

GEOTECNIA BÁSICA

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definiciones de suelos y rocas en ingeniería

Suelos: para un ingeniero los suelos son depósitos desagregados o no cementados, compuestos de los fragmentos o partículas minerales y orgánicas que se encuentran en la superficie de la corteza del planeta.

Los términos "desagregados" y "no cementados" se emplean para indicar que los enlaces entre las partículas y fragmentos son débiles, y que éstos desaparecen con procedimientos sencillos, tales como la inmersión y la agitación en agua, o mediante la excavación con pica y pala, o con un escarificador mecánico.

Suelos no cohesivos: también conocidos como granulares, son los que no tienen cohesión o coherencia alguna entre las partículas. Las arenas y gravas limpias y secas presentan este comportamiento.

Suelos cohesivos: son los que tienen alguna cohesión entre sus partículas individuales. Las arcillas, y las mezclas con limos y arenas en las que predominen las primeras, presentan el comportamiento cohesivo.

Rocas: los materiales con enlaces más fuertes o permanentes de los componentes minerales, que no se pueden excavar sin el uso de explosivos, se llaman "rocas".

Las definiciones de suelo y roca que se emplean en ingeniería civil difieren de las usadas por los geólogos y los profesionales dedicados a las ciencias agronómicas. Con el fin de evitar malos entendidos, posibles disputas y litigios legales, por definiciones ambiguas de lo que se debe considerar como "suelo" y "roca", estos materiales se deben definir de manera precisa en los documentos contractuales de ingeniería, tales como las especificaciones de construcción.

Lecho o manto rocoso, o roca sólida ('bedrock'): es una formación rocosa que se encuentra a alguna profundidad debajo de una capa de suelo. Expuesta en la superficie del terreno se presenta como una roca sólida seca.

1. INTRODUCCIÓN

Rocas duras: Son aquellas que presentan una resistencia a la comprensión simple superior a los 200 kgf/cm².

Rocas blandas: son rocas que tienen un comportamiento esfuerzo-deformación de tipo plástico, que se deforman sin fracturarse, y que poseen una resistencia a la comprensión simple menor que 20 kgf/cm².

Terreno competente: es el que al excavar un túnel en su interior no requiere soporte. Las areniscas, las cuarcitas y las rocas ígneas, casi siempre son resistentes a todas las condiciones de carga, en tanto que la lutita y la pizarra presentan baja resistencia. Las rocas calcáreas, por su parte, se comportan de forma competente a baja temperatura y con presiones moderadas, pero a profundidades donde las altas presión y temperatura favorecen la cristalización, tienen un comportamiento incompetente.

Roca intacta o material rocoso: es la parte sólida de la masa rocosa, que se puede obtener del subsuelo con una broca para recuperación de núcleos, o del afloramiento en un talud o en un corte que no presenta los rasgos estructurales de gran escala, tales como diaclasas, planos de estratificación, intercalaciones y zonas de cizalla.

Regolito: material constituido por fragmentos sueltos de roca y suelos que cubren el manto rocoso. En la superficie pueden estar cubiertos por una capa vegetal.

Masa rocosa: es la roca 'in-situ' conformada por el material rocoso y las discontinuidades estructurales.

1.2 Mecánica de Suelos y Mecánica de Rocas

Según Vèsic (1978) la ingeniería geotécnica es el arte del análisis, diseño y construcción con los materiales térreos (suelos y rocas). Sus dos ramas principales son la ingeniería de fundaciones y la ingeniería de los trabajos de movimientos de tierra.

La ingeniería de fundaciones involucra la interacción entre las estructuras de ingeniería, tales como los edificios, los puentes, presas, carreteras, túneles, y los suelos que las soportan. Tiene que ver mucho con los métodos de construcción de fundaciones, los cuales debido a las muchas dificultades que se encuentran debajo de la superficie del terreno, y bajo agua, se constituyen en un arte.

La ingeniería de los movimientos de tierra construye estructuras tales como presas, terraplenes, sub-bases y bases para carreteras y aeropuertos, con suelos y fragmentos de roca como material de construcción primario. También tiene que ver con la estabilidad de cortes superficiales y profundos, o cavidades hechas en el terreno natural con el fin de excavar materiales o para permitir el paso de canales, carreteras o conductos sobre el terreno.

La ciencia básica para ambas ramas de la ingeniería geotécnica es la Mecánica de Suelos, que estudia las propiedades físicas de los suelos y las leyes generales de su comportamiento mecánico. En los términos más generales la Mecánica de Suelos es la mecánica de los materiales particulados o granulares. Una extensión de ella, que trata el comportamiento de las masas rocosas, se llama Mecánica de Rocas.

Los suelos difieren de los sólidos en que en la mayoría de los casos no poseen un volumen estable; su volumen puede cambiar en forma notable, no solo debido a variaciones en presión y temperatura sino también por intercambio del vapor con la atmósfera, el cual se manifiesta mediante un fenómeno hidrotermal que da lugar a la contracción y la expansión del suelo.

Mientras que la mayoría de los suelos pueden transmitir esfuerzos de corte importantes bajo carga sostenida, en ciertas circunstancias también pueden fluir como líquidos. Este hecho se explica porque la resistencia al desplazamiento de las masas de suelo depende de la presión que exista entre las partículas individuales.

De acuerdo con Correa (1992) la Mecánica de Rocas es aquella parte de la mecánica que estudia la respuesta de una masa rocosa al campo de esfuerzos al que la somete el medio físico circundante. Desde un punto de vista práctico, es el arte de concebir y construir obras civiles en masas rocosas, tales como cortes, túneles, cavernas, etc.

La mecánica de rocas se ocupa entonces de las propiedades físico-mecánicas de las rocas, de las condiciones de estabilidad de sus cortes, de la presión subterránea, y de las deformaciones de la superficie terrestre debidas a los trabajos subterráneos.

En mecánica de rocas es necesario distinguir entre masa rocosa y material rocoso. El material rocoso se define como el agregado de partículas

1. INTRODUCCIÓN

minerales que yace entre cualquier discontinuidad estructural de la roca, en tanto que la masa rocosa es el agregado de bloques regulares o irregulares de material rocoso, como se ilustra en la Figura 1.1. Estos bloques se encuentran separados por rasgos estructurales tales como planos de estratificación, diaclasas, fisuras, cavidades y otras discontinuidades.

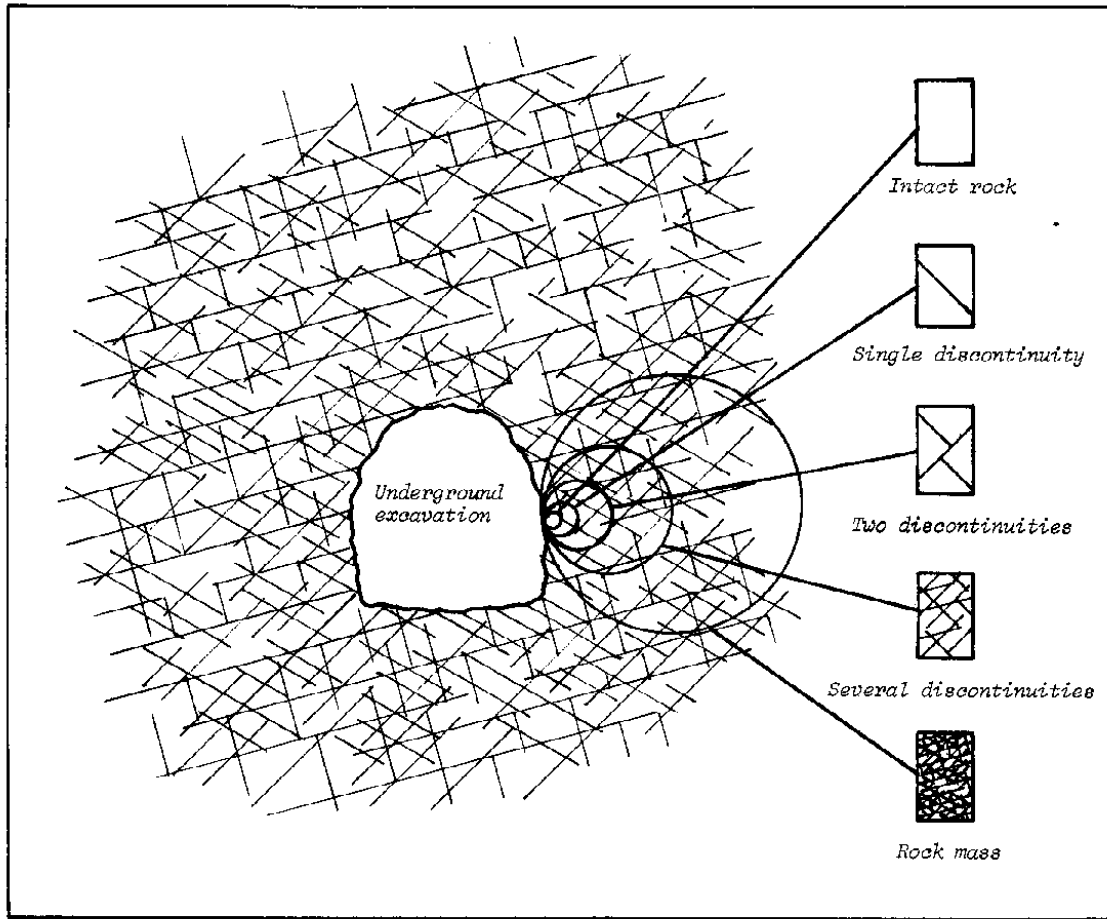


Figura 1.1 Transición entre roca intacta y masa rocosa muy diaclasada con el aumento del tamaño de la muestra alrededor de la excavación (Hoek y Brown, 1980).

Por lo tanto, las masas rocosas son ensamblajes heterogéneos y casi siempre discontinuos de materiales rocosos. Esto significa que la escala de un ensayo sobre una roca determina en alguna medida el resultado de la prueba, como se ilustra en la Figura 1.2.

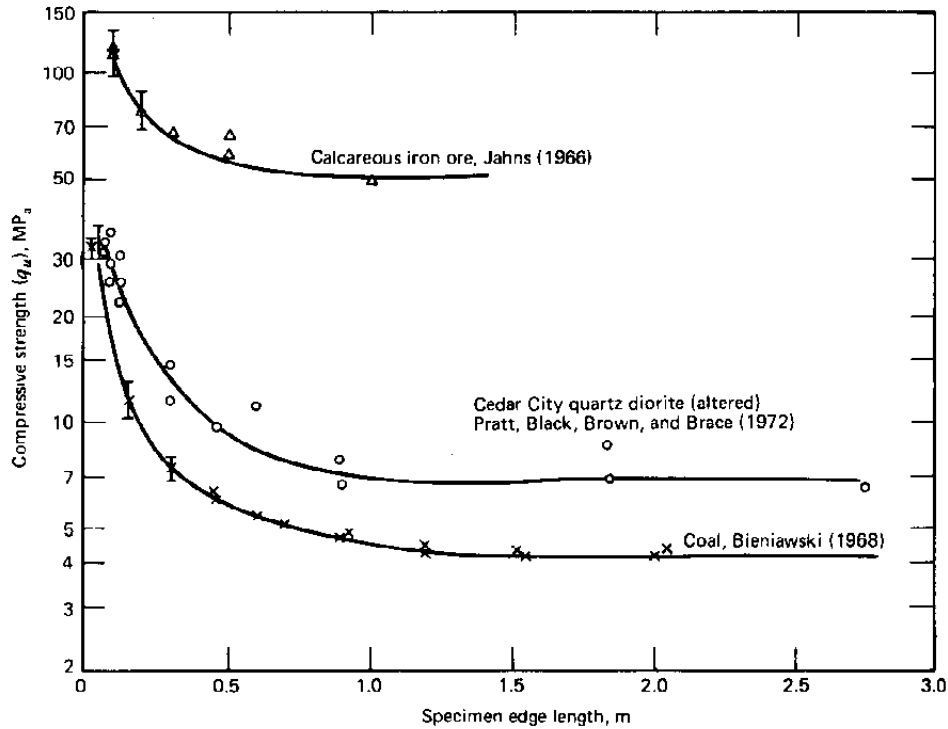


Figura 1.2. Relación entre la resistencia a la compresión uniaxial y el lado de una probeta cúbica de varias rocas (Bieniawski y Van Heerden, 1975).

1.3 El material rocoso

Según Correa (1992) las rocas son sólidos complejos debido a la heterogeneidad de sus constituyentes y a los defectos de su estructura; son medios policristalinos heterogéneos compuestos de granos que pertenecen a diversas especies minerales de formas y tamaños variados. En algunas rocas puede subsistir una fase vítrea, y los cristales de una misma especie mineral pueden diferenciarse por su estado de alteración.

Las rocas son masas discontinuas cruzadas por grietas y poros, superficies de estratificación, separación, clivaje, etc., en los que las fuerzas de cohesión se debilitan o desaparecen. Estos defectos, que se designan bajo el término general como diaclasas, hacen que las rocas tengan propiedades mecánicas diferentes según la dirección de estudio, es decir, pueden ser anisotrópicas. Por ejemplo, en la Figura 1.3 se ilustra el efecto de la anisotropía en el esfuerzo principal máximo, que produce el clivaje en la pizarra Delabole.

1. INTRODUCCIÓN

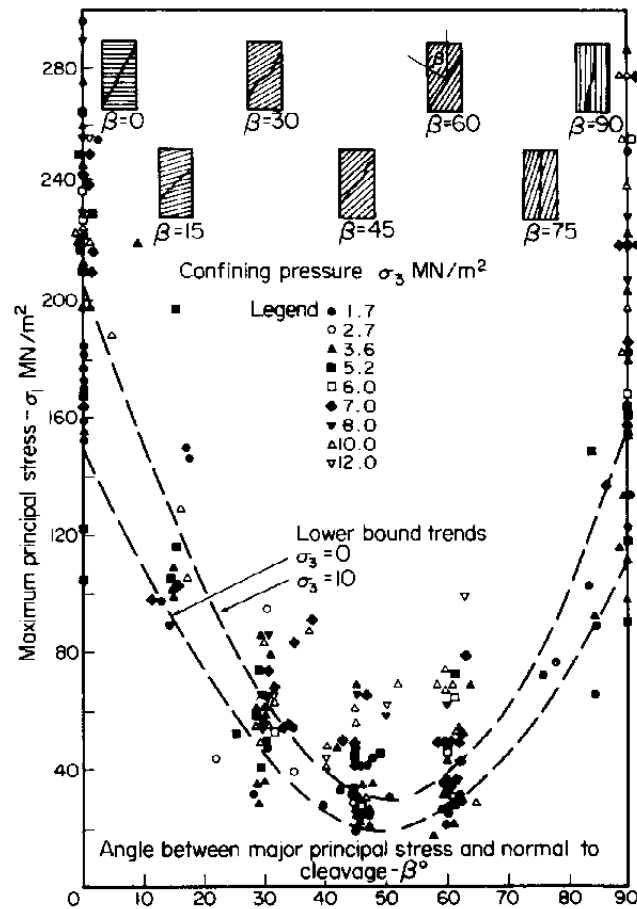


Figura 1.3. Resistencia a la compresión anisotrópica de la pizarra Delabole (Brown, Richards y Barr, 1977).

Por otro lado, al nivel de la estructura los cristales tienen una anisotropía que les es propia, que está relacionada con el sistema cristalino al cual pertenecen. La isotropía aparente de una roca resulta entonces de una distribución aleatoria de las orientaciones de los diferentes cristales.

Debido a su génesis ciertas rocas presentan orientaciones preferenciales de las especies minerales (foliación, esquistosidad) y entonces son anisotrópicas; no obstante, la anisotropía más importante resulta de la fisuración.

Cerca de la superficie del terreno las discontinuidades están saturadas o próximas a la saturación, y por lo tanto es necesario tener en cuenta la presión y las condiciones del agua intersticial.

1.4 Naturaleza de los suelos

Las siguientes características dificultan el conocimiento sobre el comportamiento y el uso de los suelos en las obras de infraestructura:

i) Los suelos son materiales multifase

Los suelos están conformados por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. Las partículas sólidas del suelo están compuestas por minerales de diversas clases y residuos de origen orgánico; estas partículas pueden desplazarse con relación a las otras, pero siempre permanecen en contacto mutuo formando el llamado esqueleto del suelo. Entre las partículas sólidas se encuentran los vacíos, ocupados por las fases líquida y gaseosa, que con mucha frecuencia son agua con electrolitos disueltos, y aire. En la Figura 1.4 se muestra el esquema de un suelo, que está conformado por partículas sólidas (S), y vacíos con aire (A) y agua (W).

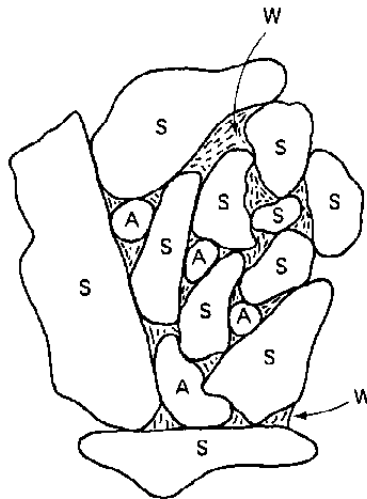


Figura 1.4. Esqueleto del suelo (s = sólidos, w = agua, a = aire).

Cuando un elemento de suelo es sometido a un sistema de fuerzas, una parte de ellas es resistida por los sólidos y la restante por el agua y/o el aire. La sobrecarga de cualquiera de estas fases componentes puede causar la falla del suelo, es decir el suelo puede fallar no solo debido a los esfuerzos excesivos impuestos sobre su esqueleto, sino también cuando por alguna razón los esfuerzos en el agua son excesivos.

1. INTRODUCCIÓN

ii) **Los suelos de fundación casi siempre no son producto del hombre, sino un producto heterogéneo de la naturaleza**

Las posibilidades de encontrar en la naturaleza un depósito uniforme de suelo dentro de un área extensa y hasta la profundidad de influencia de las estructuras, son muy escasas. Los depósitos de suelos fueron formados por la naturaleza durante miles de años, y por lo tanto, son el resultado de incontables eventos geológicos y climáticos. Además, nuestra habilidad para determinar la composición y las propiedades de un depósito natural complejo, mediante la exploración del subsuelo y los ensayos de laboratorio, está limitada por consideraciones económicas y prácticas.

En algunas ocasiones se construyen depósitos de materiales o rellenos con materiales seleccionados para cumplir con determinado propósito, en condiciones controladas según ciertas especificaciones, con el fin de alcanzar niveles mínimos de calidad. En estos casos se obtienen unos depósitos homogéneos con algún grado de anisotropía, pero debido a los procesos de extracción, selección, producción, transporte y colocación en la obra, casi siempre resultan de costos considerables, que los vuelven no utilizables en muchos proyectos, como por ejemplo en los de tipo habitacional.

iii) **Es imposible extraer muestras del suelo natural sin alterar sus propiedades mecánicas**

Si se desea obtener una muestra del subsuelo es necesario llegar hasta el punto deseado mediante una perforación del terreno, la cual modifica el estado de esfuerzos original porque extrae el material que se halla encima. Luego se debe introducir un recipiente para tomar y extraer la muestra de suelo, que casi siempre consiste en un tubo metálico con diversos complementos según la clase de suelo. Este tubo toma-muestra desplaza material y por tanto cambia aún más el estado de esfuerzos y la estructura originales.

Cuando la muestra se traslada al laboratorio, donde se extrae del tubo y se prepara para ejecutar el ensayo, se producen cambios adicionales en el estado de esfuerzos y en la estructura, cuya magnitud y efectos son difíciles de cuantificar. Por lo tanto, aunque se habla de tomar muestras inalteradas, se debe entender que éstas no conservan todas las características del material in-situ, y que su aproximación a las propiedades del terreno natural depende de la calidad del trabajo y del equipo de muestreo.

iv) **El tratamiento analítico de los problemas de suelo es difícil**

El comportamiento del suelo no se puede idealizar por medio de esquemas únicos y sencillos, tales como los usados para los metales (Ley de Hooke), debido a que depende de varios factores y condiciones, entre los que se encuentran, el contenido de humedad inicial, las condiciones de drenaje que se tengan durante el ensayo, la trayectoria o secuencia de aplicación de los esfuerzos, los esfuerzos de confinamiento, y la rata de deformación.

Por otra parte, las masas de suelos o de rocas son heterogéneas, anisotrópicas y tridimensionales, y su correcta modelación es imposible con los medios disponibles en el momento.

1.5 Características del comportamiento de los macizos rocosos

1.5.1 Resistencia al corte

Algunas masas de suelo y de roca pueden resistir durante un tiempo reducido pequeños esfuerzos de tracción, de manera que no conviene tenerlos en cuenta en los diseños de obras a largo plazo. Por lo tanto, ellas se deben hacer trabajar bajo esfuerzos de compresión y de corte, que pueden resistir en diferente grado según sea la combinación de dichos esfuerzos y la consistencia del material.

Uno de los factores que más influye sobre la resistencia de una muestra de roca es la presión de confinamiento. Como se puede apreciar en la Figura 1.5(a) a presiones de confinamiento bajas la roca presenta un comportamiento frágil, mientras que a presiones de confinamiento altas tiene un comportamiento dúctil. En la Figura 1.5(b) se muestra la variación entre la diferencia del esfuerzo axial (σ_1) y la presión de confinamiento (p), y el cambio volumétrico unitario ($\Delta V/V$), en donde $p_1 < p_2 < p_3 < p_4$.

La explicación de la diferencia en comportamiento con la presión de confinamiento se encuentra en la fricción que se produce entre las superficies de las microfisuras existentes en la roca, en donde se inician las fracturas que terminan en la falla. Este hecho introduce complicaciones a la aplicación de nociones tales como el principio de normalidad, que se asocia con las teorías del flujo y plasticidad, y al análisis de las propiedades de resistencia y de deformación después de la falla de la roca.

1. INTRODUCCIÓN

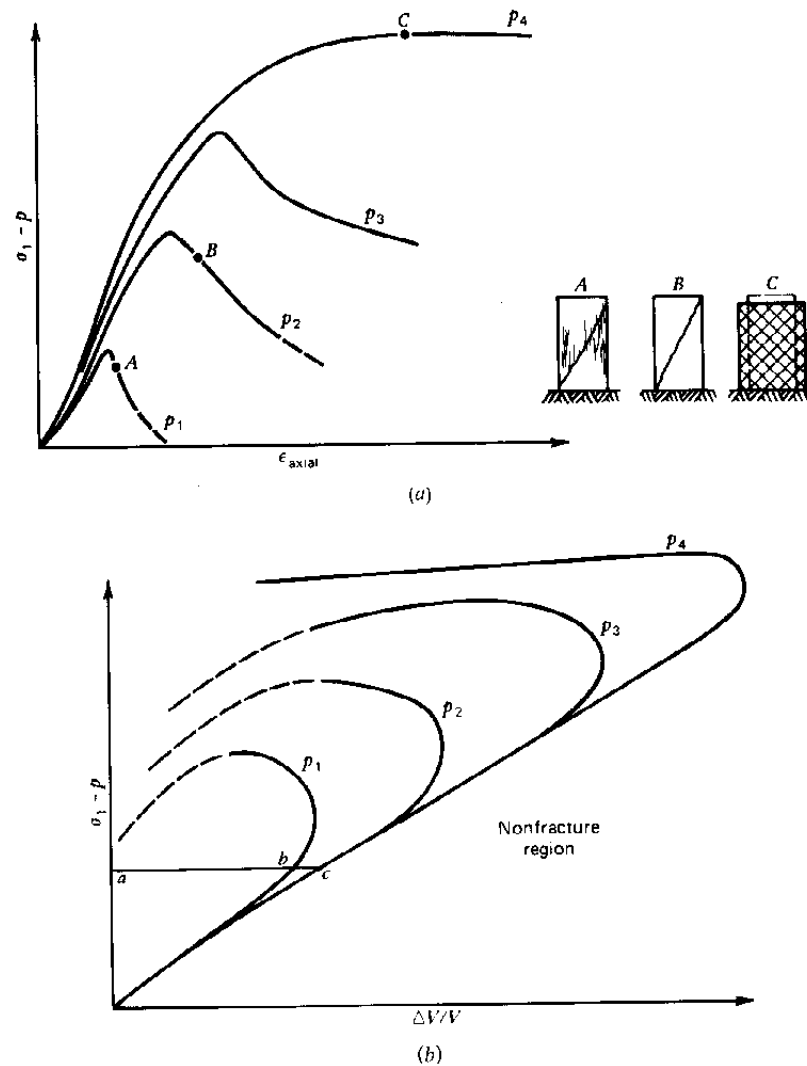


Figura 1.5. Respuestas de una muestra de roca bajo diferentes presiones de confinamiento.

1.5.2 Efectos de escala

La respuesta de la roca a cargas impuestas depende de la escala del volumen de roca sometido a la prueba, debido a las discontinuidades naturales que posee la masa rocosa, las cuales son rasgos característicos de un cuerpo rocoso, que se manifiestan de acuerdo con patrones dependientes del estado de esfuerzos que las originó, de espaciamientos y orientaciones variables. Por tanto, las propiedades de resistencia y deformación de la masa están influenciadas tanto por las propiedades del material rocoso como por las de los rasgos geológicos estructurales.

Entonces, la determinación de las propiedades mecánicas de una masa rocosa no es un asunto sencillo. La imposibilidad de analizar el comportamiento mecánico de especímenes rocosos diaclasados de gran tamaño, que representen en forma adecuada el medio discontinuo, obliga a utilizar muestras de ensayo pequeñas cuyos resultados se utilizan para estimar los de la masa rocosa.

1.5.3 Resistencia a la tracción

Las muestras de material rocoso sometidos a tracción uniaxial fallan a valores de esfuerzos muy inferiores a los que se encuentran cuando se someten a compresión, con valores cercanos al 10% de la resistencia a la compresión uniaxial, σ_c .

Por otra parte, puesto que las discontinuidades de la masa rocosa ofrecen poca o ninguna resistencia a la tracción, ésta debe considerarse como inexistente en una masa rocosa. La consecuencia de esta característica en el diseño de excavaciones en roca es que los esfuerzos de tracción en cualquier zona producen redistribuciones locales de los esfuerzos, que pueden generar inestabilidades de bloques y fragmentos de roca.

1.5.4 Influencia del agua subterránea

El agua subterránea puede afectar el comportamiento mecánico de una masa rocosa de dos maneras principales:

- i) El agua a presión en las discontinuidades que delimitan los bloques reduce el esfuerzo normal efectivo existente en ellas, y por lo tanto disminuye la resistencia al corte de la superficie de contacto, pues el principio del esfuerzo efectivo ($\sigma' = \sigma - u$) se cumple tanto en las masas rocosas como en las masas de suelo.
- ii) Un efecto más sutil del agua subterránea es su acción degradante sobre las partículas de roca y minerales. Por ejemplo, las rocas arcillosas, tales como las arcillolitas, las lutitas y las limolitas arcillosas, en breves períodos de tiempo presentan marcadas reducciones en la resistencia al corte del material luego de su contacto con el agua.

1. INTRODUCCIÓN

1.5.5 Meteorización

La meteorización se define como la alteración química o física de la roca en la superficie debido a su reacción con el gas atmosférico y las soluciones acuosas. También ocurren procesos de meteorización subterránea que casi siempre son de origen químico, como la disolución y el intercambio iónico, la oxidación, la carbonatación y la hidratación.

1.6 Carácter particular del análisis geotécnico

Considerando todas las características anteriores no es sorprendente encontrar que los problemas geotécnicos de muchas estructuras grandes de ingeniería representan la parte más difícil de su diseño y construcción. Esto es cierto no solo para los túneles bajo agua, o los grandes puentes, sino también para muchas estructuras ordinarias.

En la ingeniería del movimiento de tierras la principal dificultad está en los bajos factores de seguridad con los que se trabaja. Puede parecer increíble pero el factor de seguridad en las grandes presas de tierra, para almacenamiento de agua, y en los terraplenes casi nunca excede de 1.7, y en algunos casos pueden ser tan bajos como 1.3.

En resumen, la primera cosa que un ingeniero debe aprender de los suelos y de las rocas es que ellos difieren en varios aspectos importantes de otros materiales de ingeniería, y que requieren un tratamiento particular. La mecánica de suelos no es una simple extensión de la mecánica de los sólidos, o de los fluidos. Es una ciencia de la ingeniería que contiene un componente importante de arte, del que hace buena parte la experiencia, si se considera su aplicación en la práctica.

Más que en cualquiera otra ciencia de la ingeniería los análisis y las investigaciones geotécnicas tienen que estar acompañadas por un criterio sano, y de observaciones durante y después de la construcción de las obras.

1.7 Desarrollo de la Ingeniería Geotécnica

Desde el nacimiento de la civilización el hombre necesitó un conocimiento trabajable de las propiedades de los suelos. Durante muchos siglos la experiencia fue la única herramienta en las manos de los constructores o los ingenieros para resolver sus numerosos problemas. Además, debido a

la naturaleza compleja de los suelos la ingeniería geotécnica siempre ha estado a la zaga de las otras ramas de la ingeniería civil.

El estudio científico de la mecánica de suelos, como el de las otras ciencias de la ingeniería, comenzó en el Siglo XVIII (Coulomb, 1776). Sin embargo, la compleja naturaleza de los suelos impidió que el desarrollo de la mecánica de los suelos se produjera a la misma velocidad que la mecánica estructural.

A principios del Siglo XX el conocimiento de las propiedades de ingeniería de los suelos y el tratamiento científico de los problemas de la ingeniería geotécnica estaba bastante retrasado con relación al conocimiento similar de otras ramas de la ingeniería. Entonces dos desarrollos llamaron la atención de los ingenieros hacia los problemas de los suelos.

- i) La construcción de importantes y costosos proyectos de ingeniería (grandes presas, el canal de Panamá, autopistas, rascacielos, puentes, muelles, carreteras pavimentadas), cuyos costos estaban notablemente influenciados por las condiciones y calidad del suelo.
- ii) Varios incidentes desafortunados ocurridos en obras de ingeniería (fallas y asentamientos catastróficos de edificios, presas, y terraplenes, que causaron numerosas víctimas).

En 1913 se creó el Comité de Fundaciones de la ASCE, con el propósito de codificar la práctica del valor de soporte de los suelos. Al mismo tiempo los Ferrocarriles Estatales de Suecia crearon su Comisión Geotécnica para investigar las causas de los deslizamientos y fallas de terraplenes. Ambos grupos de profesionales hicieron un trabajo serio durante varios años, pero no fueron capaces de explicar todos los fenómenos observados.

El resultado más importante de sus actividades fue que dirigieron la atención de diferentes grupos de ingenieros y de organizaciones hacia la importancia económica de los problemas de ingeniería. Por consiguiente, más ingenieros y científicos se vieron envueltos en el estudio y la investigación de este campo.

Otro año de gran importancia fue 1925, cuando apareció el primer libro ("Erdbaumechnik") que intentó tratar una variedad de problemas de mecánica de suelos con una base unificada (Terzaghi, 1925). La publicación de este libro fue un gran estímulo para los científicos e ingenieros involucrados en los estudios de los problemas de suelos.

1. INTRODUCCIÓN

Los primeros cursos de mecánica de suelos en el mundo se dictaron en 1930, mientras que en Colombia se ofreció en la Universidad Nacional a mediados de la década de los 1950. La primera Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos se llevó a cabo en 1936, en Harvard, Massachussets, Estados Unidos.

Hacia 1950 se consideró que la mayoría de los problemas geotécnicos de construcción de ese tiempo podían solucionarse con una base razonablemente racional; sin embargo, los ingenieros situados en la frontera del conocimiento reconocían la importancia de acometer una reevaluación de las principales teorías de la mecánica de suelos basados en más investigaciones acerca de las propiedades básicas de los suelos.

En la última mitad del Siglo XX se ha realizado un progreso sustancial en esa dirección, pues se multiplicaron las investigaciones con tesis de doctorado en los países desarrollados. El avance ha sido acelerado por cambios paralelos en el carácter de la ingeniería geotécnica, con la creación de programas de postgrado en mecánica de rocas, e ingenierías geológica y sísmológica. En Colombia el primer programa de postgrado en geotecnia se inició en 1977, en la Sede de Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia.

La llegada de los computadores electrónicos extendió, por primera vez en la historia de la humanidad, las posibilidades analíticas para la solución de los complejos problemas tridimensionales, con relaciones esfuerzo-deformación no lineales, de estabilidad de masas de suelo, más allá de nuestra habilidad para la formulación racional de estos problemas.

La cantidad de conocimiento y de experiencia acumulados durante las últimas cinco décadas es considerable, y excede en varias veces el conocimiento existente antes. Este se halla en las memorias de las Conferencias Internacionales de Ingeniería Geotécnica (Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, ICSMF), que se llevan a cabo cada cuatro años, en las conferencias regionales internacionales, y en los eventos nacionales. En Colombia los más importantes son el Congreso Colombiano de Geotecnia, que organiza la Sociedad Colombiana de Geotecnia cada 4 años, y las Jornadas Geotécnicas de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, cada dos años.

Además, las sociedades geotécnicas de los países más desarrollados publican revistas con periodicidades mensuales y trimestrales, en las que

se encuentran los resultados de investigaciones y de experiencias en la construcción de obras sobresalientes. Las más conocidas mundialmente son el "Journal of the Geotechnical Engineering División", de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, y "Geotechnique", de la Sociedad Geotécnica Británica.

Sin embargo, el procesamiento y la síntesis de todo este conocimiento están retrasados, y el joven estudiante y el ingeniero que entra en este campo encontrarán muy desafiante la existencia de gran cantidad de material sin consolidar.

1.8 Problemas de geotecnia en Ingeniería Civil

Los principales problemas para resolver que se le presentan al ingeniero civil con los conocimientos de la geotecnia, son los siguientes:

1.8.1 Cimentaciones

El diseño de toda estructura que se construye sobre la superficie de la corteza terrestre debe tener en cuenta la estabilidad y la deformabilidad de los materiales que la soportan.

El aspecto de la estabilidad está relacionado con la resistencia al corte de los materiales de fundación o de cimentación, la cual determina la capacidad de soporte que ellos puedan tener durante la vida útil de la estructura. Para hallarla es necesario efectuar pruebas de resistencia al corte, ya sea en el terreno o en el laboratorio sobre muestras representativas, y adoptar un modelo de falla aceptable de acuerdo con las dimensiones y tipo de cimentación, y la clase de materiales de fundación.

El aspecto de la deformabilidad depende del comportamiento del cambio de volumen de los materiales que soportan la estructura, de la magnitud de las cargas y de las dimensiones de los cimientos.

Los dos aspectos anteriores no sólo deben analizarse para el caso de las cargas estáticas correspondientes al uso de la estructura, sino que también para las cargas horizontales y verticales de un sismo, en las regiones de riesgo sísmico medio y alto, y para las cargas horizontales del viento, que en algunas zonas del país puede ser de tipo huracanado. De igual manera se debe tener en cuenta la posibilidad de socavación en los cimientos de pilas y cimientos de los puentes, y la de licuación de los depósitos de

1. INTRODUCCIÓN

materiales granulares por efecto de los sismos.

Todos los factores mencionados hacen que el diseño de las cimentaciones en general sea diferente para cada estructura. Por otra parte las dificultades o limitaciones del sitio, como la presencia de edificaciones vecinas, de agua freática, de suelos muy blandos, etc., definen algunos tipos de cimentación por ventajas constructivas.

1.8.2 El suelo como material de construcción

Los materiales que se encuentran en la corteza terrestre son los más utilizados como materiales de construcción en las obras de infraestructura. No obstante, según sea el uso que se le desee dar a los materiales, ya sea para elaborar hormigón, o como parte de una presa de tierra o de una carretera, existen unas normas o especificaciones de amplio reconocimiento que ellos deben cumplir en cada caso particular. Muchas veces los depósitos naturales no cumplen con todas esas especificaciones y en consecuencia es necesario procesarlos o mezclarlos con otros materiales.

La selección de fuentes de materiales que cumplan con las calidades, cantidades y consideraciones ambientales, y que además tengan costos de explotación, procesamiento y transporte aceptables para los proyectos, es una tarea compleja y de gran incidencia en los análisis de factibilidad.

1.8.3 Taludes y excavaciones

En un país montañoso como es Colombia, los fenómenos de estabilidad de taludes y cortes en carreteras y excavaciones son numerosos y a veces de gran tamaño, en especial durante los periodos lluviosos. Con el fin de prever su ocurrencia y de formular planes de desarrollo que tengan en cuenta las áreas inestables, hoy en día se reconoce la importancia de realizar zonificaciones geotécnicas en los municipios localizados en la Zona Andina.

Las excavaciones producidas por los cortes viales y para proyectos de minería requieren de análisis de estabilidad, en los que es fundamental conocer los parámetros de resistencia al corte del suelo o de la roca, y las condiciones de operación de los taludes.

1.8.4 Estructuras subterráneas y de contención de tierras

Cada día se hace más necesaria la construcción de túneles con el fin de

acortar distancias de viaje o para transportar el agua que requieren las ciudades. Así mismo se deben excavar cavernas subterráneas para alojar las turbinas y los generadores de las centrales hidroeléctricas, o para extraer minerales.

El análisis de estabilidad de estas obras requiere el conocimiento de los parámetros de resistencia al corte de los materiales atravesados por el proyecto, de las estructuras geológicas, de la geotectónica, y de las condiciones del agua subterránea. Los estudios para el diseño deben ser cuidadosos y detallados con el fin de seleccionar el sitio y la orientación más conveniente.

1.8.5 Problemas especiales

Con los conocimientos de la geotecnia se pueden entender y dar solución a los problemas de subsidencia, causados por la extracción de agua o de minerales del subsuelo, a problemas de licuación de los depósitos arenosos sueltos causados por sismos o explosiones, y a problemas de cambio de volumen de los materiales arcillosos inducidos por las variaciones del clima.

1.9 Introducción al comportamiento del suelo

De acuerdo con Lambe y Whitman (1969), en cuanto al comportamiento especial de una masa de suelo, se pueden distinguir las siguientes cinco características:

1.9.1 El suelo como material discreto

Como ya se mencionó, los suelos son agregados de partículas sólidas, minerales y orgánicas, con la participación de agua y/o aire, de manera que se los puede catalogar como materiales discretos, no continuos. En una manotada de arena de playa se pueden contar miles de partículas de diversos orígenes, formas y tamaños, mientras que en un recipiente como el que se aprecia en la Figura 1.6, se podrían contar millones. Cada partícula tiene múltiples contactos con las vecinas, y a través de ellos se transmiten fuerzas que se pueden descomponer en normales y tangenciales. La modelación correcta de todo el sistema de fuerzas que se produce en una masa de suelo es, entonces, un problema muy complejo, inalcanzable y poco práctico.

1. INTRODUCCIÓN

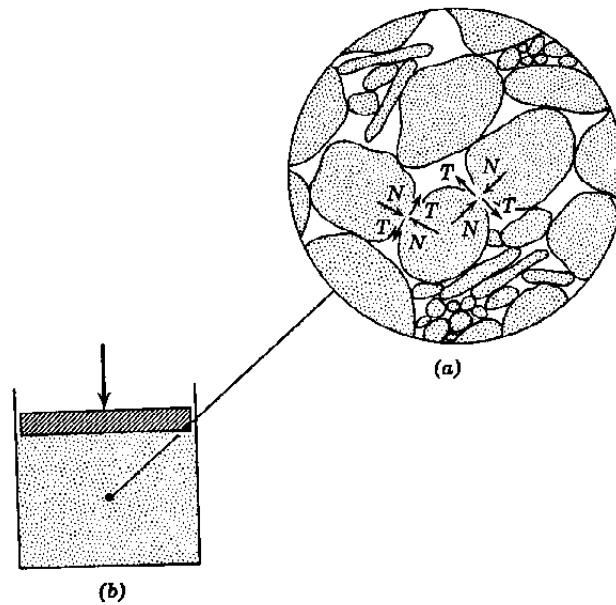


Figura 1.6. Representación de la transmisión de fuerzas a través de las partículas de un suelo granular. (Tomada de Lambe y Whitman, 1969).

1.9.2 Naturaleza de la deformación del suelo

Las partículas discretas de los suelos no están unidas fuertemente como sucede con los cristales de un metal o con los minerales de las rocas, y por lo tanto, cuando se aplican cargas sobre ellos o se induce una deformación, pueden moverse relativamente con respecto a las otras partículas, casi siempre sin perder el contacto con las vecinas.

Se puede afirmar entonces que la deformación de una masa de suelo está controlada por la interacción entre las partículas individuales, en la que se reconocen tres causas principales: compresión de las partículas en los puntos de contacto, flexión de las partículas alargadas, y deslizamiento entre ellas. De estas tres causas la de mayor participación es el deslizamiento entre partículas. En la Figura 1.7 se ilustran estas componentes de deformación.

Cuando ocurre la rotura de la masa de suelo se produce una superficie de discontinuidad, de manera que en ella las partículas pierden la vecindad y aquellas que estaban adyacentes antes de la falla pueden quedar separadas varios centímetros o metros.

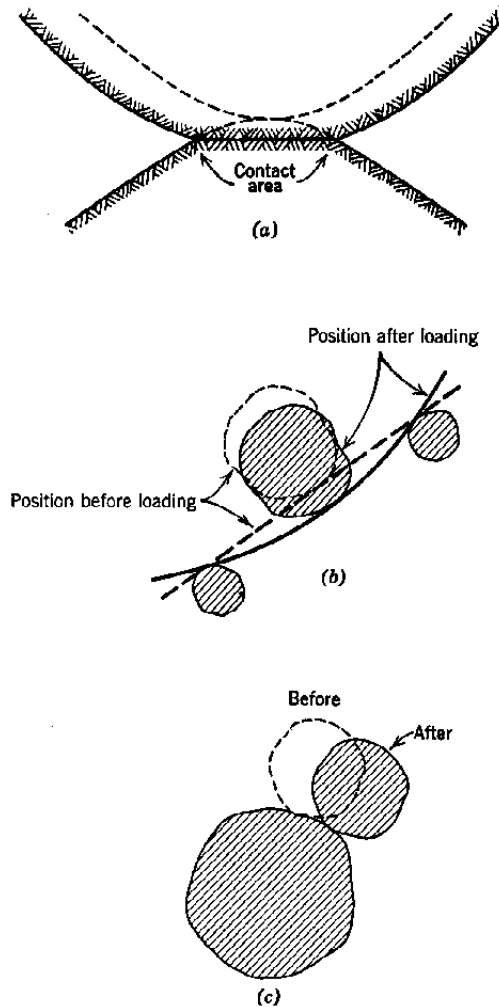


Figura 1.7. Causas de los movimientos relativos entre las partículas del suelo. a) Deformación de las partículas en los puntos de contacto. b) Flexión de partículas alargadas. c) Deslizamiento. (Tomada de Lambe y Whitman, 1969).

1.9.3 Interacción química de la fase porosa

Como el suelo es multifásico, es decir, está conformado por las fases sólida, líquida y gaseosa, los constituyentes de la fase porosa influyen en la naturaleza de la superficie mineral, cuando lubrican y dejan sobre las superficies sales y minerales disueltos, que pueden reaccionar con las superficies de las partículas minerales. Esa interacción química, por tanto, afecta el proceso de transmisión de fuerzas en los contactos entre las partículas.

1. INTRODUCCIÓN

1.9.4 Interacción física de la fase porosa

Puesto que en las masas de suelo no existe cementación entre las partículas minerales, y aunque el material posea granos de diferentes tamaños, se tendrán poros o vacíos de sólidos alrededor de todas las partículas, que se hallan interconectados por varios conductos.

El agua puede fluir a través de dichos conductos, que tienen diámetros y direcciones variables, y por consiguiente se presenta transmisión de presiones del agua en toda la masa de suelo, que altera las fuerzas de contacto entre las partículas, y por lo tanto, el comportamiento de compresibilidad y de resistencia al corte del suelo.

1.9.5 Distribución de los esfuerzos entre las fases

Cuando se aplica una carga a un suelo ella es soportada simultáneamente por la fase porosa (el agua y el aire) y el esqueleto mineral. Este es el armazón, ensamblaje, o estructura de las partículas sólidas, unidas con las demás en varios puntos de contacto, que por la fricción en ellos adquiere una resistencia a la deformación.

Los cambios en la presión intersticial que produce la fracción de carga que es soportada por la fase porosa, inducen el flujo del agua a través de los poros del suelo hacia las zonas donde las presiones son menores, con la consiguiente disminución en el volumen total del suelo, y por lo tanto, las propiedades del suelo se modifican con el tiempo, según sea la velocidad con la que el agua puede moverse a través de los poros del suelo.

1.10 Características del medio colombiano

De acuerdo con González et al (1989) y Montero et al (1987) existen cuatro características principales que favorecen la ocurrencia de los deslizamientos y derrumbes de tierra en el territorio colombiano, así como de otros problemas de tipo geotécnico. Las tres primeras están relacionadas con el territorio mismo: la orografía, el clima, y la geotectónica. La cuarta, la más importante, es el desarrollo que ha tenido el país, tanto por la ubicación de su infraestructura como por su estado o nivel. A continuación se hace una breve descripción de cada una de estas características.

1.10.1 Orografía

Cerca de la mitad del territorio colombiano es montañoso. Luego de que la Cordillera de los Andes ingresa por el sur del país, ésta se divide en tres ramales de gran longitud, que lo cruzan de sur a norte y demarcan tres zonas geográficas y económicas bien definidas.

La primera es la Zona Andina, compuesta por seis regiones: 1) El Macizo Colombiano, al sur, región agrícola, minera y ganadera. 2) La Costa Pacífica, rica en maderas y atracciones turísticas. 3) El Valle del Cauca, región agrícola de gran rendimiento. 4) La Cordillera Central: en sus laderas y valles se encuentran los principales cultivos de café, un producto importante de exportación del país, e industrias básicas. 5) El Valle del Magdalena: región agrícola y ganadera, que en varios sectores es sede de parte de la industria petrolera. 6) La Cordillera Oriental: en sus estribaciones, altiplanos y valles, se encuentran cultivos y depósitos de minerales importantes.

La segunda zona es la Costa Atlántica, dedicada principalmente a la explotación minera, comercial y turística, a la agricultura y la ganadería.

La tercera zona, que abarca cerca de la mitad del territorio colombiano, está conformada por los Llanos Orientales, con recursos petrolíferos y un uso de la tierra de tipo agrícola y ganadero, y la Amazonía, región selvática con grandes recursos, aún desconocidos.

Debido a la longitud de las tres cordilleras de la Zona Andina, y a las grandes alturas de sus montañas, sobre todo de la Cordillera Central, y a la dirección predominante Sur-Norte de los ríos principales, existe una notable dificultad geográfica para la comunicación entre las seis regiones de dicha zona, y entre las tres zonas, de manera que existe una marcada diversidad cultural, y en algún grado étnica, entre sus pobladores.

1.10.2 Clima

Los climas que se presentan en el territorio colombiano son el resultado de la interacción de tres factores principales:

- i) La localización geográfica en la zona intertropical, que es cruzado por la línea ecuatorial en la parte inferior. En esta zona la velocidad radial de rotación del planeta Tierra tiene el valor máximo, que genera una corriente de aire casi constante en todo el año de dirección

1. INTRODUCCIÓN

predominante Este-Oeste, y la radiación solar es intensa y aproximadamente constante durante todos los días del año.

- ii) Las montañas producen diferentes pisos térmicos en sus laderas, valles y montañas, por los cambios altitudinales de temperatura, así como condicionan la circulación local de los vientos y la presencia de diversas provincias de humedad.
- iii) Las corrientes de aire y núcleos de baja presión, causados por las variaciones estacionales de los hemisferios norte y sur del globo terráqueo, y por la presencia de los Océanos Atlántico y Pacífico, situados a lo largo de más de 2.500 Km de costas.

La interacción de los diferentes matices producidos por el último factor durante el año, con las variaciones orográficas del segundo, generan un clima muy variado en el territorio colombiano. Se presentan precipitaciones anuales que varían desde 200 hasta 8.000 mm, y temperaturas desde bajo 0 °C, en las cumbres nevadas, hasta 40 °C, en las áreas bajas y selváticas. En algunos casos se encuentran los valores extremos en regiones distantes pocos kilómetros entre sí.

La precipitación tiene variaciones anuales: en la zona montañosa normalmente hay dos estaciones secas (diciembre a marzo y junio a septiembre), y dos estaciones lluviosas (abril a mayo y octubre a noviembre). En los extremos occidental y oriental, donde no hay control orográfico de la precipitación, usualmente se presenta un sólo período lluvioso (mayo a octubre). Los valles interandinos y las mesetas poseen una precipitación media a baja, mientras que en las franjas de las laderas montañosas es donde casi siempre se producen las lluvias máximas.

Las temperaturas medias tienen muy poca variación anual para un mismo sitio, pero los cambios diarios pueden ser altos, especialmente en las zonas secas con poca cobertura vegetal. La temperatura media y la presión atmosférica varían inversamente con la altitud sobre el nivel del mar. Montero et al (1987) presentaron un mapa climático general de Colombia dividido en siete zonas climáticas bien diferenciadas, de acuerdo con los valores promedios anuales de la precipitación y de la temperatura.

1.10.3 Geotectónica

El territorio colombiano se encuentra ubicado tectónicamente entre las placas de Cocos, al occidente, y la continental de Suramérica, o Escudo

Amazónico, al oriente. Contra esta última se han venido adicionando diferentes terrenos provenientes del oeste. Se cree que la parte norte del territorio se encuentra sobre la placa Caribe. La cadena montañosa de los Andes entra al país por el sur en forma de dos ramales muy unidos, los cuales se separan en el Departamento de Nariño, y dan origen a las cordilleras Occidental y Central. De esta última se desprende más adelante otro ramal que se dirige hacia el Este, que es la Cordillera Oriental.

Desde el punto de vista geológico, la primera cordillera en formarse fue la Central, la más alta y abrupta, con cerca de treinta volcanes, (Ramírez, 1975), algunos de ellos cubiertos por nieve, y conformada primordialmente por materiales ígneos intrusivos y metamórficos de alto grado. Presenta coberturas de materiales piroclásticos en las áreas volcánicas, y de origen sedimentario, provenientes del Terciario, hacia el occidente, (González et al, 1989).

El levantamiento de la Cordillera Central creó una cuenca marina hacia el oriente, en donde posteriormente se elevó la Cordillera Oriental, compuesta principalmente por materiales sedimentarios y metamórficos de origen continental y epicontinental marino. Finalmente se levantó el fondo marino al oeste de la Cordillera Central, formando la Cordillera Occidental, la más baja y corta (picos hasta de 4000 m y con 800 Km. de longitud), compuesta por material de origen marino (lavas y sedimentos) y rocas metamórficas de bajo y medio grado.

En cada evento orogénico la superficie terrestre colombiana sufrió fenómenos tectónicos, que produjeron un alto grado de fallamiento y el fracturamiento de todas las rocas existentes. Los sistemas de fallas principales tienen dirección Sur-Norte, cada una con numerosas fallas satélites o secundarias. Los tipos de fallamientos predominantes son los de empuje vertical con componentes de rumbo. Todas estas fallas son fuentes importantes de sismos, así como también lo son, la zona de subducción del Pacífico y la interacción entre las placas Nazca, Suramericana y Caribe, al norte del país. Casi siempre la ocurrencia de los temblores de tierra produce numerosos deslizamientos, especialmente cuando coincide con las épocas lluviosas de las regiones afectadas por el sismo.

1.10.4 Desarrollo

El desarrollo incide de dos maneras en la generación de los deslizamientos. La primera se debe a la ubicación de cerca del 80% de la población colombiana de la Zona Andina, en razón de la fertilidad de las tierras, la

1. INTRODUCCIÓN

buena disponibilidad de agua, presencia de minerales valiosos, y el clima más benigno, comparado con los que se presentan en los Llanos y Costas.

Como consecuencia de lo anterior, de los 1.050 municipios y ciudades con que cuenta Colombia, cerca de 800 se encuentran en la Zona Andina. La comunicación entre estos centros se hace principalmente por carretera, y como resultado, estas recorren valles y montañas, en una longitud próxima a los 26.000 km. Las especificaciones de la mayoría de estas vías son pobres, teniendo en cuenta el alto costo de su construcción y mantenimiento.

Vale la pena anotar que la capital del país se encuentra en el centro geográfico del territorio, sobre la Cordillera Oriental, a 350 Km. de la Costa Pacífica y a 600 Km. de la Costa Atlántica, ambas distancias en línea recta. Las dos ciudades siguientes en tamaño, Medellín y Cali, también están localizadas en el interior del país, en la Cordillera Central y en el Valle del Río Cauca, respectivamente. Las ciudades y poblaciones de la Zona Andina también son sede de la mayor parte de la producción nacional, tanto agrícola como industrial, que se estima en cerca del 80%.

La segunda manera como incide el desarrollo en la ocurrencia de los deslizamientos tiene que ver con la limitación de los recursos disponibles, y con la escasa importancia que se le da a los daños que produce un desarrollo desordenado. Casi siempre se terminan los presupuestos estimados para las obras antes de concluirlos, y como consecuencia, no se construyen todas las medidas diseñadas para controlar el agua de escorrentía o de infiltración de las laderas, como las zanjas de coronación en los cortes viales, los filtros, drenes y alcantarillas. Sólo cuando se producen las fallas de los taludes que interrumpen el tráfico se procede a terminar o construir dichas obras.

Por otra parte, el cambio en el uso de la tierra acelera la degradación de los materiales y reduce su estabilidad, puesto que para establecer nuevos cultivos el campesino remueve el bosque natural situado inmediatamente encima de los cortes viales, sin adoptar medida alguna para reemplazar su acción estabilizante (Beltrán et al, 1989), y luego incrementa la humedad de los suelos mediante el regadío.

La construcción de vías de penetración de bajas especificaciones, generalmente por los colonos, sin cunetas ni alcantarillas, también aumenta la inestabilidad de los taludes, principalmente durante el invierno, debido a que se convierten en grandes cunetas que conducen el agua hacia algunos

puntos del talud inferior y hacia la vía principal, desestabilizándolos por erosión y aumento de humedad.

A lo anterior es necesario adicionar la poca conciencia que existe en la población en general, a todo nivel, sobre el impacto ambiental que se produce en la naturaleza, y sobre el daño ecológico a mediano y largo plazo, la cual se refleja en las pobres regulaciones establecidas y en los débiles mecanismos de control para obligar su cumplimiento.

1.11 Referencias

Beltrán M., L., y, Corredor G., A. (1989). **El uso de la vegetación en la estabilidad de taludes.** Primer Simposio Suramericano de Deslizamientos. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Paipa, Vol. 1, pp. 411-432.

Bieniawski, Z.T. (1981). **Improved design of coal pillars for US mining conditions.** Proc. 1st Ann. Conf. Ground Control in Mining, W. Virginia, pp. 12-22.

Brown, E.T., Richards, L.R., and, Barr, M.V., (1977). **Shear strength characteristics of the Delabole slates.** Proc. Conf. Rock Eng., Newcastle Univ., 1, 33-51.

Coulomb, C.A. (1776). **Essai sur une application des règles de Maximus et Minimis á quelques Problèmes de Statique, relatifs á l'Architecture, Présentés a l'Académie Royale des Sciences, par divers Savans, et lus dans ses Assemblées,** Paris, Vol. 7, (volume for 1773 published in 1776), pp. 343-382.

Correa A., A., (1992). **La mecánica de rocas.** Fundamentos de Ingeniería de Rocas, Curso de Educación Continuada, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

González G., A.J., y, Beltrán M., L., (1989). **Investigación de deslizamientos en las vías colombianas.** Primer Simposio Suramericano de Deslizamientos. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Paipa, Vol. 1, pp. 663-676.

Lambe, T.W., y, Whitman, R.V., (1969). **Soil Mechanics,** Capítulos 1 y 2, John Wiley and Sons, New York.

1. INTRODUCCIÓN

Montero O., J., Beltrán M., L., y, Cortés D., R., (1987). **Inventario de deslizamientos en la red vial nacional.** VIII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones, Cartagena, Vol. 3, pp. 137-151.

Ramírez, J.E., (1975). **Historia de los terremotos en Colombia.** Segunda edición, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 250 p.

Terzaghi, K. (1925). **Erdbaumechanik**, Franz Deutricke, Vienna.

Vèsic, A.S., (1978). **Introduction to Soil Mechanics.** University of Duke, 9p.

LISANDRO BELTRÁN MORENO

Profesor Emérito U. N.

Bogotá, Febrero de 2002