

LA ACUMULACIÓN DE BASURAS COMO MATERIAL GEOTÉCNICO I: FUNDAMENTOS TÉCNICOS

Augusto Espinosa Silva.¹

Alvaro J. González García.²

Abstract

Human wastes constitute an evergrowing by-product of civilization. Several catastrophic landslides have taken place in these so-called sanitary land fills. It is apparent that geotechnical and environmental engineers follow divergent paths to solve the related technical problems. Part I of this paper addresses the development of mechanical sciences leading to Soil Mechanics (1925) and Rock Mechanics (1960). Part II is dedicated to show how these sciences and arts or geomechanics are applied to huge accumulations of garbage of what could be referred to as anthropic waste deposits.

Palabras Claves

Depósito de basuras, desechos antrópicos, sólidos, materiales particulados, presión de poros, presión de gases, composición y descomposición de basuras, desechos sólidos, esfuerzos efectivos, resistencia deformación y consolidación, geopiezococono, influencia del tiempo.

1. INTRODUCCION

Los materiales naturales de la corteza del planeta Tierra generalmente se dividen en rocas y suelos; la humanidad ha creado un tercer tipo de material, cuya presencia ha comenzado a ganar en importancia en la medida en que el crecimiento de los hombres sobre la tierra se ha hecho exponencial. Este tipo de material está constituido por acumulaciones de basuras, que más elegantemente podrían bautizarse como desechos antrópicos.

Por su parte, las rocas se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas, según su formación. Las rocas ígneas, formadas de la solidificación de una solución silíceas a altas temperaturas, comprenden cerca del 80% de toda la corteza terrestre continental y sub oceánica que se conoce; las rocas metamórficas corresponden a un 15% y las sedimentarias a sólo 5%. Sin embargo, el

75% de la superficie de las plataformas continentales, y una proporción más alta de los pisos oceánicos, están cubiertos por una delgada capa de sedimentos [Winterkorn y Fang, 1991]

En cuanto a las basuras, debe decirse que su acumulación ha pasado a ser un indicador arqueológico de la presencia de antiguos asentamientos humanos, a partir del descubrimiento de ciertas colinas en los alrededores de la Roma imperial, que, al fracasar su interpretación desde el punto de vista geológico, resultaron ser los despojos mortales del imperio. Este mismo criterio viene siendo aplicado en el descubrimiento de otros restos en la península de Anatolia y en la antigua Media Luna Fértil. En los Estados Unidos las estadísticas indican que en 1920 la unidad familiar promedio generaba 2.7 lbs (1.22 kg) de basuras por día. Al llegar a 1970 la cifra fue de 5.3 lbs (2.40 kg) por día. En 1980 se llegó a 8.0

1 Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Master of Science, University of Illinois, USA. Profesor de tiempo parcial Universidad de los Andes por 16 años.

2 Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Master of Science, Universidad de Londres. Diploma del Imperial College. Profesor asociado de la Universidad Nacional desde 1975

lbs (3.63 kg). Si, además, se agregaran los desechos industriales -de minas y fábricas- la cifra per cápita se acercaría a 50 lbs por día (22.7 kg). [Ward y Dubos, 1972]

Tchobanoglous et al. (1993) recogen cifras de 6 lbs (2.7 kg) per capita al día en 1990, de sólo desechos urbanos sólidos en los EE.UU.

En Bogotá D.C., los desechos sólidos, familiares y urbanos varían entre 0.8 kg per cápita al día y 1.5 kg según el vecindario y la época del año.

Desde 1925 con la publicación de *Edbaumechanik* por Karl Terzaghi se reconoce una rama de la mecánica que se aplica a los suelos, entendiendo por éstos, desde el punto de vista de ingeniería, como el conjunto de materiales encontrados en la capa superficial de la tierra, suficientemente blandos como para ser removidos mediante pala o azadón [Winterkorn y Fang, 1991] o, más técnicamente, como el agregado natural de granos minerales que puede ser separado por medios mecánicos suaves como la agitación en agua [Terzaghi, Peck y Mesri, 1996]. Con todo y su mayor presencia en la corteza terrestre, la mecánica de las rocas sólo puede ser identificada a partir de 1960 [Goodman, 1980]. Con métodos de éstas dos disciplinas, algunos de cuyos puntos sobresalientes se presentan a continuación, se ha venido formulando una mecánica de las basuras, aún incipiente. [Landva y Knowles 1990; Tchobanoglous et. al., 1993;].

2. MATERIALES SÓLIDOS

2.1 División

La división de los sólidos desde el punto de vista de ingeniería se hace comúnmente en metálicos, cerámicos y poliméricos.

- i. Sólidos Metálicos.* En los sólidos metálicos la principal característica es el orden generalizado. Las moléculas o átomos se extienden en un arreglo regular que cubre el cristal. Los enlaces son a nivel atómico y forman los cristales metálicos que se obtienen en estado natural o por metalurgia..
- ii. Sólidos Cerámicos.* A diferencia de los anteriores en los vidrios el arreglo ordenado no tiene largo alcance sino que se extiende a reducidos espacios de la materia. Se dice de los vidrios que son líquidos supercongelados. También se describen como sólidos amorfos. Los enlaces son predominantemente

covalentes o iónicos En este grupo quedan los vidrios, las cerámicas, el concreto, las rocas y los suelos.

- iii. Sólidos Poliméricos.* Se caracterizan por formar largas cadenas de uniones químicas cruzadas. A una temperatura inferior a la crítica se comportan como vidrios; a temperaturas superiores a esa crítica, se comportan como cauchos. Los enlaces predominantes son de van der Waals. El ejemplo en este caso, es el polietileno, que literalmente significa muchos etilenos.

2.2 TIPOS DE ENLACES

El tipo de enlace es fundamental en la conformación del sólido y en la determinación de sus propiedades mecánicas. Se distinguen los siguientes tipos de enlaces, del más débil al más fuerte:

- **ENLACES DE VAN DER WAALS.** Son enlaces secundarios entre las moléculas debidos fundamentalmente a la atracción entre cargas eléctricas de signos diferentes. Debe anotarse que se atraen, en este caso, las moléculas y no los iones.. En el caso de moléculas vecinas del HCl la atracción será proporcional a x^{-7} , donde x es la distancia entre moléculas.
- **ENLACE IÓNICO.** Enlace entre los iones metálicos y no metálicos en el que el metal cede uno o varios electrones, de los cuales se apropia la capa externa del no metal. El resultado es que se producen iones negativos del no metal y iones positivos del metal, los cuales al atraerse generan el enlace. Las fuerzas resultantes del enlace varían con x^{-2} , donde x es la distancia entre iones.
- **ENLACE COVALENTE.** Es un enlace en el cual los átomos de un mismo elemento comparten electrones, dando como resultado un enlace fuerte. Es pués un enlace atómico, cuyas fuerzas caen rápidamente con la separación entre los átomos. Las fuerzas se distinguen como fuerzas de valencia. Las fuerzas resultantes del enlace varían con x^{-3} para el hidrógeno en cortas distancias, donde x es la distancia entre átomos.
- **ENLACE METÁLICO.** Es el enlace en el cual los átomos del metal ceden sus electrones a una nube de electrones común y adoptan un ordenamiento regular usualmente con máximo empaquetamiento. Las fuerzas resultantes del enlace metálico también varían con x^{-3} , en muchos casos. La fuerza de la atracción produce la **resistencia**, mientras la movilidad de los electrones produce la **conductividad**.

En un granito los enlaces son esencialmente covalentes al igual que los enlaces del silicio en las partículas de cuarzo y los enlaces de carbono en un diamante.

En las arcillas los enlaces son iónicos y covalentes dentro de la partícula y de van der Waals entre las láminas.

Se han seguido de cerca para estas descripciones, las obra de Flinn & Trojan, 1991-1989 y la clásica obra de Tabor, 1979. (Cuadros Nos. 1 y 2)

2.3 Comportamiento Mecánico de los Sólidos

2.3.1 GENERALIDADES

Interesa conocer cómo se comportan los sólidos ante sollicitaciones mecánicas. Para estos efectos, primero debe analizarse cómo responden ante un régimen de esfuerzos: tracción, compresión y cortante; en segun-

do término, debe estudiarse la deformación bajo carga del sólido; en tercer lugar debe relacionarse el esfuerzo con la deformación correlativa, para observar el tipo de comportamiento que permita un ordenamiento y una clasificación de la forma de respuesta particular. Se estudiarán entonces, los modos de comportamiento y la forma en que se ha decidido su representación práctica. Solo después de lo anterior se entrará de lleno en las llamadas **teorías de falla** que se han propuesto para explicar en últimas el comportamiento bajo carga de los diferentes materiales. A propósito, no debe confundirse la representación del comportamiento con la teoría que explica su rotura.

Luego, debe hacerse referencia a ciertas discontinuidades que se observan, desde la escala molecular hasta los macizos rocosos. Se mencionarán aquí el clivaje, el maclaje, las fisuras y las diaclasas. Las fallas geológicas quedan fuera de los alcances del presente trabajo.

CUADRO No.1 PRINCIPALES TIPOS DE ENLACES			
ENLACE	CARACTERÍSTICA	EJEMPLOS	ESTADO CRISTALINO
Van der Waals	Débil	H ₂ sólido, K _r Parafinas	Empaque apretado de unidades débilmente atraídas.
Iónico	Fuerte	N _a CL	Enormes agregados de iones positivos y negativos, firmemente empacados en forma consistente con la neutralidad de la carga.
Covalente	Fuerte	Diamante, S _p , G _e	Moléculas gigantes con enlaces direccionales, empaquetamiento dependiente del número de la valencia y de su dirección.
Metálico	Fuerte	Metales	Electrones de valencia dejados por átomos, resultan en iones en un mar de electrones

Modificado de Tabor, D. Gases, Liquids and Solids (1.979)

2.3.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Los principios que se recogen enseguida estrictamente se aplican a cualquier cuerpo compuesto por una **distribución continua** de materia tal como acero, roca, madera o plástico, según advierten Obert & Duvall (1967). Más adelante se recogen las discontinuidades presentes en estos materiales que obligan a plantear ciertas restricciones a los planteamientos generales que se van a formular.

CUADRO No. 2 EJEMPLOS DE FUERZAS INTERMOLECULARES				
TIPO	NATURALEZA	EJEMPLOS	MODO DE SEPARACIÓN	ENERGÍA POR ENLACE Jx10 ²¹
Van der Waals	Igual que en átomos	Metano sólido CH ₄	Ruptura en el CH ₄ ⁺	3
Iónico	Idéntica al de Fuerzas Interatómicas Cristal	N _a F	Ruptura entre los iones N _a ⁺ y F ⁻	300
Covalente	Moléculas gigantes sost.s por fuerzas covalentes	Diamante,	Ruptura dentro de los átomos de C	600
Metálico	Iones metálicos en un mar de lectrones libres con valencia	K	Vaporización entre iones metálicos + electrones	500

El término **esfuerzo** tiene unidades de fuerza por unidad de área. Así, puede escribirse que el esfuerzo S_n debido a una fuerza F en cualquier punto P de un plano de área A cuya normal es n está dado por:

$$S_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

y sus componentes cartesianos por x , y y z .

Ahora, la fuerza incremental ΔF puede resolverse en sus dos componentes: DF_n normal al plano dado y ΔFt paralelo a dicho plano. Por definición se tiene:

$$\sigma_{nn} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A}$$

$$\tau_{nt} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Ft}{\Delta A}$$

donde t es en la dirección de la intersección del plano formado por σ_{nn} y S_n y el plano tangente al área ΔA en el punto P .

Un esfuerzo perpendicular a un área será el esfuerzo normal a esa área y será denotado por σ . Un esfuerzo paralelo a dicha área será el esfuerzo cortante y será denotado por τ . La resultante de σ_{nn} y tnt es también S_n ; por tanto estos esfuerzos estarán relacionados por:

$$S_n^2 = \sigma_{nn}^2 + \tau_{nt}^2$$

$$\sigma_{nn} = S_n \cos(S_n, n)$$

$$\tau_{nt} = S_n \cos(S_n, t)$$

De la misma manera se puede demostrar que los esfuerzos sobre un plano cuya normal hace un ángulo θ con la horizontal, sumando los esfuerzos por σ_θ y por τ_θ e igualando a cero, son:

$$\sigma_\theta = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

$$\tau_\theta = \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) - (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta$$

y con la ayuda de identidades trigonométricas:

$$\sigma_{max} = P = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y) + 4\tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{min} = Q = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y) + 4\tau_{xy}^2}$$

Derivando con respecto a θ e igualando a cero, se termina por obtener los esfuerzos máximo y mínimo en el plano de interés, que son:

$$\sigma_{max} = P = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y) + 4\tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{min} = Q = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y) + 4\tau_{xy}^2}$$

Como se ve, los esfuerzos máximo y mínimo han sido bautizados P y Q , respectivamente.

Por convención, en geomecánica, se adoptan como **positivos** los esfuerzos y deformaciones de **compresión**, mientras que en otras ramas de la ingeniería, lo usual es que los esfuerzos y deformaciones de tracción sean los positivos.

2.3.3 EL CÍRCULO DE MOHR PARA ESFUERZOS

De las anteriores ecuaciones se deriva que:

$$\sigma_\theta = \frac{P+Q}{2} + \frac{P-Q}{2} \cos 2\theta$$

$$\tau_\theta = \frac{P-Q}{2} \sin 2\theta$$

Así el esfuerzo normal a cualquier ángulo θ con la horizontal y el esfuerzo cortante correspondiente, han sido expresados desde tiempo atrás en el círculo de Mohr. (Figura 1)

Sin necesidad de círculo, así ha terminado representándose la relación τ - σ , ya sea para ilustrar disquisiciones teóricas o para recoger ordenadamente la información acumulada en forma experimental.

Cabe anotar, además, que el círculo de Mohr es una manera conveniente de representar vectores tridimensionales y también es aplicable, por ejemplo, a momentos y productos de inercia.

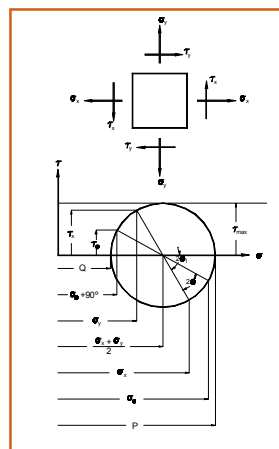


Figura 1 - Círculo de Mohr

2.3.4 ANÁLISIS DE DEFORMACIONES

Todo material sólido, al ser sometido a esfuerzo, se deforma y absorbe la energía impuesta. Si a un prisma inconfinado de base cuadrada $B \times B$ y longitud L_{z0} , se le aplica un esfuerzo de compresión σ_z en la misma dirección z , se deforma ΔL_z . La deformación unitaria ϵ_z se define en ingeniería como:

$$\epsilon_z = \Delta L_z / L_{z0}$$

Al mismo tiempo el prisma sufre expansiones iguales a $-\Delta B$ en las otras dos direcciones, las cuales resultan en deformaciones unitarias laterales:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = -\Delta B / B$$

La relación esfuerzo-deformación ($\sigma-\epsilon$) entonces puede catalogarse como una curva de densidad de energía elástica, en la cual la energía elástica U por unidad de volumen V viene dada por (Figura 2):

$$U = Y/\zeta = \int \sigma \delta \epsilon$$

2.3.5 COMPORTAMIENTOS ESFUERZO - DEFORMACIÓN

En forma teórica ideal se pueden distinguir dos casos de carga: **carga-descarga** y **carga monotónica** (González, 1990).

En **carga-descarga** pueden presentarse dos casos extremos: (A) que al descargar el sólido retorne totalmente la energía elástica que absorbió y recupere la deformación, lo cual se denomina **comportamiento elástico** (Figura 3a) o (B) que el sólido absorba totalmente la energía impuesta, el retorno sea nulo y al completar la descarga el sólido quede permanentemente deformado, caso de comportamiento plástico (Figura 3b).

En **carga monotónica** también puede haber dos situaciones extremas al llegar al esfuerzo máximo que resiste el sólido $\sigma_{m\acute{a}x}$: (A) que el sólido se deforme indefinidamente manteniendo la carga máxima, lo cual se denomina **comportamiento dúctil** (Figura 4a) o (B) que el sólido se deforme pero reduzca la carga que acepta, gradual o bruscamente, hasta cero, situación que corresponde a un **comportamiento totalmente frágil** (Figura 4b).

En la ductilidad el sólido sigue absorbiendo energía para deformarse, mientras que en fragilidad el sólido, luego de cierta deformación crítica, correspondiente al esfuerzo máximo, no acepta más carga y entonces se presenta una diferencia de energía elástica, entre el esfuerzo impuesto y el esfuerzo aceptado por el material, diferencia que se libera en otras formas de energía y se gasta en: la creación de superficies de falla al romperse los enlaces, en energía cinética que hace moverse al sólido, en energía vibratoria, energía térmica, electromagnética y hasta nuclear.

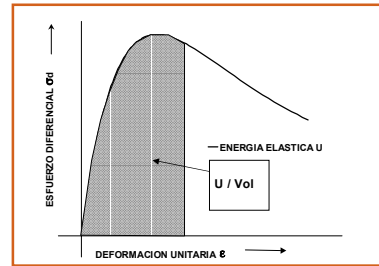


Figura 2 - Esfuerzo-deformación y Energía Elástica

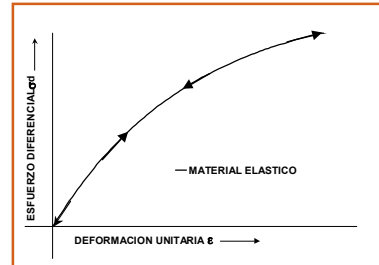


Figura 3a - Comportamiento elástico

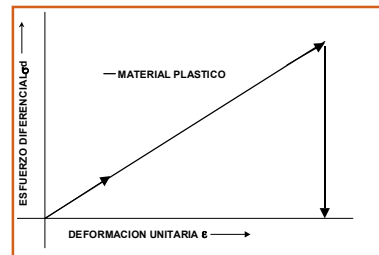


Figura 3b - Comportamiento plástico

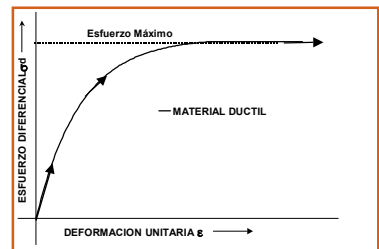


Figura 4a - Comportamiento dúctil

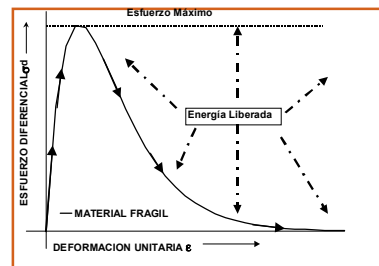


Figura 4b - Comportamiento frágil

Los materiales elásticos reales usualmente tienen una relación σ - ϵ lineal, por lo que comúnmente se tiende a relacionar la linealidad con la elasticidad. Por otro lado los materiales dúctiles, luego de entrar en la fase de esfuerzo máximo constante, al descargarlos, son totalmente plásticos, por lo que los términos dúctil y plástico tienden a hacerse equivalentes y esto es una actitud generalizada en toda la literatura técnica sin considerar las relaciones energéticas.

2.3.6 ESFUERZO-DEFORMACIÓN EN SÓLIDOS REALES

No todos los materiales sólidos siguen idéntico patrón de esfuerzo-deformación y dependiendo del tipo de material, los niveles de esfuerzos, tanto de confinamiento como diferencial, los niveles de deformación y las condiciones ambientales, se presentará uno o secuencialmente varios de los tipos de comportamientos mencionados .

Dentro de la tipología de materiales ya mencionada, los materiales metálicos tienden a ser elásticos y dúctiles, los materiales cerámicos a ser elastoplásticos y parcialmente frágiles y los materiales poliméricos a presentar comportamientos plásticos y dúctiles.

Por ejemplo, Hendron (1970) reprodujo la tipología propuesta para materiales rocosos por Miller en su tesis en la U. de Illinois, que va desde materiales **elásticos** (lineales) como el **basalto** (Tipo I), hasta **elastoplástico con fluencia** (lineal-dúctil) en el caso de la **sal gema**, (Tipo VI), pasando por **plastoelastoplástico** en el caso del **esquistos** (Tipo V) (Figura 5)

En un régimen de esfuerzo-deformación, sólidos frágiles pueden hacerse dúctiles, lo cual es de extraordinaria importancia para comprender el comportamiento de los materiales de la corteza terrestre. Para comodidad de la explicación, es útil considerar el comportamiento de un espécimen metálico homogéneo, de sección transversal uniforme, que es sometido a tracción (Figura 6 -Tabor, 1979):

- **COMPORTAMIENTO DÚCTIL.** En el diagrama σ - ϵ inicialmente se producirá una deformación para cada incremento de esfuerzo, hasta el punto A, de tal manera que la representación es lineal y en cualquier punto en que se decida retirar el esfuerzo, la deformación retornará al punto inicial; el régimen es elástico. Si se continúa incrementando el esfuerzo, se llega al punto Y, o de fluencia, a partir del cual la relación no es lineal y una eventual descarga a partir de B, mostrará una deformación remanente en O' y O'B será aproximadamente paralela a OA. Entre Y y Z el material sufrirá una deformación plástica. Ahora, si el espécimen es sometido a una presión hidrostática

(presión ambiente igual en todas direcciones), el punto de fluencia no ocurrirá sino hasta que se haya excedido tal presión. Esta condición de deformación plástica de Y a Z, lleva a un endurecimiento por trabajo (work hardening), y se ha entrado en la ductilidad

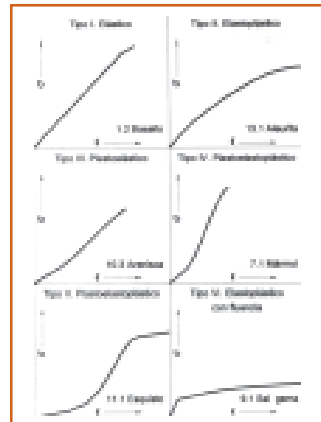


Figura 5 - Materiales Rocosos

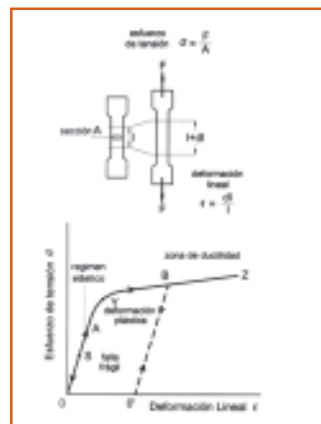


Figura 6 - Comportamiento σ - ϵ de un metal

- **COMPORTAMIENTO FRÁGIL.** Aprovechando la misma figura, si el material no muestra ninguna ductilidad, se aplicará la tracción hasta llegar a un punto S en el cual el material fallará súbitamente. Se dirá entonces que su comportamiento es frágil.

Si el espécimen es sometido a una condición hidrostática P, la falla frágil tendrá lugar a un esfuerzo P+S. Ahora bien, si se considera la muestra cargada a P+S, estará sometida a un esfuerzo cortante iguala 1/2 (P+S). Si el esfuerzo se mantiene ligeramente por debajo del anterior, la falla frágil no ocurrirá y el material fluirá en forma dúctil.

Esta es la explicación por la cual las rocas en la corteza terrestre, aún siendo materiales frágiles en superficie, debido al esfuerzo de confinamiento, el cual aumenta con profundidad en la corteza, pueden deformarse plásticamente como si de materiales dúctiles se tratara. Adicionalmente la temperatura también hace más dúctiles los materiales rocosos y la temperatura también crece con profundidad y por eso la fragilidad de las rocas necesaria para producir energía vibratoria (léase sismos) tiene un límite de profundidad: no se conocen hipocentros sísmicos de más de 850 km de profundidad.

2.3.7 TEORÍAS DE FALLA

El término **falla** de un material denota una casi total pérdida de integridad en una muestra bajo análisis [Goodman, 1980] o lo mismo, **la rotura** de la muestra. Esto ocurre cuando el **comportamiento es frágil**, en donde el excedente de energía elástica permite la destrucción de los enlaces y la creación de superficies de ruptura, las cuáles sólo pueden presentarse en este tipo de comportamiento. Por el contrario, en **comportamiento dúctil**, el material puede deformarse bajo carga sin que presente una pérdida catastrófica de sus propiedades. En realidad la rotura del material bajo carga depende del mecanismo de aplicación y de las condiciones ambientales ya discutidas y no es una verdadera propiedad intrínseca del material.

En términos más generales y ya al referirse a obras, una falla en ingeniería se puede considerar como la pérdida o disminución significativa de una o varias de sus características deseables, todas ellas interrelacionadas entre sí (González, 1974):

- 1 **SEGURIDAD:** es decir que en ningún momento de su existencia, la obra vaya a causar desastres (pérdidas irre recuperables)
- 2 **ESTABILIDAD:** o sea que la obra debe permanecer dentro de ciertos límites físicos y energéticos.
- 3 **CAPACIDAD DE SERVICIO:** o su propiedad de cumplir el propósito asignado en el periodo establecido para su existencia.
- 4 **DURABILIDAD:** o la facultad para permanecer durante el tiempo previsto (vida útil).

Entonces, desde el punto de vista mecánico, en algunos casos se podrá hablar de máximo esfuerzo, en otros casos de máxima deformación, de manera que no se altere el correcto desempeño de la instalación bajo análisis. Unos serán los criterios para una central atómica, y otros para una instalación temporal de barracas de madera.

Los materiales sólidos sólo pueden romperse por esfuerzos de **tracción** o de **cortante**. Fallas por sollicitaciones de flexión, compresión, torsión o aplastamiento, siempre se pueden interpretar en términos de los antedichos esfuerzos y tienen lugar en la naturaleza. Por lo tanto o con mayor razón, en obras construídas por el hombre o derivadas de su acción directa.

Por todo é ello, es deseable disponer de una teoría mecánica de falla, basada en resultados teóricos o experimentales, donde se establezca cómo los materiales son afectados hasta rebasar su resistencia, por el estado de esfuerzos, el tiempo transcurrido, la temperatura y otros factores determinados por la necesidad específica.

Algunas de la teorías de falla que se han postulado a lo largo del tiempo para materiales sólidos son:

- **TEORÍA DE COULOMB (EN HEYMAN, 1972).** Coulomb presenta "el efecto de la fricción y la cohesión en algunos problemas de estática" y postula que la resistencia de la mampostería y de los suelos se compone de las fuerzas pasivas de cohesión y fricción, la primera de ellas proporcional al área de la superficie de falla y la segunda proporcional a la fuerza normal sobre el mismo plano de falla, "de acuerdo con lo ya encontrado por Amontons". Se llega al equilibrio cuando en ese plano del material "las componentes de las cargas resueltas paralelas al plano inclinado sean exactamente iguales a la resistencia" es decir cuando se llegue a un esfuerzo cortante dado
- **TEORÍA DE MOHR.** Mohr postula que el material se fracturará o sufrirá una deformación permanente, siempre y cuando el esfuerzo cortante exceda un cierto valor τ_0 , dependiente del esfuerzo normal al mismo plano, o cuando el máximo esfuerzo de tensión llegue a un valor predeterminado T_0 .
- **TEORÍA DE GRIFFITH.** Griffith formuló para metales la hipótesis de una fracturación frágil en tracción originada al propagarse las microfisuras existentes en los materiales, hasta convertirse en una falla macroscópica. Posteriormente Hoek la extendió a la falla en compresión en materiales rocosos.
- **TEORÍA DE MOHR-COULOMB.** La denominada por muchos teoría de Mohr-Coulomb, en realidad combina lo encontrado por éstos dos autores y basada en experimentaciones reales, en especial de suelos, postula una resistencia al esfuerzo cortante s , tal que al excederse se origina la falla. Dicha expresión adopta la forma lineal de: $s = c + \sigma \tan \phi$, donde c es la cohesión y ϕ es el ángulo de fricción interna.

- **TEORÍAS EMPÍRICAS DE FALLA.** Se han planteado varias teorías empíricas de falla que consideran, con base en los postulados de Mohr-Coulomb, la realidad de un conjunto de muestras de laboratorio cuya envolvente de falla en el diagrama τ - σ será ligeramente convexa y no lineal. Dentro de estas envolventes se encuentran las de enrocados, las de materiales rocosos y las de discontinuidades en roca.
- **OTROS CRITERIOS (TRESKA, VON MISES, ETC).** Los criterios de von Mises y Tresca pertenecen ya a la explicación de la cedencia de los materiales en el ámbito de la plasticidad. Se basan en una observación previa según la cual los materiales sólidos, en especial los metales, sometidos a esfuerzos de confinamiento perfectamente hidrostáticos, no muestran ninguna tendencia a la deformación o a la reptación; se concluye pues, que la deformación plástica debe estar asociada a cierta distorsión o esfuerzo cortante.

2.3.8 DISCONTINUIDADES

Los postulados teóricos son planteados para medios homogéneos e isotrópicos. Se sabe, sin embargo, que las masas de sólidos de común ocurrencia en la naturaleza poseen discontinuidades. Se mencionan, dentro de los alcances de este trabajo, las siguientes:

- **CLIVAJE.** Es la propiedad de muchos minerales de romperse en ciertas direcciones predominantes, a lo largo de planos regulares, como resultado del arreglo atómico particular que en esa dirección presenta una debilidad. Ocurre a escala intracrystalina.
- **MACLAJE.** Es una deformación plástica que ocurre en la formación de los cristales de manera que cada átomo se corre en proporción a la distancia al límite del maclaje y se forma así una estructura cristalina que semeja una flor.
- **DIACLASADO.** Es una rotura o conjunto de roturas dentro de la masa de rocas sólidas, a lo largo de las cuales no ha ocurrido movimiento. Tienen lugar por enfriamiento del material rocoso, o por fuerzas tectónicas coetáneas con doblamientos, y convierten el macizo rocoso en un conjunto de bloques apretados entre sí, pero sin estricta continuidad entre ellos.

2.3.9 RUGOSIDADES DE DIACLASAS

Patton (1966), presentó una serie de ensayos controlados en diaclasas secas, aserradas e intactas, de los cuales le fué posible deducir un comportamiento al corte, modificando el postulado de Mohr-Coulomb así:

$$\tau = \sigma \tan (\phi_u + i)$$

donde:

- τ = esfuerzo cortante
- σ = esfuerzo normal
- ϕ_u = ángulo de fricción en la superficie
- i = ángulo de las asperezas

Lo anterior quiere decir que el cizallamiento a lo largo de una diaclasa sin pulir, no solo debe sobrepasar el ángulo de fricción interna ϕ_u , sino además remontar las asperezas o irregularidades de la misma diaclasa, representadas por i . Converge este hallazgo con el concepto de **dilatancia**, o la **resistencia al cambio de volumen**, ya expresado anteriormente por Reynolds en sus clásicos experimentos con arenas sueltas y densas,

3. MATERIALES PARTICULADOS

3.1 Generalidades

Hasta este punto, los materiales sólidos han dominado el panorama de lo que se viene exponiendo, de una mecánica del medio continuo, con irregularidades y discontinuidades que, mal que bien, se ha podido manejar con ciertas correcciones y ajustes a las teorías y postulados iniciales.

A partir de Terzaghi, todo cambia. Ya no se trata de resolver un continuo, sino una masa donde la ley son las discontinuidades distribuidas en toda ella de manera más o menos aleatoria, pero también continua.

Entonces, es necesario hacer referencia a los materiales particulados, compuestos por fragmentos sólidos y con interacción esencialmente mecánica entre ellos.

Marsal inició en 1963 la presentación de sus profundas investigaciones sobre enrocados y más adelante Harr (1977) escribió un libro que tituló precisamente *Mechanics of Particulate Media*, en la cual trata la interacción mecánica entre partículas con modelos probabilísticos. Muchos otros autores también han investigado este asunto, entre ellos Trollope quién ha postulado una **mecánica clásica de las rocas**, dado que éstas estarían compuestas por clastos (en griego fragmento). Pese a que estos esfuerzos se realizaron en los 60s, la mecánica de las rocas no se desarrolló por este camino, aunque sus fundamentos son dignos de tomarse en cuenta.

Posteriormente Jiménez Salas (1982) haría referencia a la **Mecánica de los Conjuntos Particulados**: "Esto nos conduce de lleno en un concepto que fue fundamental para los primeros que se ocuparon de estos temas, pero que muchas veces ha quedado relegado a segundo pla-

no. El suelo no es un continuo sino un conjunto particulado. El modo de tratamiento habrá de ser una Mecánica de los Conjuntos Particulados, que podremos llamar, quizás con una denominación demasiado enfática, mecánica del suelo cuántica, pues tenemos un cuanto, que es la partícula".

3.2 Principio de los Esfuerzos Efectivos

Este, que algunos llaman la Ley de Terzaghi fue intuído desde antes de su formulación explícita en 1936, por otros investigadores que lo precedieron, como Reynolds. Sin embargo, fue Terzaghi quien primero entendió cabalmente sus consecuencias para materiales particulados que además llevan fluidos en sus poros, de manera que:

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

donde

σ = esfuerzo total

σ' = esfuerzo efectivo

μ = presión de poros o de fluidos o esfuerzo neutro.

La consecuencia trascendental de esta formulación es que cualquier deformación, distorsión o cambio de la resistencia al corte de un medio particulado es resultado únicamente de un cambio en el esfuerzo efectivo σ' , que interesa a los contactos entre sólidos y no al esfuerzo total σ que se aplica también parcialmente a la fase fluida.

La extensión del principio a otros materiales sólidos porosos como rocas o concreto ya no es tan directa y requiere de formulaciones algo diferentes (i.e. Skempton, 1964)

3.3 La Deformación Diferida

La teoría de la deformación diferida o consolidación también se debe a Terzaghi. Precisamente porque el medio es particulado, y porque existen enlaces entre las partículas -algunos de los cuales son viscosos-, cualquier cambio en la presión de poros se traducirá en cambios en el esfuerzo efectivo y se representará en un acomodamiento de la estructura del material, que dependerá del tiempo transcurrido desde la aplicación de la carga y la transferencia de ésta del medio fluido al medio sólido, por movimiento del fluido en los poros. La respuesta del material, suelo en este caso, será su consolidación bajo carga. Siguiendo los postulados de la teoría de Terzaghi, junto con las contribuciones de

otros investigadores, es posible calcular los asentamientos que sufrirá una masa de suelo sometida a cargas y en cuánto tiempo ocurrirán.

3.4 Resistencia en Medios Particulados

La resistencia de los materiales particulados, se puede considerar entonces con tres componentes: cohesión (c), dilatancia ($v = \tan i$) y fricción ($\mu = \tan \phi$)

Aunque la separación de estas componentes no es fácil se puede postular el siguiente comportamiento esfuerzo-deformación de cada una de ellas (González, 1990) (Figura 7):

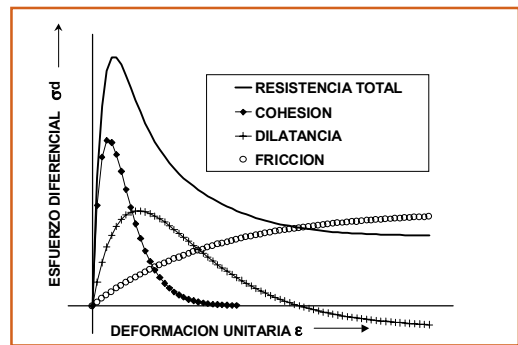


Figura 7 - Componentes de Resistencia

- Cohesión: rígida, elasto-plástica y frágil
- Dilatancia: relativamente rígida, elastoplástica y frágil. Puede ser negativa.
- Fricción: poco rígida, plástica y dúctil.

Los materiales puramente particulados o **materiales granulares gruesos** como enrocados, gravas o arenas poseen únicamente dilatancia y fricción. Si están totalmente sueltos tienen fricción y eventualmente dilatancia negativa, lo que lo hace plásticos y dúctiles. Si son densos tienen fricción y dilatancia positiva, lo que lo hace frágiles y elasto-plásticos.

Los materiales particulados finos como limos, por su alta superficie específica ya tienen fuerzas electroquímicas de superficie que les dan algo de fuerzas cohesivas. Por su parte las arcillas tienen enlaces de van Der Waals y eventualmente iónicos entre partículas, lo que las provee de una cohesión verdadera, la cual sin embargo, depende de las condiciones físico-químicas del fluido de los poros.

Los materiales orgánicos, como las turbas, también considerados por la geomecánica, son conjuntos parti-

culados que provienen de descomposición especialmente de vegetales (materiales poliméricos), tienen una estructura intrínseca altamente porosa y sufren procesos bioquímicos de cambio que las transforman. Son dúctiles, altamente compresibles y tienen resistencias inicialmente friccionantes que se van transformando a cohesivas y en conjunto reduciendo a medida que su descomposición aumenta.

Por su lado, las basuras, compuestas por materiales particulados también orgánicos en su mayoría, relativamente frescos inicialmente y mezclados con otro tipo de sólidos, especialmente papel y plásticos (poliméricos) tienen parecido en su comportamiento con las turbas, pero son más heterogéneas y variables y su proceso de descomposición ocurre en los rellenos casi en su totalidad y en ambientes no totalmente saturados, como sí es el caso de los depósitos de turbas.

Finalmente es necesario recordar que los medios particulados no son exclusividad de la geomecánica, sino también de otras disciplinas que involucran este tipo de materiales, como procesos industriales de polvos y granulados; granos en silos; etc.

En la segunda parte de este trabajo se hará referencia específica a las propiedades de las basuras dentro del ámbito descrito aquí y en especial para las basuras del Relleno Sanitario Doña Juana en Bogotá D.C..

REFERENCIAS

- FLINN, R. & TROJAN, P. Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones. 3a Edición, McGraw Hill. 1991
- GONZALEZ, A. J. Safety Factors - A Conceptual Review - M.Sc. Thesis- Imperial College, 1974
- GONZALEZ, A. J. Curso de Mecánica de Rocas -Notas sin publicar- Universidad Nacional de Colombia, 1990
- GOODMAN, R. Introduction to Rock Mechanics. Wiley. 1980
- HARR, M.E. Mechanics of Particulate Media. John Wiley & Sons, 1977
- HENDRON, A, J. Propiedades Mecánicas de las Rocas. Capítulo 2 Mecánica de las Rocas en la Ingeniería Práctica, Stagg & Zienkiewicz, Ed. Blume, 1970
- HEYMAN, J. Coulomb's Memoir on Statics Imperial College Press, 1972
- JIMÉNEZ SALAS, J. El lugar de la Geotécnica en el Panorama de la Ciencia. Conferencia Internacional de Mecánica de Suelos. México, 1982
- LADNVA, A; KNOWLES, G. F. Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice ASTM STP 1070, 1990
- OBERT, L.; DUVALL, N. Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock. Wiley. 1967
- PARRY, R.H.G. Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics - E & FN Spon -London, 1993
- PATTON, F, D. Multiple Modes of Shear Failure in Rock. 1ST. IntL Congress on Rock Mechanics, Lisbon. 1966
- SKEMPTON, A. W. Effective Stress in Soils, Concrete and Rocks. Pore Pressure and Suction in Soils Butterworths, London, 1961
- TABOR, D. Gases Liquids and Solids. 2a, Ed, Cambridge University Press. 1979
- TCHOBANOGLIOUS, et. al. Integrated Solid Waste Management. McGraw Hill. 1993
- TERZAGHI, K.; PECK, R.B. MESRI, G. Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley Interscience. 1996
- WARD, B; DUBOS, R. Only One Earth. Norton, 1972
- WINTERKORN; FANG. Soil Technology and Engineering Properties of Soils. Ch 3. Foundation Engineering, Van Nostrand, Reinhold. 1991