

1

INTRODUCCIÓN A LA GEOTECNIA: TIPOS Y PROPIEDADES GENERALES DE LOS SUELOS

1.1 INTRODUCCIÓN

La Geotecnia es la rama de la Ingeniería que se ocupa del estudio de la interacción de las construcciones con el terreno. Se trata por tanto de una disciplina no sólo de la Ingeniería Civil, sino también de otras actividades, como la Arquitectura y la Ingeniería Minera, que guardan relación directa con el terreno.

Los problemas geotécnicos básicos son:

- El terreno como cimiento: todas las obras deben apoyarse en el terreno; debe por tanto definirse la forma de este apoyo, y la transmisión de cargas de la estructura al terreno, para lo que debe estudiarse la deformabilidad y resistencia de éste.

- El terreno como productor de cargas: en ocasiones, para crear un desnivel, o con otro motivo, se construyen estructuras cuyo fin es contener el terreno (p. ej., muros de contención, revestimientos de túneles); para su dimensionamiento, debe calcularse la magnitud y distribución de los empujes ejercidos por el terreno.
- El terreno como propia estructura: otras veces, para crear un desnivel no se construye una estructura de contención, sino que se deja al propio terreno en talud; debe en este caso estudiarse la inclinación que debe darse a este talud para garantizar su estabilidad.
- El terreno como material: en obras de tierra (rellenos, terraplenes, presas de materiales sueltos), el terreno es el material de construcción, por lo que deben conocerse sus propiedades, y la influencia que en ellas tiene el método de colocación (compactación).

Los terrenos sobre los que se construyen las obras son de naturaleza muy variada, desde un macizo granítico sano hasta un fango de marisma en el que no es posible caminar. Las diferencias de comportamiento obedecen a varias causas:

- Diferencias de naturaleza mineralógica de los componentes: silíceos, calcáreos, orgánicos, etc.
- Diferencias de tamaño de las partículas:
 - de milímetros o decímetros en gravas y bolos
 - de décimas de milímetro en arenas

- de centésimas de mm (decenas de micras) en limos inferiores a una micra en arcillas.
- Diferencias de la forma de contacto y unión entre granos; puede tratarse de:
 - una simple yuxtaposición, en el caso de una arena seca,
 - uniones por meniscos capilares entre granos si está húmeda,
 - fuerzas eléctricas entre partículas en el caso de arcillas,
 - soldadura entre granos o cristales en rocas.
 - Diferencias del proceso de deposición y de tensiones a que está sometido: la compacidad o consistencia de un elemento de terreno varía entre los casos:
 - recién sedimentado, a pequeña profundidad, y por tanto a pequeñas compresiones;
 - profundo y, por tanto, sometido a un gran peso de terreno situado por encima;
 - que haya estado a gran profundidad y luego por erosión se haya eliminado parte de la presión (procesos de sobreconsolidación);
 - en rocas, por la fracturación producida por plegamiento y empujes tectónicos, o con diferentes grados de meteorización por agentes atmosféricos.

Todo ello da lugar a la gran diversidad de terrenos señalada.

1.2 SUELOS Y ROCAS

Una primera clasificación es la distinción entre **suelos** y **rocas**.

Suele considerarse que los suelos están constituidos por partículas sueltas, mientras que en las rocas los granos están cementados o soldados. Sin embargo, esta separación no es tan clara: existen, por una parte, suelos con algún grado de cementación entre sus partículas y, por otro, rocas en las que la cementación es relativamente ligera. En algunos textos se considera la resistencia a compresión simple de 10^3 kN/m^2 (1 MPa) como el límite de separación entre suelo y roca.

Desde el punto de vista práctico, en construcción es habitual considerar como suelos aquellos terrenos que pueden excavarse sin necesidad de recurrir a explosivos, y así se define en algunos textos. Sin embargo, en las últimas décadas la evolución de las técnicas de excavación (martillos picadores, rozadoras) permite la excavación mecánica de rocas de resistencia media, lo que ha hecho más difuso este límite.

El Código Técnico de la Edificación establece la distinción en función de que la acción del agua sea capaz de disgregar el material en partículas en poco tiempo o no (considerando “poco tiempo” el periodo de vida útil de un edificio).

De lo anterior se deduce que no hay una distinción clara entre suelos y rocas, sino una transición continua. Los materiales de tránsito (suelos duros-rocas blandas) tienen características específicas y presentan comportamientos a veces de más difícil estudio que los suelos y rocas típicos.

1.3 ORIGEN DE LOS SUELOS

Los suelos provienen de las rocas a través de procesos de erosión. El proceso formativo puede incluir las siguientes fases:

- erosión
- transporte
- sedimentación
- procesos secundarios

1.3.1 Erosión

Puede ser física o química.

- La **erosión física** consiste en la reducción de la roca a fragmentos progresivamente más pequeños, pero sin alterar su composición química. Puede ser por acción del agua, aire, temperatura u otros factores, ya

sea actuando solos o en combinación. Así se forman los **suelos granulares (gravas, arenas, limos)**. Las acciones entre partículas son puramente mecánicas.

- La **erosión química** consiste en procesos de hidratación, hidrólisis, oxidación o disolución, por los que se forma un suelo cuya composición química difiere de la de la roca original. El proceso más importante es la hidrólisis de los silicatos de las rocas para pasar a **arcillas**. Debido al proceso, las partículas tienen cargas eléctricas no compensadas (o no uniformemente distribuidas), por lo que aparecen fuerzas eléctricas de interacción entre sí y con el agua intersticial. Esto confiere a estos suelos propiedades particulares (plasticidad).

1.3.2 Transporte y sedimentación

El suelo, una vez formado por la erosión, puede quedarse donde se formó o ser transportado y sedimentado en otros lugares. En función de ello se habla de:

- Suelos **residuales**, o **eluviales**: no han sufrido transporte. Por ello, suelen conservar algunos restos de la estructura de la roca a partir de la que se formaron (dirección de estratificación, anisotropía). Deere y Patton (1971) presentan un perfil típico de suelos residuales.

Es frecuente que la zona de transición suelo-roca (Deere y Patton, 1971) sea más permeable que la parte superior, de suelo, y que la inferior, de roca, lo que da lugar a filtración preferente de agua en dicho contacto.

- Suelos **transportados** y sedimentados. Puede ser mediante el agua de ríos (**suelos aluviales**), mar, lagos, glaciares, o del viento (dunas, depósitos eólicos), o por gravedad en laderas (**suelos coluviales**).

El medio de transporte (que actúa a la vez como agente de erosión y medio de sedimentación), tiene una gran influencia en las propiedades del suelo resultante: distribución de tamaños de partículas, y forma y textura de las mismas. Así, los suelos eólicos suelen ser muy uniformes, mientras que los aluviales presentan un mayor grado de mezcla de tamaños, y los glaciares aún más.

1.3.3 Procesos secundarios

Ocurren una vez formado y sedimentado el suelo. Los más importantes son:

- **Consolidación** por el peso de sedimentos. Cuando el suelo se deposita, está sometido a una tensión nula, y está por tanto con una consistencia muy floja. Al continuar depositándose sedimentos encima, va consolidándose, aumentando su compacidad y consistencia.

Si un suelo ha estado sometido en su historia a una presión mayor de la que tiene actualmente, se dice que está **sobreconsolidado**; en caso contrario, **normalmente consolidado** (ver esquema de la Figura 1.1). La causa más obvia de sobreconsolidación es la erosión de material representada en la figura, pero también puede deberse a desecaciones asociadas a ascensos y descensos del nivel freático. Como resultado, sólo los suelos muy recientes (fangos costeros, de marisma o aluviales) están normalmente consolidados, y todos los suelos de consistencia media han sido sobreconsolidados por alguno de los procesos citados.

- **Cementación** entre partículas, que se presenta en algunas ocasiones: caliches y costras, suelos cementados por sulfatos o carbonatos, etc.

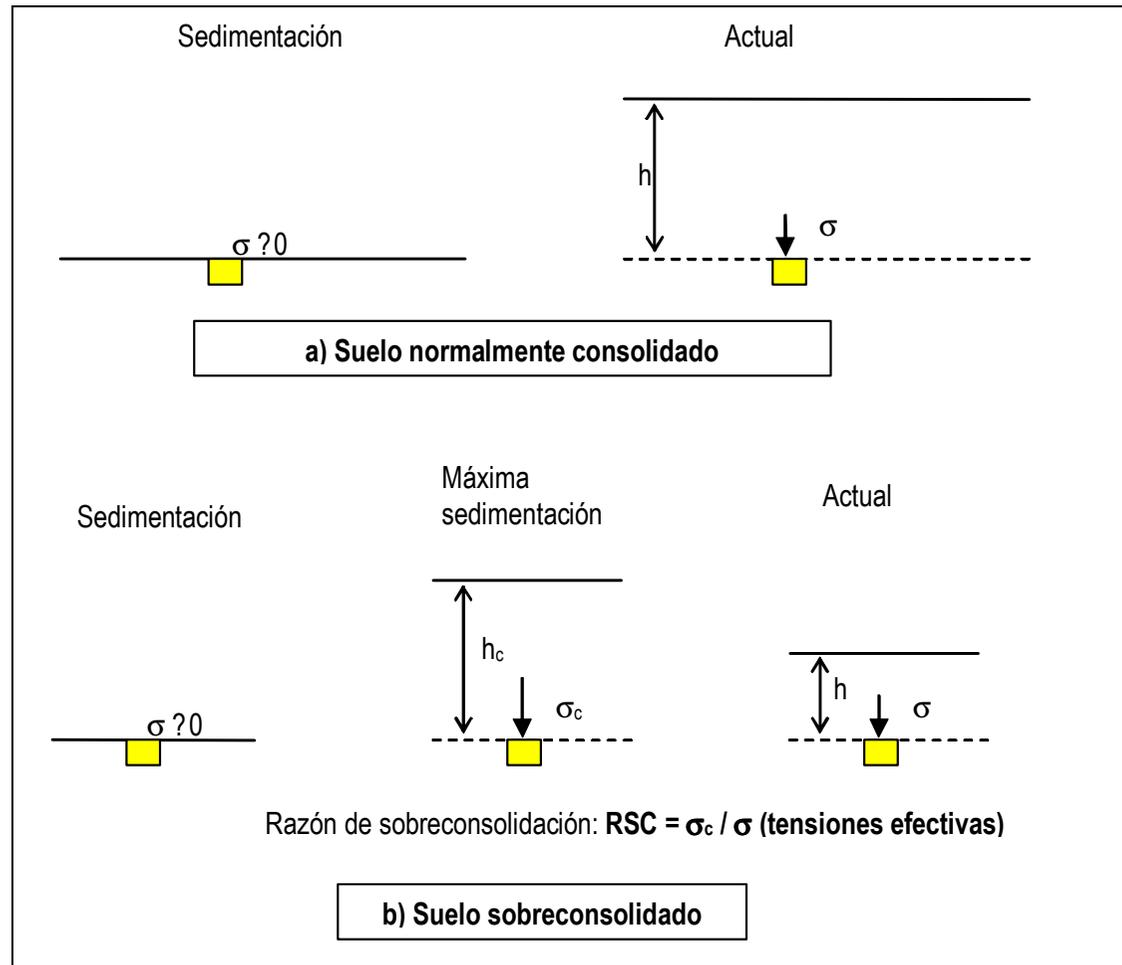


Figura 1.1. Procesos de consolidación y sobreconsolidación

1.4 TIPOS DE SUELOS

El tamaño de las partículas es el primer criterio de clasificación de los suelos. La denominación más extendida para las partículas es en una escala basada en los dígitos 2 y 6 (es decir, con un factor de 3 entre ellos) (Tabla 1.1).

De la Tabla anterior es importante destacar:

- Las gravas, arenas, limos y arcillas se designan con los símbolos G, S, M y C, respectivamente.
- El límite entre gravas y arenas es de 2 mm
- Para el límite entre arenas y limos hay ligeras variaciones: algunas normas lo sitúan en 0,06 mm, pero otras toman 0,08 mm, y otras 0,074 mm (tamiz 200 de la serie ASTM).

Tabla 1.1. Escala de tamaños de partículas de suelos

| Denominación | Tamaño (mm) |
|--------------------|--------------|
| Grava (G) | 60 |
| | Gruesa |
| | 20 |
| | Media |
| Arena (S) | 6 |
| | Fina |
| | 2 |
| | Gruesa |
| Limo (M) | 0,6 |
| | Media |
| | 0,2 |
| | Fina |
| Arcilla (C) | 0,06 |
| | Grueso |
| | 0,02 |
| | Medio |
| Arcilla (C) | 0,006 |
| | Fino |
| Arcilla (C) | 0,002 |

1.5 PROPIEDADES ELEMENTALES. PARÁMETROS DE ESTADO

El estado de compacidad de un suelo se define mediante unas relaciones entre volúmenes y pesos de sus elementos constitutivos. La Figura 1.2 representa los volúmenes, V , de materia sólida y huecos (parcialmente rellenos de agua en el caso más general). Los pesos respectivos, W , se relacionan con ellos a través de los pesos específicos respectivos.

Se definen los siguientes parámetros:

- Porosidad, n : cociente entre volúmenes de huecos y total:

$$n = \frac{V_h}{V_t} \quad (1.1)$$

- Índice de huecos o de poros, e : cociente entre volúmenes de huecos y de sólidos:

$$e = \frac{V_h}{V_s} \quad (1.2)$$

- Humedad, w : cociente de pesos de agua y sólidos (suele expresarse en %):

$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (1.3)$$

- Grado de saturación, S_r : fracción de poros llenos de agua (suele expresarse en %):

$$S_r = \frac{V_w}{V_h} \quad (1.4)$$

- Peso específico aparente, natural o húmedo, γ cociente entre el peso total y volumen total:

$$\gamma = \frac{W_t}{V_t} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_h} = \frac{\gamma_s V_s + \gamma_w V_w}{V_s + V_h} \quad (1.5)$$

- Peso específico seco, γ_d : peso específico, descontando el peso del agua, es decir, el peso específico aparente que tendría el suelo si extrajéramos su agua sin modificar su volumen total:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} = \frac{W_s}{V_s + V_h} = \frac{\gamma_s V_s}{V_s + V_h} \quad (1.6)$$

- Peso específico saturado, γ_{sat} : peso específico aparente que tendría el suelo si se saturasen totalmente sus poros, sin modificar su volumen total:

$$\gamma_{sat} = \frac{W_s + W_w^{sat}}{V_t} = \frac{\gamma_s V_s + \gamma_w V_h}{V_s + V_h} \quad (1.7)$$

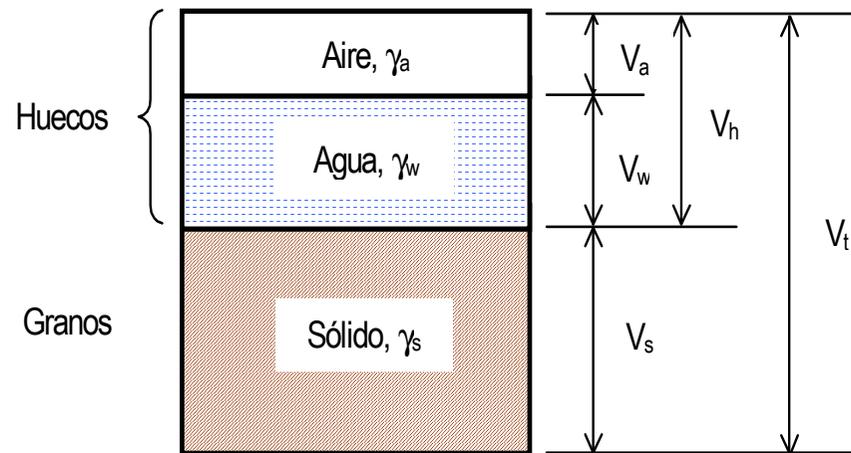


Figura 1.2. Distribución de volúmenes en un suelo

Sobre estos parámetros cabe hacer las siguientes observaciones:

- En el lenguaje geotécnico, es habitual referirse impropriamente a los anteriores pesos específicos como “densidades” (seca, saturada, etc.); sin embargo, se trata siempre de peso (y no masa).
- Los parámetros anteriores no son independientes, sino que existen relaciones entre ellos, que pueden obtenerse fácilmente. Son especialmente útiles las siguientes:

$$\begin{aligned}
 n &= \frac{e}{1+e} & e &= \frac{n}{1-n} & e &= \frac{\gamma_s w}{\gamma_w S_r} \quad (= \frac{\gamma_s w}{\gamma_w} \text{ si está saturado}) \\
 \gamma_d &= \frac{\gamma_s}{1+e} = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{\gamma_s w}{\gamma_w S_r}} & \gamma_{sat} &= \frac{\gamma_s + \gamma_w e}{1+e} & \gamma &= \frac{\gamma_s (1+w)}{1+e} = \gamma_d (1+w)
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

- Como rangos típicos en suelos reales, pueden darse los siguientes:
 - El peso específico de la materia sólida, γ_s , varía relativamente poco, estando en general en el rango 26-27 kN/m³, salvo que existan minerales metálicos pesados.
 - El del agua, γ_w , es de 10 kN/m³ (en rigor 9,81 kN/m³), y el del aire despreciable.
 - Índice de poros: gravas y arenas (0,20-0,50); limos y arcillas (0,40-1,00)
 - Humedad natural, w : suelos muy secos y duros (10-20%); suelos blandos (20-40%)

- Peso específico seco: suelos blandos o flojos ($15-18 \text{ kN/m}^3$); suelos densos o muy compactados ($19-22 \text{ kN/m}^3$)
- Así mismo, es interesante definir los siguientes parámetros, cuyo uso se refiere exclusivamente a suelos granulares (arenas o gravas):
 - Densidad máxima: Corresponde a la situación más densa posible que podría ser obtenida en un suelo granular, la cual, como es lógico, depende de la granulometría y forma de los granos. El volumen de los huecos es el menor posible, por lo que el índice de poros tiene un valor mínimo ($e_{\text{mín.}}$). El valor de la densidad máxima se consigue mediante un ensayo normalizado (Norma UNE-103106) en el que se procede a densificar el suelo granular mediante la aplicación de una energía determinada.
 - Densidad mínima: Al contrario que la anterior, corresponde a la estructura más abierta que puede obtenerse con los granos de una arena o grava, lo que implica el mayor volumen de huecos posible para una determinada granulometría y forma de los granos. Le corresponde el mayor índice de poros que puede conseguirse para dicho suelo ($e_{\text{máx.}}$). La forma de obtención está también normalizada (Norma UNE-103015).

- Índice de densidad: En su estado natural el suelo tiene un peso específico seco cuyo valor se encuentra en el rango definido por la densidad mínima y máxima, y un índice de poros e intermedio entre $e_{máx.}$ y $e_{mín.}$. Se define como índice de densidad a la siguiente expresión

$$I_D = \frac{e_{máx.} - e}{e_{máx.} - e_{mín.}} \quad (1.9)$$

Cuando, en estado natural, un suelo granular tiene $I_D = 0$, su peso específico coincide con el valor de la densidad mínima. Por el contrario, si $I_D = 1$ el suelo se encuentra con la máxima compacidad y su peso específico coincide con el valor de la densidad máxima.

Si el índice de densidad es bajo, se dice que el suelo es “flojo”. Si sucede lo contrario, y su valor está cercano a la unidad, se cataloga como “denso”.

Cuanto mayor es el índice de densidad, menor es el volumen de huecos y hay mayor número de contactos entre partículas. Intuitivamente, puede apreciarse que valores altos del índice de densidad implican una menor compresibilidad y una mayor resistencia del terreno que cuando el valor de I_D es bajo.

1.6 PARÁMETROS DE IDENTIFICACIÓN

Se denominan parámetros de identificación a aquellos que dependen de la naturaleza de las partículas del suelo, pero no de su estado de agregación o compacidad. Para su determinación, por tanto, no se requieren muestras inalteradas del suelo, sino que basta que sean representativas de sus componentes.

Los más importantes son la granulometría y la plasticidad.

1.6.1 Granulometría

– Curva granulométrica

En un suelo cualquiera, habrá en general partículas de todos los tamaños (grava, arena, limo y arcilla, ver Tabla 1.1). La granulometría indica la proporción relativa de cada una de estas fracciones.

Se representa por la **curva granulométrica**, que indica, para cada diámetro de partícula D , el porcentaje en peso de partículas menores que D . Se representa en escala logarítmica de tamaños.

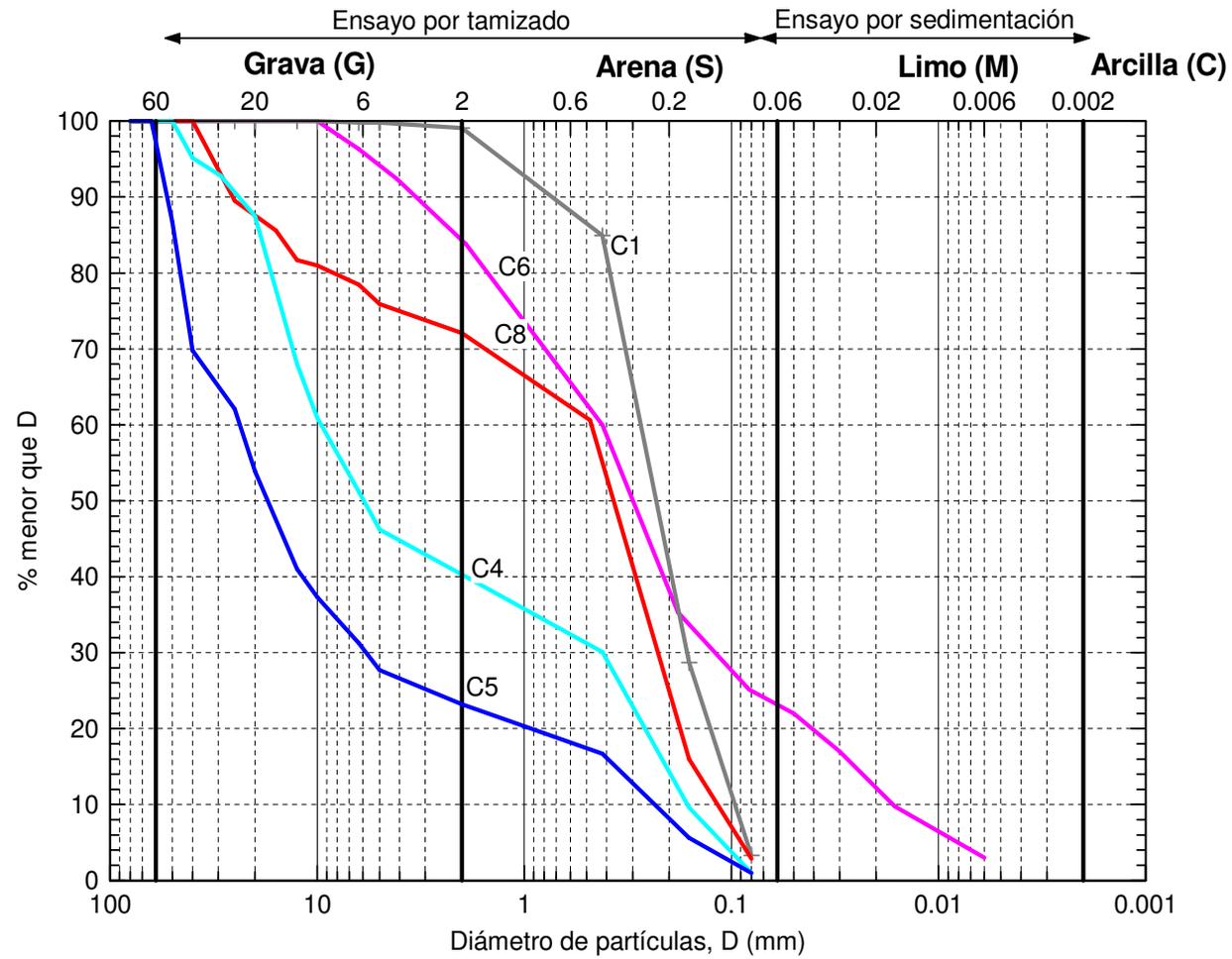


Figura 1.3. Cruvas granulométricas

La Figura 1.3 muestra varias curvas granulométricas típicas. Una curva muy tendida indica una graduación continua de tamaños de partículas, mientras que una caída vertical brusca para un cierto diámetro quiere decir que existe una gran cantidad de partículas de dicho diámetro.

Se suelen definir algunos parámetros de la curva granulométrica: denominando D_n al diámetro correspondiente al porcentaje $n\%$, se definen:

– Coeficiente de uniformidad: $C_u = D_{60}/D_{10}$ En realidad, este coeficiente es tanto mayor cuanto menos uniforme es el suelo. Si todas las partículas tuviesen el mismo tamaño, se tendría $D_{60} = D_{10}$, es decir, $C_u = 1$. En suelos reales, C_u oscila entre 2 (suelos muy uniformes) y 100 (suelos de granulometría muy extendida).

– Coeficiente de graduación: $C_g = (D_{30}/D_{10})/(D_{60}/D_{30}) = D_{30}^2/(D_{60} \cdot D_{10})$

– **Determinación experimental**

Para las fracciones gruesas (tamaños de grava y arena), la granulometría se determina mediante el **ensayo de tamizado** (Norma UNE-103101). Se hace pasar el suelo por una serie de tamices de finura creciente, y se pesa la parte retenida en cada uno de ellos. El tamiz más fino que suele usarse es el 0,08 UNE

(0,080 mm), o el aproximadamente equivalente nº 200 ASTM (0,074 mm). Este tamiz corresponde precisamente a la separación entre arenas y limos.

Para los tamaños inferiores a éstos, es decir, para la fracción limosa, se hace el **ensayo de sedimentación**. En él, se utiliza la propiedad de que, cuando una partícula cae en el seno de un fluido viscoso, su velocidad de caída alcanza enseguida un valor límite constante, para el cual la fuerza másica (peso menos empuje de Arquímedes) resulta equilibrada por la resistencia viscosa del agua a su alrededor. Si la partícula es esférica de diámetro D , dicha velocidad es (ley de Stokes):

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\eta} D^2 \quad (1.10)$$

siendo γ_s y γ_w los pesos específicos de la partícula y del fluido, respectivamente, y η la viscosidad dinámica del fluido.

La forma operativa del ensayo consiste en preparar una suspensión del suelo en agua, con una concentración determinada, en un recipiente graduado. Se agita y se deja reposar. Las partículas van cayendo y depositándose en el fondo. Con ello, la concentración de la suspensión va decreciendo al ir desapareciendo de ella las partículas más gruesas. Se mide la variación con el tiempo de esta concentración en un punto

determinado del recipiente (método de la **pipeta**), o de la densidad aparente (método del **densímetro**), y de ello se puede deducir la proporción de partículas de cada tamaño. En España está normalizado el método del densímetro (Norma UNE-103102).

Para la parte de arcilla, y en parte también para los limos, la granulometría no es significativa, por lo que los ensayos de sedimentación no se hacen sistemáticamente, como los de tamizado. Para estos suelos, su identificación se basa preferentemente en la plasticidad, que se estudia a continuación.

1.6.2 Plasticidad. Límites de Atterberg.

En un suelo granular seco, si se añade agua progresivamente, ésta va rellenando los poros hasta saturar el suelo; a partir de este momento, el suelo no admite más agua, y si se sigue añadiendo, el suelo queda en el fondo del recipiente y por encima de él, agua limpia.

En cambio, en arcillas, y en cierta medida en los limos, las partículas, merced a su actividad eléctrica, admiten agua de forma progresiva, separándose unas de otras hasta llegar a formar una suspensión cada vez más diluida. Presentan así todos los **estados de consistencia**, desde un sólido frágil, pasando por un sólido plástico amasable, hasta un líquido (Figura 1.4).

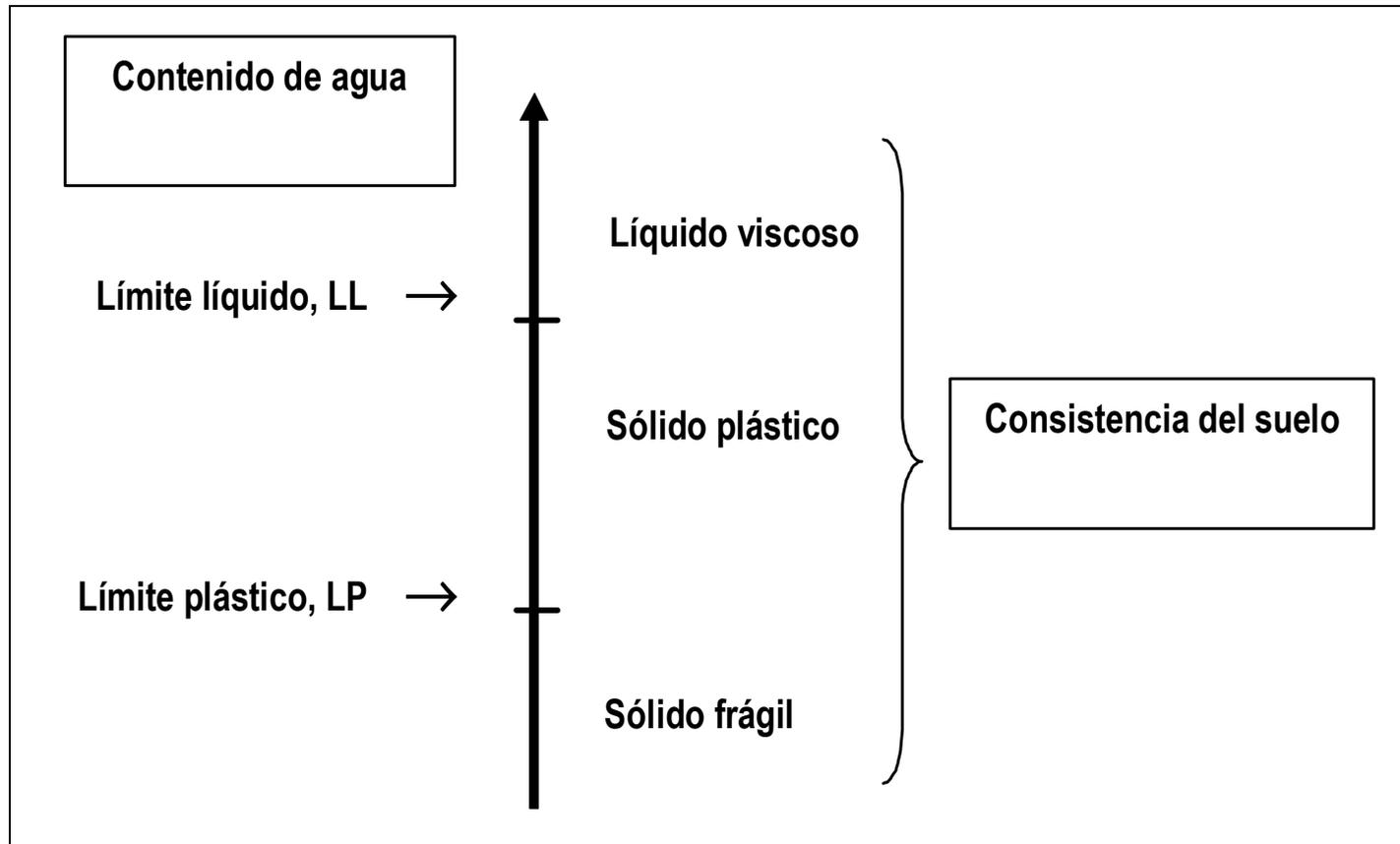


Figura 1.4. Estados de consistencia de un suelo

A esta propiedad se le denomina plasticidad, y se emplea para la identificación de suelos arcillosos y limosos. Se cuantifica mediante los llamados **límites de Atterberg**, que se definen como la humedad (cociente en tanto por ciento entre peso de agua y de suelo seco) para la cual la arcilla presenta una determinada consistencia.

– **Límite plástico (w_P o LP):**

Es la humedad para la cual el suelo pasa de ser un sólido frágil a plástico, es decir, que puede moldearse sin agrietarse. Se determina mediante ensayo normalizado (Norma UNE-103104). Se amasa la arcilla entre la palma de la mano y una superficie lisa, formando un pequeño cilindro hasta la aparición de grietas. Cuando el agrietamiento comienza a producirse para un diámetro del cilindro de arcilla de unos 3 mm, se dice que la arcilla tiene la humedad correspondiente al límite plástico (Figura 1.5).



Figura 1.5. Determinación del límite plástico

– Límite líquido (w_L o LL):

Es la humedad para la cual el suelo pasa de ser un sólido plástico a un líquido viscoso.

Se determina mediante ensayo normalizado (Norma UNE-103103) con la cuchara de Casagrande (Figura 1.6). En él se amasan unos 100 g de suelo con la humedad aproximada del límite líquido, y se rellena con él la parte inferior del cuenco metálico (cuchara). Luego se hace un surco con un acanalador normalizado y se dan golpes a la cuchara dejándola caer sobre la base desde una altura determinada (para esto el aparato lleva un mecanismo regulador). Se dice que la arcilla tiene la humedad del límite líquido cuando, tras dar 25 golpes, el surco se cierra en una longitud aproximada de 12 mm (media pulgada).

Las definiciones anteriores de los límites son un tanto arbitrarias, y no responden a un cambio brusco en la consistencia del suelo. Tienen sin embargo la virtud de ser utilizadas de forma universal, lo que permite validar descripciones de suelo hechas por personas diferentes en lugares distintos del mundo.

Se han hecho numerosas determinaciones de la resistencia de los suelos amasados y se ha obtenido que en general, la resistencia al corte para la humedad del límite líquido es del orden de 0,5-5 kPa (media de 1-2 kPa), y para el límite plástico unas 100 veces superior, es decir, de 50-500 kPa (media 100-200 kPa).



Figura 1.6. Cuchara de Casagrande para determinación del límite líquido

– **Índice de plasticidad (IP):**

Es la diferencia entre las humedades de los límites líquido y plástico:

$$IP = LL - LP \quad (1.11)$$

Indica el tamaño del rango de humedades en el que el suelo se comporta como un sólido plástico.

– **Carta de Casagrande**

Los parámetros anteriores se emplean para identificar los suelos arcillosos y limosos, mediante el gráfico denominado **Carta de Plasticidad de Casagrande**. Consiste en un diagrama LL-IP (Figura 1.7). El área del gráfico queda dividida en cuatro zonas, separadas por dos líneas:

- La línea $LL=50\%$, que separa los suelos de alta plasticidad (símbolo H) de los de baja plasticidad (símbolo L)
- La línea A, de ecuación:

$$IP = 0,73(LL - 20) \quad (1.12)$$

Esta línea separa las arcillas (símbolo C), que caen por encima de ella, de los limos (símbolo M) y los suelos orgánicos (símbolo O), que caen por debajo.

Cuando se ensayan muestras de un determinado suelo, suele haber diferencias entre ellas, al variar el contenido de finos; los puntos correspondientes suelen quedar agrupados en zonas alargadas, sensiblemente paralelas a la línea A (Figura 1.7).

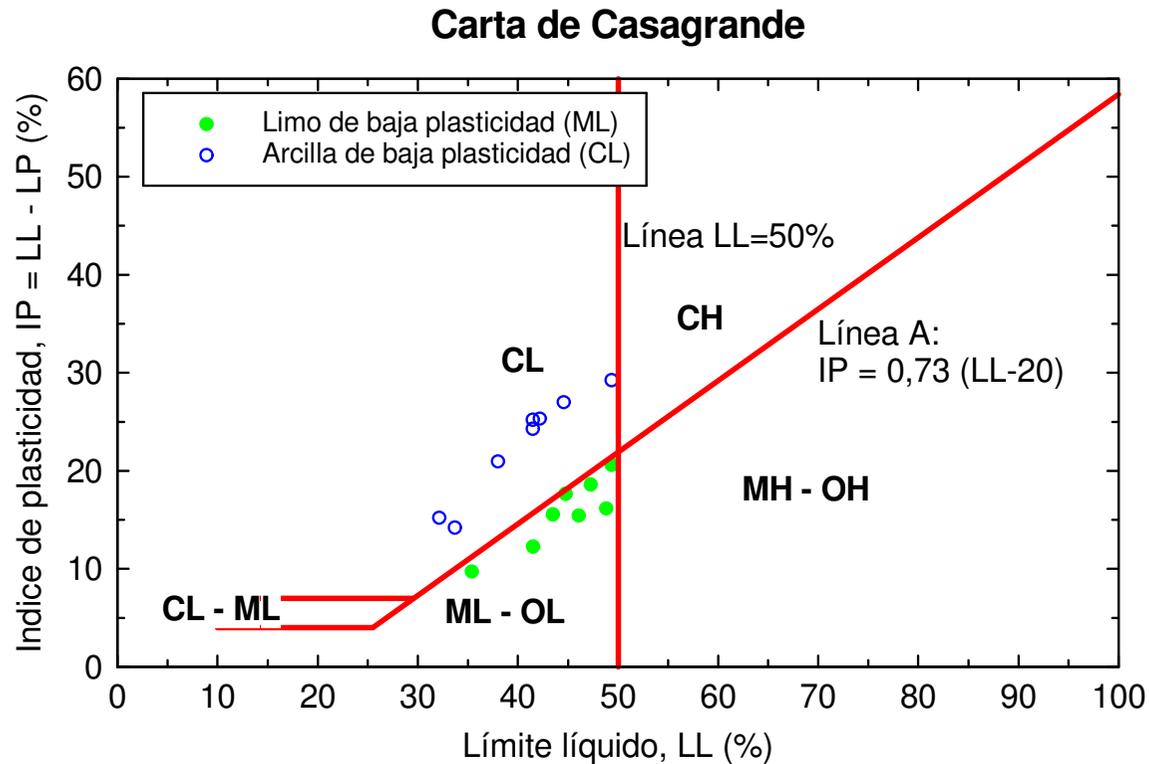


Figura 1.7. Carta de plasticidad de Casagrande

1.6.3 Índice de fluidez

Como se ha visto, la consistencia de un suelo con características plásticas, depende del valor de su humedad natural y de la relación entre este valor y sus límites líquido y plástico. Si la humedad está por encima del valor del límite líquido la consistencia de este suelo es de líquido viscoso, mientras que tendrá una consistencia de sólido plástico si la humedad se encuentra entre ambos límites, y una de sólido frágil si dicha humedad se encuentra por debajo del límite plástico.

Una forma de indicar directamente la consistencia de un suelo es mediante el parámetro denominado índice de fluidez, que se define por la siguiente expresión:

$$I_F = \frac{w - w_P}{I.P.} \quad (1.13)$$

- Si el suelo tiene la humedad natural inferior al límite plástico (comportamiento como sólido frágil), el índice de fluidez es negativo $I_F < 0$
- Si el suelo tiene la humedad natural entre el límite plástico y el líquido (comportamiento como sólido plástico), el índice de fluidez resulta ser $0 < I_F < 1$

- Si el suelo tiene la humedad natural superior al límite líquido (comportamiento como fluido viscoso), el índice de fluidez es $I_F > 1$

1.6.4 Clasificación de suelos

Con la granulometría y la plasticidad se pueden clasificar los suelos en cuanto a sus propiedades de identificación.

Aunque existen varios sistemas de clasificación, dirigidos a determinados usos de los suelos (carreteras, presas, etc.), el más general es el U.S.C.S. (*Unified Soil Classification System*), americano, basado en la propuesta inicial de Casagrande. En la Tabla 1.2 se puede ver la citada clasificación, que asigna a cada suelo dos letras según los criterios siguientes:

- **Separación entre suelos gruesos (G, S) y finos (M, C, O):**

En función de que el porcentaje de partículas gruesas (arenas y gravas, es decir, mayores de 0,074 mm, tamiz 200 ASTM), sea mayor o menor del 50%.

– **Para los suelos gruesos, separación entre gravas (G) y arenas (S):**

En función de que, de la fracción retenida en el tamiz 200, resulte retenida por el tamiz 4 (4,76 mm) más del 50% (G) o menos (S).

– **Tanto para gravas (G) como para arenas (S), separación entre suelos gruesos limpios o con finos:**

En función del contenido de finos (fracción que pasa por el tamiz 200):

Suelos gruesos limpios (inferior al 5%)

Suelos gruesos intermedios (entre el 5 y el 12%)

Suelos gruesos con finos (superior al 12%)

– **Para suelos gruesos limpios, separación entre suelos bien graduados (W) o pobremente graduados (P):**

En función de que se cumplan o no los dos requisitos de la curva granulométrica indicados en la Tabla 1.2, se añade el símbolo W,P a la letra G,S.

– **Para suelos gruesos con finos, separación entre limosos, arcillosos u orgánicos:**

En función de las características de plasticidad de la fracción fina (carta de Casagrande), se añade el símbolo C,M,O a la letra G,S (p.ej., GC).

– **Para suelos gruesos intermedios (finos entre el 5 y el 12%):**

Se les asigna doble símbolo, considerándolos limpios y con finos (p.ej., GW-GC).

– **Para suelos finos:**

En función de las características de plasticidad (carta de Casagrande), se clasifican como CH, CL, MH, ML, OH, OL.

Tabla 1.2. Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (U.S.C.S.)

| DIVISIONES PRINCIPALES | | SÍMBOLOS DEL GRUPO | DENOMINACIÓN TÍPICA | CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN | | | |
|--|---|---|---------------------|--|---|--|--|
| SUELOS DE GRANO GRUESO Más del 50% es retenido en el tamiz nº 200 | GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenido por el tamiz nº 4 | GRAVAS LIMPIAS | GW | Gravas y mezclas grava-arena bien graduadas, con pocos finos o sin finos | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4 \quad C_c = \frac{D_{200}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \text{ entre } 1 \text{ y } 3$ <p>Cuando no se cumplen simultáneamente las dos condiciones para GW</p> | | |
| | | | GP | Gravas y mezclas grava-arena mal graduadas, con pocos finos o sin finos | | | |
| | | GRAVAS CON FINOS | GM | Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo | | <p>Debajo de la línea A o $IP < 4$</p> <p>Por encima de la línea A o $IP > 7$</p> <p>Los casos intermedios requieren doble símbolo</p> | |
| | | | GC | Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla | | | |
| | ARENAS Más del 50 % de la fracción gruesa pasa por el tamiz nº 4 | ARENAS LIMPIAS | SW | Arenas y arenas con grava bien graduadas, con pocos finos o sin finos | $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6 \quad C_c = \frac{D_{200}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \text{ entre } 1 \text{ y } 3$ <p>Cuando no se cumplen simultáneamente las dos condiciones para SW</p> | | |
| | | | SP | Arenas y arenas con grava mal graduadas, con pocos finos o sin finos | | | |
| | | CON ARENAS FINOS | SM | Arenas limosas, mezclas de arena y limo | | <p>Debajo de la línea A o $IP < 4$</p> <p>Por encima de la línea A o $IP > 7$</p> <p>Los casos intermedios requieren doble símbolo</p> | |
| | | | SC | Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla | | | |
| | | Clasificación basada en el porcentaje de finos que pasan por el tamiz nº 200 (0,080 UNE) Menos del 5%: GW, GP, SW, SP Más del 12% : GM, GC, SM, SC Del 5 al 12%: Casos intermedios que requieren el uso de doble símbolo | | | | | |

| | | | | |
|--|---|--|--|--|
| SUELOS DE GRANO FINO 50% o más pasa por el tamiz nº 200 | LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido igual o menor que 50 | ML | Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas | <p style="text-align: center;">GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE para la clasificación de suelos de grano fino y de la fracción fina de los suelos de grano grueso</p> |
| | | CL | Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas | |
| | | OL | Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad | |
| | LIMOS Y ARCILLAS Límite líquido mayor de 50 | MH | Limos inorgánicos, arenas finas o limos con mico o diatomeas, limos elásticos | |
| | | CH | Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad | |
| | | OH | Arcillas orgánicas de plasticidad media o elevada | |
| SUELOS DE ESTRUCTURA ORGÁNICA | PT | Turbas, fangos y otros suelos de alto contenido orgánico | Fácilmente identificables por la presencia de raíces, hojas y materia vegetal fibrosa en descomposición, así como su color marrón oscuro ó negro, su olor y su tacto suave y esponjoso | |

1.7 ENSAYOS QUÍMICOS DE IDENTIFICACIÓN

Los suelos y las rocas pueden contener elementos y compuestos químicos que impidan o restrinjan el uso de un suelo, generalmente para rellenos (p.e. terraplenes de carretera), o bien que ataquen a los materiales que constituyen partes de una obra que se encuentren en contacto con el terreno (p.e. el hormigón en cimentaciones o muros, tuberías de fundición, etc.)

Los ensayos químicos buscan obtener el contenido en estos compuestos químicos, y de esta forma caracterizar el terreno. Son ensayos relativamente sencillos, entre los que están:

– **Determinación del contenido de materia orgánica.**

La materia orgánica se degrada con el tiempo, aparte de tener elevada compresibilidad, lo que hace problemático el uso de un suelo con fuerte contenido en materia orgánica en la ejecución de un relleno. Existen dos tipos de ensayos normalizados para este fin: el método del permanganato potásico (UNE 103204) y el método del peróxido de hidrógeno (UNE 7368).

Además, el humus del suelo es agresivo frente al hormigón. El ensayo para detectar si esto sucede es el de determinación de la acidez Baumann-Gully (normalizado en la Instrucción EHE, que obtiene el contenido de iones hidrógeno que el humus de un suelo es capaz de liberar.

– **Determinación del contenido en sulfatos y otras sales solubles**

Al igual que en el caso anterior la tendencia a la solubilidad o hidratación que tienen determinadas sales contenidas en los suelos puede producir cambios volumétricos en el terreno. Por otra parte, la disolución de sulfatos procedentes en gran parte de los yesos, en el agua existente en el terreno, hace a ésta agresiva frente al hormigón y materiales férricos.

Los ensayos normalizados existentes son:

- Determinación del contenido de yesos en suelos (Norma NLT-115).
- Contenido de sulfatos solubles. Existen dos posibles ensayos. Uno de ellos es cualitativo (UNE 103202) e indica la presencia de estos iones solubles. El segundo es cuantitativo (UNE 103201), y proporciona el porcentaje de sulfatos solubles en el suelo.
- Determinación del contenido de sales solubles en los suelos (Norma NLT-114)

– **Determinación del contenido en carbonatos**

Las sales carbonatadas pueden ser solubles en agua, sobre todo en presencia de dióxido de carbono, lo que pueda dar lugar a disgregación de los suelos cementados por carbonatación y la consiguiente pérdida de parte de sus propiedades resistentes y deformacionales. Este fenómeno sucede en terrenos con contenidos en carbonato cálcico inferiores al 40%. Por otra parte, conocer dicho contenido en rocas permite diferenciar las rocas arcillosas (lutitas, limolitas, arcillas margosas) de las carbonatadas (margas, margo-calizas y calizas) .

El ensayo se encuentra normalizado por la Norma UNE 103200.

1.8 MINERALOGÍA Y ESTRUCTURA DE ARCILLAS

1.8.1 Minerales arcillosos

Las arcillas proceden de las rocas a través de procesos de erosión química. Como consecuencia, su composición es muy variable. Están constituidas por mezclas de minerales arcillosos, que son silicatos, fundamentalmente de aluminio, hierro y magnesio. Gran parte de las propiedades de las arcillas, como la plasticidad, responde a su composición mineralógica, por lo que se comentan aquí algunos de sus aspectos más notables.

La gran variedad de minerales arcillosos obedece a la combinación de unas pocas unidades cristalinas fundamentales:

- Capa de tetraedros de sílice, unidos por sus vértices. En ella, los átomos de silicio ocupan el centro de los tetraedros, y los de oxígeno los vértices.
- Capa de octaedros, unidos por los vértices. El centro está ocupado por átomos de magnesio o de aluminio, y los vértices por grupos OH^- .

Las capas de octaedros son eléctricamente neutras y existen en la naturaleza como minerales aislados (Brucita y Gibbsita). No así la de tetraedros, que requiere una red de tetraedros en tres dimensiones para formar la sílice mineral.

En la red cristalina de las arcillas, es frecuente que existan **sustituciones isomorfas**, por las cuales algunos de los átomos centrales son sustituidos por otros de menor valencia (lo más frecuente es Si^{+4} por Al^{+3} , y Al^{+3} por Mg^{+2} o Fe^{+2}). Como resultado, las partículas tienen un déficit de cargas positivas.

La combinación de estas unidades de diversas ordenaciones y con diferentes enlaces entre ellas produce los distintos minerales. La estructura cristalina resultante es laminar, y las partículas son aplanadas, con una dimensión mucho menor que las otras dos. A lo largo de las caras planas existen cargas negativas por las razones antedichas. En los bordes, donde termina la estructura, puede haber cargas positivas o negativas.

De los minerales arcillosos, cabe destacar los siguientes por su frecuencia e importancia práctica:

– **Caolinita**

Abunda en los suelos naturales. El caolín, usado en fabricación de porcelana, es un suelo con alta proporción de caolinita.

Consiste en grupos de dos capas, una de tetraedros y otra de octaedros de aluminio. La unión entre estos grupos es por enlaces de hidrógeno, relativamente débiles.

Las partículas tienen forma exagonal y un tamaño relativamente grande: diámetro de $0,1 \mu$ a 1μ , y relación espesor/diámetro de $1/3$ a $1/10$. Tienen pocas sustituciones isomorfas (1 de cada 400 átomos de Si^{+4} sustituido por Al^{+3}). Por ello, es una arcilla poco activa. Su índice de plasticidad se sitúa de 2 a 4 enteros sobre la línea A en el gráfico de Casagrande.

– Illita

Es el componente más frecuente en las arcillas naturales. La agrupación fundamental es un grupo de tres capas, con una capa de octaedros de magnesio entre dos de tetraedros. La unión entre estas agrupaciones es mediante enlaces de potasio, relativamente fuertes. La relación espesor/diámetro es de $1/10$ a $1/50$. Tiene muchas sustituciones isomorfas, lo que la hace muy activa.

– Montmorillonita

De estructura similar a la illita, pero con dos diferencias fundamentales: en primer lugar, tiene más sustituciones isomorfas, llegando a 1 de cada 6 átomos, con lo que tiene una importante carga eléctrica neta negativa; por otra parte, la unión entre agrupaciones no es de potasio, sino de valencia secundaria. Este enlace

es muy débil, lo que hace que las partículas sean muy pequeñas, con una relación espesor/diámetro inferior a 1/100.

Es una arcilla extraordinariamente activa, y en estado puro puede tener límite líquido entre 100 y 1000 (es decir, que posee la consistencia del límite líquido para un contenido de agua de 1 a 10 veces el de suelo). Además, admite moléculas de agua entre las capas de su estructura, lo que le proporciona carácter expansivo (aumenta extraordinariamente de volumen al saturarse). Este conjunto de propiedades la hacen, por un lado, especialmente peligrosa para las cimentaciones (por su carácter expansivo), y, por otra parte, muy útil en algunas aplicaciones en construcción (lodos tixotrópicos). La bentonita es un suelo con elevada proporción de montmorillonita.

1.8.2 Estructura

Como resultado de las cargas eléctricas de las partículas de arcilla, éstas interactúan entre sí y con el agua intersticial.

El agua posee sales en disolución, de las que los cationes (+) son atraídos por las cargas negativas de las partículas. Además, las moléculas de agua (H₂O), aunque neutras, son polares, con sus cargas positivas y negativas situadas en los extremos de cada molécula. Por ello, sus polos positivos son atraídos también por las

partículas. Debido a esto, el agua que rodea cada partícula posee una elevada viscosidad, decreciente con la distancia a la partícula (Figura 1.8).

La manifestación macroscópica más clara de este fenómeno es el comportamiento plástico de los suelos arcillosos, descrito en el Apartado 1.6.2. A continuación se definan algunos conceptos relacionados con este comportamiento.

– **Actividad**

Cuanto mayor es la carga eléctrica de las partículas de una arcilla, es capaz de ejercer acciones eléctricas a mayor distancia, con lo que sus límites de Atterberg aumentan. Sin embargo, el índice de plasticidad solo no refleja este aspecto, pues depende también de la proporción de arcilla que tenga la muestra ensayada. Por eso se define la actividad de una arcilla como el cociente entre su índice de plasticidad y el contenido de arcilla (porcentaje de partículas menores de 2 micras). La actividad de la caolinita varía entre 0,1 y 0,4; la de la illita entre 0,2 y 0,8; la de la montmorillonita entre 1 y 10.

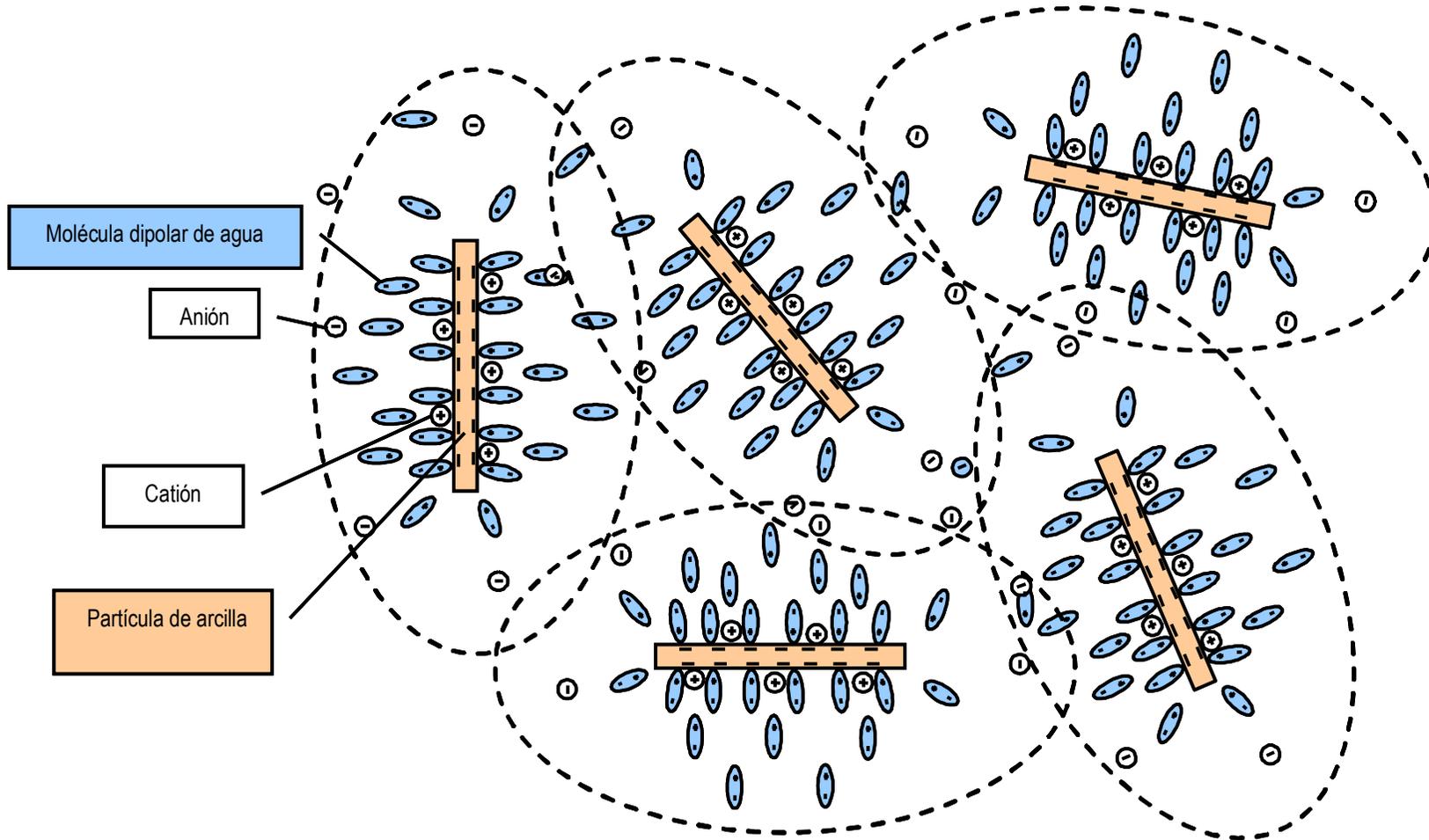


Figura 1.8. Interacción eléctrica de las partículas de arcilla. Capa doble

– Susceptibilidad

Cuando se amasa una muestra de arcilla, se destruye su estructura y los enlaces establecidos entre sus partículas. Se define la susceptibilidad como el cociente entre las resistencias al corte sin drenaje en estado natural y después de amasada a humedad constante.

En función de este cociente se clasifican las arcillas como indica la Tabla 1.3.

– Tixotropía

Consiste en la propiedad de recuperar la resistencia perdida por el amasado en un tiempo relativamente corto. Sólo las arcillas más activas, como la montmorillonita, presentan esta propiedad de modo significativo. En ellas, si se deja reposar la arcilla una vez amasada, recupera gran parte de su resistencia inicial. Ello las hace especialmente útiles en construcción, como suspensiones en agua (lodos), que endurecen por reposo.

Tabla 1.3. Susceptibilidad de las arcillas

| Susceptibilidad, S_t | Calificación |
|------------------------|---|
| $S_t \cong 1$ | no susceptibles |
| $1 < S_t < 2$ | de baja susceptibilidad |
| $2 < S_t < 4$ | de susceptibilidad media |
| $4 < S_t < 8$ | susceptibles |
| $8 < S_t < 16$ | muy susceptibles |
| $S_t > 16$ | arcillas” rápidas” (<i>quick clays</i>) |