be larger than those that can move into an underground gallery; thus local failures tend to be bigger on the surface than underground.

Moreover, the open cut usually includes weathered rocks, whose strengths are much less than that of the intact rock. Some of the weaker rock types will continue to degrade because of disturbance during construction and thereafter under the action of water and weather, particularly in warm, moist climates. Additionally, while water veins tend to be intercepted in both the underground and the surface cutting, surficial materials may yield far more water due to greater porosity and increased degree of fracturing, despite lower hydraulic heads; furthermore surface waters compound the troubles that can be caused by ground water. In both the underground and surface environment, the hydraulic pressure of water in fractures, and internal pore pressures within soil-like porous fault gouge, fissured rocks, or soft sedimentary strata, can markedly destabilize a rock mass. During rain storms, surface cuts may also have to contend with effects of loss of capillary pressure or softening of clay materials in an initially desaturated or desiccated state, while internal or external erosion of silty weathered materials, typical of residual soils, can trigger rapid slope destruction.

Natural slopes form the foundations of surface penstocks, and buildings, and the abutments of bridges and dams.

Artificial rock slopes are products of excavations to create space for transportation routes, buildings, power houses, dams, and portals. These are "permanent" slopes in which rock movements have to be prevented or controlled. But even "temporary" rock slopes, as for quarries and contractors' operations, may have portions in which failure needs to be prevented for a long time, and some slopes intended to be short-lived have taken up new lives as permanent features of the landscape abutting on housing or industrial developments.

Since an excavated rock slope may have an extended life during which it is not permitted to menace adjacent facilities, the engineer will have to understand how to interpret signs of impending trouble. Some of the tell-tale signs vary with the particular failure mode that the slope material undergoes. Fortunately, most slope problems materialize during the construction period and can be rectified with appropriate redesign or construction expedient, especially if the failure mode is properly identified. However others may develop only after a long time, during which successive stages in a progression of events slowly and surreptitiously move the slope towards danger or eventual collapse.

within the rock mass to delimit real removable blocks. If these blocks moved under the natural forces still operating in the slope, the moulds identify "keyblocks" of the specific slope; since there are sometimes many different discontinuity sets that could theoretically intersect to form important blocks, the identification of the actual "bad-actors" is a valuable bit of geotechnical data.

Table 1 lists typical modes of failure for rock slopes. The first five are best developed in soft, soil-like rocks; the sixth occurs in soft or hard rocks, and the remaining ten modes are more frequent in the harder rocks. Examples of typical materials in which these modes are realized are also stated in this table. The contents of this table will be discussed in the following paragraphs.

The idealized, simple modes featured in textbooks on rock mechanics (like those of Hoek and Bray (1981) and Goodman (1989)) are: block sliding on a single face (sometimes termed *slab sliding*); block sliding on two faces simultaneously along their line of intersection (often termed *wedge sliding*), and overturning of multiple columns (usually called *toppling*). "Textbook cases" in which one of these three behavior styles is the sole cause for damage to a rock slope do occur. Wedge and block sliding modes are much more common than toppling. However, although the toppling mode was not generally appreciated until fairly recently, we have since learned of many significant toppling failures, particularly in steep mountain slopes or open pit mines. The speaker has recently battled three toppled rock slopes that bear hydro-electric penstock lines on their backs, each of which has been threatened by deep seated slope deformation.

If a rock slope is large and embraces a mix of rock types and structures, it can not be expected that a single mode of failure will cover all sectors. On the contrary, within a single sliding mass it is not unreasonable to find more than one of the simple rock-failure modes at work; one part may be sliding, another toppling, another experiencing erosion, and yet another suffering new fractures and destruction of previously continuous rock volumes. Some of the principles governing this compound behavior are as follows.

- 1) Isolated blocks are formed by the intersections of previously formed discontinuities and the excavation surface.
- 2) Adversely oriented blocks move out first, leaving behind a new space into which adjacent blocks can move; the first blocks to move were named, by Goodman and Shi (1985) "keyblocks".
- 3) Sliding along an adversely oriented rock face or block edge will invariably occur if the kinematic conditions for such sliding are met; the most important of these conditions is that the block be removable in the

excavated space, meaning that the direction of incipient motion daylights into the excavation.

4) If sliding motion is prevented or inhibited, rotational movements are favored. Thus when sliding opportunities are blocked because the sliding layers do not daylight, toppling, buckling, block slumping, and torsional failures can occur.

5) Incomplete blocks that would tend to slide but which are not completely cut out by the joint system (meaning not completely "isolated") may fail when new rock fracturing completes the isolation of the block.

These principles cover most of the entries in Table 1, which we now examine methodically from top to bottom.

Slumping is the classical backward rotational shear failure best developed in clay soils. Only a few types of rock masses are soft enough or sufficiently free of weak seams and joints to develop true slumping. The rock types that do generate slumps are clay-rich rocks, softened by loosening and wetting, as for example smectite-rich clay-shales, and weathered or altered tuffs. Slumps can also occur in highly fissured rocks containing so many discontinuities as to be effectively homogeneous, as may be found in and adjacent to major fault zones and among Tertiary sediments and coal-bearing rock formations. In most other rocks, fracture develops in the tensile mode rather than through shear rupture so that the classical curved sliding surfaces prove to be rare.

Figure 2A depicts a style of slumping found in rock formations in which the sliding material is uplifted by water pressure in an underlying aquifer that has impeded drainage opportunity in the valley bottom. The principal cause of the failure is high pore-pressure in the sliding formation, which acts as an aquiclude.

Figure 2B depicts a similar case where the high pore pressures are caused by an impervious member at the base of the slope which impounds ground water beneath the hillside. In the same vein, Terzaghi repeatedly cautioned about the destabilizing effect of pore pressures produced where sedimentary layers impede drainage of ground-water from hydraulically conductive joints.

Erosion can very seriously degrade a rock slope, either by the surficial action of concentrated run-off, or from internal erosion or piping, particularly in poorly cemented silty sediments, highly weathered granitic rocks and saprolyte. Internal erosion and piping can occur when natural or artificial slopes contain loose silty materials in contact with open-jointed hard rock, an arrangement that occurs automatically in many volcanic rock series and in extensive fault zones. If the erodible soils are downstream of rock with open joints, exiting seepage can start a process of quick erosion which undermines adjacent rocks by transforming the shape of the excavated

space. If the erodible soils are upstream of the open joints, their internal erosion into the cracks is possible but generally less damaging to the slope (although it may be devastating for upstream structures).

Ravelling refers to progressive loosening and erosion of cobbles or blocks from the surface of the rock cut. It is a process of mass wasting and gradual erosion under active weathering and gravity transport. Very highly fractured hard rocks, as for example columnar basalt, and brittle sandstone lying atop soft shales, may contribute large talus cones by this process. Depending on the shape of the slope section, the moving particles may become projectiles.

Sheet jointing describes extension joints formed parallel and at shallow depth beneath the free surface. The classic sheet joint occurrences in granitic rocks and massive sandstone preexist the rock cut and lie sub-parallel to the original slope surface. But new sheet jointing tends to form in any relatively unjointed, hard or soft rock, parallel to any newly cut steep slopes. If the inclination of the sheet joint is steeper than the angle of friction between the walls of the joint, as is so often the case, the slope is stable only by virtue of tensile stresses at the tops of the steepest portion of the sheets, which in effect are left hanging. New cracks, as in Figure 1D, then allow sheets to dislodge. Weathering of the sheets reduces the tensile strength (surprisingly rapidly in moist, warm climates), promoting their detachment and failure. Figure 3 depicts failure of a hanging sheet formed beneath a new cut slope. The slide is disruptive because it falls suddenly. If the slope is high, the volume of material may be large despite the thinness of the new sheet.

Figure 4 shows a mechanism of rock-mass loosening resembling sheet joint formation that operates in inter-layered sandstone and shales. As the slope rebounds forward, the sandstone splits while the shale decrepitates. The entire sheet may come down at a later time, due to water or ice action, progressive deterioration, or as an inadvertent result of grouting. Terzaghi (1962) cautioned against the general deterioration of slopes after their formation.

Rock crushing is not infrequently instrumental in the failure of rock slopes despite the important action of discontinuities within the rock mass. Rupture of rock bridges allows the final step in the isolation of some slide blocks which otherwise would have failed soon after initial excavation. Because of the finite extent of most joints, very large, potentially highly significant slides may at first be imperfectly isolated by the joint system. After excavation, gradual crack growth concentrates stresses of increasing intensity in the remaining unfractured portion of the bridge, leading to an accelerating rate of movement and rupture.

Block sliding on a single plane of weakness can occur only after the eventual sliding mass has been completely isolated. In the case of a layered rock

mass with one dominant set of bedding joints, a potential slide can not occur unless the lateral isolation of the block is carved out by topographic valleys, or the sides have developed strike-slip type shear ruptures. The latter is facilitated by the occurrence of individual faults or shear zones that cut the slide mass roughly parallel to the direction of the dip of the sliding surface.

Blocks defined by three or more sets of joints do not require any other structures or topographic helps to slip out if they are "removable" in the excavated space. A simple test of removability, determined by Shi's Theorem, is one of the significant contributions of Block Theory, as discussed by Goodman (1995). Blocks shown to be removable may slip in a direction on one face alone, or on two intersecting block faces, moving along one of the block's edges (a line of intersection between two joints), or they may move in a rotational mode, as will be enumerated.

Wedge slides can and do occur in convex slopes cut by only two non-parallel discontinuity surfaces. In these cases, approximately four-sided sliding blocks are carved by the two rock discontinuity planes and two tangent planes of the terrain surface. Thus no additional lateral release surfaces are necessary to isolate the block as it prepares to slide. Accordingly, very large sliding masses can be set free by the intersection of say an important, extensive shear zone or fault with a contact between two members or formations, or any other well-developed, slippery bedding plane. Any engineer or geologist entrusted with the safety of rock slopes needs to keep an alert eye on the developing geologic map of a project to assure that such an intersection does not become undercut by project excavation.

Block slumping describes a mode of backward rotation of hard blocks as they move from their original face-to-face connection into edge-to-face contact. Initially described by Wittke (1965), the block slumping mode is the subject of a recent doctoral dissertation by Kieffer (1998). Figure 5, taken from Kieffer's thesis, shows how the successive slumping of multiple blocks produces a scar resembling that of a soils slump in its gross features; however the internal anatomy is distinct, with independent back-rotated blocks and large tabular apertures. Figure 6, also from Kieffer (1998), shows how block slumps change according to the degree of cross-jointing. In all three cases, the layers are blocked from sliding on the steeply dipping beds alone and end up slipping simultaneously on the bedding and a more gently dipping crossing joint plane; this assigns to the layers the mechanical action of beams, which then fracture and deform. Figure 7 shows a similar mode in which one block after another has slumped and rafted down along the surface of a soft lower layer. Without subsurface exploration, it might be possible to mistake this block-armored slope as belonging to a single, homogeneous mass of layered hard rock.

Toppling is a deep-seated failure mode for rock slopes in which the blocks or columns dip away from the free space, such that any single layer tends to

overhang and is supported only by the passive resistance of its downslope neighbors. Figure 8 shows three classes of toppling failures named by Goodman and Bray (1976).

The speaker must confess some frustration with trying to communicate the impact of this failure mode to some geologists, whose acceptance of toppling as a slope hazard is impeded by their strange attraction for the explanation that it is nothing but "creep". It is true that one mechanism of creep from a physical geology perspective involves slow toppling-like rotation of steeply dipping layers, which yields a hinge line at shallow depth. To the author, the term "creep" signifies slow, semi-continuous motion under constant stress; it does not necessarily lead to rupture. Toppling failures, on the other hand, can be deep, large, and rapid and can involve fresh rock well below the zone of true geological creep. Like any landslide mass, the period of rapid movement is preceded by slowly accelerating displacements as the rock weight is gradually redistributed to the toe blocks. After the main rupture event, the now flexurally broken rock mass continues to walk slowly downslope, and in this condition would surely damage penstocks that had been ignorantly placed atop the toppled mass (a mistake that seems to be quite common).

Both block slumping and toppling modes can produce steep fronts of highly broken and very loose rock blocks. This loosened talus can become a severe hazard to lower facilities.

Column collapse, or buckling describes compressional failures of rock columns, typically developed in a mine-footwall environment. As cartooned at the peak of failure in Figure 9, this mode is distinct from classical buckling of a homogeneous column surrounded entirely by free space. The buckling rock layer can deform in only one direction; furthermore, initiation of column collapse takes advantage of some initial imperfection of the layer, for example a minor flexure or material weakness, at some point in the region of critical stress in its lower part, as discussed by Cavers (1981). It is quite likely that some failures attributed to buckling resulted rather from block slumping, facilitated by a cross joint in the lower part of the column. Figure 10, from Kieffer (1998) shows a mode of failure intermediate between block slumping and buckling, which might be termed *kink-band slumping*.

A number of "secondary toppling modes", discussed by Goodman and Bray (1976), are depicted in Figures 11 and 12. *Slide-toe toppling* occurs when layers that are blocked from sliding (because they do not daylight) occupy the passive region of a block slide. Figure 11C shows such a case as set up by the occurrence of a fault at the base of potentially sliding layers that do not daylight. In effect this is a two-block active/passive mechanism in which the passive region topples rather than slides.

Figure 12 shows two additional cases of slide toe toppling. The slide on the left side of the valley (a), has an active block composed of weathered phyllites moving along a weakness surface at shallow depth (for example a new sheet-type joint) and bearing against a passive block with closely-space foliation joints dipping steeply towards the valley bottom. Note that the toppling toe forming the passive block could not topple under its own weight as the individual columns in this block, before bending, are not overhanging. In the slide on the right side of the valley of Figure 12, the active block is a more massive metamorphic unit and the passive block is formed in a more closely jointed phyllite, dipping into the slope in the classical manner for toppling under self-weight.

In Slide base toppling, sketched in Figure 11B, the horizontal shear stress transmitted along the base of an incipient slide provokes toppling of steeply dipping layers forming the slide toe's foundation, which triggers destruction of the overlying cliff. *Slide base rupture*, drawn in Figure 13, is similar, but the passive block fails as an intact weak-rock material. In the case depicted, the shear stress transmitted beneath the slide's toe induces tensile splitting of the rock forming this member. Weakening and destruction of the toe can propel a previously creeping slide mass towards gross failure.

Block torsion is a mode of failure of a single block in which delete local restriction of sliding causes the block to spin out about a hinge at the point where sliding is impeded. Stopped from sliding, the block moves in a rotary motion along one contacting surface. Such a failure mode could surprise a constructor who pinned a block by means of a rock bolt placed near its corner. *Block rotation about a corner* is similar, with the rotary motion moving the block forward through space without contact in any plane. Analysis of these types of rotational failures are discussed by Wittke (1984), and Mauldon and Goodman (1990).

The final entry in Table 1, Rock bursting, refers to failure of rock near the free surface due to high tangential stresses. This mode differs from the formation of sheet joints previously described in that the fracture growth and rock destruction are dynamic events. Rock bursting occurs typically in granite quarries in highly stressed regions but can also happen in marble quarries and when excavating rock slopes at the base of a narrow, deep canyon in hard rocks.

From this list of different slope failure mechanisms, one can appreciate how important it is to characterize the rock mass and its structure in order to judge the style of failure. In order to decipher the failure mode(s), the basic tools are structural engineering geological mapping, the measurement of piezometric levels and springs throughout the slope, and observations of slope deformation using surveying of fixed targets on the rock mass and, if feasible, borehole inclinometers. Figure 14 compares the slope inclinometer signatures of a slide (a) and a topple (b). The significant difference in these

response patterns is due to the fact that the slide involves essentially rigid-body motion of the entire displacing mass, while the topple is a tilting motion with predominantly horizontal displacements that decrease linearly with depth.

Once the predominant failure modes have been appreciated, the degree of safety can be judged using three dimensional static, with free-body diagrams deduced from the geological map and water forces calculated from the piezometry. Limit equilibrium computations using block theory programs are particularly applicable to single block slides of complex 3-d shape. Block theory determines the strong influence of the direction of the cut slope on the mode of failure and slope stability. With two dimensional modes, like toppling, secondary toppling, block slumping, and simple sliding, numerical models that include the representation of discontinuities prove useful. Studies of this type are within the capabilities of, for example, UDEC, DDA, and FLAC. The numerical approach allows the modeller to compare the relative cost effectiveness of different remedial approaches, or to judge the likelihood that erosion, excavation or deformation will trigger global failure. Goodman and Bray (1976), presented a limit equilibrium analyses for toppling slopes, and Ke, Thapa and Goodman (1994) extended the analysis to handle drag of soil over the surface and water pressures between the blocks. Kieffer (1998) developed a limit equilibrium analysis for multiple block slumping.

Among the causes and triggers of slides, as discussed by Terzaghi (1950), the speaker finds it helpful to distinguish the class of *kinematic causes*. These are events that change the geometric boundary conditions of the slide by means of erosion or excavation. Figure 15 shows some examples. In Figure 15A, excavation of sediments and previous slide material completes the isolation of the toe of an ancient rock slide. In Figure 15B, the driving of a large tunnel beneath a daylighting shear surface causes a chain of events that release block slides in the slopes above. Mining work in the toe of a steep slope can similarly release slides or topples (as in the case of the famous Turtle Mountain slide near Frank, Alberta).

Figure 15C depicts the case where a new excavation in the side-hill daylightes the sliding surface of a new block slide. In Figure 15D, continued deep-seated toppling of a mountain mass creates new block slides through the gradual steepening of the dip of cross joints. Figure 15E shows a common condition along a rocky coast where bombardment by waves and erosion of the toe of the sea cliffs removes the essential toe support from a potentially toppling mass. Similarly, sea erosion can provoke slumps and slides by redefining the boundary conditions along the potential toe.

Figure 15F shows how erosion of a gully can isolate potential wedge slides. This is a less well appreciated kinematic cause that deserves careful attention. Erosion not only removes supporting earth and changes

hydrologic conditions, but it reconfigures the rock slope and enlarges the space. Block theory can be used to judge how potentially damaging this can be in any particular case.

The problems of rock slopes are seen to be capable of much more variation and complexity than generally admitted. The goal here was not to provide an adventure for classification fanatics, but to recognize the spectrum of responsibilities and possibilities when we move rock or place structures on sloping ground. Classification in this sense is as potentially useful to the engineer as Karl Terzaghi's appreciation of the different kinds of clay soils has been to the soils engineer. As Terzaghi wrote to R.L. Loofbourow, in 1953, "how are you going to describe what you know about the physical properties of rocks and how can you correlate your experiences with those of others if you have no adequate language in common?"

If we go to the field, we can see the rock trying to show us what's going on inside it. We would not wish to prescribe improper medicine because our diagnosis is faulty, especially if we neglected even to examine the patient. However, in making this examination, we can heed Terzaghi's counsel to engineer Adolph Ackerman, concerning the observations of deformations in the Serre Penstock slope (June 28, 1947): "The man in charge of the field observations should always keep in mind that field observations could as well be performed by a recording machine unless the findings produce reactions in the brains of the observer and are utilized as tools for improvement and clarification of ideas."

The speaker wishes to thank the Mexican Society of Rock Mechanics for entrusting him with the honor of lecturing in the name of so significant a person as Professor Raul Marsal. He also must express appreciation to his brilliant graduate student Scott Kieffer and to Professors Gunther Riedmueller and Rainer Poisel for illuminating conversations in front of many a mountain slope. Mr. (soon to be Dr.) Kieffer kindly granted permission to include several Figures from his outstanding doctoral dissertation. Mr. Adrian Rodriguez translated the draft into Spanish. And finally, he wishes to thank you, the audience, for your patience in trying to understand his irregular pronunciation of your beautiful Spanish language.

Table 1 Typical Modes of Rock Slopes

NAME OF MODE	TYPICAL MATERIALS
Slumping (shearing with backward-rotation)	Weathered or softened clay-shales; thick fault gouges, soft tuffs.
Erosion/piping	Silty residual soils, specially disintegrated granite; silty fault gouge; uncemented sand rocks; uncemented non-clayey pyroclastic sediments.
Ravelling	Poorly cemented conglomerates and breccias; very highly fractured hard rocks.
Sliding on preexisting or new sheet joints	Preexisting sheet joints in granites and sandstone; new sheeting in weathered hard rocks on steep slopes, massive friable sandstone, and pyroclastic sediments.
Rock crushing or disintegration	Weak rocks forming rock bridges that restrain block motion; stiff hard rocks causing bearing capacity failure of underlying very soft rocks or soils, such as a poorly welded tuff bearing on soft, altered tuffs.
Block sliding on a single plane - single or multiple blocks	Hard or soft rocks with well defined discontinuities; examples are layered sedimentary rocks, volcanic flow rocks, block-jointed granite, even if decomposed, and foliated, jointed metamorphic rocks.
Block sliding on two planes along their line of intersection - single or multiple blocks	Blocky rocks with two continuous joint sets, as cross jointed sedimentary rocks, any regularly faulted rocks, block-jointed granites, and especially, foliated or bedded metamorphic rocks
Block slumping (back rotation about an edge) - single or multiple blocks	Hard rocks with regular, parallel joints dipping towards the free space but with the dip vector not daylighted and at least one flat - lying joint that does daylight in the space of the rock cut; typically developed in slates, phyllites and schists.
Block toppling (forward rotation about an edge) -	Hard rocks with regular, parallel joints dipping away from the free surface, with or without crossing joints; best developed in slates, phyllites, schist, and steeply

single or multiple blocks	dipping layered sedimentary rocks; also in block jointed granites.
Column collapse (buckling)	Thin - bedded, weak sedimentary rocks dipping parallel to the slope and not cross jointed. Typical in shale/sandstone, shale/chert, coal measures, and slate, phyllite, or schist.
Slide - toe toppling	Typical toppling rocks that occur at toe of a landslide or blockslide, particularly where the toe of the slide is a fault.
Slide-base toppling	Typical toppling rocks that underlie a landslide or block slide, particularly where the seat of sliding is a fault surface.
Slide-base rupture	Weak rock that can rupture under the shear stress parallel to the slide surface where the slide daylights in a steep hillside or cut-slope.
Block torsion	Blocky rock where sliding on the obvious potential slip surface is prevented by a rock bridge or asperity which forms a hinge.
Block rotation about a corner	Blocky rock which would slide along a line of intersection but is restricted from doing so by a rock bridge or asperity where the edge daylights.
Rock bursting	Violent new fracture and dynamic motion due to in-situ stress; occasionally found in granitic and metamorphic rocks quarried without blasting.

REFERENCES

1. Cavers, D.S. (1981) "Simple methods to analyze buckling of rock slopes" *Rock Mechanics* Vol 14, pp. 87-104.
2. Goodman, R.E. (1989) *Introduction to Rock Mechanics - Second Edition*. (Wiley).
3. Goodman, R.E. (1995) "The 35th Rankine Lecture - Block theory and its application" *Geotechnique* Vol XLV, no. 3, pp. 381-423.
4. Goodman, R.E. and Bray, J.W. (1976) "Toppling of rock slopes" in *Rock Engineering for foundations and slopes* (ASCE) Vol 2, pp. 201-234.
5. Goodman, R.E. and Shi, G.H. (1985) *Block Theory And Its Application To Rock Engineering* (Prentice-Hall).
6. Hatzor, Y. and Goodman, R.E. (1995) "Application of block theory and the critical key block concept to tunnelling: Two case histories" in *Proc. of Conf. on Fractured and Jointed rock Masses* (Balkema) pp. 663-669.
7. Hoek, E. and Bray, J.W. (1981) *Rock Slope Engineering - 3rd Edition* (Inst. Mining & Metallurgy, London).
8. Ke, T. C., Thapa, B, and Goodman, R.E. (1994) "Stability analysis of a penstock slope" in *Proc. 1st NARMS Symposium* (Balkema), pp. 1109-1116.
9. Kieffer, Scott (1998) "Rock slumping - - a compound failure mode of jointed, hard rock slopes", PhD Dissertation, University of California, Berkeley, Dept of Civil Engineering.
10. Mauldon, M. and Goodman, R.E. (1996) "Vector analysis of keyblock rotations - kinematics, failure modes and stability" *G. Geotech. Engin* (ASCE) Vol. 122 no. 12, December pp. 976-987.
11. Terzaghi, Karl (1950) "The mechanism of landslides" in *the Berkey Volume. Geological Society of America* pp. 83-245. (Reprinted in *From Theory to Practice in Soil Mechanics* (Wiley, 1960) pp. 202-245.
12. Terzaghi, Karl (1962) "Stability of steep slopes on hard, unweathered rock" *Geotechnique* Vol. 12, no 4, pp. 251-270.
13. Wittke, W. (1965) "Methods to analyze the stability of rock slopes with and without additional loading" *Rock Mechanics and Engineering Geology, Supplement 2* (Springer).
14. Wittke, W. (1984) *Felsmechanik* (Springer).

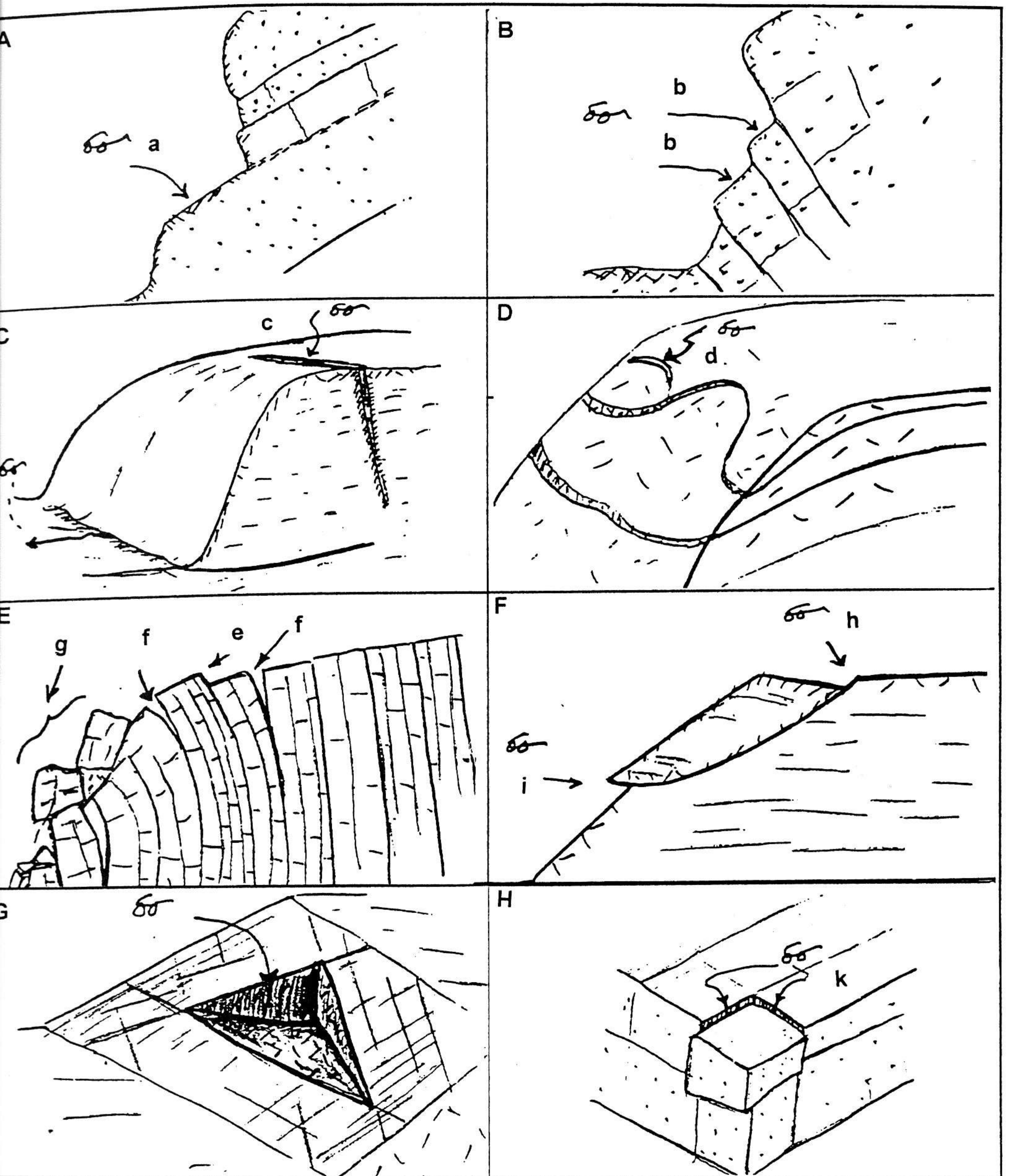
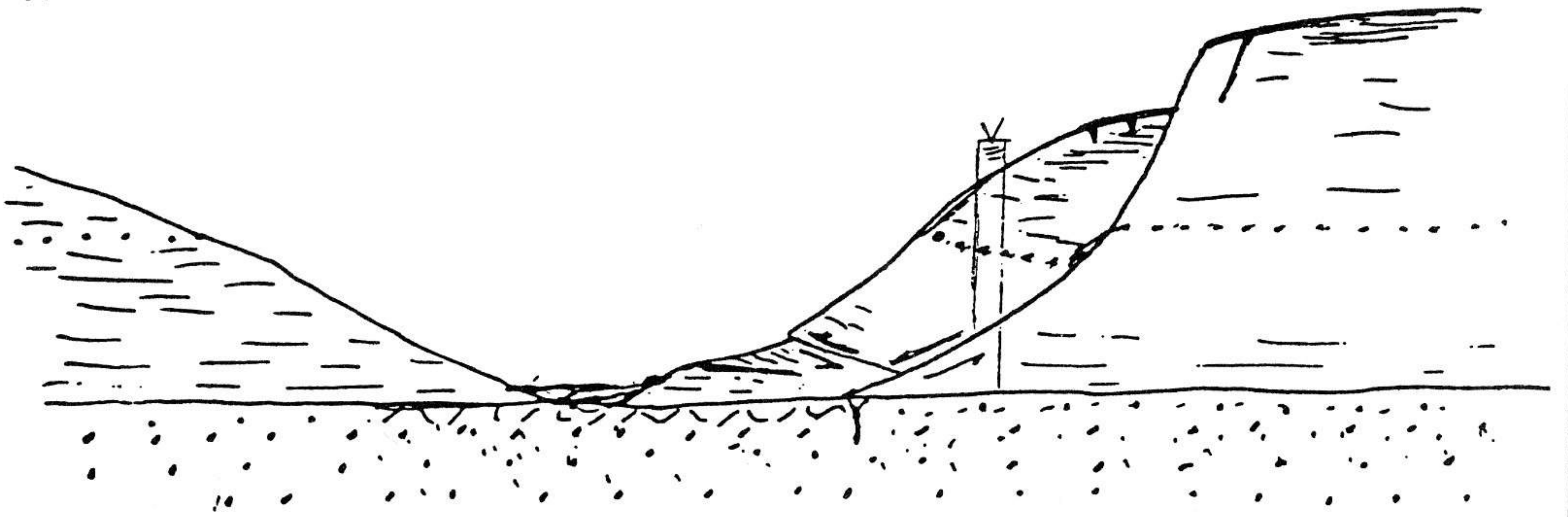


Figura 1
Rasgos típicos relacionados al comportamiento de taludes en roca.

Figure 1
Some observable features concerning the behaviour of rock slopes.

A



B

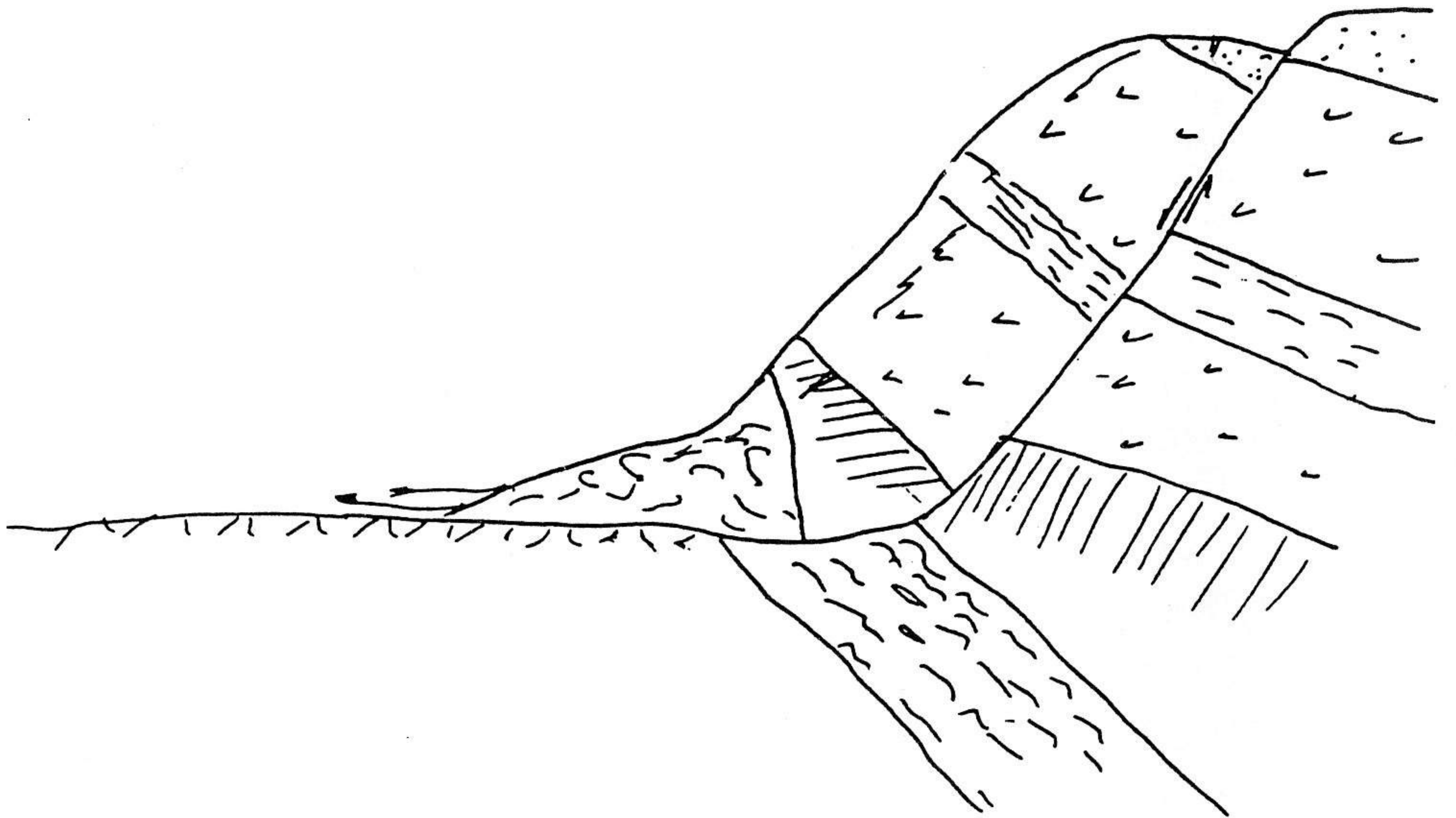


Figura 2

Falla por hundimiento causada por presión de poro en rocas blandas.

Figure 2

Slumping caused by internal water pressure in weak rocks.

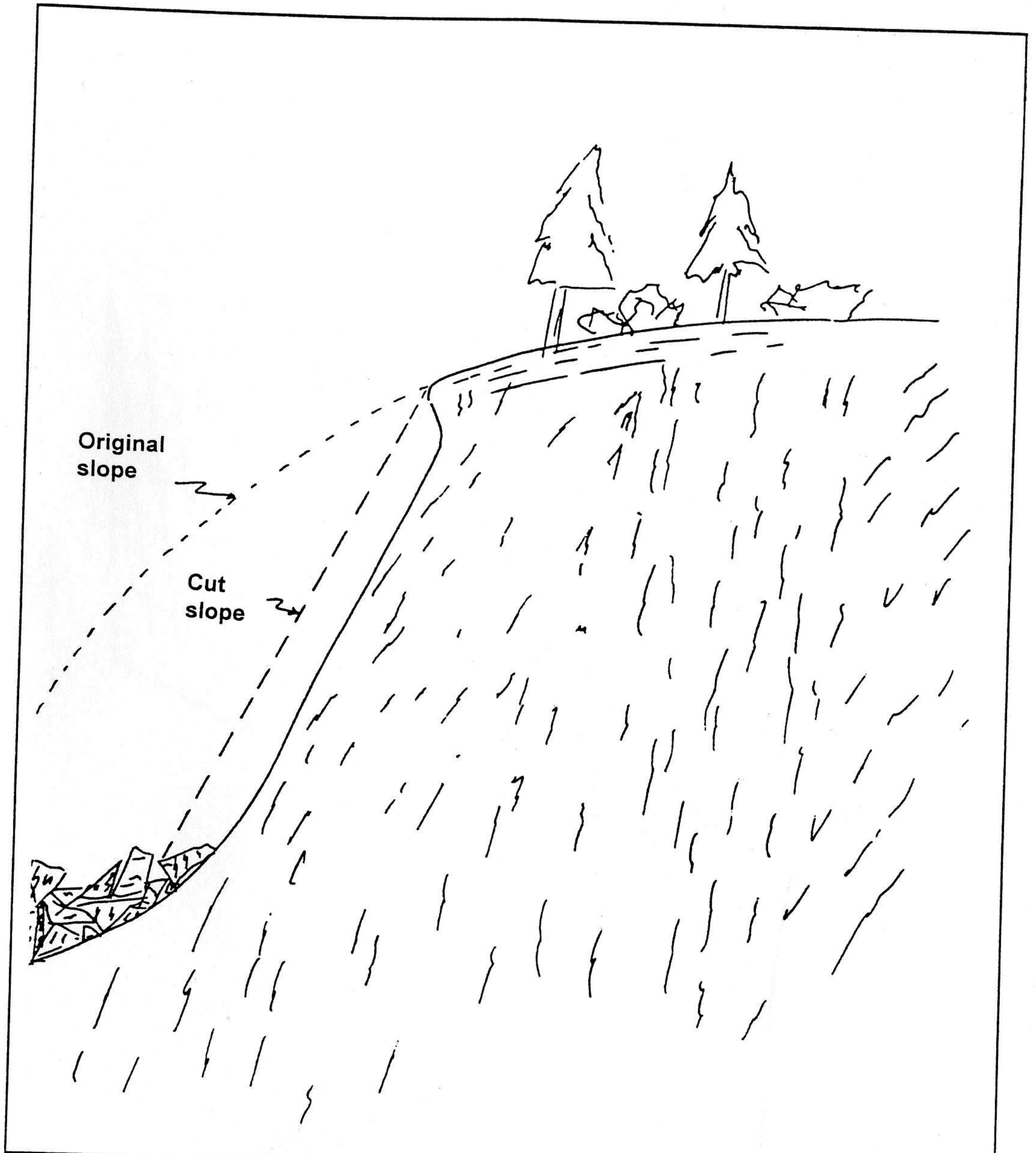


Figura 3

Falla de talud, por la formación de nuevas juntas en capas.

Figure 3

Slope failure after the formation of a new sheet joint.

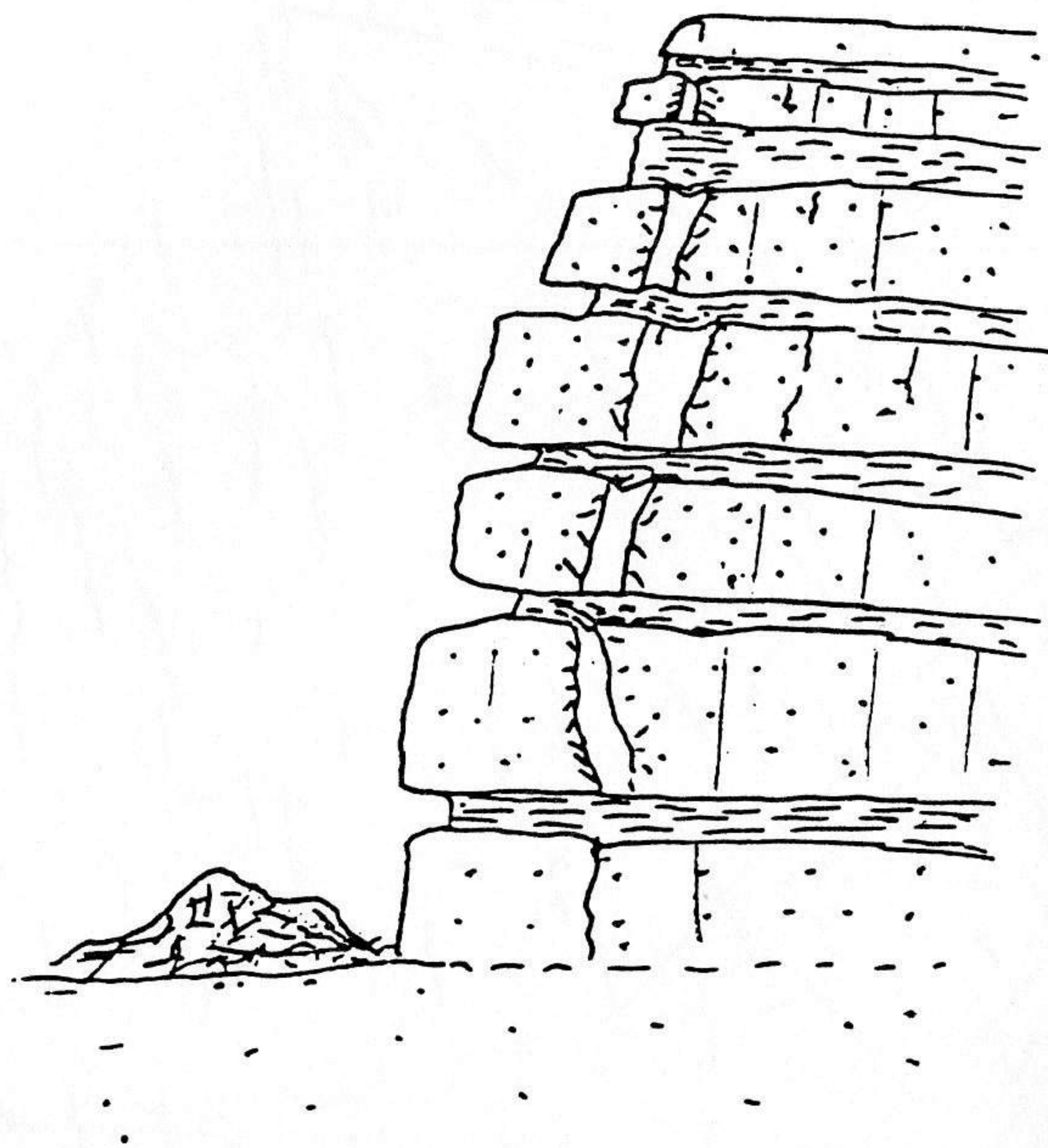


Figura 4

Formación de pseudo-capas, conduciendo al debilitamiento de una roca blanda.

Figure 4

Formation of "pseudo-sheeting", leading to loosening of weak rock.

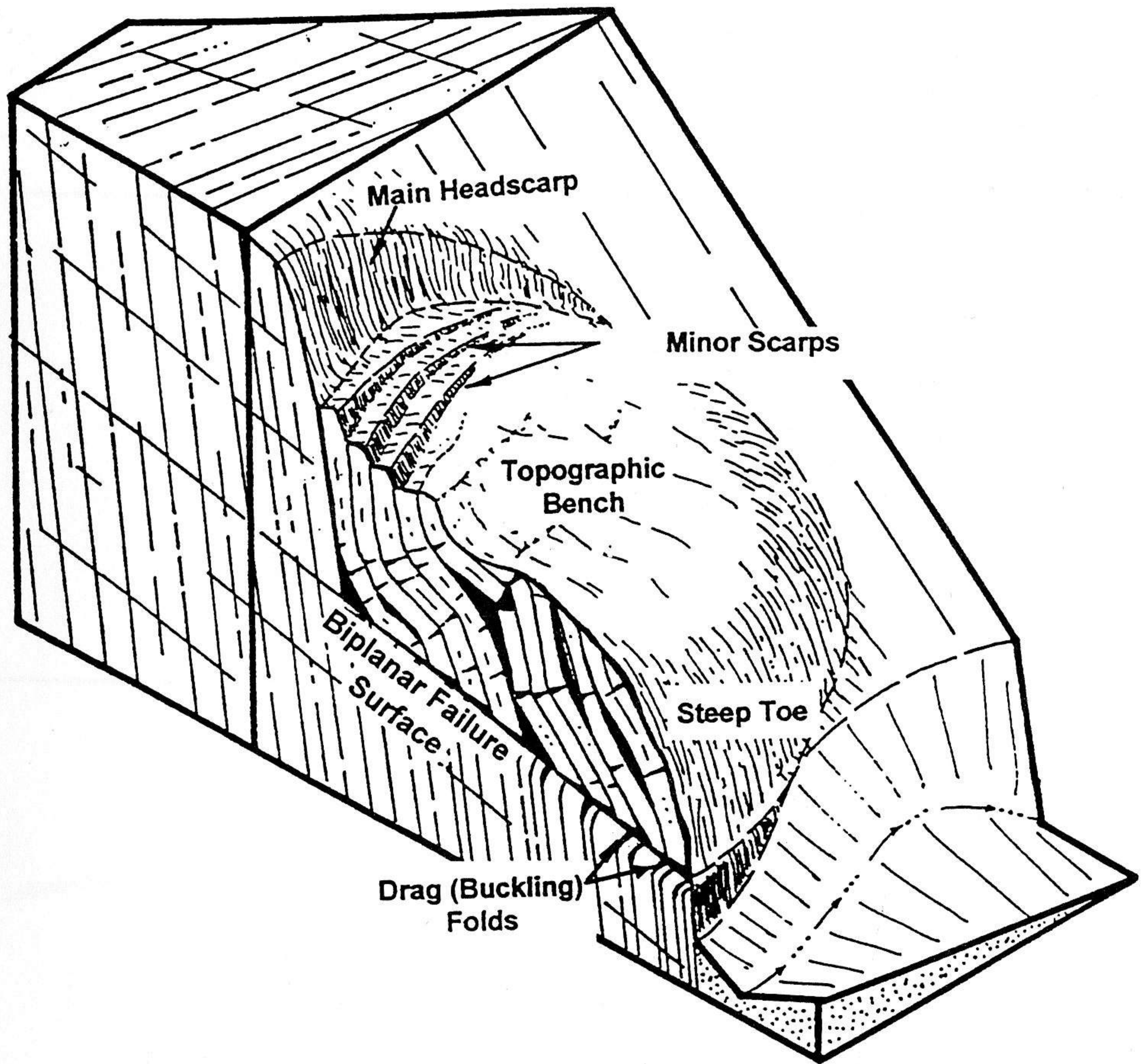
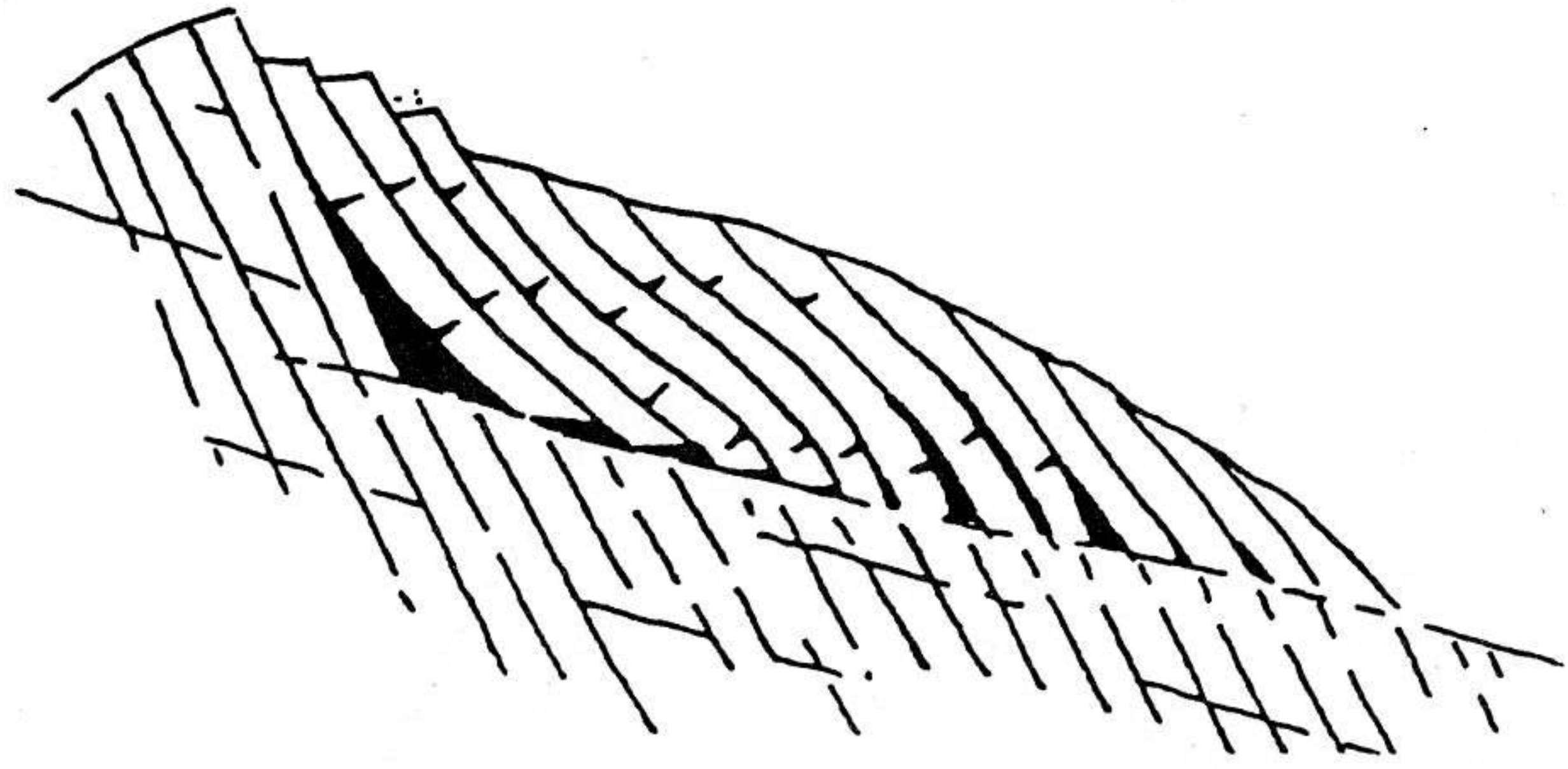


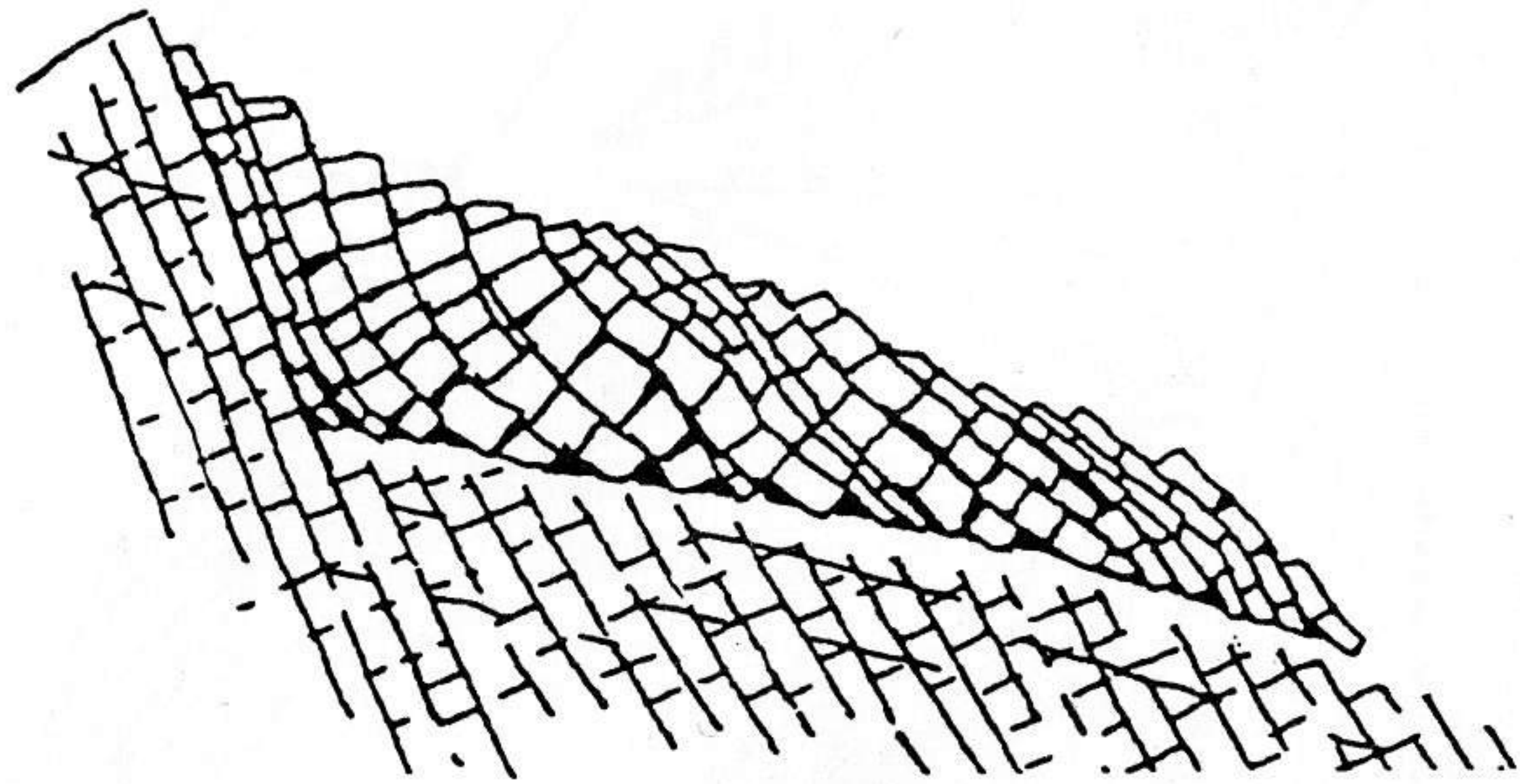
Figura 5
Morfología y estructura interna de un fallamiento por hundimiento de bloque, de Kieffer (1998).

Figure 5
The morphology and internal structure of a rock slump, from Kieffer (1998)

A



B



C

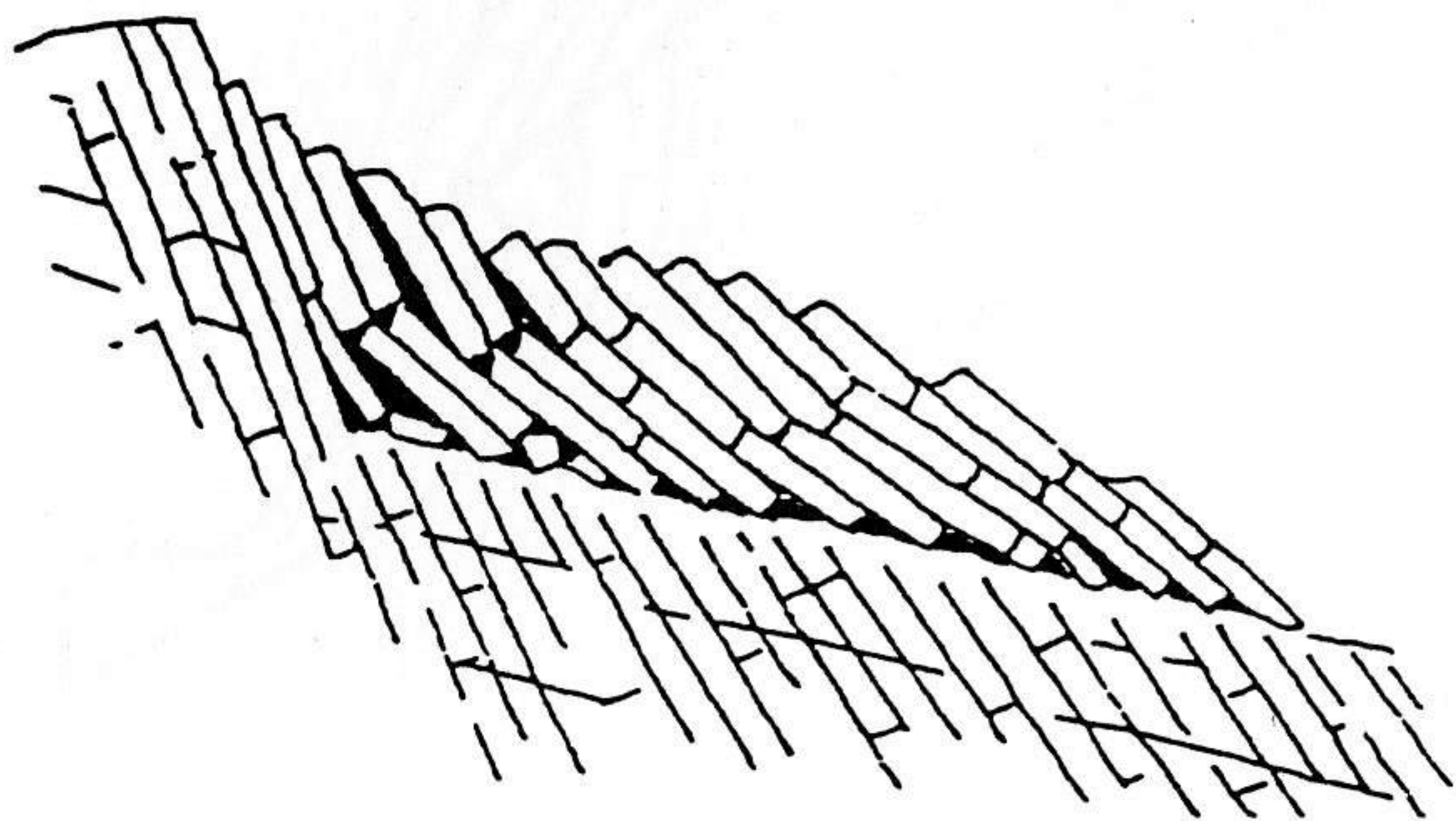


Figura 6

Tipos de fallamiento por hundimiento de rocas:

- A) Hundimiento por flexión;
- B) Hundimiento por flexión de bloques;
- C) Hundimiento de bloques.

De Kieffer (1998).

Figure 6

Types of Rock slumping failures: A) Flexural slumping; B) Block flexural slumping; C) Block slumping. From Kieffer (1998)

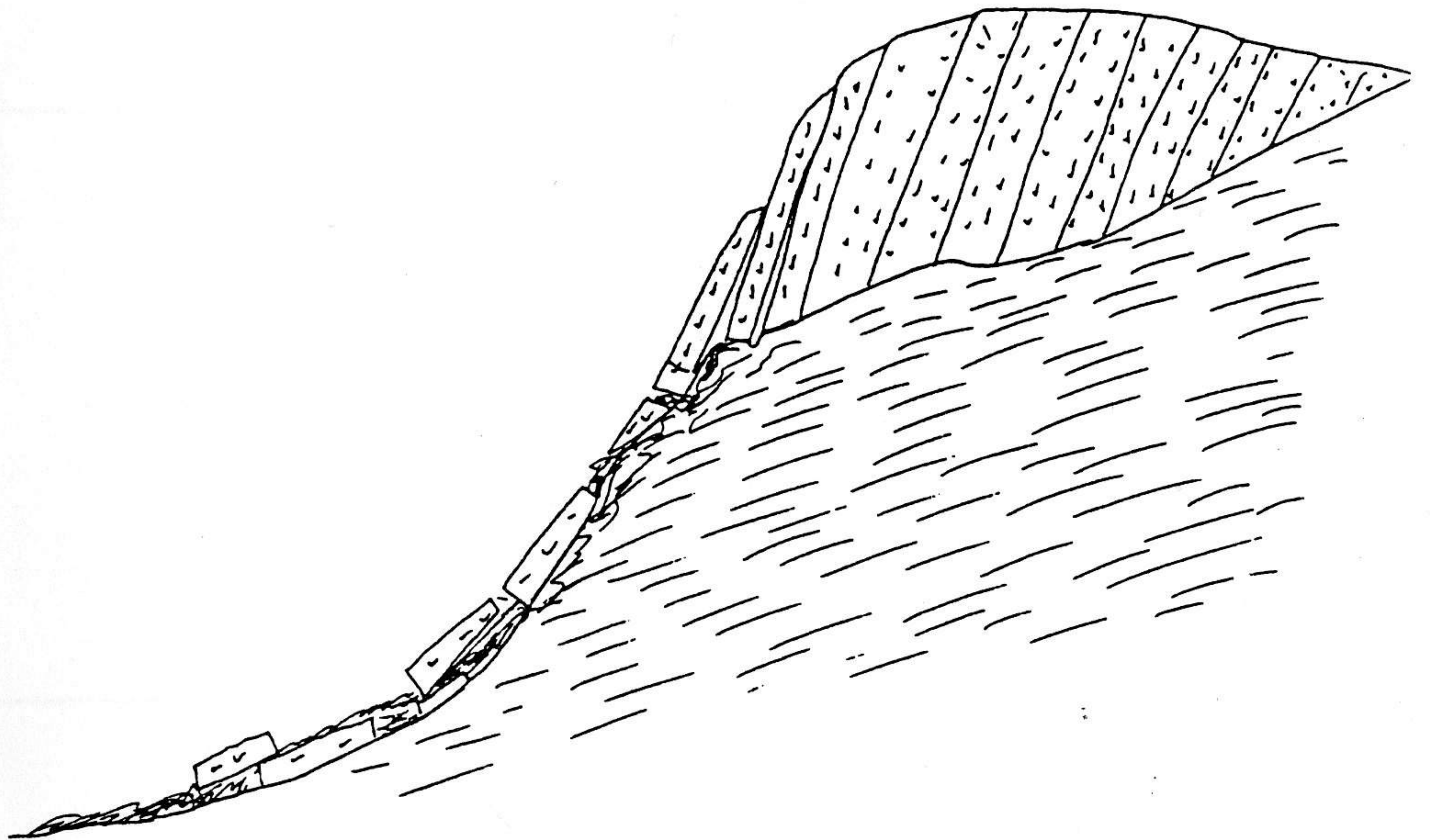
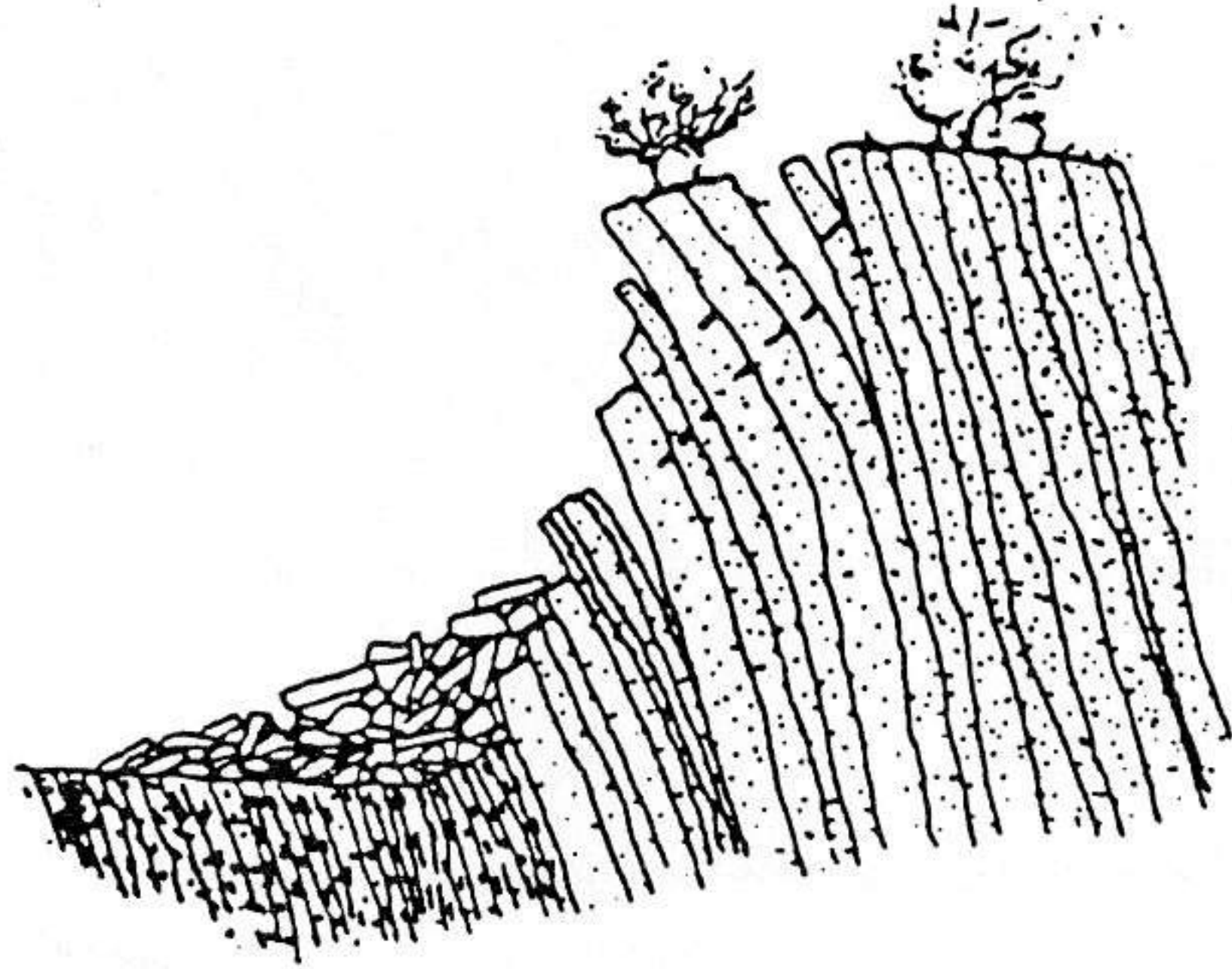


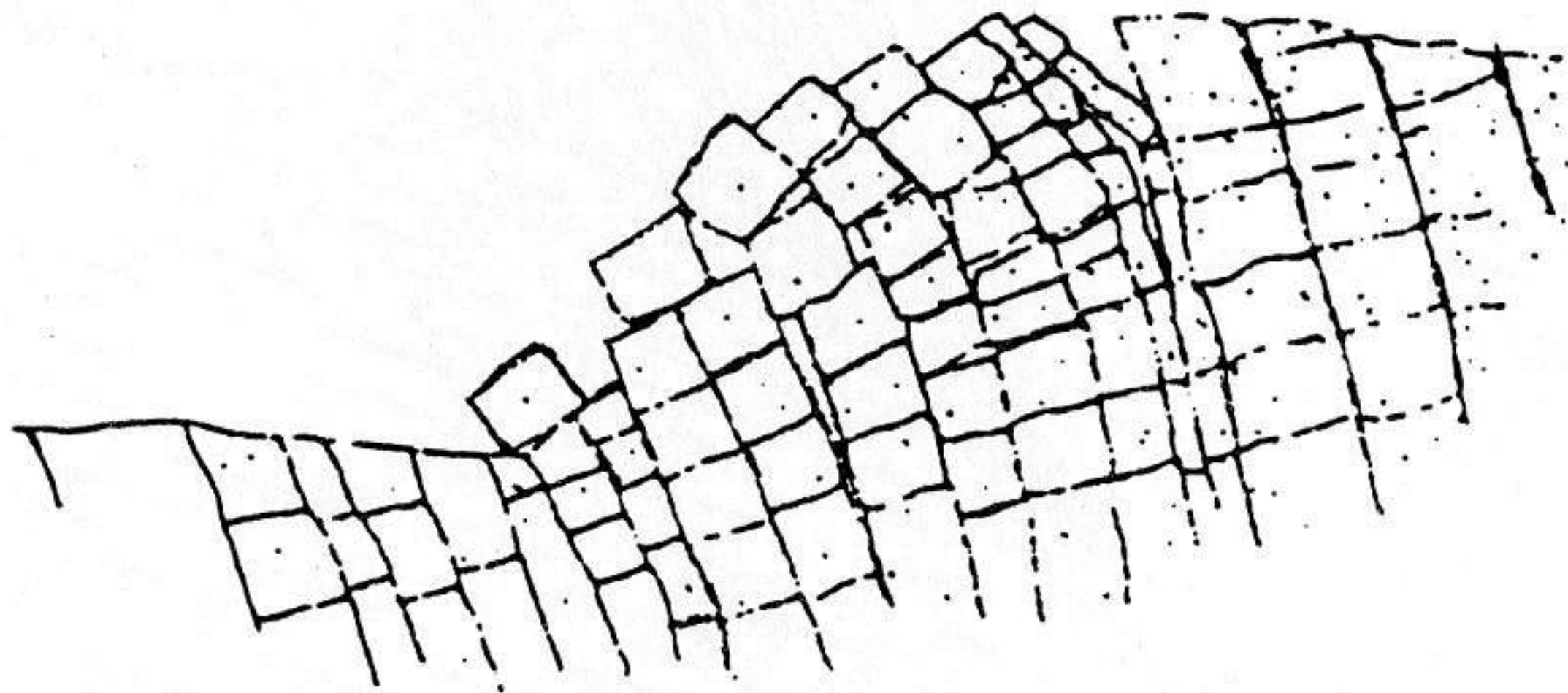
Figura 7
Falla por hundimiento de bloques y
deslizamiento en una superficie suave

Figure 7
Block slumping and rafting on a soft base

A



B



C

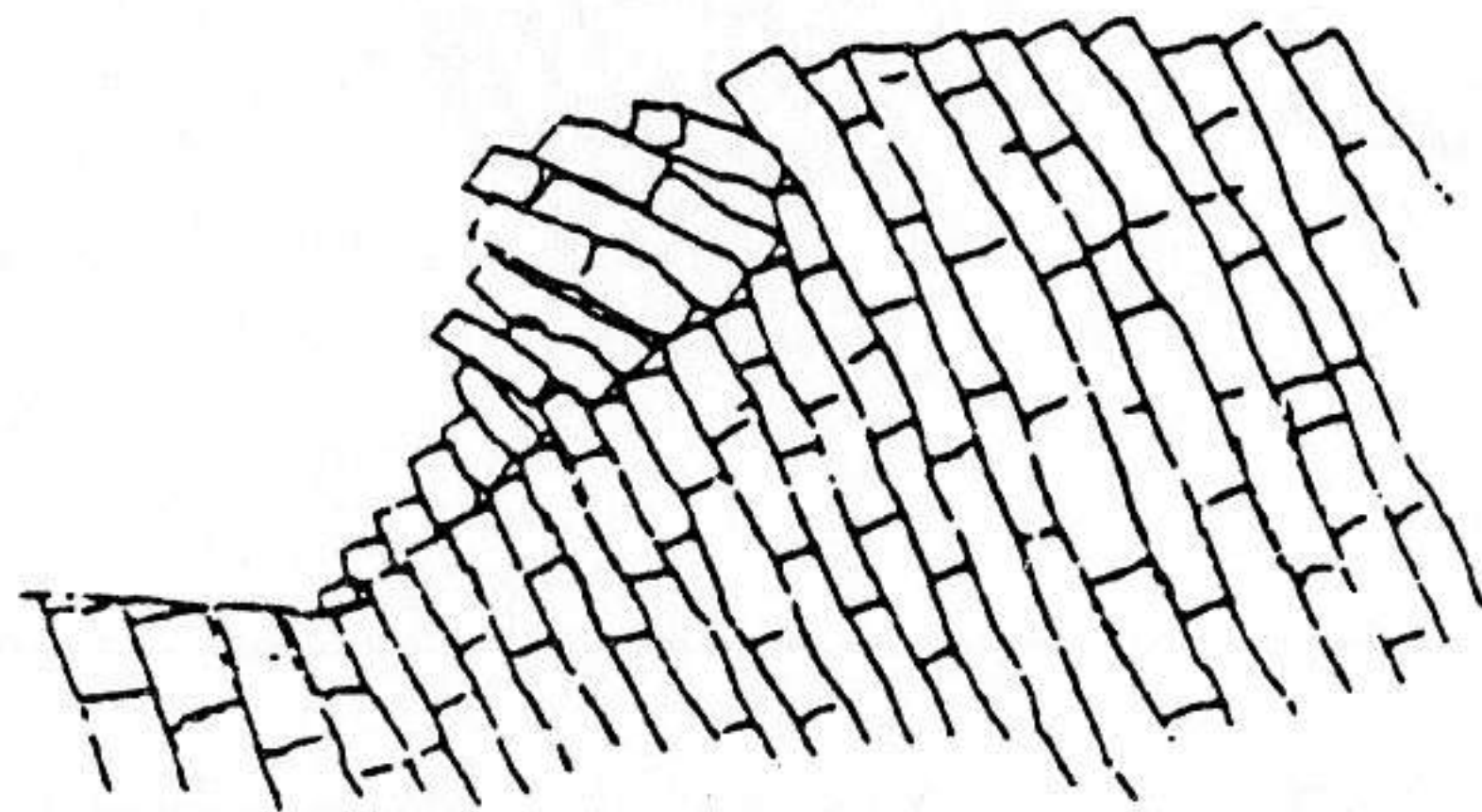


Figura 8

Tipos de volteo: A) Volteo por flexión; B) Volteo por flexión de bloques, C) Volteo de bloques.
De Goodman y Bray (1976).

Figure 8

Types of topples: A) Flexural toppling; B) Block flexural toppling, C) Block toppling. From Goodman and Bray (1976)

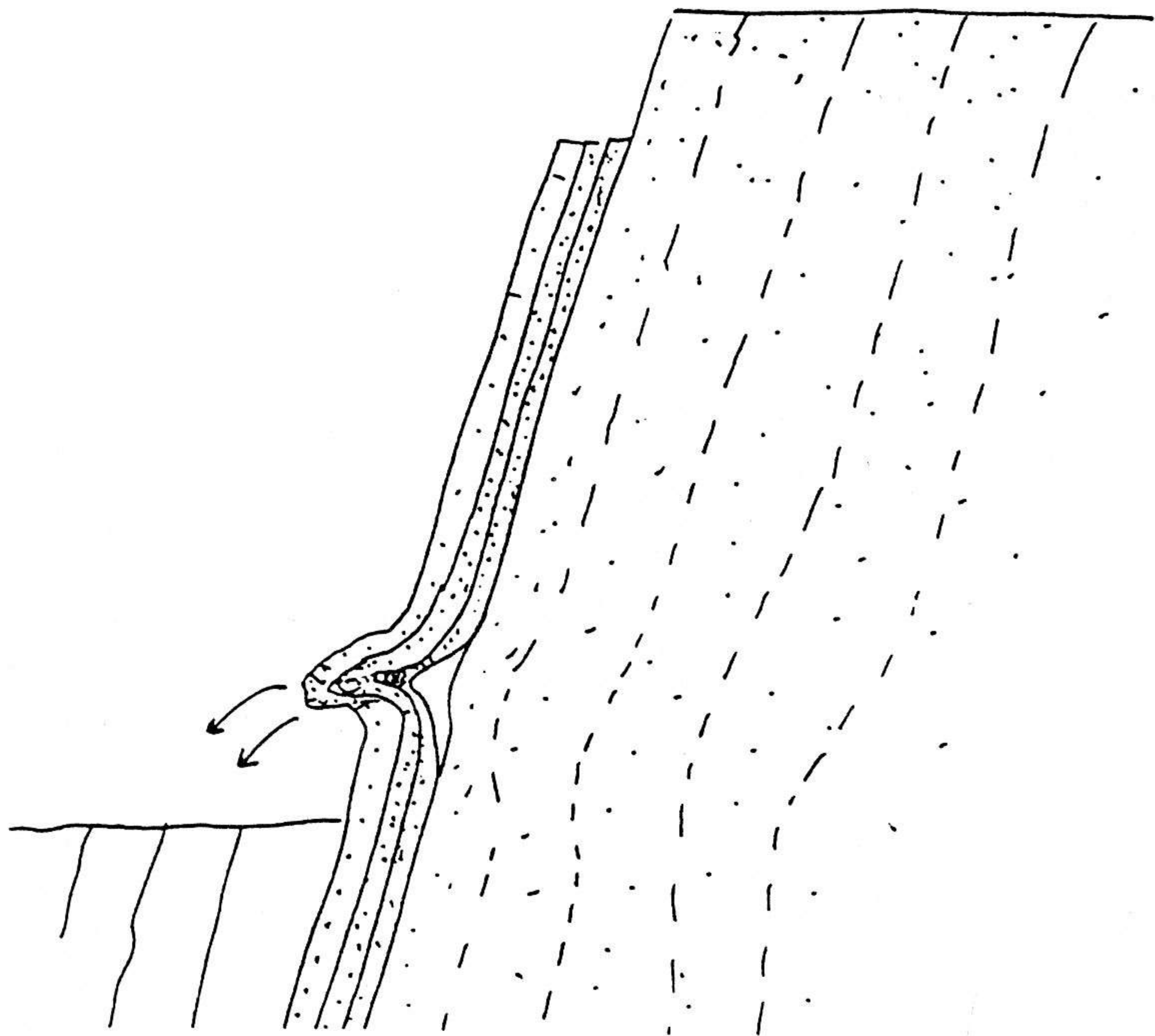


Figura 9
Falla de columnas por pandeo

Figure 9
Column Collapse by buckling

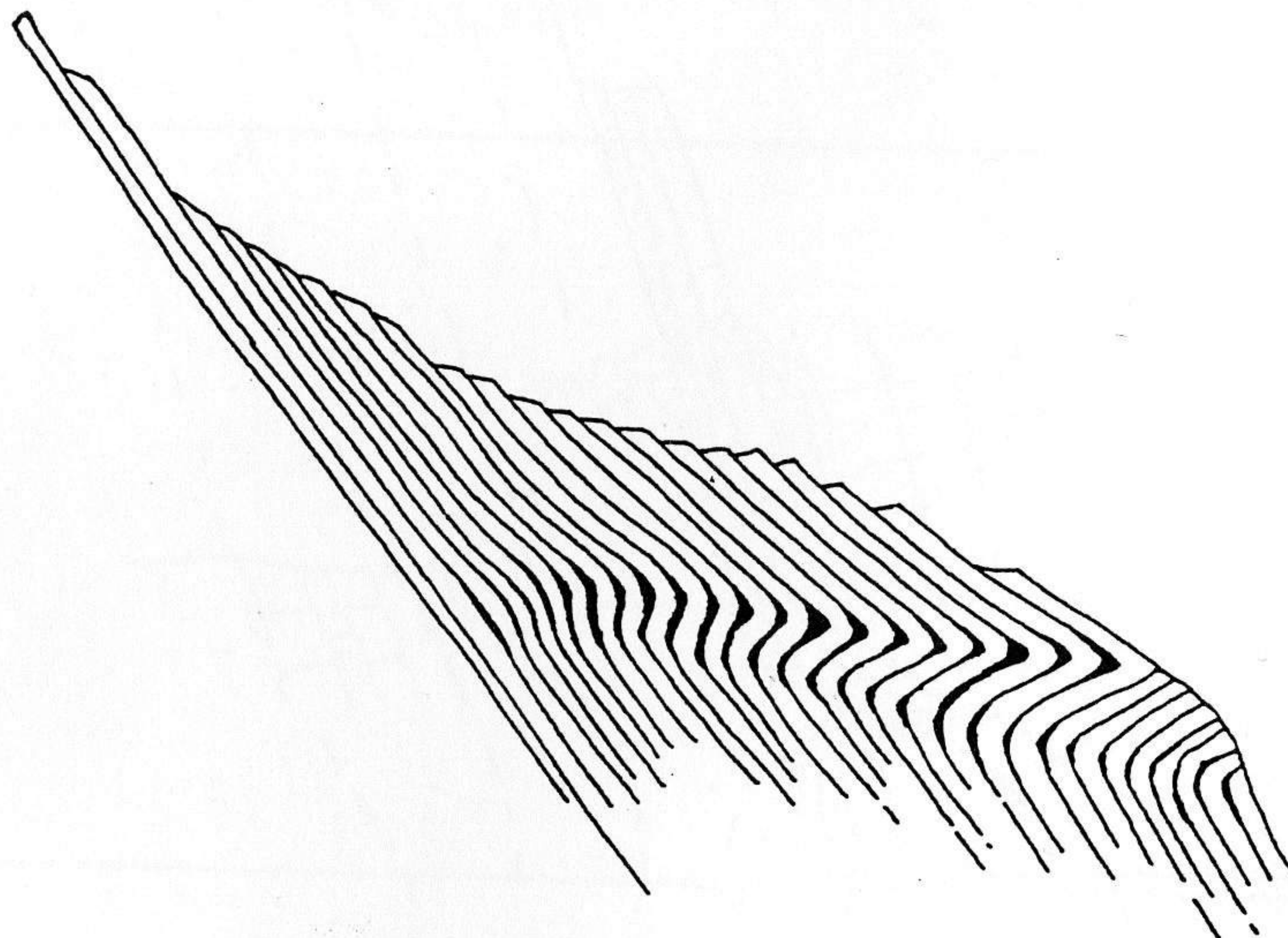


Figura 10
Falla por hundimiento de bandas plegadas.
De Kieffer (1998).

Figure 10
Kink Band Slumping. From Kieffer (1998)

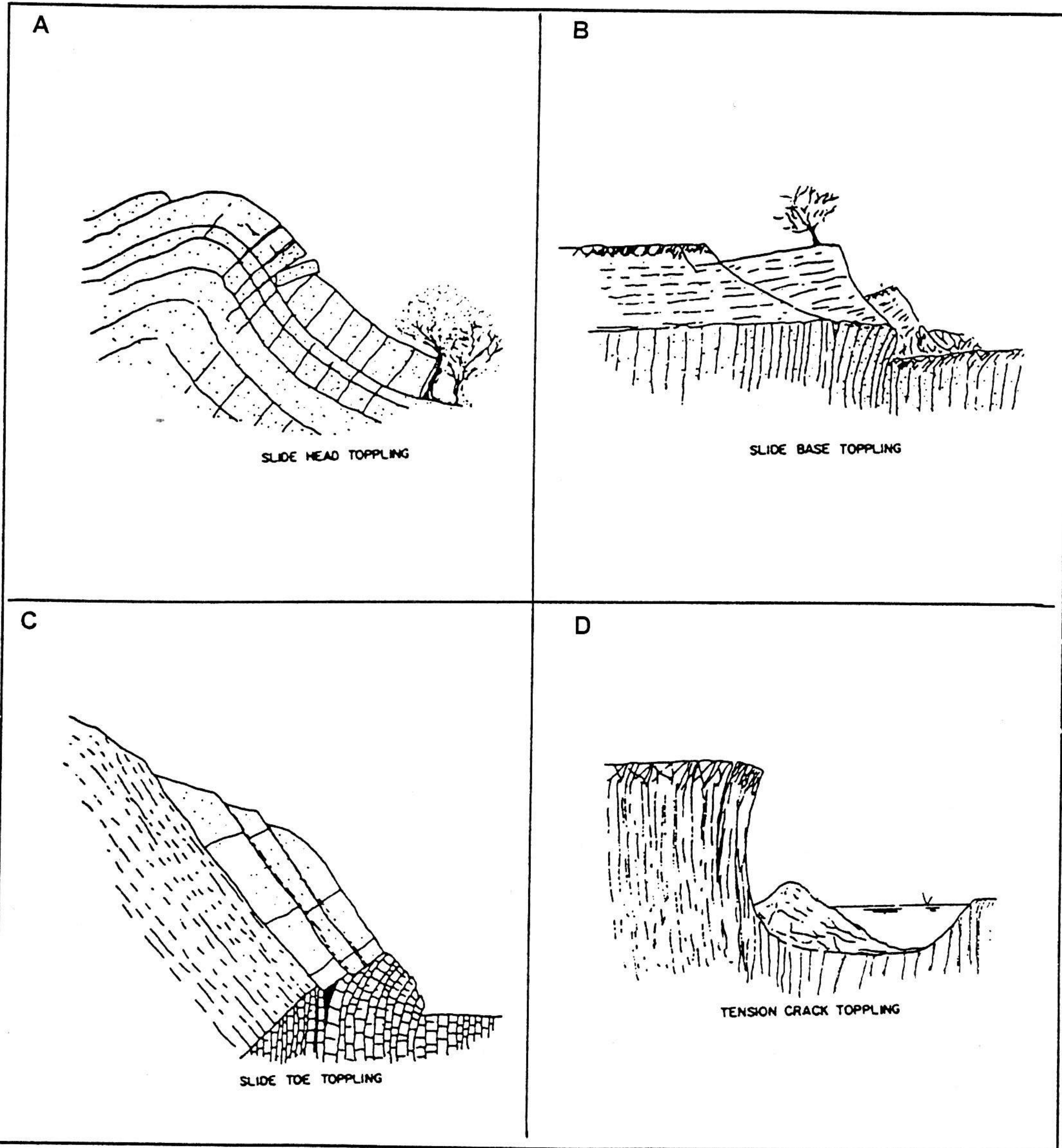


Figura 11
 Modos de falla por volteo secundario: A) Deslizamiento por volteo en la cresta; B) Deslizamiento por volteo en la base; C) Deslizamiento por volteo al pie; D) Volteo por grieta de tensión. De Goodman y Bray (1976)

Figure 11
 Secondary toppling modes: A) Slide head toppling; B) Slide base toppling; C) Slide toe toppling; D) Tension crack toppling. From Goodman and Bray (1976).

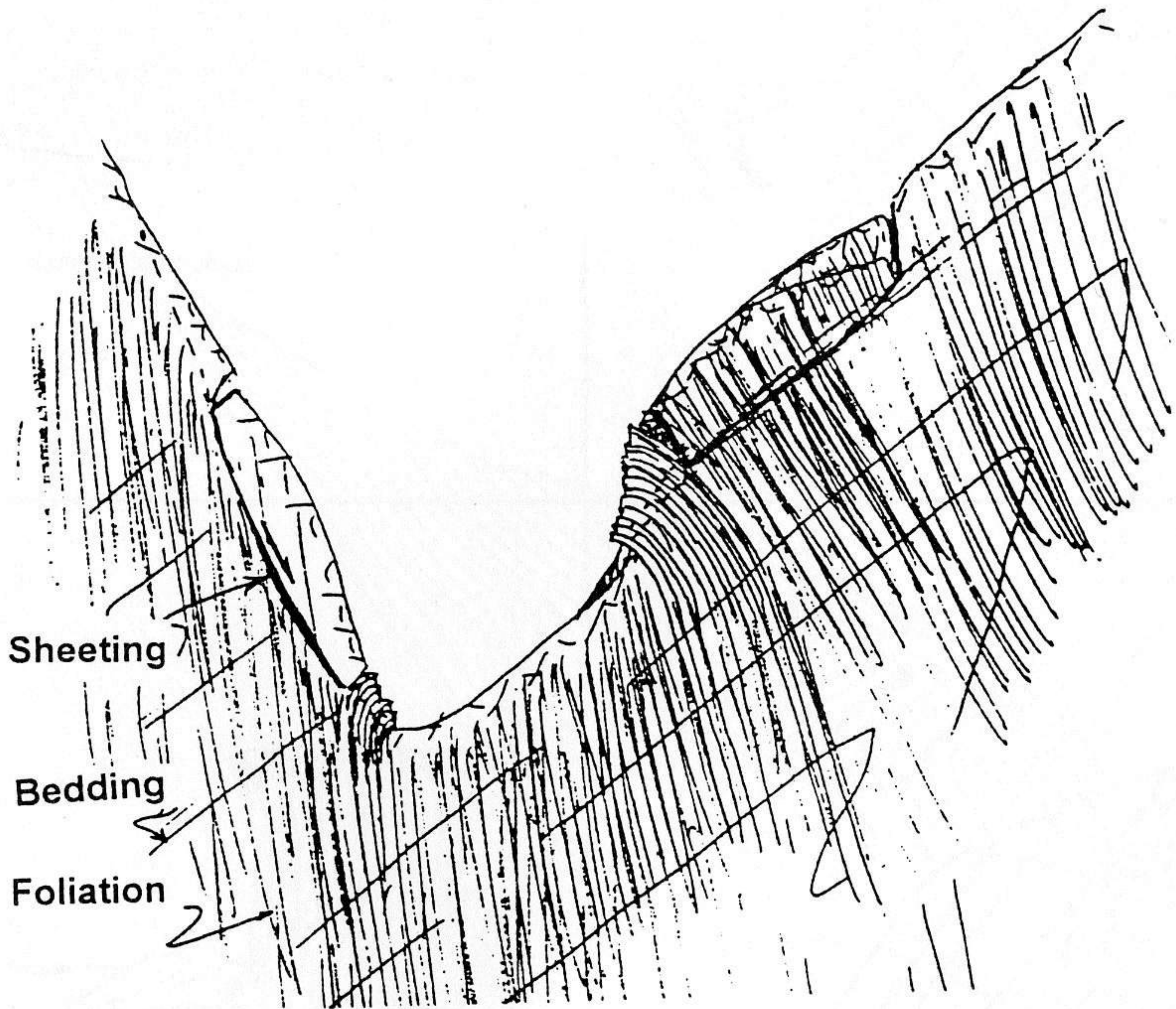


Figura 12
Dos tipos de deslizamiento por volteo al pie.

Figure 12
Two types of slide-toe topples

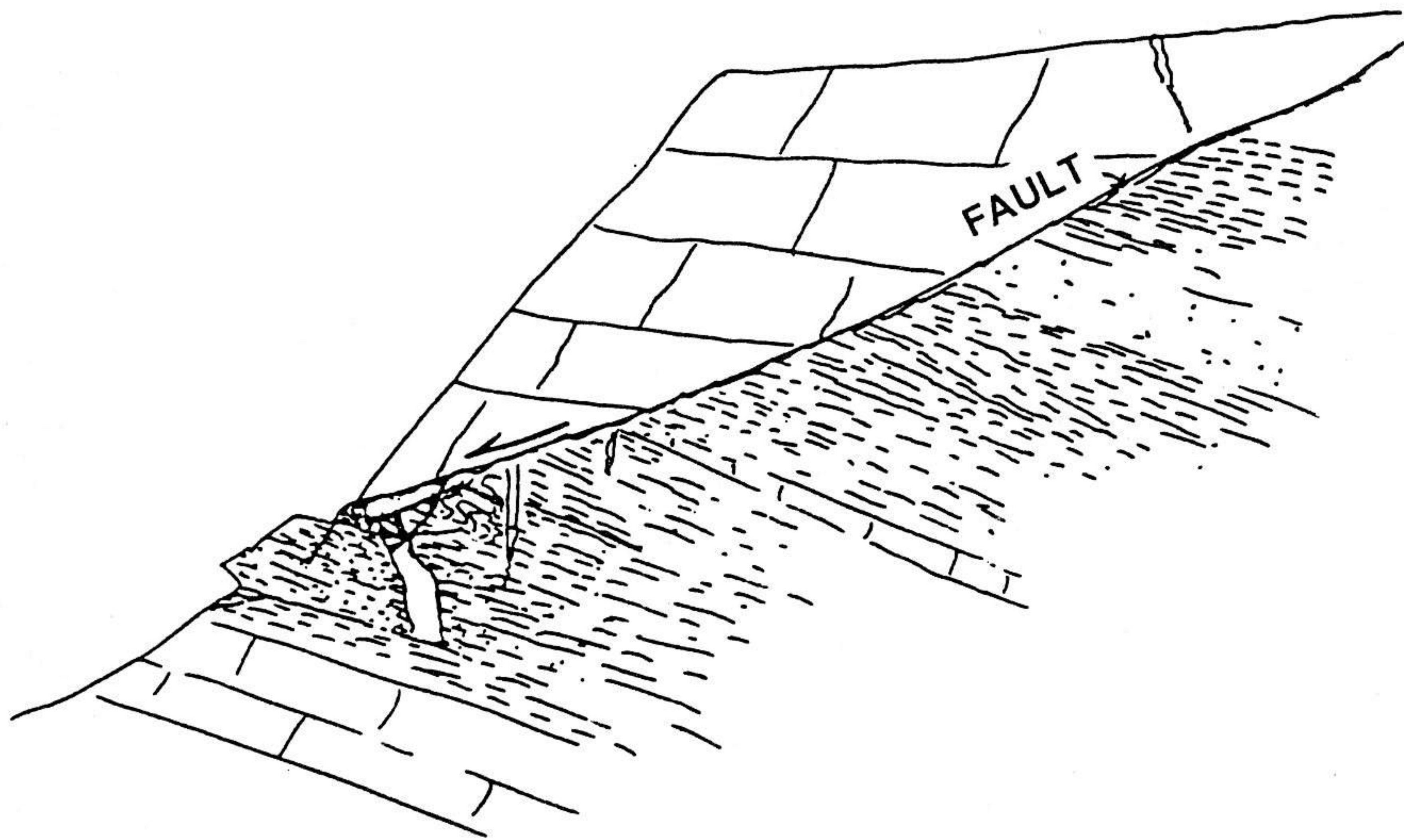


Figura 13
Deslizamiento por ruptura en la base

Figure 13
Slide-base rupture

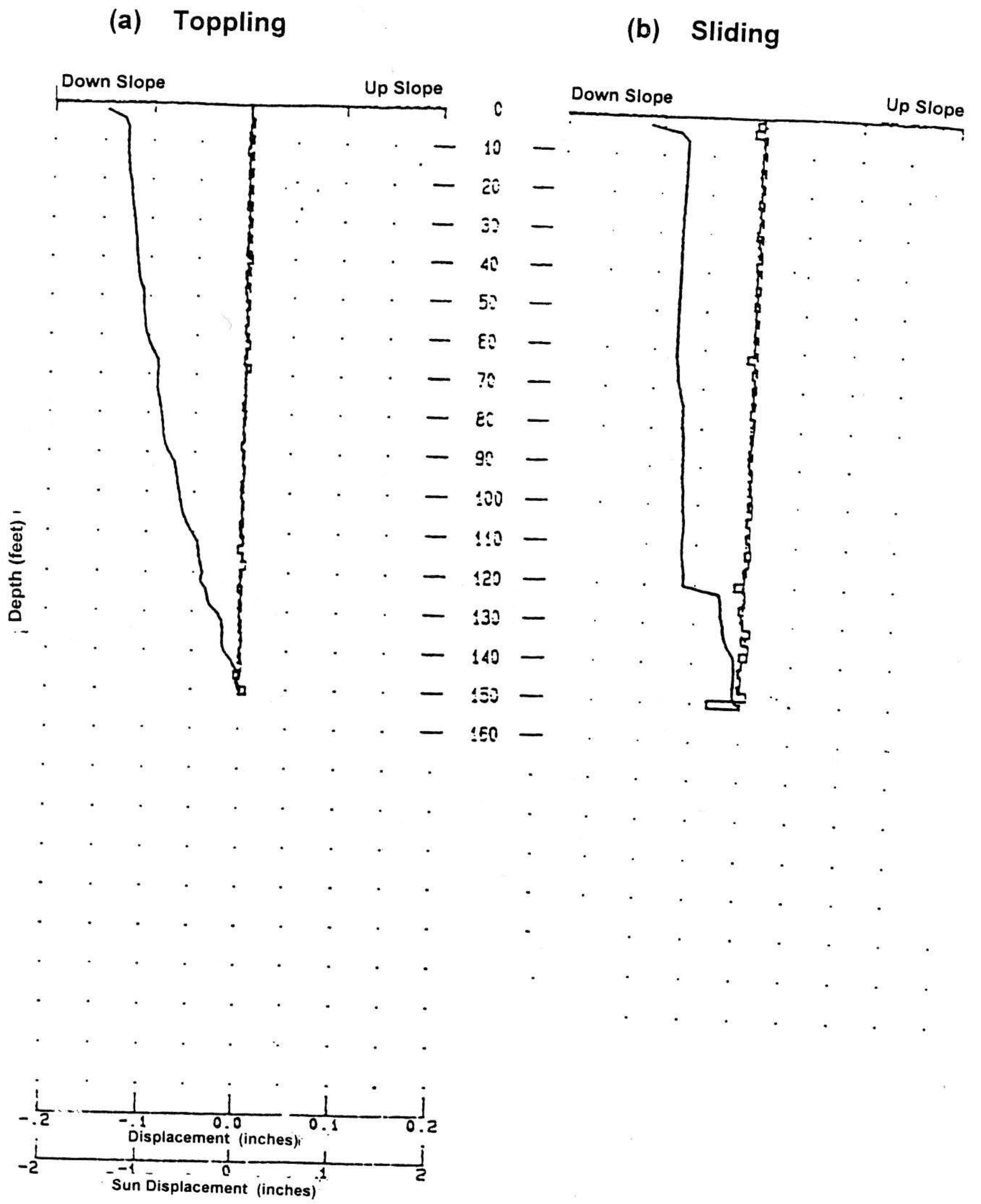


Figura 14
 Registros de inclinómetros para falla por
 deslizamiento contra falla por volteo.
 Cortesia de Pacific Gas and Electric Company.

Figure 14
 Sample borehole inclinometer records for
 sliding versus toppling behaviour.
 Courtesy of Pacific Gas and Electric Company

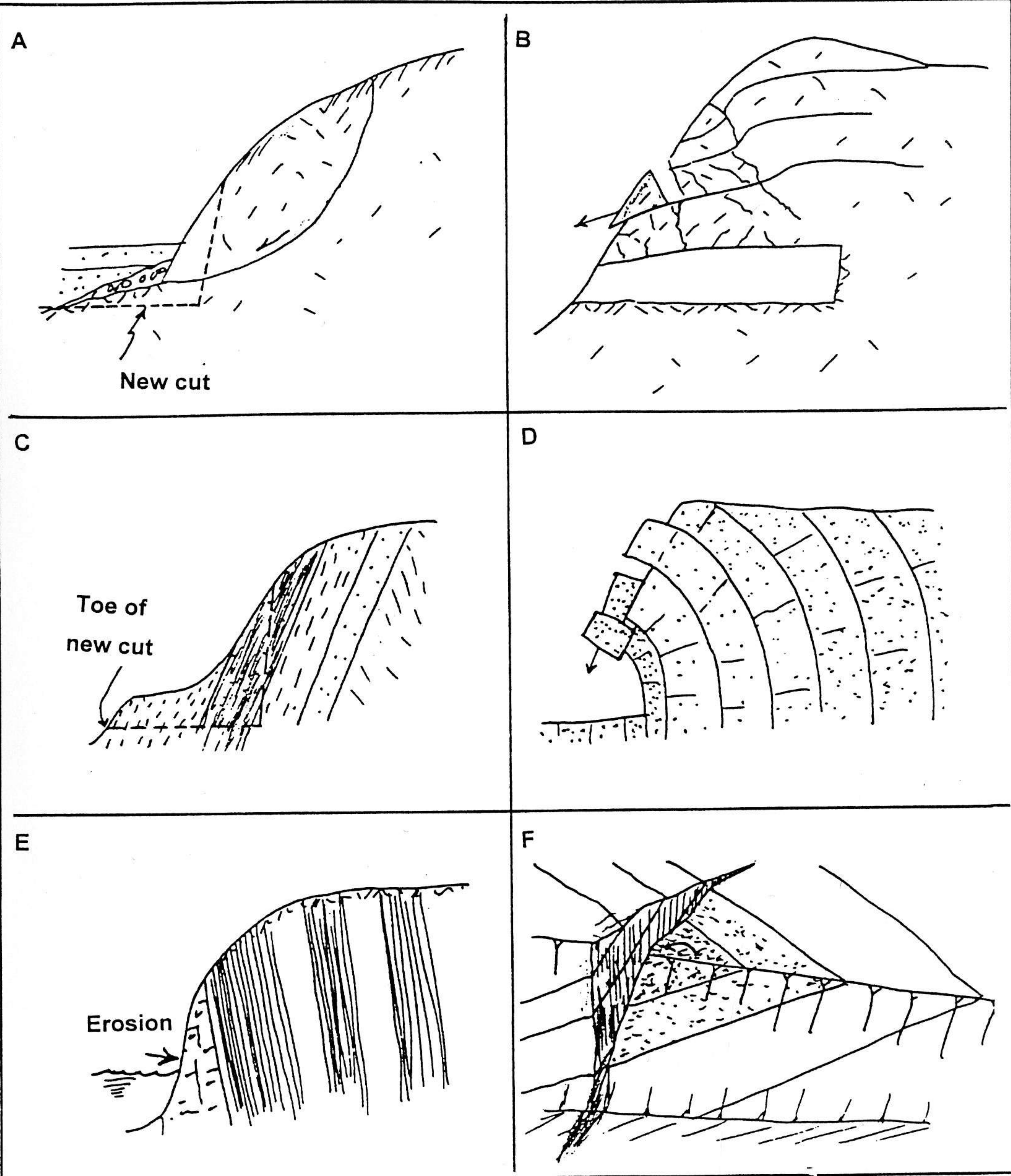


Figura 15
 Causas cinemáticas de fallamiento
 de taludes en roca

Figure 15
 Kinematic causes of rock slope failures

Fundación ICA es una Asociación Civil constituida conforme a las leyes mexicanas el 26 de octubre de 1986, como se hace constar en la escritura pública número 21,127 pasada ante la fe del Lic. Eduardo Flores Castro Altamirano, Notario Público número 33 del Distrito Federal, inscrita en el Registro Público de la Propiedad en la sección de Personas Morales Civiles bajo folio 12,847. A fin de adecuar a las disposiciones legales vigentes los estatutos sociales, estos fueron modificados el 17 de octubre de 1994, como se hace constar en la escritura pública número 52,025 pasada ante la fe del Lic. Jorge A. Domínguez Martínez, Notario Público número 140 del distrito Federal.

Fundación ICA es una institución científica y tecnológica inscrita en el Registro Nacional de Instituciones Científicas y Tecnológicas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, con el número 97/213 del 20 de junio de 1997.

Esta edición de la Tercera Conferencia Magistral "Profesor Raúl J. Marsal". El comportamiento de la roca en taludes por Richard E. Goodman, se terminó en octubre de 1998, se imprimieron 2,300 ejemplares. La edición estuvo al cuidado de Tomás Lugo Ibarra, José Luis Garrido Uribe y Carlos Santana Palomino y Fernando O. Luna Rojas.

**Mesa Directiva de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Rocas
Bienio 1996-1998**

Alfredo Sánchez Gómez
Presidente

José Luis Garrido Uribe
Vicepresidente

Jorge Castro Abonce
Secretario

Jorge Castañeda Maza
Tesorero

Magdaleno Martínez Govea
Eliseo Padrón Fernández
Carlos Santana Palomino
Enrique Valencia Enríquez
Vocales

Tomás Lugo Ibarra
José Luis Garrido Uribe
Coordinadores de la Conferencia