

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS EN
TOPOGRAFÍA, GEODESIA Y CARTOGRAFÍA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

**TEMA 2
SUELOS Y ROCAS
INGENIERÍA CIVIL**

ÍNDICE

1. Origen de suelos y rocas
2. Historia geológica de la tierra
3. Las rocas y sus propiedades
4. Los suelos y sus propiedades

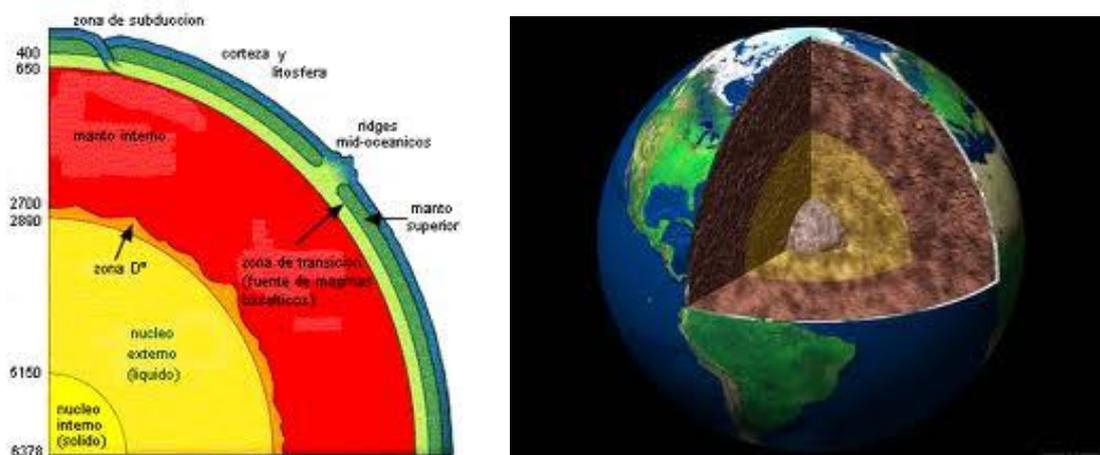
BIBLIOGRAFÍA

1- Origen de suelos y rocas

1.1.- Estructura y composición de la Tierra

El planeta Tierra está constituido en un 75% por una capa líquida: Hidrosfera, y en un 25 % por una parte rocosa: Litosfera. En los polos aparecen unos casquetes de agua helada: la Criosfera. Envoltiendo a todas ellas encontramos una capa gaseosa, la Atmósfera.

La geosfera es la parte sólida del planeta. Esto no quiere decir que todos los materiales que la forman sean sólidos. En las profundidades terrestres hay materiales fundidos, algunos de los cuales salen al exterior en forma de magmas y algunos gases. Estos materiales fluidos son más densos que el agua o los gases atmosféricos.



Capas que componen la estructura terrestre

a) El núcleo.-La zona más densa y más profunda (esfera de $R \approx 3.500$ km), formado mayoritariamente por hierro y níquel en proporciones de 90%/10%, y pequeños porcentajes de azufre y oxígeno, por lo que también se conoce como NIFE.

La existencia de un núcleo ferroso se relaciona con el impacto de meteoritos metálicos en las primeras etapas de formación del planeta.

b) El manto.-Recubriendo el núcleo se encuentra el manto, con un espesor de ≈ 2.400 Km de profundidad, en el que predominan los elementos silicio y magnesio, lo que da el nombre de SIMA a esta corona.

La variación de la velocidad de ondas sísmicas permite detectar 2 zonas:

Un manto superior que está por debajo de la corteza, formado por silicato piroxeno y olivino y un manto inferior de mayor densidad y con la misma composición.

c) La corteza.- Es la parte más externa de la geosfera. Está formada por los materiales enfriados que proceden del manto. Por el predominio de los elementos silicio y aluminio se conoce como SIAL, y en ella se distinguen una fase continental y una fase oceánica.

Fase Continental (Litosfera): Esta formada por rocas mayor edad y se caracteriza por su mayor grosor de $\approx 40-60$ Km y una densidad media de $2,7$ g/cc). En ella se observan las estructuras tectónicas más relevantes, por tanto cuanto mayor es el tamaño de la cordillera mayor es el grosor de esta corteza (Andes, Himalaya).

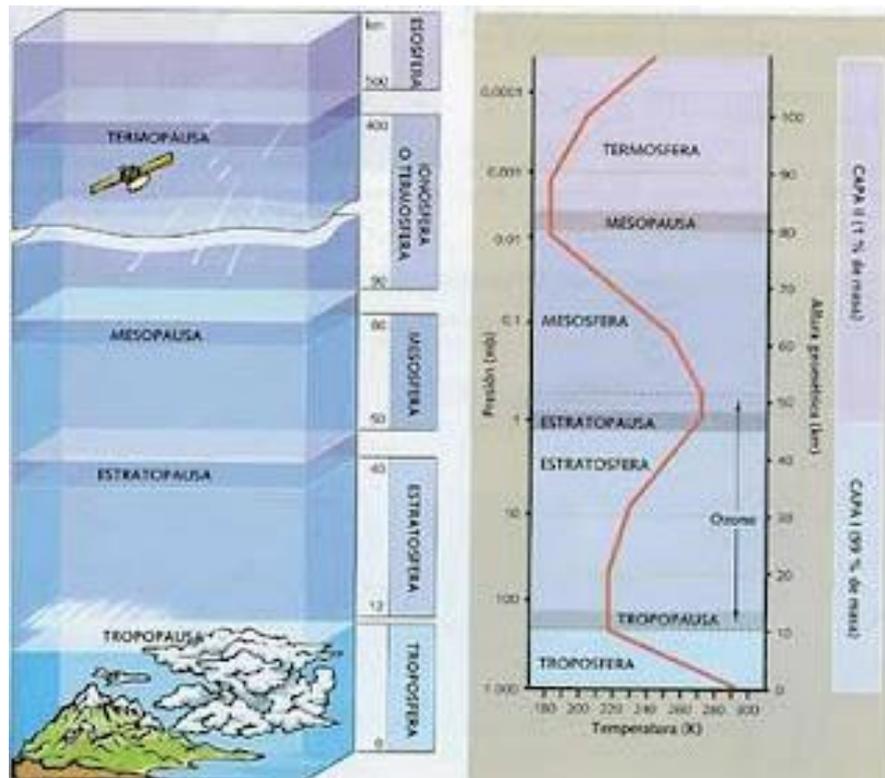
En esta corteza se localiza la mayor parte de las rocas metamórficas y consta de 3 capas: una superior de sedimentos y rocas de bajo metamorfismo, una intermedia con rocas de metamorfismo medio y plutónicas tipo granito) y una inferior formada por rocas de alto metamorfismo y con incrustaciones de rocas ígneas.

Fase Oceánica (Hidrosfera): Esta integrada por las áreas ocupadas por las aguas oceánicas con un grosor de $\approx 6-10$ Km y una densidad de $3,0$ gr./cc). Los grosores menores se localizan en las zonas inmediatas a las dorsales, lugares por donde se incorpora el material del manto, hecho que condiciona la menor edad de esta corteza.

Está formada por 3 capas: superior (sedimentos), intermedia (basaltos) y capa inferior de rocas ígneas.

c) **La atmósfera**- Es la corona, en fase gaseosa, que envuelve la corteza, con un espesor de ≈ 1.000 km y compuesta a su vez por varias capas, con distinta presión y temperatura, que ordenadas del nivel inferior al superior son las siguientes:

Troposfera (aire), Estratosfera (ozono), Mesosfera, Ionosfera y Esosfera.



Esquema de las distintas capas que componen la atmósfera, presión y temperatura.

1.2.- Las Rocas

Son materiales pétreos naturales, que se encuentran en la Litosfera formando grandes masas, y compuestas por la asociación de minerales, que son sólidos con la misma composición química y forma cristalina.

En la relación de minerales que componen las rocas, se pueden destacar:

- Cuarzo: Oxido de silicio (SiO_2) cristalizado, transparente, presente en distintas variedades (ágata, amatista, sílex).
- Feldespato: Silicato de Aluminio, alcalino y cálcico, que da origen a las arcillas y al caolín.

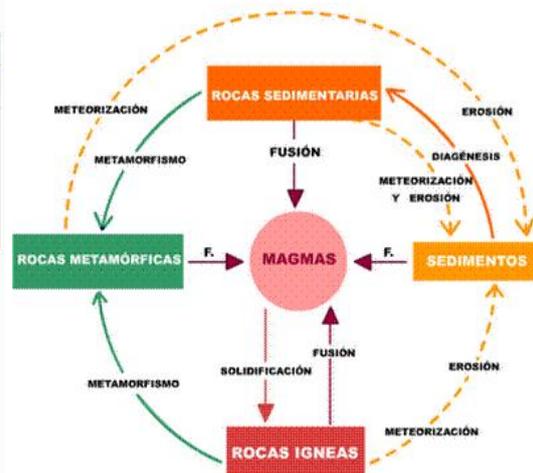
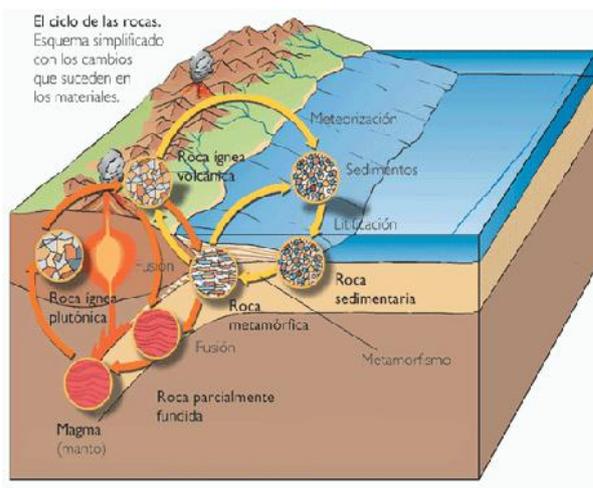
- Turmalina: Silicato Complejo de Na,Ca,Mg,Al,B,Fe.
- Mica: Silicato Aluminico-Potásico con Mg, Fe y K, que se presenta en tonos oscuros (biotita) y claros (moscovita).
- Piroxenos: Metasilicatos presentes en los basaltos, variando su color en función del contenido de Fe, caso de la augita (color oscuro).
- Talco: Silicato hidratado de magnesio.
- Otros como: calcita (carbonato cálcico), magnetita (carbonato magnésico, dolomita (carbonato cálcico y magnésico), algez (sulfato cálcico hidratado), fosfatos, nitratos y potasas.

Estos minerales aparecen en las rocas que a continuación se clasifican.

1.3.- Clasificación de las rocas por su origen

En función del proceso de formación y por tanto de su origen las rocas de clasifican en tres grupos:

- Eruptivas
- Sedimentarias
- Metamórficas



Esquemas del ciclo de formación de los distintos tipos de roclas, clasificadas por su origen.

a) Rocas eruptivas ó ígneas:

Se forman por afloramiento y enfriamiento del magma fundido a grandes profundidades, dando lugar a la consolidación.

Están compuestas por silicatos de sodio, potasio, aluminio, hierro, calcio y magnesio. Esta composición las agrupa en “ácidas” ($\text{SiO}_2 > 50\%$) ó en básicas ($\text{SiO}_2 < 50\%$).

En función de la velocidad a la que se produjo el enfriamiento del magma y se consolidaron, estas rocas se subdividen en:

- a.1) R. Plutónicas ó de profundidad, originadas en consolidación lenta.
- a.2) R. Efusivas ó volcánicas, formadas por enfriamiento rápido.
- a.3) R. Filoneanas ó porfídicas, con un enfriamiento intermedio.



a.1) R. Plutónica (Granito) a.2) R. Volcánica (Basalto) a.3) R. Filoneana (Pórfido granítico)

a.1) Rocas Plutónicas:

Consolidadas lentamente, y por tanto, con cristalización de los minerales que las componen, dando lugar a una estructura granular con cristales de pequeño tamaño. Son las fases más antiguas y la más representativa es el granito, formado por cuarzo (20/30%), feldespato (20/60%) y mica (60/20%), que se puede encontrar en varias tonalidades y tipos, si bien los tonos grises son los más comunes.

Si no contiene un mineral se denominan granitos abortados, como son:

- Aplita (sin mica)
- Sienita (sin sílice)
- Cuarzon (sin feldespato, ni mica)

En el proceso de degradación por meteorización dan lugar al Jabre, granito con pérdida de cohesión, llegando a formaciones arenosas.

En el Paisaje de las rocas plutónicas las formas más habituales son:

- Batolito, perfil granítico en masas de gran tamaño con formas irregulares que afloran en salientes (apófisis), rodeados de una zona metamórfica (aureola).
- Berrocales, formados por grandes bloques fracturados y erosionados.
- Trampales, en los que la fracturación del macizo rocoso deja paso al agua que arrastra depósitos de jabre.



Paisaje en forma de batolito granítico



Paisaje en forma de trampales

a.2) R. Efusivas ó volcánicas:

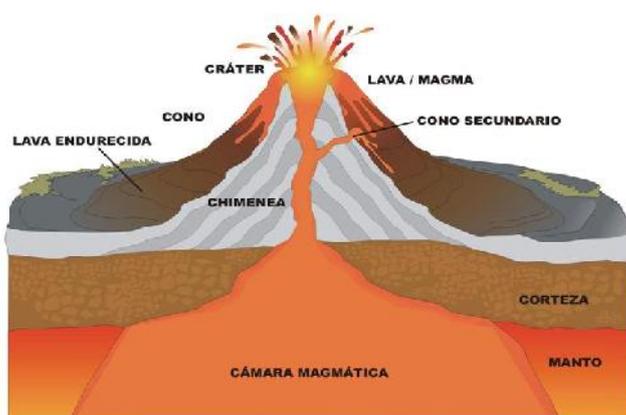
Originadas por enfriamiento rápido del magma arrojado por los volcanes, dando lugar a estructuras vítreas, con una masa amorfa, sin cristalización. Pueden presentarse como rocas:

-Sueltas: Partículas sin cohesión, de diferentes tamaños

Bloque(<50cm); Bomba(<10cm); Lapilli(<1cm); Ceniza(<0,1cm); Polvo(<0,01cm)

-Conglomeradas: En las que aparecen partículas aglutinadas, en las que las puzolanas (cenizas) cementan a otras partículas de mayor tamaño.

- Agregadas: Con una estructura muy cohesionada, por enfriamiento menos rápido que el resto, alcanzan una elevada densidad y dureza, caso del basalto.



En los paisajes de tipo volcánico destacan los cráteres, los conos adventicios, las chimeneas y el malpaís (depósitos en la ladera del cráter).

Magma Efusivo en las laderas.

Magma Explosivo (solidifica en el aire).

a.3) R. Filoneanas ó porfídicas:

Se forman por penetración del magma en cavidades de otras rocas, que al contactar con éstas se produce un enfriamiento más rápido que en la formación de las plutónicas, pero más lento que en las efusivas.

Consolidan con la forma de las cavidades que ocupan, normalmente en filones, pero también en forma de venas, diques, etc. y tienen una composición mineral similar a las rocas plutónicas, pero sin una cristalización perfecta, por lo que aparecen fenocristales (cristales más grandes que en las plutónicas).

El pórfido granítico es la roca más destacada de las filoneanas, con una composición, uso y propiedades, similares a las plutonias (granito).

-Uso de la Rocas Eruptivas:

En la construcción de obras civiles las rocas más utilizadas son:

Granito: para la fabricación de sillares, mampuestos, solados y chapados.

Pórfido: para la producción de áridos para MBC y para balasto de FFCC.

Puzolana: en adicciones de cementos y fabricación de materiales ligeros.

-En el corredor de obras civiles:

En general suponen un buen soporte para obras lineales, con la precaución de localizar y tratar las fallas y diaclasas.

En túneles, presentan dificultad de perforación, a cambio de autosostenibilidad.

Como vasos de embalses son resistentes y estancos, una vez resuelto el problema de las litoclasas.

b) Rocas Sedimentarias:

Las rocas sedimentarias se forman en la superficie de la tierra por procesos de erosión y alteración de rocas preexistentes (eruptivas ó metamórficas), lo que supone su disgregación, formación de detritus y la disolución de componentes en soluciones acuosas, el transporte de los mismos, el depósito de fragmentos de rocas, de organismos o material de precipitación bío ó geoquímica en las zonas apropiadas (cauces de ríos, lagos, mares, etc).

Posteriormente se producen las transformaciones originadas en el ambiente sedimentario o una vez enterradas por debajo de la superficie atmosférica o acuosa (transformaciones diagenéticas). Por esta razón, suelen presentar una disposición en capas denominada estratificación.

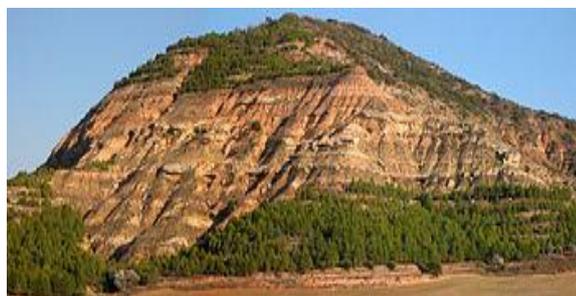
Procesos sedimentarios:

Básicamente, corresponden a erosión (mecánica, química y biológica) en áreas fuente continentales, transporte por corrientes de agua (ríos), hielo (glaciares), o atmósfera (viento), depósito en cuencas deprimidas (lagos, deltas, estuarios, plataformas marinas relativamente someras, fosas y cuencas abisales), y compactación y diagénesis durante la formación en estas cuencas de pilas sedimentarias estratificadas que pueden llegar a tener miles de metros de espesor.

Degradación (erosión)	→	Transporte	→	Depósito	→	Consolidación
-Agentes físicos		-Aire		-Valles		-Química
-Agentes orgánicos		-Agua		-Ríos		-Mecánica
-Agentes químicos				-Océanos		-Orgánica

Los depósitos contienen elementos de diferente tamaño:

Bloques ← 50 cm → Cantos ← 10 cm → Gravas ← 3 cm → Gravillas ← 5 mm → Arenas ← 0,2 mm → Limos ← 0,002 mm → Arcillas ← 0,001 mm → Coloides, más ó menos cementados, que nos indican como se ha originado el depósito.



Ejemplos de formaciones sedimentarias, dolomítica (izquierda) y de origen fluvial (derecha.)

En función del proceso de consolidación se subdividen en:

b.1) Depósitos Mecánicos:

Formados por depósitos de gravedad, en los que se acumulan capas de mayor a menor tamaño, que consolidan por efecto del peso de las capas superiores.

En este grupo se encuentran:

- Conglomerados, bloques, cantos y gravas cementados por una matriz
- Areniscas, formadas por arenas finas cohesionadas.
- Margas, compuestas por arcillas cementadas con polvo calcáreo.

b.2) Depósitos Químicos:

La consolidación se produce por la alteración química de los minerales en procesos de precipitación, en zonas con abundantes precipitaciones y elevadas temperaturas, dando lugar a:

- Calizas, a partir de la calcita cementada.
- Yesos, formados por sulfato cálcico
- Margas, compuestas por carbonato cálcico y arcilla en distintas proporciones.

b.3) Depósitos Orgánicos:

La clave en este proceso está en la biomineralización de restos de seres vivos, ó bien por la evolución de materiales orgánicos, estas son propiamente rocas orgánicas (carbones), en este grupo encontramos

- Calizas orgánicas
- Carbones de fosilización.

En el Paisaje de las rocas sedimentarias las formas más representativas son:

- Desiertos, formados por partículas de arrastre, Erg (arenas) y Hamara(cantos).
- Dunas costeras, que se forman por elevación de la arena por arrastre de agua y viento.
- Playas, que acumulan las arenas de erosión configuradas por los movimientos del oleaje marino, y que se controlan con diques de protección.
- Graveras fluviales, depósitos en los lechos de los ríos compuestos de gravas y arenas sedimentados en función de la velocidad de arrastre.
- Morrenas glaciares, localizadas en la proximidad de glaciares.

-Terrazas fluviales, en las que se localizan depósitos escalonados en las márgenes de cuencas de ríos.

-Depósitos arcillosos, originados en fondos de barrancos a donde las aguas arrastran los productos de la erosión de laderas.

-Calizas, en distintas formaciones, como son:

- Paramo calizo: con perfiles ondulados y profundos, más ó menos pronunciados, dando lugar a formas de tipo Dolina, Torca y Sima.
- Hoces, en cauces fluviales formando acantilados, en los que es frecuente la alternancia de calizas con estratos de margas.

-Depósitos yesíferos, de origen similar a los calizos, pero con un perfil menos pronunciado, más erosionado y en forma de cantiles.



Paisaje de calizas kársticas



Paisaje de dolina caliza

Uso de la Rocas Sedimentarias:

En la construcción de obras civiles las rocas sedimentarias más utilizadas son:

Arcillas: para la fabricación de productos cerámicos (tejas, ladrillos, bovedillas, bloques de termoarcilla, baldosas, etc.)

Calizas y Dolomías: en áridos (machacados), chapados, encachados, etc.

Yesos: material conglomerante, revestimiento interior y ornamentaciones.

-En el corredor sobre el que se construyen las obras civiles:

Se caracterizan por tener un comportamiento muy diferente, ya que si se trata de calizas no ofrecen dificultades, más allá de la excavación en macizos compactos, y de las zonas kársticas (cuevas), mientras que los yesos dan complicaciones por su solubilidad y agresividad sobre el hormigón.

Las obras sobre arcillas también suponen un factor de dificultad añadido por la influencia del agua en su plasticidad, lo que hace que no sean un buen cimiento, ni se adecuadas para rellenos compactados, más aún si tienen un comportamiento expansivo.

b.3) Rocas Metamórficas:

Proceden de la transformación de otras rocas sometidas a grandes presiones y altas temperaturas, que provocan cambios en los minerales y se transforman en un nuevo tipo que llamamos rocas metamórficas.

El proceso se realiza en estado sólido, es decir las transformaciones se producen sin que la roca llegue a fundirse. La mayoría de las rocas metamórficas se caracterizan por un aplastamiento general de sus minerales que hace que se presenten alineados. Esta estructura característica de foliación se aprecia en rocas como las pizarras, los esquistos y los gneises.

Las pizarras son arcillas metamorfizadas, que presentan foliación muy recta, paralela y próxima. Generalmente son oscuras y con frecuencia contienen fósiles.

Los esquistos son rocas que han sufrido un metamorfismo más intenso, que presentan foliación algo deformada y los fósiles que pudiera haber en la roca original desaparecen durante el proceso metamórfico.

El gneis es una roca que ha sufrido un metamorfismo muy intenso; sus principales minerales son el cuarzo, los feldspatos y las micas (como el granito) pero se presentan orientados en bandas claras y oscuras.



Muestra de Pizarra



Muestra de Gneis

Otras rocas metamórficas muy comunes son:

El mármol: se trata de rocas carbonatadas (como las calizas) que han sufrido metamorfismo y presentan un aspecto cristalino característico.

La cuarcita: son areniscas ricas en cuarzo metamorfizadas.



Muestra de Mármol



Muestra de Cuarcita

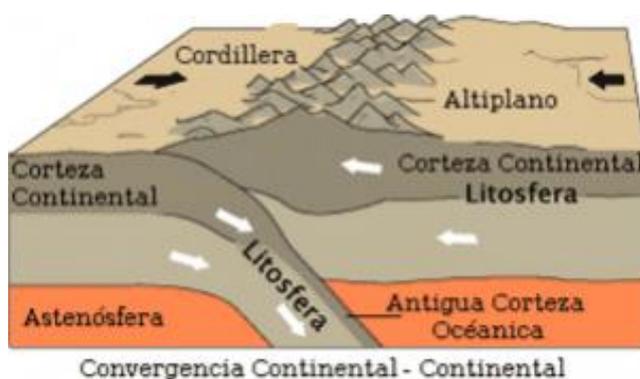
El metamorfismo puede ocurrir en diferentes ambientes terrestres, por ejemplo a ciertas profundidades las rocas sufren cambios debidos al peso de los materiales que hay por encima y a las grandes temperaturas. También se produce metamorfismo en los bordes de las placas tectónicas debido fundamentalmente a las grandes presiones que actúan y también en los alrededores de los magmas gracias a las grandes temperaturas reinantes.

El paisaje y el uso de estas rocas, es similar al de las rocas plutónicas.

2.-Historia geológica de la Tierra

La configuración actual de la Tierra se ha desarrollado durante un largo proceso de transformación de más de 4500 M. de años, que se divide en eras, y estas en periodos.

El origen de las formaciones montañosas está relacionado con los movimientos en el interior de la litosfera.



Las transformaciones del relieve se han sucedido por los movimientos de las placas de contacto en el interior de la tierra (tectónica). Los empujes entre estas placas dieron lugar a la formación de las montañas y cordilleras.

Otros movimientos que influyeron en la configuración del planeta fueron los de las aguas de los océanos, que dieron lugar a trasgresiones y regresiones, en desplazamientos de avance y retroceso sobre las zonas continentales, en los que los factores determinantes fueron los cambios climáticos con ciclos de agua-nieve- evaporación, que provocaron las variaciones del nivel del mar.

La historia geológica de la tierra se resume en cuadro adjunto, en el que se recogen las eras, periodos y antigüedad de estos en millones de años.

Era	Período	(m.a.)*	Orogénesis
Arcaica o Precámbrico		4 000-600	
Primaria o Paleozoico	Cámbrico	600-500	CALEDONIANA HERCINIANA
	Ordovícico	500-440	
	Silúrico	440-400	
	Devónico	400-350	
	Carbonífero	350-270	
	Pérmico	270-230	
Secundaria o Mesozoico	Triásico	230-180	ALPINA
	Jurásico	180-130	
	Cretácico	130-70	
Terciaria o Cenozoico	Paleoceno	70-60	
	Eoceno	60-40	
	Oligoceno	40-25	
	Mioceno	25-10	
	Plioceno	10-1,8	
Cuaternaria	Pleistoceno	1,8-0,01	
	Holoceno	0,01	

* Millones de años

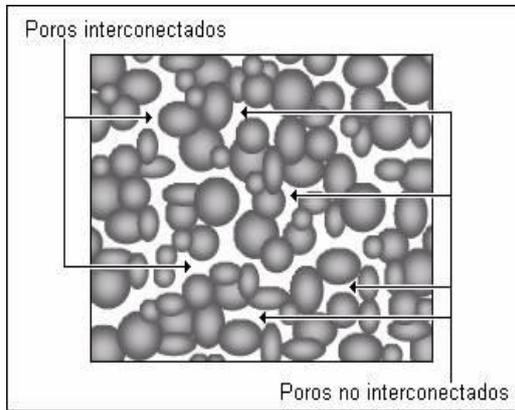
3.- Las Rocas y sus propiedades

Las rocas son materiales naturales formadas por asociación de minerales, con un amplio rango de variación composicional, textural y estructural, debido a su heterogeneidad.

Esta variabilidad hace que las propiedades de los materiales, que son las que dictan sus campos de aplicación, sean también variables. Así, la adecuación de un material para un uso concreto, tanto desde el punto de vista constructivo

como restaurador, debe basarse en determinadas propiedades que deben, a su vez, ser fácilmente medibles en el laboratorio especializado.

En estas, están presentes al menos dos, de los tres estados de la materia:



- Sólido (minerales que la componen),
- Líquido (agua en los poros accesibles)
- Gaseoso (aire en los poros)

- En los poros accesibles (interconectados), puede entrar y salir el agua.
- En los poros inaccesibles (no interconectados) solo puede haber aire.

Las propiedades de las rocas se dividen en físicas, químicas y mecánicas, aunque en el campo de la construcción también pueden incluirse las propiedades relacionadas con su trabajabilidad.

a) Aspecto superficial: En el que se analiza su estructura, estado y textura.

- | | | |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| - Granuda | -Cristalizado | - Rugosa |
| ▪ Estructura: - Fibrosa | ▪ Estado: -Amorfo | ▪ Textura: - Lisa |
| -Laminar | | |

b) Densidad y peso específico:

Relación entre la masa y la unidad de volumen y entre el peso y la unidad de volumen, respectivamente, con siguiente expresión

$$\text{densidad } \rho = \frac{M}{V}; \text{ (gr./cc, kg/dm}^3; \text{ t/m}^3\text{)} ; \text{ peso específico } \gamma = \frac{P}{V} \text{ (gr./cc, kg/dm}^3; \text{ t/m}^3\text{)}$$

c) Humedad:

La cantidad de agua que contienen las rocas influye en su peso y en su comportamiento, siendo la humedad la relación entre el peso húmedo y el peso seco de una muestra.

$$H = \frac{P. \text{ agua (peso húmedo} - \text{ peso seco)}}{P. \text{ seco (peso seco)}} = \frac{Ph - Ps}{Ps} \quad (\text{expresada en tanto por uno}).$$

Diferenciando tres situaciones respecto al agua contenida:

Estado seco ó sin humedad (H=0); estado húmedo, con H>0 y estado saturado ó con humedad máxima, todos los poros accesibles llenos de agua (H.máx.), que se corresponden con los pesos específicos ordenados de menor a mayor:

$$\gamma_{\text{seca}} (\gamma_{\text{sec}}) = \frac{P_{\text{seco}}}{V} = \frac{p_{\text{sólidos}}}{\text{volumen}} ; \gamma_{\text{húmeda}} (\gamma_{\text{h}}) = \frac{P_{\text{h}}}{V} = \frac{\text{peso sólidos} + \text{peso agua}}{\text{volumen}}$$

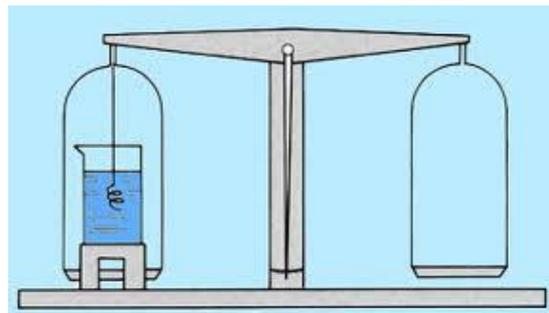
$$\gamma_{\text{saturada}} (\gamma_{\text{sat}}) = \frac{P_{\text{sat.}}}{V} = \frac{\text{peso sólidos} + \text{peso de poros accesibles llenos de agua}}{\text{volumen}}$$

El P_{seco} se determina con un secado previo de la muestra en estufa, el P_{h} pesando directamente la muestra y el $P_{\text{sat.}}$ sumergiéndola en agua (24h) antes de pesarla.

El volumen se obtiene, de forma indirecta, con la balanza hidrostática, por diferencia entre el peso sumergido ($P_{\text{sum.}}$) y el peso al aire, ya que se descuenta el empuje del agua sobre el volumen aparente de la muestra

Esta balanza mide el peso del sólido sumergido P_{sum} , que será inferior al peso en el aire P , en el valor del empuje ascendente E , ejercido por el agua $\rightarrow P_{\text{sum}} = \text{Peso} - \text{Empuje}; E = V * \gamma_{\text{H}_2\text{O}}$

$$V = \frac{(P_{\text{sum}} - P)}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}}$$



Balanza hidrostática

d) Porosidad:

Se define la porosidad (n), de una roca, como la relación entre el volumen de

poros y el volumen aparente ó total (V), $n = \frac{V_p}{V}$; $n = \frac{V - V_{\text{sol}}}{V}$ (x100 en %).

Se mide en laboratorio, con el porosímetro de mercurio ó de forma indirecta, mediante la expresión $V_{\text{poros}} = V_{\text{saturado}} - V_{\text{sólidos}}$.

e) Índice de poros:

Es la relación entre el volumen de poros y el volumen de sólidos, ó volumen que ocupan las partículas minerales (volumen triturado y prensado).

$$e = \frac{V_p}{V_{\text{sol}}} ; e = \frac{V - V_{\text{sol}}}{V_{\text{sol}}} \text{ (x100 en \%)} \rightarrow e = \frac{n}{1 - n} \rightarrow n = \frac{e}{1 + e}$$

f) Absorción de agua:

Proporción de agua que una roca puede absorber a temperatura y presión ambiente, respecto a su peso inicial ó natural. Se designa con la letra “A”.

$$A = \frac{P_{sat} - P}{P} \times 100; \text{ (en \%); (será máxima cuando está seca y nula si está saturada).}$$

g) Permeabilidad:

La permeabilidad se define como la capacidad que tiene una roca de permitir el flujo de agua a través de sus poros accesibles e interconectados. Si los poros de la roca no se encuentran interconectados no puede existir permeabilidad

Se mide en permeámetros obteniendo medidas de caudal (volumen/tiempo), que depende de la porosidad de la muestra y de la presión del fluido.

Este ensayo permite asignar un indicador de la permeabilidad que es el coeficiente de permeabilidad (K), medido en unidades de velocidad (cm/seg. ó cm/h), con la que el fluido atraviesa una sección de la roca

La permeabilidad se clasifica en el siguiente cuadro:

	Muy lenta	Lenta	Moderadamente lenta	Moderada	Moderadamente elevada	Elevada	Muy elevada
K (cm/h)	< 0,1	0,1 – 0,5	0,5 – 2,0	2,0 – 6,5	6,5 – 12,5	12,5 – 25,0	> 25,0

h) Heladicidad:

Propiedad que indica la influencia de las heladas en la degradación de las rocas y en sus condiciones mecánicas. Está relacionada con la porosidad, ya que el agua alojada en los poros genera tensiones en el interior, debidas al incremento de volumen en la congelación (≈9%), lo que provoca microfisuras en la estructura mineral que degrada la roca de forma progresiva.

Porosidad → Absorción de agua → Congelación → Fisuración → Meteorización

Se mide evaluando la alteración de peso y resistencia, después de varios ciclos de hielo-deshielo.

i) Dureza:

Resistencia de las rocas a rayadas ó penetradas por otros sólidos, cualidad muy importante, sobre todo cuando el uso de la roca lo requiere.

En 1812 el geólogo austriaco F. Mohs ideó una escala de dureza que asigna a una roca un valor de 1 a 10, según que mineral de la escala lo raya.

Escala de Mohs		
Dureza	Mineral	Prueba
1	Talco	Friable bajo la uña
2	Yeso	Rayado por la uña
3	Calcita	Rayado por una pieza de moneda
4	Fluorita	Se puede fácilmente rayar con un cuchillo
5	Apatito	Rayado con un cuchillo
6	Ortosa	Rayado con una lima
7	Cuarzo	Raya un cristal
8	Topacio	Rayado por herramientas con tungsteno
9	Corindón	Rayado por el carburo de silicio
10	Diamante	Rayado por otro diamante

En edificación se dividen en tres grupos de dureza:

R. Blandas: Areniscas y Calizas

R. Duras: Mármoles y Granitos

R. Muy duras: Pórfidos y Basaltos

en función de material necesario para el corte.

Escala de Dureza de Mohs

j) Resistencias mecánicas:

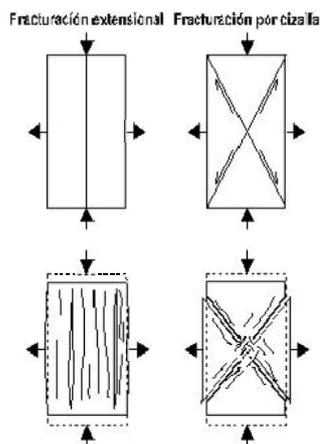
Nos definen el comportamiento de la roca frente a las solicitaciones mecánicas:

j.1) Compresión:

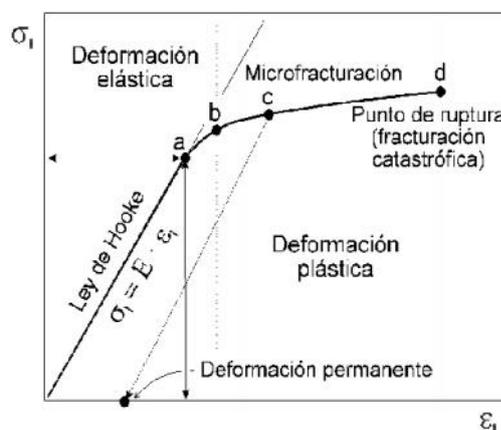
Resistencia ante el esfuerzo de compresión, que se mide una muestra tallada a dos fuerzas opuestas que la comprimen (figura 1). La resistencia se obtiene al dividir la fuerza entre el área de la sección de roca: $\sigma_c = F_c / S$ (kp/cm²)

j.2) Tracción:

Resistencia de la roca al esfuerzo producido por fuerzas opuestas de tracción que intentan el alargamiento. Se calcula con la expresión $\sigma_t = F_t / S$ (kp/cm²).



Ensayo de compresión (fig.1)



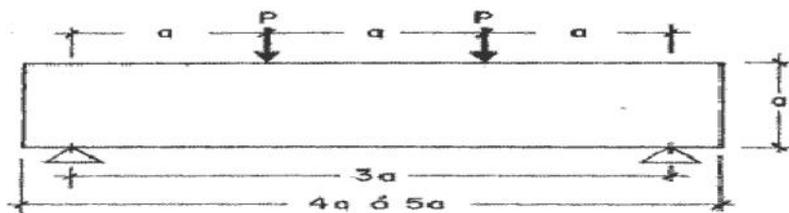
Ensayo de tracción (fig.2)

j.3) Resistencia a flexotracción:

Se trata de medir la resistencia a un esfuerzo combinado de flexión y tracción, situación que se reproduce en elementos constructivos biapoyados.

Se somete a una muestra a una carga puntual F ($P+P$) y se mide su resistencia, utilizando la expresión

$$R.ft = 3F / a^2 \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$



Esquema del ensayo de flexotracción

j.4) Resistencia a cortadura ó a cortante:

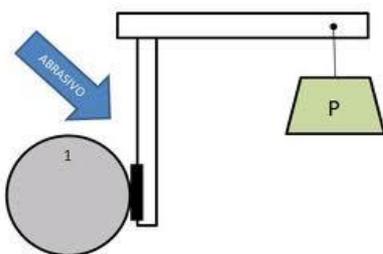
Es la resistencia al esfuerzo de corte por una sección, que se determina mediante la acción de dos fuerzas Q , paralelas y excéntricas, de sentido contrario aplicadas tangencialmente sobre una sección S . El valor resultante es

$$\zeta = Q / S \text{ (kp/cm}^2\text{)}$$

k) R. Abrasión ó desgaste:

Se evalúa el comportamiento de la roca ante el desgaste provocado por una superficie abrasiva giratoria, para elementos planos sometidos a desgaste (baldosas).

Para rocas trituradas, cuando se utilizan como áridos en pavimentos y como balasto para ferrocarril, se simula la abrasión mediante bolas de acero que voltean e impactan contra los fragmentos de roca. En este caso, el ensayo que determina la resistencia al desgaste es el de Los Ángeles, que mide la pérdida de peso de la muestra sometida al ensayo, que consiste en voltearla con un nº de bolas de acero (5 /10), según el tipo de árido, en el interior de la maquina.



Ensayo de desgaste superficial



Maquina para el Ensayo de Los Ángeles

l) Resistencia a los agentes atmosféricos

Consiste en evaluar el comportamiento de las rocas ante los fenómenos atmosféricos adversos: temperaturas extremas, heladas, lluvia, etc., que inciden en la durabilidad y que pueden condicionar su uso.

Para la determinación de esta resistencia, en el laboratorio, se realizan ataques químicos, que causan efectos equivalentes a los agentes atmosféricos.

m) Resistencia a los ambientes agresivos:

Se trata de medir la resistencia al ataque de ambientes químicos agresivos, mediante el efecto que producen los productos ácidos como.

- Ácido sulfúrico (SO_4H_2)
- Acido carbónico (CO_3H_2)

4.- Las Suelos y sus propiedades

Se encuentran en la capa más superficial de la corteza terrestre, que resulta de la descomposición de las rocas por los cambios bruscos de temperatura y por la acción del agua, del viento.

El proceso mediante el cual los fragmentos de roca se hacen cada vez más pequeños, se disuelven o van a formar nuevos compuestos, se conoce con el nombre de meteorización.

Los productos rocosos de la meteorización se mezclan con el aire, agua y restos orgánicos provenientes de plantas y animales para formar suelos. Luego el suelo puede ser considerado como el producto de la interacción entre la litosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera.

Lo que caracteriza a los suelos, es la composición granulométrica, ya que están compuestos por partículas disgregadas de diferentes tamaños, pero al igual que en las rocas, de las que proceden, están presentes tres fases:

Fase Sólida: Comprende, principalmente, los minerales formados por compuestos relacionados con la litosfera, como sílice o arena, limo ó arcilla.

Fase Líquida: Comprende el agua de la hidrosfera que se filtra por entre las partículas del suelo.

Fase Gaseosa: Tiene una composición similar a la del aire que respiramos. Además, pueden presentar un contenido alto de vapor de agua. Cuando el suelo está muy húmedo, los espacios de aire disminuyen, al llenarse los huecos de agua.

En los suelos existen productos inorgánicos, como la arena, la arcilla, el agua y el aire; y orgánicos, como restos de plantas y de animales.

Por el tamaño de los granos se dividen en granulares ó gruesos (gravas y arenas) y cohesivos ó finos (arcillas y limos).



Muestra de suelo granular (gravas)



Muestras de suelos cohesivos (arcillas)

Las propiedades se analizan sobre una porción de muestra representativa siguiendo métodos normalizados de preparación:

- Dsecación
- Trituración
- Pulverización,
- Cuarteo

a) Granulometría:

Cada suelo se caracteriza por la cantidad de partículas de cada tamaño que lo componen, esta medición y análisis de los tamaños y proporciones de estos, se conoce como análisis granulométrico, que se representa en un gráfico para facilitar su interpretación.

Para medir el tamaño de las partículas minerales se utilizan los tamices de series normalizadas, fraccionando los tamaños de mayor a menor que se enumeran a continuación:

- Bolos: Tamaño $T > 60$ mm, retenidos en el tamiz 3" ASTM
- Gravas: $2 < T < 60$ mm, retenidas en el tamiz N° 10 ASTM
- Arenas: $0,08 < T < 2$ mm, retenidas en el tamiz N° 200 ASTM
- Limos: $0,002 < T < 0,08$ mm, pasan por T 200, (E. Sedimentación)
- Arcillas: $T < 0,002$ mm, pasan por T 200, (E. Sedimentación)

La granulometría de un suelo condiciona su comportamiento como cimiento y como material utilizado en construcción, algunas de estas diferencias son:

- Las gravas y las arcillas no tienen cohesión entre partículas y son permeables
- Limos y arcillas, si tienen cohesionadas sus partículas y no son permeables.
- Los limos tienen un tacto áspero, mientras que las arcillas lo tienen suave
- La diferenciación entre limos y arcillas requiere un ensayo de sedimentación.

El tamiz N° 200 ASTM es la frontera entre la fracción gruesa ($T > 0,08$ mm) que queda retenida en este y la fracción fina ($T < 0,08$ mm), que pasa por él.



Tamices utilizados para el análisis granulométrico

En el cuadro adjunto se recoge la clasificación de los tamaños de partículas de suelos, según distintos organismos

A.A.S.H.T.O.		gruesa	media	fina	gruesa	fina			coloides																																		
	BOLOS	GRAVA			ARENA		LIMO	ARCILLA																																			
U.S.C.B.		gruesa	fina	g	media	fina																																					
	BOLOS	GRAVA		ARENA		FINOS (Limos o arcillas)																																					
A.S.T.M.				g	media	fina																																					
	BOLOS	GRAVA		ARENA		LIMO	ARCILLA																																				
DIN 4022 BS 1377		gruesa	media	fina	gruesa	media	fina	gruesa	media	fina																																	
	BOLOS	GRAVA			ARENA			LIMO		ARCILLA																																	
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">80</td> <td style="text-align: center;">3/16</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">1/4</td> <td style="text-align: center;">10</td> <td style="text-align: center;">4</td> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">0.85</td> <td style="text-align: center;">0.425</td> <td style="text-align: center;">0.25</td> <td style="text-align: center;">0.075</td> <td style="text-align: center;">0.0425</td> <td style="text-align: center;">0.025</td> <td style="text-align: center;">0.015</td> <td style="text-align: center;">0.0075</td> <td style="text-align: center;">0.00425</td> <td style="text-align: center;">0.0025</td> <td style="text-align: center;">0.0015</td> </tr> <tr> <td colspan="16" style="text-align: center;">Tamaño de las partículas en mm</td> </tr> </table>										80	3/16	20	1/4	10	4	2	0.85	0.425	0.25	0.075	0.0425	0.025	0.015	0.0075	0.00425	0.0025	0.0015	Tamaño de las partículas en mm															
80	3/16	20	1/4	10	4	2	0.85	0.425	0.25	0.075	0.0425	0.025	0.015	0.0075	0.00425	0.0025	0.0015																										
Tamaño de las partículas en mm																																											
Tamices A.S.T.M																																											

A.A.S.H.T.O. = American Association of State Highway and Transportation Officials
 U.S.C.B. = Unified Soil Classification System [Corps of Engineers, U.S. Army - Bureau of Reclamation
 A.S.T.M. = American Society for Testing Materials
 DIN = Deutsche Industrie - Norm
 BS = British Standard

Clasificación de suelos por el tamaño de las partículas

La serie americana ASTM define los tamices por abertura de malla en pulgadas y con el N° que indica la fracción de la misma, (N°10= 1"/10=2,5 mm), mientras que en la serie europea UNE los tamices se designan por abertura en mm.

b) Equivalente de arena:

Es el parámetro indicador de la proporción de arena limpia, respecto a los finos, que contiene una muestra de suelo arenoso

El ensayo consiste en introducir la muestra en una probeta llena de una solución floculante, que se sacude de izquierda a derecha en posición horizontal, posteriormente se añade agua y se deja reposar

La arena limpia queda depositada en el fondo, las partículas de limos y arcillosas, se situarán en suspensión en la parte intermedia, quedando en la parte superior líquido relativamente limpio.

Leyendo en la probeta las alturas del árido limpio (h_1) y de las partículas contaminantes (h_2), que se hace coincidir con el 100, se define el equivalente de arena como:

$$EA = (h_1/h_2) \times 100;$$

Si $EA > 75$ es una arena muy limpia y buena calidad

Si $EA < 45$ es una arena con muchos finos y de mala calidad.



Determinación del equivalente de arena (EA)

c) Humedad:

Es el contenido de agua expresado en porcentaje, respecto al peso de la muestra seca. Se obtiene por diferencia de peso, antes y después de desecada en una estufa.

$$H = (Ph - Ps) / Ps \times 100$$

d) Limites de Consistencia ó de Atterberg:

Son contenidos de humedad crecientes, que establecen las fronteras que marcan la evolución del estado sólido al líquido, y que determinan el comportamiento plástico de cada suelo.

Sólido I→ Semisólido I→ Plástico I→ Semisólido ó Viscoso
LR (retracción) **LP** **LL**

Esos límites sirven para la clasificación de la fracción fina, permiten diferenciar los limos de las arcillas y si estos son de alta ó baja plasticidad

Deben su nombre al científico sueco Albert M. Atterberg y el profesor Arthur Casagrande consiguió la normalización de estos ensayos.

Limite Líquido (LL)

El Límite Líquido se define como el contenido de humedad (%) para el cual una acanaladura en una muestra de suelo viscosa depositada en la Cuchara de Casagrande (normalizada), requiere 25 golpes para cerrarse 13 mm.

Límite Plástico (LP)

El Límite Plástico se define como el contenido de humedad (%) para el cual un cilindro de 3 mm de diámetro amasado con la mano contra una superficie lisa comienza a resquebrajarse.

Índice de Plastidicidad (IP)

Se obtiene por diferencia del Limite Líquido con el Limite Plástico y resulta un indicador de la plasticidad y la permeabilidad del suelo.

$$IP = LL - LP$$



Limite Líquido (LL).Cuchara de Casagrande



Determinación del Limite Plástico (LP)

e) Gráfico de plasticidad de Casagrande

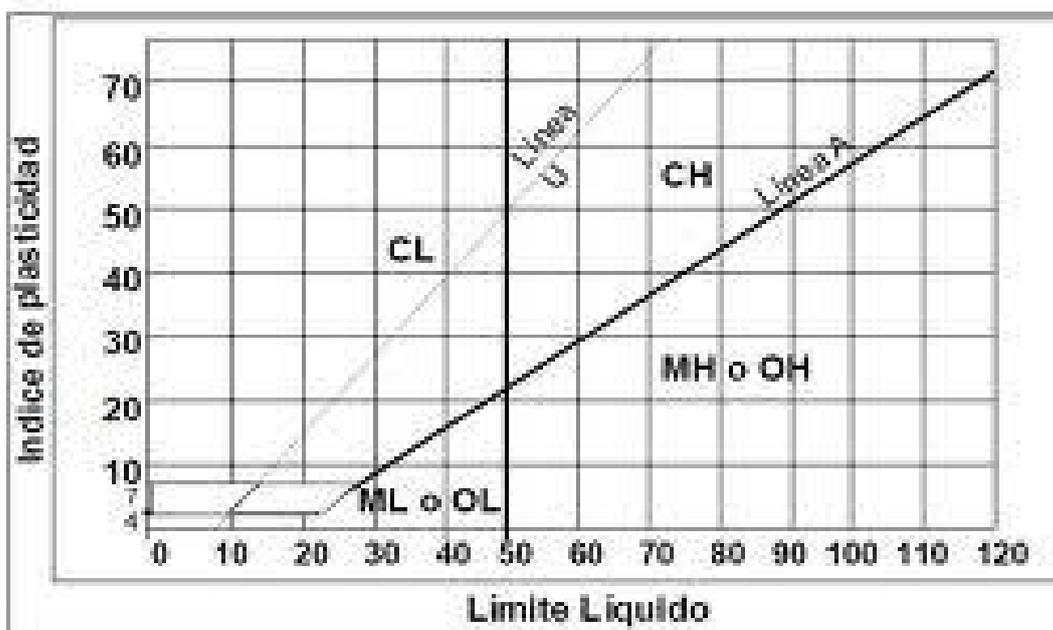
Una vez conocidos los Límites de Atterberg y el Índice de plasticidad, deducido de estos, se puede clasificar un suelo mediante el gráfico de plasticidad creado por Arthur Casagrande.

Este gráfico establece cuatro sectores que separan los limos de las arcillas y el nivel de plasticidad (baja ó alta), que se designan con:

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| ML- Limo de baja plasticidad | CL- Arcilla de baja plasticidad |
| MH- Limo de alta plasticidad | CH- Arcilla de alta plasticidad |
| OL- Suelo orgánico de baja p. | OH- Suelo orgánico de alta p. |

La línea A definida por $I.P. = 0,73(LL-20)$, es la frontera entre arcillas, que están por encima y los limos que se sitúan por debajo de esta.

La vertical para el valor $LL=50$, separa la baja plasticidad de la alta plasticidad.



$Línea A = 0,73 (LL - 20)$

$Línea U = 0,90 (LL - 8)$

Gráfico de Plasticidad de Casagrande

f) Clasificación de los suelos de Casagrande

El profesor Casagrande estableció un método de clasificación de los suelos a partir de la granulometría y de la plasticidad (límites de Atterberg); para ello utilizó la siguiente designación:

G-gravas; S-arenas; L-limos; C-arcillas; W- bien graduada; P- mal graduada

M- limoso, C- arcilloso ; H- alta plasticidad ; L – baja plasticidad

CASAGRANDE MODIFICADA

DESCRIPCION		Simbolos de grupo	CRITERIOS DE LABORATORIO				NOTAS
			FINOS (%)	GRADACION	PLASTICIDAD		
Grano grueso (Más de 50 % del tamaño mayor que la medida del tamiz nº 200 (UNE 0.08) <u>límite líquido</u> $< 50\%$	Gravas (Más de 50 % de la fracción gruesa, de dimensión de grava)	GW	0 - 5	Cu > 4 I < Cc < 3		Simbolos duales si los finos van de 5 a 12 % Simbolos duales si estan por debajo de la linea "A" o Pt < 4 Por encima de la linea "A" o Pt > 7	
	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos o sin finos	GP	0 - 5	No satisface los requerim. de GW			
<u>límite líquido</u> $< 50\%$	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.	GM	> 12		Por debajo de la linea "A" o Pt < 4	Simbolos duales si estan por debajo de la linea "A" o Pt < 4 Por encima de la linea "A" o Pt > 7	
	Gravas arcillosas, mezclas limo-arcilla.	GC	> 12		Por encima de la linea "A" o Pt > 7		
Arenas (Más de 50 % de la fracción gruesa, de dimensiones de arena)	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos o sin finos	SW	0 - 5	Cu > 6 I < Cc < 3		Simbolos duales si los finos van de 5 a 12 % Simbolos duales si estan por debajo de la linea "A" o Pt < 4 Por encima de la linea "A" o Pt > 7	
	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos o sin finos	SP	0 - 5	No satisface los requerim. de SW			
<u>límite líquido</u> $> 50\%$	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	SM	> 12		Por debajo de la linea "A" o Pt < 4	Simbolos duales si los finos van de 5 a 12 % Simbolos duales si estan por encima de la linea "A" o Pt > 7	
	Arenas arcillosas	SC	> 12		Por encima de la linea "A" o Pt > 7		
Grano fino (Más de 50 % del tamaño menor que la medida del tamiz nº 200 (UNE 0.08) <u>límite líquido</u> superior a 50	Limos y arcillas	ML	Usar diagrama de plasticidad				Simbolos duales si los finos van de 5 a 12 % Simbolos duales si estan por encima de la linea "A" o Pt > 7
	Limos inorgánicos, arenas finas limosas o arcillas con leve plasticidad.	CL	Usar diagrama de plasticidad				
<u>límite líquido</u> superior a 50	Arcillas inorgánicas, arenas finas limosas de baja plasticidad.	OL	Usar diagrama de plasticidad				Simbolos duales si los finos van de 5 a 12 % Simbolos duales si estan por encima de la linea "A" o Pt > 7
	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de plasticidad reducida.	MH	Usar diagrama de plasticidad				
Suelos altamente orgánicos	Arcillas inorgánicas, de alta plasticidad	CH	Usar diagrama de plasticidad				Simbolos duales si los finos van de 5 a 12 % Simbolos duales si estan por encima de la linea "A" o Pt > 7
	Arcillas orgánicas, de alta plasticidad	OH	Usar diagrama de plasticidad				
	Turbas y suelos altamente orgánicos	Pt					

g) Ensayos químicos

Se realizan para conocer las limitaciones y precauciones a tener en cuenta con determinados suelos existentes en las obras.

g.1) Contenido de materia orgánica (MO)

Se obtiene por calcinación ó pérdida de peso al someter a la muestra de suelo a 800° C. **MO= $(P_s - P_s^*) / P_s^* \times 100$** , siendo P_s^* el peso después de calcinar

g.2) Contenido de carbonatos (CO₃=)

Se trata de determinar el contenido de carbonatos de ión CO₃=, que influyen en la heladicidad del suelo.

g.3) Contenido de sulfatos (SO₃=)

Se calcula el contenido de ión sulfato SO₃= para prever los posibles ataques químicos del suelo al hormigón en presencia de agua; lo que condiciona el uso de cementos especiales ó barreras anticontaminantes.

h) Otras propiedades

h.1) Expansividad

Esta propiedad se da en algunas arcillas, y está relacionada con el grado de finura de sus partículas. Se mide mediante el ensayo normalizado Lambe, que registra el hinchamiento (% Δ volumen) con la absorción de agua, y relacionado con este, se realiza el ensayo de presión de hinchamiento ó presión necesaria para mantener el volumen inicial.

Cuando los valores son significativos, estos pueden provocar daños importantes en las construcciones.



Ensayo Lambe



Presión de hinchamiento

h.2) Deformabilidad

Se evalúa el comportamiento de un suelo ante las cargas que se prevé que va a soportar, relacionando las cargas con las deformaciones escalonadamente.

Se determina con el ensayo edométrico, que sirve para estimar los asentos previstos de un suelo con las hipótesis de cargas de los proyectos.

h.3) Resistencia a compresión

Capacidad de resistencia al aplastamiento por compresión, medida sobre muestra talladas de suelos cohesivos $R_c = F/S$ (kp/cm²).

h.4) Resistencia al corte

Medida de la resistencia de los suelos cohesivos al esfuerzo cortante. Para ello, se talla una muestra que se somete a un esfuerzo tangencial entre dos mordazas, que se desplazan en sentido inverso. $\zeta = Q / S$ (kp/cm²)

Toma de muestras

Para la realización de ensayos que permitan caracterizar los suelos y estudiar sus propiedades, se han de tomar muestras en estado natural cuando se realizan las prospecciones del terreno. Se obtienen estas muestras a distintas profundidades y manteniendo, ó no, sus condiciones naturales, de ahí que estas se clasifiquen en

- Superficiales (Calicatas < 2m) → Muestras alteradas ó inalteradas (MA, MI)
- Profundas (Sondeos mecánicos > 2 m) → Muestras inalteradas (MI)

BIBLIOGRAFÍA

- Enciclopedia de geológica básica
- Generalidades sobre M. de Construcción (M. Pétreos). Francisco Arredondo
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes. (PG-3)
- Normas de ensayo NLT de rocas y suelos (CEDEX). Ministerio de Fomento
- Normas UNE sobre ensayos de rocas y suelos (AENOR).