

Arcillas

1./ Arcillas e Ingeniería Civil

Las arcillas son, probablemente, los materiales geológicos más contradictorios desde el punto de vista de su utilidad en Ingeniería Civil. Son fuente inagotable de problemas de estabilidad en buen número de obras, pero constituyen por sí mismas un material de valiosas propiedades ingenieriles. Por otro lado, durante los últimos años, las arcillas han cobrado un interés especial en la medida que constituyen potenciales emplazamientos de repositorios de residuos nucleares de alta actividad o se considera su empleo en las barreras de ingeniería previstas para retardar o evitar la migración de radionucleidos y su interacción con la biosfera.

Para la mayor parte de actuaciones sobre el terreno, las propiedades que determinan el comportamiento de un suelo pueden determinarse a partir de ensayos estandarizados de laboratorio más o menos laboriosos. La mayor parte de estos ensayos se ocupan de la evaluación de parámetros tales como el contenido de humedad, permeabilidad, porosidad, densidad, forma y tamaño de las partículas (granulometría), estructura, plasticidad, capacidad de hinchamiento, etc. Sin embargo, hay situaciones en las que es importante comprender por qué un suelo se comporta de la manera que lo hace antes de poder aplicar una solución geotécnica adecuada a un problema. Para ello es necesario conocer el suelo no sólo desde el punto de vista macroestructural sino también del microestructural, esto es, su mineralogía, composición y las interacciones con los fluidos de su entorno, principalmente agua.

El caso de las arcillas es particularmente ilustrativo en este respecto. La clase dictada no tendrá en cuenta la caracterización macroestructural del suelo en el sentido anteriormente expuesto. Ello es cometido de otras lecciones de la asignatura y de otras asignaturas más especializadas. Tampoco pretende ser una exhaustiva revisión de las propiedades microestructurales de los suelos, algo que debe quedar para cursos de especialización. Tan solo son unas pinceladas que deben ayudar a entender mejor las

complejas interacciones entre los diferentes elementos de un suelo arcilloso (partículas sólidas, agua y electrolitos) y sus implicaciones macroscópicas.

En la clase que nos ocupa omitiremos cualquier comentario referente al enlace químico, dado por sabido al ser objeto de clases anteriores y nos centraremos en primera instancia en algunos aspectos terminológicos de carácter general, para pasar a continuación a describir desde un punto de vista cristalquímico las arcillas.

2./ Terminología

El término *arcilla* puede ser empleado desde puntos de vista muy diversos: 1) En sentido petrográfico (como un tipo de roca en sí misma); 2) En un sentido mineralógico (aquél conjunto de minerales que comparten unas características químico-estructurales características); 3) En un sentido granulométrico (referido a la fracción de una roca en la que el tamaño de sus granos constituyentes satisface un determinado rango de medida.

En general, el término arcilla se aplica a un material natural, terroso, de tamaño de grano fino y que muestra plasticidad* cuando es mezclado con una cierta proporción de agua. Su composición química está caracterizada por la presencia de Si, Al y H₂O, junto a cantidades variables de Mg, Mn, Fe, Ca, Na y K, principalmente.

Es un término que no posee connotaciones genéticas, esto es, no nos indica nada respecto del origen de la roca (continental o marino, sedimentario o hidrotermal, etc.).

Desde el punto de vista granulométrico, un material se considera arcilla si, de acuerdo a la clasificación de Wentworth[†], el tamaño de grano de sus partículas constituyentes es inferior a 1/256 mm (4 μm). Sin embargo, existe la tendencia a considerar los 2 μm como límite superior al tamaño arcilla dado que la experiencia ha demostrado que los minerales de la arcilla se concentran en la fracción granulométrica de 1-2 μm (quedando los minerales no arcillosos en la fracción mayor a esta medida) y porque parece ser el tamaño máximo en el que una partícula se puede mantener suspendida coloidalmente.

Hay que destacar el hecho de que las clasificaciones granulométricas no nos ayudan a caracterizar el tipo de roca en tanto que la composición o la mineralogía de la

misma no participa en su catalogación. En este sentido, es ilustrativo considerar el caso de los fangos carbonatados. Son sedimentos, en general marinos, formados casi exclusivamente por granos de carbonato cálcico de tamaño inferior a las 4 μm (micrita), por lo que en el sentido granulométrico han de considerarse arcillas o arcillitas si se encuentran más o menos compactados. Desde el punto de vista químico o mineralógico, la denominación más propia de estas rocas es caliza.

El pequeño tamaño de los cristales de arcilla entrañó durante muchos años una barrera infranqueable al conocimiento de estos materiales dado que las técnicas de caracterización y análisis se restringía al uso del microscopio petrográfico (cuyo poder de resolución tan solo alcanza las 2 - 4 μm) o métodos indiscriminados. Con el descubrimiento de los rayos X, a finales del siglo pasado, y el desarrollo de los primeros difractómetros de rayos X, se empezaron a desvelar los misterios de tales materiales. Pero es el desarrollo de los primeros microscopios electrónicos, en la década de los años 30 en que se alcanzan los avances más significativos.

En la actualidad, la combinación de técnicas de análisis (DRX, SEM-EDS, WDS, FTIR, ATD-TG, Raman, etc.) permite la realización de caracterizaciones químico-estructurales muy precisas sobre partículas tan pequeñas como son los cristales individuales de arcilla, si bien estamos todavía lejos de conocer el complejo entramado físico-químico que gobierna las interacciones agua-arcilla.

El término *alofana* hace referencia a un material tipo gel (no cristalino y fuertemente hidratado), de composición variable aunque dominada por Si y Al y que, en general es el precursor químico de los minerales de la arcilla.

Una *pizarra* es una roca sedimentaria de tamaño de grano fino, terrosa y con una laminación característica formada como resultado de la compactación o por la actuación de esfuerzos tectónicos. El laminado es debido a la orientación preferencial de los minerales de la arcilla, que suelen tener hábitos (morfologías) tabulares y prismáticos.

Una *arcillita* es una roca de tamaño de grano fino, masiva y, a veces, endurecida y resistente. Difiere de una pizarra por ser masiva y no laminada y de una arcilla por ser

más dura. De acuerdo a la clasificación de Wentworth, las arcillitas englobarían tanto a las arcillas ($\varnothing < 4 \mu\text{m}$) como a los limos ($4 < \varnothing < 64 \mu\text{m}$).

Los términos *lutita* y *pelita* son equivalentes y su diferencia estriba en que son palabras derivadas de una raíz latina (lutita) o griega (pelita). Desde el punto de vista granulométrico, se trata de rocas más o menos consolidadas en las que hay una proporción variable de partículas de tamaño de grano limo y arcilla. Una lutita no consolidada puede recibir los nombres tales como *barro*, *fango*, *lodo*, o *cieno*.

El término *marga* es muy utilizado por los geólogos para referirse a un conjunto de materiales terrosos, sueltos o consolidados, formados por una íntima mezcla de minerales de la arcilla (35-65 %) y carbonato cálcico (65-35 %).

Se conoce como *arcilla sensible* a aquella arcilla que se transforma en un fluido viscoso cuando es remoldeada. Esta propiedad se denomina sensibilidad de la arcilla y todas ellas la presentan con mayor o menor intensidad. El origen de esta sensibilidad es variado pudiendo ser textural (fábrica metaestable), químico (pérdida de cemento, tixotropía, meteorización, lavado de cationes y/o sales, cambios en la relación de cationes mono y divalentes, oxidación etc.), o combinaciones entre ellos. La historia geológica particular de cada arcilla es importante a la hora de evaluar la importancia relativa de cada uno de los factores enumerados anteriormente.

El término *suelo* posee una interpretación contextual bastante variada. Para un geólogo, el suelo es el regolito[‡] meteorizado presente en la superficie terrestre y que constituye la base de la vegetación. Para un edafólogo, el suelo es el material no consolidado que se encuentra en la superficie terrestre, esté meteorizado o no, contenga vegetación o no. Los edafólogos suelen estudiar los suelos mediante su división en horizontes independientes del lecho rocoso infrayacente. Por último, un ingeniero civil tiende a separar los materiales de la corteza en dos grupos: *roca* y *suelos*. La roca es todo aquel material que, de una manera característica se presenta duro y consolidado.

Un suelo, de acuerdo a Terzaghi y Peck[§] es '*un agregado natural de granos minerales que pueden ser separados mediante métodos tan delicados como la agitación en agua*'. Cualquier material suelto de la corteza terrestre, independientemente de su

granulometría, composición, contenido de materia orgánica, etc. es un suelo para un ingeniero y, en este sentido, el término arcilla suele tener un significado granulométrico para el mismo.

Otros aspectos terminológicos particulares serán considerados más adelante.

3./ Cristaloquímica de las arcillas

La cristaloquímica es la parte de la mineralogía que se encarga de relacionar la estructura cristalina de los minerales con la composición química que estos poseen y las propiedades que de ello se derivan.

Las arcillas pertenecen a una clase particular de minerales denominados silicatos. Los silicatos son, desde un punto de vista práctico, el conjunto de minerales de mayor importancia de la naturaleza puesto que constituyen el 25 % de los minerales conocidos y cerca del 40 % de los más corrientes. Si se hace un promedio del porcentaje en peso de los principales elementos de la corteza terrestre vemos que el 46.6 % es oxígeno, el 27.72 % silicio, el 8.13 % aluminio, el 5.0 % hierro, el 3.63 % calcio, el 2.83 % sodio, el 2.59 % potasio y el 2.09 % magnesio, es decir que las arcillas están hechas de los mismos elementos químicos que la propia corteza terrestre. Ello es lógico pues las arcillas no son más que una de las etapas en el devenir de los elementos a lo largo de los ciclos geológicos.

3.1./ Algunas ideas básicas

Todos los silicatos están caracterizados por la presencia de una unidad estructural fundamental, cuya forma idealizada es un tetraedro. Este tetraedro está constituido por 4 átomos de oxígeno rodeando 1 átomo de silicio. Como quiera que la valencia de los átomos de silicio en los silicatos es 4+ y la del oxígeno 2-, cada unidad estructural tetraédrica posee un déficit de carga negativo de 4 cargas: $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Las diferentes formas de combinación de estos tetraedros entre sí y con otros iones da lugar a la formación de los 6 grupos de silicatos existentes: *nesosilicatos*, *sorosilicatos*, *ciclosilicatos*, *inosilicatos*, *filosilicatos* y *tectosilicatos*.

Los minerales de la arcilla pertenecen al grupo de los filosilicatos, o silicatos en hojas, dada la morfología característica que suelen presentar estos minerales: hábitos tabulares y una exfoliación basal perfecta. Antes de describir su estructura de forma detallada, vale la pena indicar algunos aspectos terminológicos importantes.

- **Plano atómico** (plane): Se dice de aquella superficie que contiene alineaciones de átomos
- **Hojas** (sheets): Conjunto de planos atómicos definidos por la presencia de unidades estructurales básicas. Por ejemplo, una hoja tetraédrica es aquella definida por dos planos de átomos (uno en la base y otro en el ápice) correspondientes a tetraedros unidos lateralmente a lo largo de grandes distancias.
- **Capas ó Láminas** (layer): Apilamiento de varias hojas.

La estructura de todos los filosilicatos puede entenderse a partir de la combinación de hojas tetraédricas (T) y octaédricas (O). Tanto los tetraedros como los octaedros que constituyen estas capas son poliedros idealizados, es decir, no existen en la realidad pero su dibujo nos ayuda a visualizar mejor la estructura. Sin embargo, los átomos de silicio y oxígeno así como los respectivos cationes y aniones en las hojas tetraédricas y octaédricas sí están unidos (coordinados) mediante enlaces covalentes, energéticamente muy fuertes.

Una hoja tetraédrica está constituida por una disposición bidimensional de tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$, yaciendo sobre una de sus caras y compartiendo 3 de los 4 oxígenos que poseen. El plano que contiene los tres oxígenos de la cara sobre la que yace el tetraedro recibe el nombre de **plano basal** mientras que el cuarto oxígeno se denomina **apical** y se encuentra desplazado una cierta distancia sobre el plano basal (4.63 \AA)^{**}. Suponiendo que en la hoja tetraédrica solo entre silicio^{††}, la fórmula ideal de la misma sería $n[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$. La disposición de los tetraedros en la hoja es tal que quedan libre en la misma unos huecos de forma hexagonal. En el centro de esas cavidades y a una altura correspondiente a la de los oxígenos apicales se ubican grupos OH. Cualquier catión externo que se enlace con la hoja tetraédrica lo hará con dos oxígenos y el OH que quedan por coordinar. El triángulo formado por los dos oxígenos y el OH es casi

igual al correspondiente a la cara triangular de un octaedro XO_6 (donde X es, en general Mg o Al) con lo que es posible enlazar con la hoja tetraédrica una nueva hoja de octaedros abatidos sobre una de sus caras (que será la formada por los 2 oxígenos y el OH), unidos lateralmente (capa TO).

Para entender mejor la geometría de la hoja octaédrica y como se combina esta con la hoja tetraédrica, hemos de hacer algunas consideraciones sobre otro grupo de minerales importantes: los hidróxidos.

La estructura de muchos hidróxidos y en particular la de dos de ellos, la brucita, $Mg(OH)_2$, y la gibbsita, $Al(OH)_3$, se caracteriza por estar constituida por una serie indefinida de octaedros abatidos sobre una de sus caras. En los vértices de cada octaedro se encuentran grupos OH, en la cantidad de 6 por cada octaedro. Cuando el catión coordinado con los OH es divalente (caso de la brucita), cada hidroxilo es compartido por 3 octaedros por lo que la carga equivalente de cada OH es de $-1/3$. El balance de cargas para cada octaedro en el caso de que este corresponda a un catión divalente es:

$$6 \times \left(-\frac{1}{3}\right) + 2 = 0$$

con lo que la estructura es eléctricamente neutra. Esta es una condición *sine qua non* para que un sólido cristalino sea estable.

En el caso de que el catión del octaedro sea trivalente (p. ej. el caso de la gibbsita), para mantener la neutralidad de cargas es necesario que 1 de cada 3 posiciones catiónicas quede desocupada. A efectos de la compartición de OH entre tetraedros eso quiere decir que cada hidroxilo será compartido por 2 octaedros y no 3, y la carga equivalente de cada hidroxilo pasa a ser de $-1/2$. El balance de cargas resulta entonces:

$$6 \times \left(-\frac{1}{2}\right) + 3 = 0$$

La similitud estructural existente entre filosilicatos e hidróxidos no es resultado de la casualidad. Se ha comprobado experimentalmente que los embriones cristalinos de

la mayor parte de los minerales de la arcilla son hidróxidos que evolucionan hasta dar, superados unos ciertos condicionantes cinéticos, verdaderos filosilicatos.

La hoja octaédrica de los filosilicatos suele denominarse hoja de brucita o de gibbsita en función del tipo de catión (di o trivalente) que ocupa el centro de cada octaedro y, de hecho, constituye la primera gran dicotomía que puede establecerse entre los diferentes filosilicatos. Cuando cada grupo OH de la hoja octaédrica de un filosilicato está rodeado de tres cationes, se dice este es *trioctaédrico* y los cationes que ocupan los huecos octaédricos son *divalentes*. Cuando, por otro lado, cada OH es rodeado por sólo 2 cationes, el filosilicato se denomina *dioctaédrico*, siendo los cationes *trivalentes*.

Antes de proceder a la descripción de las diferentes estructuras de los principales filosilicatos, es interesante ver como se produce el enlace entre las hojas tetraédrica y octaédrica, para alcanzar el necesario equilibrio de cargas.

Antes veíamos que en el centro de cada hueco hexagonal de la hoja tetraédrica y a una altura correspondiente a la de los oxígenos apicales, se encuentran grupos OH. La unión de la hoja tetraédrica y octaédrica se verifica mediante el OH de la cavidad hexagonal y la compartición entre octaedro y tetraedros de 2 oxígenos apicales. Es decir, que del octaedro ideal de los hidróxidos, son substituidos dos OH por oxígenos. Los octaedros se disponen abatidos sobre una de sus caras y el balance de cargas se realiza de la siguiente manera. En el caso de que el catión sea divalente (estructura trioctaédrica), cada OH es compartido por 3 octaedros con lo que la valencia equivalente de cada uno de ellos es $-1/3$. Como quiera que cada octaedro solo tiene 4 OH, la carga total de los vértices del octaedro ocupados por OH es $-4/3$. Los dos vértices restantes del octaedro están ocupados por los oxígenos compartidos de la hoja tetraédrica. Si recordamos la fórmula de la hoja tetraédrica ($n[\text{Si}_2\text{O}_5]^{2-}$) vemos que a cada oxígeno apical le corresponde una carga equivalente tetraédrica de -1 . Ahora bien, cada uno de los oxígenos apicales es compartido a la vez por tres octaedros por lo que la carga equivalente tetraédrica ha de ser dividida por 3. La carga total de los oxígenos apicales será entonces $-2/3$. El balance neto de carga en el conjunto de hojas tetraédrica y octaédrica es:

$$\left(-\frac{4}{3}\right) + \left(-\frac{2}{3}\right) + 2 = 0$$

Si en lugar de ser un catión divalente, se tratara de un catión trivalente, una de cada tres posiciones catiónicas estaría libre para mantener la neutralidad de cargas.

Todos los enlaces establecidos entre oxígeno, OH y cationes, tanto en la hoja tetraédrica como en la octaédrica son de tipo covalente y no pueden ser rotos con facilidad, salvo que se suministre una elevada energía para deshacer el enlace. Los filosilicatos y, en particular, los minerales de la arcilla, son extraordinariamente estables bajo condiciones ambientales.

Los grupos OH presentes en la estructura de los filosilicatos suelen agruparse bajo el nombre de agua estructural. Esta 'agua' sólo puede ser movilizad a temperaturas muy elevadas y cuando es extraída de la estructura el filosilicato se desestabiliza, transformándose en otro mineral.

Los minerales de la arcilla raramente desarrollan cristales macroscópicos. Su tamaño habitual es del orden de 1 a 2 μm de longitud y un grosor que puede oscilar entre los 10 y los 200 Å . Cuando las partículas son tan pequeñas, las fuerzas que actúan sobre su superficie pasan a tener un muy importante papel a la hora de entender su comportamiento.

3.2./ Isomorfismo

Se denomina isomorfismo a aquella propiedad que presentan determinadas sustancias mediante la cual se produce la substitución, en proporciones variables, de determinados elementos químicos que la componen. Los filosilicatos pueden presentar elevados grados de solución sólida por lo que el balance de carga particular de cada mineral ha de establecerse mediante análisis detallados.

Una de las propiedades más destacables derivada a partir del diferente grado de substitución que pueden presentar las arcillas es la denominada *capacidad de intercambio catiónico* o CEC. Como hemos dicho anteriormente, las arcillas suelen presentar un grado variable de isomorfismo el cual puede afectar tanto a la hoja

tetraédrica como a la octaédrica. En sustancias de bajo índice de cristalinidad, las vacantes también pueden jugar un papel significativo en este respecto. Las sustituciones suelen implicar cambios de Si por otros cationes de menor valencia (Al) o del Al de la hoja octaédrica por cationes divalentes. Ello conduce a la circunstancia de que casi todas las arcillas poseen un déficit estructural de carga positiva, es decir, sus cristales suelen estar cargados negativamente. Cualquier estructura cristalina puede soportar un limitado desequilibrio eléctrico pero, sobrepasado un cierto umbral, la estructura deja de ser viable y colapsa. Para compensar ese desequilibrio de cargas, las arcillas incorporan cationes a su estructura en los huecos dejados entre los apilamientos de capas TO o TOT. A veces esos cationes pueden ser fácilmente movilizados o intercambiados por otros presentes en una solución acuosa. Se denominan entonces cationes de cambio y la CEC es la medida de la capacidad de intercambio catiónico que posee una arcilla, que suele medirse en $\text{meq}^{\pm\pm}/100$ gr de arcilla. Cuando esos cationes interlaminares no pueden ser movilizados porque, en función del tipo de sustitución, se establecen enlaces más fuertes con la estructura, se habla de micas y no de arcillas.

Aquellas arcillas más descompensadas eléctricamente serán las que posean mayor valor en su CEC. Así mismo, no todos los cationes quedan igualmente retenidos dado que es función de la energía de enlace que se establece entre el catión y la estructura, lo que a la vez está relacionado con el lugar donde se produce la sustitución isomórfica (hoja tetraédrica u octaédrica).

Los cationes en cualquier solución acuosa tienden a estar solvatados (rodeados de un determinado número de moléculas de agua), por lo que al incorporarse a la arcilla también se incorpora una cierta cantidad de agua a la misma. Así mismo, la propia molécula de agua posee una estructura polar y dado que las partículas de arcillas actúan como condensadores planos cargados negativamente, tienden a atraer las moléculas de agua que son dispuestas de manera ordenada en la superficie de las partículas.

Los iones en la proximidad de las partículas de arcilla también poseen una disposición condicionada por la presencia de fuerzas electrostáticas operando en sus inmediaciones. La distribución de los mismos suele explicarse a partir de modelos de complejación superficial del que la doble capa difusa es un ejemplo. Este modelo, sin entrar en excesivos detalles, considera que la densidad catiónica decrece

exponencialmente con la distancia a la superficie de la partícula de arcilla, hasta alcanzar un nivel de referencia que es el de la concentración de la solución acuosa no afectada por la carga superficial de la partícula. Este modelo no refleja otra cosa que el efecto de dos fuerzas actuando en sentido contrario: por un lado la atracción electrostática y por otro la tendencia de los cationes a difundirse para tener así concentraciones iguales en toda la solución.

3.3./ Clasificación sistemática

Los dos puntos anteriores son las bases fundamentales con las que entender la mayor parte de propiedades que presentan las arcillas. Pasaremos ahora a describir las diferentes configuraciones estructurales.

Los filosilicatos estructuralmente más sencillos son aquellos que consisten en el apilamiento indefinido de capas formadas por hojas tetraédricas (T) y octaédricas (O). Los dos minerales característicos de este tipo de filosilicatos son la *antigorita* (trioctaédrica) y la *caolinita* (dioctaédrica). Las capas TO son eléctricamente neutras pero los enlaces entre las mismas se verifican mediante enlaces de Van der Waals (débiles) al ser anisótropa la distribución de la energía de enlace dentro de las hojas. La baja energía de enlace de las uniones de Van der Waals es responsable de la exfoliación perfecta que presentan todos los filosilicatos.

Cuando cada hoja octaédrica está rodeada de dos hojas tetraédricas, tenemos un nuevo miembro del grupo de los filosilicatos, representado por el *talco* (trioctaédrico) y la *pirofilita* (dioctaédrico). Los bocadillos TOT se enlazan entre sí mediante fuerzas de Van der Waals.

Si dentro de la hoja tetraédrica el Si es substituido por Al, se crea un déficit de carga negativo en la estructura. Si se substituye 1 átomo de Si de cada 4, el equilibrio de cargas de la estructura se mantiene mediante la incorporación de cationes monovalentes que ocupan el hueco dejado entre dos capas TOT. De esta manera la estructura se mantiene más fuertemente unida y la dureza del mineral crece. Estos minerales se denominan micas reales y cuando el catión monovalente es K, tenemos la *flogopita*

(trioctaédrica) y la *moscovita* (dioctaédrica). Cuando el catión monovalente es Na, tenemos la *paragonita* (dioctaédrica).

Si la mitad de los átomos de Si de la hoja tetraédrica es substituida por Al, el déficit de carga generado es mayor y los cationes intercapa pasan a ser divalentes. Este conjunto de minerales se denomina micas frágiles, dada su mayor dureza y fragilidad. *Xantofilita* (trioctaédrica) y *margarita* (dioctaédrica) serían un ejemplo de este grupo. Tanto en el caso de los iones divalentes como en el anterior de los monovalentes, estos ocupan posiciones interlaminares fijas, no intercambiables y su estructura es eléctricamente neutra.

Si la substitución del Si tetraédrico por Al se produce al azar, es posible que no se pueda formar una estructura ordenada tipo mica, con todas las posiciones de cationes monovalentes intercapa ocupadas, pero algunas de ellas quizá sí. Estos minerales poseen propiedades intermedias de mica y arcilla y se conocen como el grupo de la *illita*.

El importante grupo de las *cloritas* consiste en capas TOT mezcladas con capas de brucita o de gibbsita y el de las *esmectitas*, del que nos ocuparemos a continuación, se deriva de la inserción de una o varias capas de moléculas de H₂O (y cationes) entre cada capa TOT.

En la naturaleza, no obstante, es relativamente raro encontrar estas especies minerales como fases estrictamente puras. Dado el tipo de estructura que presentan los filosilicatos, es muy habitual que se formen lo que se denominan *interestratificados* de filosilicatos, es decir paquetes de grosor variable formados por fragmentos de estructura asimilable a la de diversas micas y/o arcillas. Se trata en realidad de un mezcla de minerales y ello condiciona que las propiedades del conjunto sean mixtas y no la de las fases puras. Por ejemplo, es normal que la esmectita no se encuentre en forma pura sino que en realidad sea un interestratificado de la fase illita con la fase esmectita. La expansividad del conjunto, por ilustrar un ejemplo, es inferior a la que tendría si fuera una esmectita pura.

3.3.1./ El grupo de la esmectita

El término esmectita deriva del griego ‘smectos’ (αμζγμα) cuyo significado original es jabón puesto que la saponita fue el primer mineral de la arcilla descrito como esmectita. Se trata de un conjunto de minerales altamente plásticos, expansivos y que son utilizados en buen número de aplicaciones ingenieriles e industriales. Desde el blanqueo de cervezas y vinos, a lodos de sondeo, material impermeabilizante, de relleno, de barrera, etc.

El término *bentonita* se aplica a aquella roca constituida fundamentalmente por minerales de la arcilla expansivos (montmorillonita, saponita, nontronita, vermiculita, etc.) si bien pueden contener fracciones más o menos variables de otros minerales. La *Tierra de Fuller* puede considerarse sinónimo de bentonita.

Estructuralmente, las esmectitas son análogas al talco y la pirofilita si bien se producen extensas substituciones isomorfas (hasta un 15% del Si tetraédrico puede ser substituido por Al) que hacen que el déficit de carga de estos minerales sea el mayor de entre los minerales de la arcilla. Su CEC es también de las más elevadas (80-150 meq/100 g), resultado de la incorporación masiva de cationes entre las capas TOT de la estructura.

La *montmorillonita* es la esmectita dioctaédrica más abundante mientras la *saponita* lo es de las trioctaédricas

La superficie específica de las esmectitas es enorme. La superficie primaria (la superficie excluyendo las zonas interlaminares) oscila entre 50 y 120 m²/g mientras que la superficie específica secundaria (aquella expuesta cuando la estructura se expande y el agua puede penetrar en la región interlaminar) puede alcanzar valores de hasta 840 m²/g.

3.4./ Un pequeño ejemplo

El estudio de las propiedades químicas de los materiales arcillosos es fundamental para entender muchos de los procesos que suceden en él. Los deslizamientos, licuefacciones del terreno, etc. son debidos en muchas ocasiones a la

actuación de fuerzas que pueden ser consideradas pequeñas cuando se analizan desde un punto de vista macroscópico pero que su contribución global es significativa sobre todo si estas fuerzas actúan, como decíamos antes, en una miriada de cristales de muy pequeño tamaño.

El fenómeno de la floculación en las arcillas es harto conocido. De todos es conocido que las arcillas depositadas en aguas saladas (marinas o salobres) tienden a tener una estructura floculada mientras que aquellas que lo hacen en ambientes de agua dulce (ríos, lagos, etc.) dan texturas defloculadas. En experimentos de laboratorio es fácil comprobar que la adición de un electrolito a una suspensión de arcilla tiene el efecto de flocular la suspensión. ¿Cual es la justificación de este fenómeno? La explicación hay que buscarla en interacciones de tipo electrostático. Hemos dicho antes que casi todas las arcillas poseen un exceso de carga negativa por lo que diversas partículas de arcilla en suspensión en una solución tenderán a repelerse electrostáticamente al estar cargadas de igual manera. Cuando decanten, lo harán interactuando lo menos posible con las adyacentes, dando una textura defloculada. Cuando en una solución hay electrolitos, los iones de la misma pueden actuar como núcleos aglutinantes de las partículas en suspensión, coalesciendo las partículas hasta dar una textura floculada. En este sentido los cationes atenúan las fuerzas de repulsión entre partículas permitiendo su unión. Las fuerzas de unión entre partículas son mayoritariamente de Van der Waals. A veces, cuando se ha producido la sedimentación en ambientes muy salinos, la estabilidad de la masa de arcilla puede incrementarse al precipitar pequeños cristales de sales que actúan a modo de cemento entre las partículas de arcilla.

Sin embargo, una arcilla floculada puede deflocular si pierde el agente floculante, es decir, aquellos iones que mantienen unidas las diferentes partículas. La pérdida de los agentes floculantes, si estos son iones, puede darse si se produce el lavado de la arcilla por aguas diluidas, como pueden ser las aguas de lluvia. En este caso, la estabilidad de la masa de arcilla puede mantenerse de una manera meramente mecánica pero su resistencia al corte puede haberse visto seriamente modificada y cualquier pequeña perturbación puede inestabilizarla.

* Por plasticidad entendemos aquella propiedad de un material humedecido mediante la cual se deforma al serle aplicada una presión, conservando la deformación una vez esta ha cesado.

† Wentworth, C.K. (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments; J. Geol. 30, 377-392

‡ Regolito es un término general que hace referencia al manto de materiales rocosos fragmentarios, generados in situ o transportados, y de composición variada. Constituye casi toda la superficie terrestre, cubriendo el substrato rocoso.

§ Terzaghi, K. y Peck, R. (1948) Soil mechanics in engineering practice' Wiley, New York.

** 1 Å equivale a 10^{-10} m ó 0.1 nm.

†† En realidad, junto con el Si, suelen entrar proporciones más o menos importantes de otros cationes, principalmente Al, Ti y, en ocasiones excepcionales, Fe^{3+} . Este fenómeno de substitución se denomina isomorfismo y está fuertemente controlado por el tamaño de los iones que participan de la substitución.

‡‡ n° de equivalentes= (peso del elemento/peso atómico) x valencia