Bol. Soc. Geol. Mexicana, t. XXVII, n. 2, p. 49-92, fig. 1, tablas 1-9 (1964)

LAS ARCILLAS. I. CLASIFICACION, IDENTIFICACION, USOS Y ESPECIFICACIONES INDUSTRIALES

Liberto de Pablo *

RESUMEN

Tradicionalmente, las arcillas han sido consideradas como materia prima cerámica, escasamente realizando su importancia geológica y económica en una variedad de industrias que ha resultado en una amplia y compleja tecnología, dispersa y con frecuencia ambigua. En nuestro medio, su estudio ha sido impulsado en baja escala tanto en sus aspectos científico como geológico y tecnológico con lo que, actualmente, materiales locales se usan en la industria cerámica pero, aún ella y otras muchas, dependen en buen grado de material importado que se piensa pueda ser localizado en México o producido por beneficio de aquellos disponibles. Más aún, los conocimientos geológicos, mineralógicos o tecnológicos son escasos ocurriendo con frecuencia el hecho de que una arcilla se usa porque 'trabaja" en su uso final sin conocer mucho sus características. De aquí que se estime conveniente la divulgación de algunos conceptos elementales que puedan ayudar tanto al geólogo y minerálogo como al técnico.

El autor comienza discutiendo el origen de las arcillas y clasificándolas en primarias y secundarias para pasar a distinguir entre caolines, barros plásticos, montmorrillonitas y otras establecidas por la teconología, indicando las propiedades características de cada grupo. Se presenta la clasificación de los minerales arcillosos basada en el concepto cristalográfico de la unidad estructural que distingue entre minerales dioctahédricos y trioctahédricos y grupos 1:1, 2:1 (2:1):1 así como un sistema que por difracción de rayos X y técnicas simples de adsorción, análisis químico y tratamientos térmicos simples permite la clasificación mineralógica completa. Otras técnicas analíticas son comentadas. Finalmente, el autor discute el empleo y características de las arcillas en las industrias cerámica, de papel, hule, petróleo, síntesis orgánicas, fundición, ingeniería civil y otras varias.

INTRODUCCION

Arcilla es una asociación de silicatos complejos hidratados de aluminio de fino tamaño de partícula que, húmeda, es plástica y seca, dura y que-

* Investigador Titular. Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México.

bradiza. Está abundantemente distribuida en la Naturaleza y es constituyente importante de la corteza terrestre.

Para muchos, arcilla tiene el significado clásico de ser un material "cerámico" y por ende, constituyente básico de las piezas cerámicas, una antigua forma de expresión de la humanidad. Otros, realizan su versatilidad y amplio y fundamental empleo en papel, cerámica, hule, refractarios, plásticos, insecticidas, adhesivos, petróleo, síntesis orgánicas, decolorización de alimentos y productos químicos, construcción, medicina, etc., que han transformado lo que era una simple operación minera en una tecnología compleja y especializada.

La literatura sobre arcillas es abundante y compleja pero escasa y ambigua en el aspecto práctico de su industrialización, particularmente en México. Ello se debe, posiblemente, a que sus propiedades, que dependen de su mineralogía, estado físico e historia geológica, pueden modificarse con relativa facilidad y sus amplios usos, son función de sus propias características y de las que resultan al asociarse con otras substancias. En cualquier caso, el resultado es una tecnología compleja, especializada, de escasas especificaciones, en la que la importancia geológica o la aceptación industrial es decidida por un criterio complejo individual de cada caso, por comparación con otro mineral o, como ocurre generalmente, porque "trabaja" en su aplicación final.

México es abundante en arcillas. Sin embargo, su rápido y reciente desarrollo industrial ha implicado una exploración y explotación más práctica que técnica que si bien ha substituido apreciablemente anteriores importaciones, no ha resuelto todavía todos los problemas de la industria. Por otra parte, la geología y mineralogía de arcillas o su significado en procesos geológicos han sido escasamente desarrollados. De aquí que sea recomendable la divulgación de un criterio básico elemental sobre algunos aspectos de su mineralogía y tecnología.

La presente publicación es parte de una serie y cubre los aspectos de clasificación, identificación y empleo industrial. Su propósito es de divulgación y es producto de la experiencia del autor, de conversaciones con especialistas y de la compilación de datos de publicaciones y catálogos técnicos.

CLASIFICACION DE LAS ARCILLAS

En todo estudio sobre arcillas, geológico o tecnológico, el primer paso es la clasificación e identificación del mineral. Siendo tan semejantes megascópicamente pero tan diferentes en sus características y propiedades, un mejor

aprovechamiento y algunos fracasos pudieran evitarse con una interpretación mineralógica adecuada.

Arcilla es una asociación de minerales arcillosos (silicatos complejos hidratados de aluminio), de pequeño tamaño de partícula originada por la alteración hidrotermal de rocas ígneas (granitos, riolitas, dioritas, basaltos) que, bajo condiciones propias de presión, temperatura, acidez, etc., desilicifican a minerales arcillosos sílice libre y alcalies que se lixivian según la conocida reacción:

$$\underset{\text{feldespato}}{K_2O.Al_2O_3.6SiO_2} \xrightarrow[\Delta\,.\,P]{H_2O} \underset{\text{caolinita}}{Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O} + \underset{\text{sílice}}{4SiO_2} + \underset{\text{potasa}}{2KOH}$$

La alteración es hipogénica si es debajo de la superficie y epigénica, si en ella. La naturaleza de la roca y el proceso de alteración fijan las características de los minerales que se forman, definiendo su estructura y composición química. Así, rocas o condiciones ácidas producen minerales como caolinita mientras que medios básicos forman montmorrillonita o talco. En general, el origen de la mayor parte de los minerales arcillosos ha sido establecido pero, para los propósitos actuales, baste indicar que se forman a temperaturas menores de 450°C y presiones elevadas.

Las arcillas, en su estado natural, están compuestas de uno o, como es el caso general, varios minerales arcillosos y de otros minerales como cuarzo, feldespatos, plagioclasas, piroxenas, rutilo, limonita y materia orgánica. Sus propiedades resultan de su origen, mineralogía y tratamientos posteriores a su formación que agregaron nuevos minerales, transformaron los ya existentes o, simplemente, los alteraron mecánicamente.

La clasificación de las arcillas, desde un punto de vista geológico, es simple. Fundamentalmente, se distingue entre primarias o residuales, casi siempre de origen hipogénico, que permanecieron en el mismo lugar de su formación y secundarias, que fueron acarreadas a lugares diferentes al de su origen. Entre éstas se diferencian (1) fluviales, depositadas por ríos y siendo generalmente depósitos pequeños de baja calidad; (2) lacustres, asentados en lagos y estando en capas uniformes de buena calidad; (3) marinas, que son más uniformes que las anteriores; (4) en deltas, que son arenosas y de composición irregular; (5) glaciales, formadas por la acción de grandes masas

de hielo sobre rocas cristalinas y que no se han localizado en México y (6) eólicas.

Otra clasificación distingue entre caolines, bentonitas, hidromicas o ilitas y cloritas, según el grupo mineralógico dominante.

La clasificación más antigua, aceptada tradicionalmente por la industria y en geología de minerales no metálicos, y que en el último grado fija su valor económico, admite los siguientes tipos:

Caolín, Arcilla "China", Blanca o para Papel

Son arcillas residuales, in situ, originadas por alteración hidrotermal, hipogénica o epigénica, de rocas ígneas ácidas (granitos, dioritas, riolitas). Durante la alteración, feldespatos alcalinos son atacados por soluciones líquidas o vapores ácidos, a presiones y temperaturas moderadamente elevadas, para formar caolinita, sílice libre y alcalies solubles. La alteración también ocurre en condiciones atmosféricas.

Siendo depósitos primarios, su mineralogía es la derivada directamente de la roca original e incluye caolinita, cuarzo y mica, en proporciones que varían según el grado de alteración y que pueden llegar hasta 80 a 100% de caolinita, menos de 30% de cuarzo y menos de 10% de mica. Los yacimientos hipogénicos más conocidos tienen de 25 a 30 millones de años y se formaron en el Terciario, a finales del Oligoceno y principios del Mioceno.

La caolinita es de buena cristalización en placas hexagonales y fino tamaño de partícula. La arcilla es refractaria, cono pirométrico 33 a 35, bajo módulo de ruptura en verde (menor de 100 Kg/cm^2) análisis químico próximo al teórico de caolinita de 46.5SiO_2 y 39.6% Al_2O_3; acidez entre 4.5 y 6. Color blanco brillante si es de origen hipogénico o blanco opaco o crema si se formó por alteración epigénica. Brillo entre 65 y 88% (reflectómetro GE), color quemado blanco a crema, contracción al quemado de 8 a 12%, absorción al quemado de 10 a 20% y distribución de partícula de 80 a 100 menor de 10 micrones, 50 a 90 menor de 2 y 1 a 60 por ciento menor de 0.5 micrones.

Arcillas Plásticas, Bola o "Ball Clays"

Arcillas sedimentarias, de origen similar al de los caolines pero que, al contrario de éstos, fueron acarreados a lugares distintos al de su formación. Por el mismo acarreo pasaron por una selección que las hizo de fino tamaño de partícula y consiguientemente, más plásticas.

La mineralogía es la derivada de la roca original pero de mayor pureza por el proceso de acarreo que movió la fracción arcillosa ligera y dejó la no arcillosa pesada (clásticos de cuarzo, feldespato, roca sin alterar). Incluye caolinita (30–80%), hidromica y/o montmorrillonita (0–40%), cuarzo (0—50%), materia orgánica (0-8%) y escasos contenidos de feldespato, mica, rutilo y limonita. Su formación fue en el Terciario, durante el Eoceno, Oligoceno y Mioceno (20 a 50 millones de años).

La caolinita es de cristalización ordenada y/o desordenada, placas hexagonales irregulares o regulares y reducido tamaño (80 a 100 menor de 10 micrones, 55 a 95 menor de 3, 25 a 95 menor de 1 y 10 a 80 por ciento menor de 0.5 micrones). La materia orgánica es fina, coloidal o gel recubriendo las partículas de arcilla y contribuyendo notoriamente a mejorar su plasticidad. Son más silicosas que los caolines, teniendo desde 50 hasta 65 de SiO_2 y de 20 a 35% de Al_2O_3, con pequeños contenidos de alcalies, Fe_2O_3, TiO_2, etc. Su color natural es café obscuro, gris, crema o negro (43–45% G.E.) pero queman blanco, crema o gris con contracción alta (hasta 13%). Son muy plásticas, cono pirométrico de 30 a 33, menor que el de los caolines y desarrollan módulos de ruptura hasta 700 lb/pulg^2 en verde y de 400 a 8000 lb/pulg^2 en quemado.

Arcillas Refractarias

Son de alto cono pirométrico, con punto de reblandecimiento superior a los 1600°C y compuestas de caolinita con pequeñas cantidades de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, y óxido de hierro. Analizan de 40 a 60 SiO_2, 25 a 40 Al_2O_3, 1 a 5 Fe_2O_3, menos de 4 MgO y CaO y menos de 3% de alcalies. Según su aspecto megascópico, se distingue entre (1) arcillas duras o "flint", compactas a masas duras como rocas, de fractura concoidal, (2) plásticas, que fácilmente se desintegran en agua a una masa plástica y (3), pizarras o arcillas impuras compactadas a una masa lamelar sin fractura concoidal. Se formaron a finales del Paleozoico, durante el Devoniano, y en el Mesozoico, desde el Carbonífero al Cretácico, siendo su edad desde 300 hasta 100 millones de años.

Arcillas de Alta Alúmina

Son arcillas con contenidos de alúmina superiores a 39.6% y cuya mineralogía incluye hidratos de aluminio (gibsita, boehmita). Son de interés en las industrias de refractarios y cerámica.

Arcillas de Liga

Son plásticas, de fino tamaño de partícula, que mezcladas en pastas cerámicas o con otras arcillas más refractarias, proporcionan liga o unión entre las partículas para dar cuerpos resistentes y densos. También se usan con materiales no plásticos, arenas de cuarzo, para formar la mezcla moldeable de los moldes de fundición. Su composición es variable y su mineralogía incluye caolinita, desordenada o normal, montmorrillonita e hidromica, de fino tamaño de partícula.

Arcillas para Ladrillos

Arcillas impuras, de mediana plasticidad, composición y mineralogía variable, útiles para la fabricación de ladrillos. Generalmente no son de color blanco y contienen hasta 5% de alcalies, 12% de alcalinoterreos y 8% de óxido férrico.

Arcillas Montmorrilloníticas

Son aquellas en las que montmorrillonita es el componente principal. Se diferencia entre tierras de Fuller y bentonitas. Las primeras son montmorrillonitas magnésicas con poder de decoloración natural y las segundas, sódicas que aumentan su volumen con la absorción de flúidos, no decoloran y cálcicas que ni aumentan su volumen ni decoloran minerales. Su composición química incluye de 50 a 65 de SiO_2, 10 a 25 de Al_2O_3, hasta 4 de alcalies y 6% de alcalinoterreos. Se originan por alteración, en condiciones alcalinas, de roca volcánica (basaltos, vidrios) y algunas montmorrillonitas sódicas, por precipitación química de aguas marinas. Su principal uso industrial es en decoloración y desodorización en procesos químicos, lodos de perforación, síntesis orgánicas y fundido de metales.

Arcillas Haloisíticas

Arcillas en las que el principal componente es haloisita. De composición química semejante pero más plásticas, mayor contracción y diferente cristalización que los caolines, con frecuencia asociadas a emanaciones sulfurosas. Son de interés en las industrias de refractarios, cerámica y de catalizadores de arcilla.

Atapulgita

Arcillas en las que el componente mayor es el mineral atapulgita o paligorsquita, de textura fibrosa, origen hidrotermal o sedimentario, derivadas de piroxenas o anfíbolas; análisis químico de 50 a 65 SiO_2, 7 a 15 Al_2O_3, 5 a 15 por ciento MgO y escasos FeO, Fe_2O_3 y CaO. Es de gran interés en la preparación de arcillas activadas y catalizadores para usos diversos.

Otras Arcillas

Otras arcillas comunes son aquellas en que los componentes principales son hidrómica o ilita o alófano. No tienen gran aceptación en la industria y su empleo principal es en casos particulares de cerámica. Otras más contienen los minerales hectorita y sepiolita que, por ser tan escasos, no tienen mayor importancia industrial.

Se habrá observado que la clasificación anterior no es estricta sino que permite una amplia variación de criterio. Ello se discute más adelante junto con las características de los principales tipos de arcillas aceptados por la industria, que sirven de criterio para su clasificación, exploración y explotación. Es obvio que un mineral se consideraría dentro de estos tipos cuando por sí solo o por procesos simples económicos de beneficio califícase dentro de ellos.

CLASIFICACION DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

Se ha dicho en párrafos anteriores, que las arcillas están constituidas por una asociación de minerales arcillosos y es evidente que la clasificación de aquéllas está íntimamente ligada a la de éstos. Es entonces oportuno presentar una clasificación de los minerales arcillosos que contribuirá a comprender mejor su naturaleza.

La clasificación de los minerales arcillosos se basa en los tres criterios fundamentales que los definen: (1) el espesor de la unidad estructural, (2) su composición química y contenido iónico, y (3) su orden y simetría, que son consecuencia de su origen y de los procesos de metamorfismo posteriores a que estuvieron sometidos. La unidad estructural la forman tetrahedros de $[SiO_4]^{-4}$ que, en un mismo plano, unen tres de sus vértices para formar exágonos y dejan el cuarto vértice apuntando en una misma dirección. A esta capa, se asocia otra formada por dos planos de HO^- arriba y abajo

de un plano de Al^{+++}, con solamente 2/3 de las posibles posiciones ocupadas (capa dioctahédrica de gibsita) o, en su lugar, una capa similar en la que Al^{3+} ha sido substituido por Mg^{++} (trioctahédrica de brucita) con todas las posiciones satisfechas. Las capas tetrahédrica de siliceo y octahédrica de aluminio o magnesio se unen a manera de que oxígenos de los vértices libres de los tetrahedros reemplacen 2/3 de los oxhidrilos de los octahedros, dejando el resto de estos en el centro de exágonos formados por tetrahedros de $[SiO_4]^{-4}$, según se indica en la Fig. 1. El espesor, composición química y simetría de estas dos capas que forman la unidad estructural, rigen la clasificación de los minerales arcillosos.

En la Tabla I se presenta la clasificación de los minerales arcillosos. Se distingue entre di y trioctahédricos y entre los grupos 1:1 (*unidad estructural* es de una capa tetrahédrica por otra octahédrica con 7 angstroms de espesor) o de 7 angstroms, 2:1 o de 10 angstroms (dos capas tetrahédricas por una octahédrica) y de 14 angstroms o (2:1):1 (una capa 2:1 de talco por una octahédrica de brucita). Dentro de cada grupo, diferencias en la composición química debidas a la substitución catiónica (substitución de un ión por otro de radio comparable y carga idéntica, como Fe^{-} por Mg^{-}. $Mg^{++}_{(6)} + Si^{4+}_{(4)}$ por $Al^{3+}_{(6)} + Al^{3+}_{(4)}$, Si^{4-} por Al^{3-} o Fe^{3+} en la capa tetrahédrica; Al^{3+}, Mg^{++}, Fe^{++}, Fe^{3+}, Li^{+}, HO^{-}, F^{-} y Cl^{-} en la octahédrica y K^{+}, Na^{+}, Ca^{++}, Mg^{++}, Al^{3+} e H_3O^{-} entre las capas) permiten una clasificación más completa. Finalmente, diferencias en la asociación y simetría de capas distinguen entre minerales arcillosos polimorfos, si la composición es la misma, y minerales politipos y heteropolitipos si capas de diferente estructura se juntan por fuerzas electrostáticas.

La nomenclatura usada en la Tabla I puede, en algunos casos parecer extraña. Así, por fengita se entienden micas intermedias entre dioctahédricas tri y tetrasilícicas; bentonita potásica es un mineral de interestratificación desordenada de micas y minerales expandibles; clorita es la asociación de una capa de talco y una de brucita y septocloritas, son las variedades oxidadas de las ortocloritas.

Un examen simple de la Tabla I, indica que los minerales dioctahédricos 1:1 no admiten substitución iónica, al contrario de los trioctahédricos. Los dioctahédricos 2:1 expansibles admiten substitución y reemplazamiento, mientras que las micas, con capas sujetas por cationes grandes, no se expanden y son sumamente resistentes y los trioctahédricos 2:1 permiten abundante substitución y son los más complejos. Ello es importante en la exploración geológica, en la localización de yacimientos minerales y en el empleo

CLASIFICACION GENERAL DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

CARACTERISTICA	GRUPO	DIOCTAHEDRICOS: NOMBRE	DIOCTAHEDRICOS: COMPOSICION	DIOCTAHEDRICOS: POLITIPO	LUGAR DE LA CARGA	TRIOCTAHEDRICOS: NOMBRE	TRIOCTAHEDRICOS: COMPOSICION	TRIOCTAHEDRICOS: POLITIPO
2 capas 1 : 7 Å	Caolin ita *serpentinas*	Nacrita Dickita Caolinita Caolinita Halloisita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$ $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 4H_2O$ $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot 4H_2O$	Monoclínico 6 capas (parámetro 5 Å) Monoclínico 2 capas (parámetro 2 Å) Triclínico 1 capa (parámetro 1 Å) Monoclínico (capa desordenada en 2 y en 3 1 capa desordenada en 2 y en 3	1 capa hidratada	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$	3 2 capas Monoclínico 1 capa Ortorrombico 1 capa 1 y 6 capas Ortorrombica, 6 capas
3 capas 2 : 2 : 1 Å	Esmectitas 2 : 1	Montmorillonita Beidellita Nontronita Hectorita Saponita Sauconita Medmontita	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ $Al_{2-x}Mg_xSi_4O_{10}(OH)_2$ $Al_2Si_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Al_2Si_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ $Mg_{3-x}Li_xSi_4O_{10}(OH)_2$ $Mg_{3-x}\square_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Mg_{3-x}Al_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Mg_{1-x}Al_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Zn_{3-x}Al_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Cu_{3-x}Al_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$	Montmorillonita Beidellita Nontronita Hectorita Saponita Sauconita Medmontita	Montmorillonitas Beidellitas Nontronitas Hectoritas Saponitas Sauconitas Medmontitas	$Al_{2-x}Mg_xSi_4O_{10}(OH)_2$ $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ $Al_2Si_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ $Mg_{3-x}Fe_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$	Dioctaédrico $X > Y$, $Y \rightarrow O$ Octaédrico $X > Y$ Tetraédrico $Y > X$ Tetraédrico $Y < O5$ Tetraédrico $Y = 1$	Interestratificación y politipismo
3 capas 2 : 2 : 1 Å	Expandidas 2 :	Vermiculita Beidellita Nontronita Hectorita Saponita Sauconita Medmontita	$(Al,Fe)_{2-x}Mg_xSi_4O_{10}(OH)_2$ $Al_2Si_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Al_{1-x}(x)_2Si_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Mg_{3-x}Fe_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$	Interestratificación y politipismo				
	Fragilita-Mica	Brittlita	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$			Talco	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	

CARACTERISTICA	GRUPO	DIOCTAHEDRICOS: NOMBRE	DIOCTAHEDRICOS: COMPOSICION	DIOCTAHEDRICOS: POLITIPO	LUGAR DE LA CARGA	TRIOCTAHEDRICOS: NOMBRE	TRIOCTAHEDRICOS: COMPOSICION	TRIOCTAHEDRICOS: POLITIPO
					Octaédrica $X > Y$, $Y \rightarrow O$ Octaédrica $X > Y$	Hectorita Stevensita Saponita Pimelita Sauconita Medmontita	$Mg_{3-x}Li_xSi_4O_{10}(OH)_2$ $Mg_{3-x}\square_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Mg_{3-x}Al_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Mg_{1-x}Al_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Zn_{3-x}Al_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$ $Cu_{3-x}Al_xSi_{4-x}Al_xO_{10}(OH)_2$	
	Esmectitas Expandidas 2 :	Nontronita Hectorita Saponita Sauconita Medmontita	$Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot nH_2O$	Monoclínico 6 capas (parámetro 5 Å) Monoclínico 2 capas (parámetro 2 Å) Triclínico 1 capa (parámetro 1 Å) Monoclínico (capa desordenada en 2 1 capa desordenada en 2 y en 3	1 capa hidratada	Clinocloro Antigorita Lizardita Chamosita Grenalita Cloritoide Sudoita Clinochlore Daphnite Brunsvigita Pennantita Ripidolita Donbassita Turingita Fassaite Cornubdita Amesita Constedita	$Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$ $Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8$ $Mg_{3-x}Al_{2+x}Si_{3-x}

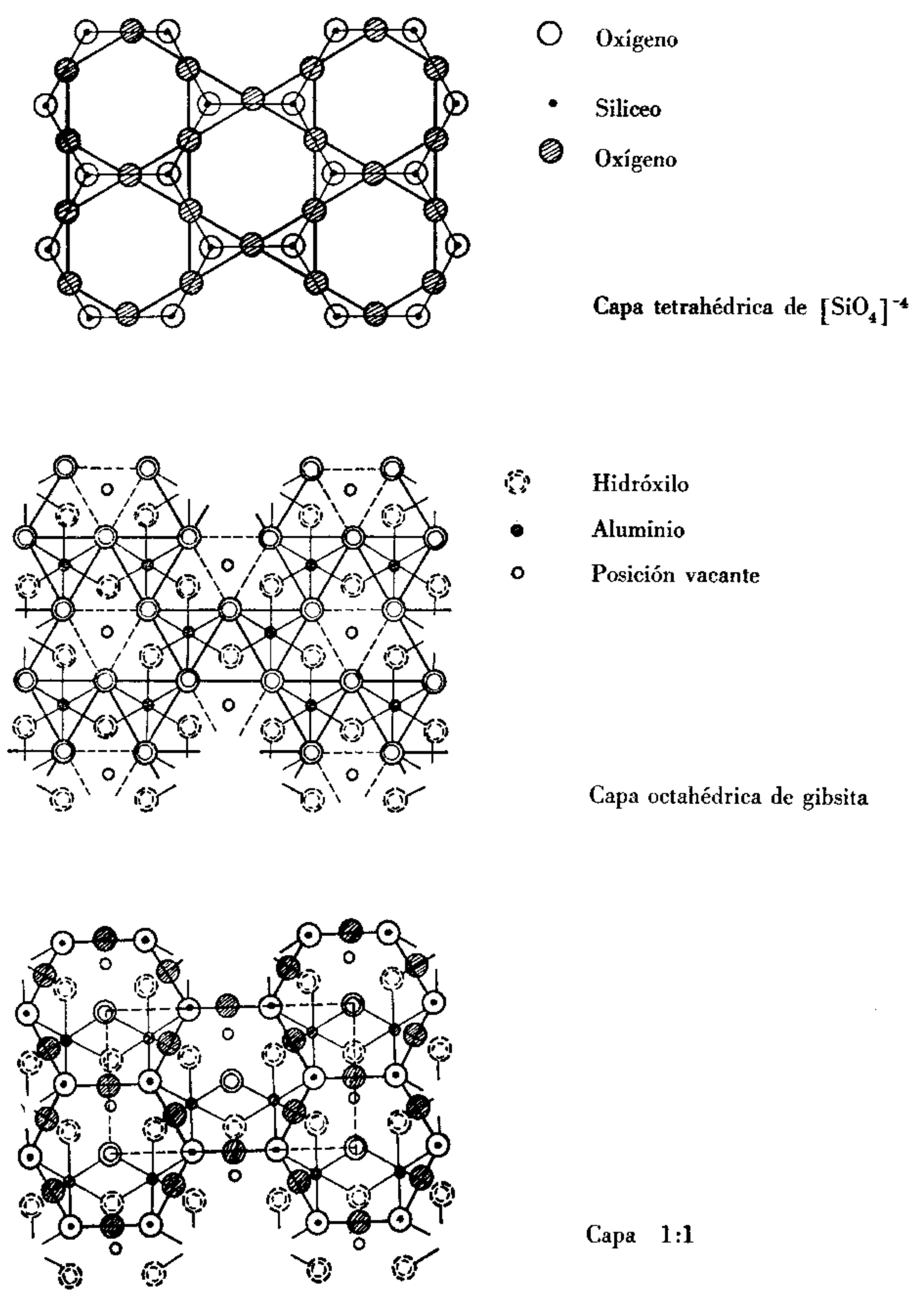


Fig. 1. Unidad estructural 1:1 de los filosilicatos.

industrial de las arcillas. Así, una arcilla compuesta predominantemente de caolinita, tiene significado geológico y usos tecnológicos muy diferentes de los de una mica, montmorrillonita o, inclusive, haloisita o, dentro de un mismo grupo, como el de las montmorrillonitas, diferencias en la composición química o en el contenido iónico implica propiedades y usos tecnológicos notablemente diferentes. Baste decir que el estudio de las arcillas requiere, como primer paso fundamental, el conocimiento de los minerales arcillosos y de sus relaciones y características estructurales.

IDENTIFICACION DE LOS MINERALES ARCILLOSOS

En párrafos anteriores se comentó la clasificación de las arcillas y de los minerales arcillosos y se estableció que el paso inicial en todo estudio es la determinación de su mineralogía. De aquí que se proceda a presentar las técnicas mineralógicas apropiadas.

El análisis de las arcillas comienza con la selección y preparación adecuada de las muestras. Son aplicables las recomendaciones generales pertinentes pero observando que los minerales arcillosos son sumamente sensibles y fácilmente verían su composición química, cristalización y características. Por ello es conveniente que:

1) La humedad del ejemplar sea la original, usando recipientes herméticos con ligera adición de agua destilada.
2) No haya molienda u otra alteración física o mecánica que pueda afectar la cristalización o características de las partículas. Es apropiada la disgregación en agua por agitadores eléctricos de baja velocidad.
3) No haya tratamientos químicos.
4) Se evite la clasificación o selección por forma o tamaño de partícula.
5) No haya tratamientos térmicos que involucren temperaturas mayores de 65°C.
6) Si el análisis es sobre un mineral sin ningún tratamiento, la técnica general consiste en una disgregación suave en seco y la aplicación de la difracción de rayos X, el análisis térmico o cualquier técnica apropiada. Si se requiere separar la fracción arcillosa de la no arcillosa, generalmente se disgrega la arcilla en agua o en solución amoniacal o alcalina, dejándola asentar a manera de separar la parte

pesada de la ligera, recogiendo ésta, si tal es el caso, a intervalos seleccionados según la ley de Stokes.

7) La fracción no arcillosa de una arcilla es también analizada, pues es importante tanto en la tecnología como por su significado geológico.

Disponiendo de una muestra de arcilla, ya en su estado natural ya aislada de la fracción no arcillosa, se procede generalmente a la identificación de los minerales arcillosos basándose en los criterios anteriormente indicados de espesor, composición química, contenido iónico, orden y simetría de la unidad estructural. Es evidente que para determinar éstos, se requieren los análisis estructural y químico.

El análisis estructural es, fundamentalmente, por difracción de rayos X. Según la técnica común, el ejemplar en portamuestras fijos o giratorios, es irradiado por radiación filtrada de cobre, molibdeno o tungsteno, a ángulos de Bragg desde 80 hasta 4º, interpretando en el difractograma la localización, forma e intensidad de las reflexiones. Por comparación con datos similares para estandards conocidos se identifica el mineral y estiman su concentración y algunas características.

Entre los minerales arcillosos, las diferencias estructurales con frecuencia son tan pequeñas que no es suficiente el análisis simple directo de difracción de rayos X. Por ello, y dentro del marco de la difracción de rayos X, se emplean la orientación de cristales y los tratamientos térmico y con glicol. En el primer caso, por asentamiento mecánico o en agua, se favorece la orientación basal preferente típica mejorando así la intensidad y definición de las reflexiones correspondientes. En el segundo caso, y dado que los minerales arcillosos sufren reacciones de deshidratación, deshidroxilación, descomposición y recristalización a temperaturas elevadas, el tratamiento térmico combinado con la difracción de rayos X permite identificar las fases de alta temperatura y de aquí, deducir sus características originales. Y por último, se aprovecha la propiedad que tienen de absorber líquidos orgánicos polares (etilen glicol en este caso) entre las capas de la estructura, variando la distancia entre ellas y consiguientemente, la naturaleza de las reflexiones básicas.

Otras técnicas son también empleadas que exceptuando aplicaciones específicas, son de utilidad más limitada que la difracción de rayos X. Así, para la determinación más exacta de los parámetros estructurales se substituye el difractómetro por la cámara de Debbye o la de reflexiones bajas y para la medición de fases de alta temperatura, el horno eléctrico por cámaras de alta temperatura que permiten obtener difractogramas o registros fotográ-

ficos en el momento de efectuarse la reacción. Para la medición de la *energía asociada a una reacción* se emplea el análisis térmico diferencial si el interés es en la temperatura o entalpia de la reacción y la balanza termogravimétrica, si es en la pérdida de materia que acompaña a tales reacciones. Siendo ambos efectos característicos del grupo mineralógico o del mineral, son posibles la *identificación* y *estimación cuantitativa*.

Hay casos de mineralogía de arcillas que no pueden resolverse solamente por difracción de rayos X o análisis térmico como por ejemplo, mezclas haloisita-caolinita, que requieren estudios detallados de morfología externa y estructurales de diminutos cristales por microscopía electrónica y difracción de electrones. Más aún, cuando se estudian los grupos funcionales o la distribución de protones en la estructura, se usan la absorción de radiación infrarroja y la resonancia magnética.

Un comentario sea quizá oportuno respecto al empleo del microscopio petrográfico en el estudio de las arcillas. Es aceptado que esta técnica es muy útil en la identificación de la fracción no arcillosa pero es de aplicación muy limitada en el análisis de la fracción arcillosa, particularmente, cuando se consideran las características de los minerales arcillosos, las finas diferencias entre ellos o la facilidad con que se descomponen térmicamente, se hidratan, absorben líquidos orgánicos o se transforman por efectos químicos o mecánicos que *nulifican en buen grado* las técnicas de identificación petrográfica.

Como se dijo anteriormente, la identificación de los minerales arcillosos requiere, además del estudio estructural, el análisis químico para determinar la composición química y contenido iónico de la unidad estructural. Si el análisis es total, es normalmente por SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, TiO_2, humedad, pérdida por calcinación a 900°C y elementos metálicos menores si es que son necesarios. Si el propósito es solamente la identificación del mineral, el análisis puede ser por Cr, Ni, V, Mn, etc. En ambos casos, el lector es referido a publicaciones relativas. Si la cuantificación es por metales pesados, aún en escasas concentraciones, son aplicables las técnicas de vía húmeda, fluorescencia de rayos X o espectrografía de emisión entre otras y si es total, se prefieren generalmente los métodos de vía húmeda.

En la Tabla II se presenta un sistema para la identificación de los minerales arcillosos basado en la clasificación y criterios antes indicados. Tiene la particularidad de requerir *solamente equipo de difracción de rayos X*, horno de calentamiento hasta 1200°C y facilidades propias para análisis químicos simples y, su utilidad principal, reside en indicar sucesivamente los procedimientos a seguir hasta llegar a la identificación final de la especie

mineralógica. Es obvio que si bien el sistema resuelve la mayor parte de los casos posibles de mineralogía de arcillas, habrá también casos que requieran de otros estudios o análisis más avanzados para los que el lector es referido a publicaciones pertinentes.

CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

El estudio de arcillas puede ser con fines netamente científicos como también con fines económicos. En ambos casos pero particularmente en el último, es necesario, además de la mineralogía, satisfacer una serie de condiciones físicas propias y representativas de su uso final y que fijan su valor económico. En los siguientes párrafos se presentan las características principales de las arcillas más comunes, entendiéndose que no son clasificaciones estrictas y que un mineral puede considerarse dentro de estos grupos cuando en su estado natural o, mediante tratamiento físico o químico económico sus propiedades queden dentro de los márgenes indicados.

APLICACION INDUSTRIAL DE LAS ARCILLAS

Tradicionalmente, las arcillas han sido consideradas como un material cerámico y como tal han sido ampliamente estudiadas. Sin embargo, hay además una gran variedad de procesos o productos industriales que requieren de un material inerte, económico, estable bajo condiciones muy diferentes o, también, de un material cuya naturaleza física y química produzca cambios importantes en un proceso. Y es precisamente en estos casos donde las arcillas han encontrado una gran variedad de aplicaciones, algunas no sospechadas hace pocos años, y que han llegado a ser tanto o más importantes que el mismo empleo cerámico.

Desde el punto de vista de uso de las arcillas, puede distinguirse, en primer caso, el clásico de la cerámica que incluye aplicaciones tales como refractarios, loza, azulejo, porcelana, porcelana eléctrica, aisladores, tubos de drenaje, tabique, etc., y en las que la arcilla es usada por su composición química y por sus características en estado verde y quemado. En segundo caso, como inerte o material de carga, se usa en papel, hule, adhesivos, pinturas, plásticos, insecticidas, etc., por ser barata, de fácil disponibilidad, estable bajo condiciones físicas y químicas muy diversas. Y por último, la naturaleza de su estructura atómica que permite el intercambio iónico

o el desarrollo de estructuras desordenadas, hace que encuentren gran aplicación en la decolorización y desodorización de productos químicos y en la fabricación de catalizadores.

Siendo las arcillas tan sensibles a cambios físicos y químicos y tan diferentes las condiciones en que se usan, es de entenderse la complejidad de su estudio y el por qué pueden o no servir para un proceso o producto determinado. Baste decir que en buen número de aplicaciones industriales, son usadas no por su análisis químico o mineralogía, sino más bien porque "trabajan" en tal aplicación. Claro está que ello es consecuencia de sus propiedades y su conocimiento completo es útil sino indispensable.

En las siguientes páginas se presentan las características más comunes, desde el punto de vista de aplicación industrial. No deben considerarse propias de un grupo determinado sino típicas de él ni olvidarse que son propiedades comercialmente aceptadas para un mineral natural o tratado a manera de producirlas económicamente y que, en su aplicación final, las arcillas pueden usarse solas o combinadas con otras substancias, químicas o minerales, que con relativa facilidad modifican algunas de sus propiedades originales.

Arcillas en la Industria Cerámica

Cerámica, expresión derivada del griego "Keramos", significa material quemado y en su significado original, se aplicaba a la acción del calor sobre materiales terrosos. En el concepto moderno, se entiende por cerámica aquellos productos o procesos que usan temperaturas elevadas particularmente sobre silicoaluminatos, minerales no metálicos y algunos óxidos inorgánicos. Dentro de esta amplia definición se incluyen industrias tan diversas como refractarios, porcelana, loza, azulejo, aisladores, ferritas, bujías, combustibles nucleares y cerámica eléctrica.

Las arcillas tienen importancia fundamental en la industria cerámica por ser ingrediente básico de sus formulaciones. Por su naturaleza, al ser mezcladas con agua, fácilmente adquieren formas que con el quemado a temperaturas elevadas quedan duras y permanentes. Su empleo está íntimamente asociado al proceso y producto que se fabrica y por ello se distinguen varios tipos y usos específicos.

Los procesos cerámicos varían según la naturaleza del producto pero, en general, incluyen operaciones de (1) preparación y molienda de materias primas, (2) mezclado, (3) adición de agua y/u otros aglutinantes, (4) prensado, (5) extrusión, (6) colado sobre moldes, (7) secado y (8) calcinación. Las formulaciones contienen desde 0 hasta 100% de arcillas, junto

[illegible] como talco, wolastonita, cuarzo, feldespato, pirofilita, [illegible] por quebrado y molienda simples previo o simultáneo [illegible] de la mezcla; se agrega después agua hasta en 8% si las [illegible] 15 a 20% si son extruidas y 50% si son vaciadas [illegible] Y finalmente, las piezas formadas se secan lentamente antes de [illegible] a temperaturas elevadas fijadas por su composición y propiedades.

Los materiales cerámicos reúnen ciertas propiedades características de [illegible] porosidad, densidad, resistencia mecánica, resistencia al choque térmico, grado refractario, color, plasticidad, viscosidad a temperaturas elevadas, etc., además de otras más específicas de su uso final, como [illegible] dieléctrico (aisladores), resistencia mecánica y al choque térmico [illegible], ser impervios (porcelana) o resistencia a temperaturas elevadas (refractarios).

[illegible] considerando proceso y producto cerámico, es evidente que las condiciones que se imponen en la materia prima y especialmente en las arcillas, el principal componente, son variadas y complejas. Así en el proceso de manufactura, se espera que fácilmente se mezclen, emulsionen, absorban agua, o sequen lentamente sin deformación y sin absorber gases o vapores de la atmósfera, para finalmente dar un producto quemado dentro de las especificaciones de contracción, color, porosidad, densidad, etc. Si a esto se añade las variantes introducidas por su origen geológico y composiciones mineralógica y química, y por los otros integrantes de la formulación cerámica, se comprende la complejidad de la tecnología.

En la industria cerámica se distinguen tradicionalmente varios tipos de arcillas según su origen, características o usos finales, y entre los que se citan caolines, barros plásticos, barros o arcillas refractarias, pizarras, arcillas duras y caolines arenosos. Sin embargo, en una clasificación más estricta, puede diferenciarse solamente entre caolines y barros plásticos y considerar a los demás como variedades de éstos.

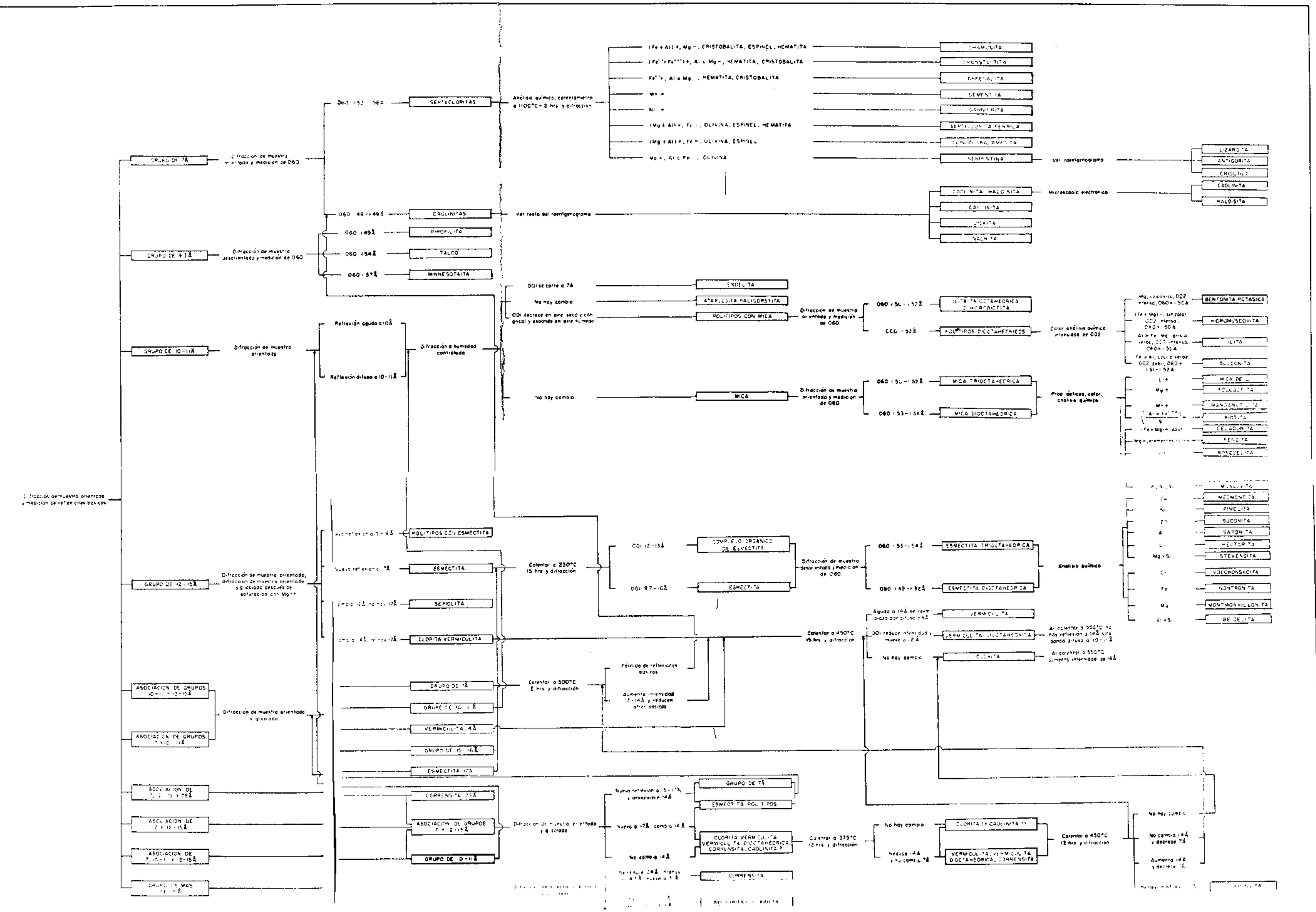
Los caolines son arcillas primarias, producidas in situ por la alteración hidrotermal o atmosférica de los feldespatos de rocas ígneas ácidas (granitos, riolitas, dioritas), habiéndose formado los de más calidad en el Terciario, hacia finales del Oligoceno y principios del Mioceno. El principal componente es caolinita, como placas exagonales bien formadas, y con pequeñas cantidades de cuarzo (menos de 10%) e hidrómica (menos de 10%), siendo su color blanco brillante cuando el origen es hidrotermal o blanco crema opaco cuando es de alteración atmosférica superficial. Presentan fractura concoidal poco apreciable en los caolines de fino tamaño de partícula y más

en aquellos duros o compactos. Su composición química casi corresponde a la teórica de caolinita de 46.5% SiO_2 y 39.6% Al_2O_3, con ligeras variaciones según sean más o menos silicosos y escasas impurezas. Entre sus propiedades físicas se citan pH entre 4.5 y 5.5; agua de plasticidad de 32 a 45%; brillo de 65 a 80% (unidades G.E.); módulo de ruptura de 50 a 150 lb/pulg^2; contracción al secado de 4 a 8%; contracción al quemado a cono 8 de 8 a 12% y absorción de 10 a 20%; cono pirométrico de 33 a 35; distribución de partícula de 80 a 95 menor de 10 micrones, 50 a 70 menor de 2 micrones, 25 a 35 menor de 0.5 micrón y de 5 a 20% menor de 0.2 micrones (Tabla III).

Los barros plásticos son arcillas sedimentarias, también originadas por la alteración de rocas ácidas pero que, a diferencia de los caolines, fueron acarreadas a lugares diferentes al de su formación y consiguientemente, pasaron por una selección que separó el material arcilloso del clástico no arcilloso, pero que asoció material vegetal que posteriormente desarrolló lignito, lignocelulosas y ácidos húmicos. Su origen se sitúa en el Terciario, durante el Eoceno, Oligoceno y Mioceno, del orden de 20 a 50 millones de años. Su principal componente es caolinita que, a diferencia de los caolines, es predominantemente de cristales pequeños exagonales irregulares, de cristalización desordenada, regulares y hasta subarredondeados. Por su fino tamaño de partícula y su contenido de coloides orgánicos, son sumamente plásticas, moldeables, de alta contracción y retienen la humedad fácilmente. Contienen hidrómica y montmorrillonita (10 a 30%, menor de 0.2 micrones), cuarzo (0 a 50%, del orden de 0.5 micrones) y cantidades menores de ilmenita, rutilo, limonita y material orgánico (0 a 8%). Su análisis químico indica contenidos de sílice de hasta 65% por el fino cuarzo, mica y montmorrillonita asociados a la caolinita y de 20 a 35% de Al_2O_3, con pérdidas de calcinación variables entre 6 y 15%. Entre sus propiedades físicas destacan pH entre 4 y 5; color crema, gris, marrón o negro; agua de plasticidad entre 30 y 45% brillo de 40 a 45% (unidades G.E.); módulo de ruptura de 400 a 700 lb/pulg^2; contracción linear de 5 a 8%; contracción al quemado a cono 8 de 5 a 10%, con absorción de 4 a 10% y módulo de ruptura entre 4000 y 8000 lb/pulg^2; como pirométrico de 30 a 33; distribución de partícula de 80 a 100 menor de 10 micrones, 55 a 95 menor de 3 micrones, 25 a 95 menor de 1 micrón, 10 a 80 menor de 0.5 micrón y de 3 a 40% menor de 0.2 micrones (Tabla IV).

Además de los caolines y los barros plásticos, que podrían considerarse como las arcillas cerámicas fundamentales, hay otras variedades entre las que cabe citar las arcillas duras ("flint clay"), compactas, densas, de frac-

SISTEMA PARA LA IDENTIFICACION DE LOS MINERALES ARCILLOSOS



CARACTERISTICA	Devon Inglaterra	Devon Inglaterra	Georgia EUA	Georgia EUA	Georgia EUA (Secado)	Florida EUA	North Carolina EUA	North Carolina EUA	PROMEDIO
Análisis Químico									
SiO_2	47.10	50.48	45.54	45.45	45.40	40.95	46.80	48.01	48.00 50.00
Al_2O_3	37.50	34.47	38.39	38.10	38.05	36.75	37.00	38.95	34.00 39.00
Fe_2O_3	0.83	0.55	0.28	0.65	0.59	0.50	0.90	0.50	0.20 0.90
TiO_2	0.10	0.20	1.35	1.42	1.32	0.18	0.08	1.42	0.10 1.50
MgO	0.30	0.10	0.18	0.18	0.20	0.20	—	0.02	0.00– 0.30
CaO	0.25	0.50	0.16	0.09	0.17	0.15	—	0.13	0.00– 0.50
K_2O	1.95	3.20	0.08	Ind.	0.14	0.24	1.00	0.00	0.00– 3.00
Na_2O	0.10	0.20	0.33	Ind.	0.27		0.27	0.00	0.00– 0.50
Pérdida a 900° C	11.95	10.10	13.82	14.03	13.82	14.95	13.82	13.89	10.00– 15.00
Propiedades Físicas									
pH	4.5	4.9	5.2	4.7	4.8				4.5 – 5.5
Color	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco
Agua de Plasticidad (%)			33.5	35.0	35.5	47.0	42.0	33.8	32 – 45
Tamaño de partícula % menor 10 μ	95.0	80.0	70.1	79.0	79.0				80 – 95
2	70.0	50.0	36.3	57.0	54.0				50 – 70
0.5	35.0	25.0	18.1	27.2	27.0				18 – 35
0.2	18.0	8.0		10.9	11.0				5 – 20
Brillo G.E. (%)						76.9	65.2	77.0	65 – 77
Módulo de ruptura (lbs/cm²)	90	45	24	502	500	400	150	61	50 –150
Contracción secado (%)	4.7	2.9				8.0	5.7	4.2	4 – 8
Contracción a Cono 8 (%)			8.2	11.5					8 – 12
Absorción a Cono 8 (%)			14.7	12.0		18.0	19.6	18.1	10 – 20
Cono pirométrico	33	33	34-35	34	34				33 – 35

Tabla III. Características de Caolines, grado Cerámico

CARACTERISTICA	ORIGEN								PROMEDIO
	Tennessee EUA	Kentucky EUA	Tennessee EUA	Tennessee EUA	Tennessee EUA	South Devon Inglaterra	South Devon Inglaterra	South Devon Inglaterra	
Análisis Químico									
SiO_2	53.50	51.88	53.96	61.00	64.01	45.60	53.40	63.20	50.00– 65.00
Al_2O_3	29.84	32.42	29.34	24.54	25.16	35.02	32.34	24.75	20.00– 35.00
Fe_2O_3	0.95	1.03	0.98	0.99	0.93	0.70	0.90	0.90	0.50– 1.00
TiO_2	1.52	1.37	1.64	1.29	1.48	0.70	1.03	1.15	0.50– 1.70
MgO	0.33	0.46	0.30	0.12	0.45	0.16	0.33	0.32	0.10– 0.50
CaO	0.36	0.56	0.37	0.09	0.31	0.22	0.38	0.20	0.10– 00.60
K_2O	0.50	0.38	0.28	1.69	0.77	1.50	2.48	2.53	0.30– 2.50
Na_2O	0.25	0.45	0.12	0.36	0.34	0.22	—	0.40	0.10– 0.50
Pérdida a 900° C	0.02	—	0.02	0.01	0.03	—	—	—	0.00– 0.20
	12.73	11.59	12.82	9.74	6.20	15.85	—	6.50	6.00– 15.00
Propiedades Físicas									
pH			4.8	4.2	4.4	5.1	4.9	5.1	4.0 – 5.0
Color			gris	negro	marrón	blanco	blanco	crema	crema a negro
Agua de Plasticidad (%)	44.4	42.0	40.0	36.2	31.1				30 – 45
Tamaño de partícula % menor 10 μ			93	82	83	97	98	93	80 –100
3			79	55	53	95	95	85	55 – 95
1			63	25	27	92	85	66	25 – 95
0.5			45	11	13	80	76	55	10 – 80
0.2			17	3	3	40	42	32	3 – 40
Brillo G.E. (%)	44.8	45.2							43 – 45
Viscosidad relativa			2.20	1.33	1.55				12 – 25
Velocidad de colado (gm/15 min, 426 cm^2)			174	132	209				130 –240
Módulo de ruptura (lbs/cm^2)	675	620	428	545	385	700	700	600	400 –700
Contracción lineal (%)	8.5	8.1	8.3	6.9	5.7	7.8	7.8	5.1	6 – 9
Contracción a Cono 8 (%)			10.3	5.4	5.3				5 – 10
Absorción a Cono 8 (%)	4.6	5.2	5.5	8.9	9.9				4 – 10
Módulo ruptura a Cono 8 (%)			4250	6860	6590	7200	8100	6600	4000 –8000
Cono pirométrico			33	31	30	33	33	30	30 – 33

Tabla IV. Características de Barros Plásticos, grado Cerámico

[illegible] baja plasticidad, con caolinita como principal componente y [illegible] ilmenita, cuarzo o hidrómica, de gran interés en la industria de [illegible]. Caolines arenosos, arcillas para ladrillo y refractarias pueden considerarse como caolines o barros altos en impurezas (cuarzo, cristobalita, ilmenita, etc.) y con características que no permiten sean considerados como tales pero de interés en la manufactura de ciertos productos cerámicos.

En las Tablas IV y III se presentaron las características principales de caolines y barros grado cerámico. Su examen, sugiere que los valores aceptados dependen de la arcilla, pero también en buen grado, de los métodos empleados para estimarlos por lo que es recomendable seguir una tecnología específica. De aquí que se indiquen a continuación los métodos normalmente empleados en la industria cerámica para el análisis de arcillas. Huelga decir que la calificación para un uso determinado puede o no requerir todas las determinaciones que se presentan.

Estudio mineralógico

Se analizan tanto la fracción arcillosa como la no arcillosa. Generalmente, en principio se examina la muestra en su estado natural y si se estima necesario para los propósitos finales, se separan las fracciones por suspensión en agua pura o alcalina y asentamiento. La fracción pesada es de interés por su mineralogía, forma de gránulos y cristales, tamaño, etc., y es normalmente estudiada por microscopía simple, petrografía o rayos X. La fracción arcillosa, separada por lento asentamiento o por defloculación alcalina y floculación ácida, es de interés en cuanto a su mineralogía, composición, cristalización, etc., siendo la difracción de rayos X y la técnica preferida. Y, en menor grado, el análisis térmico diferencial y la microscopía electrónica. Dado que las arcillas son sumamente sensibles a cambios en su ambiente, la situación ideal es aquella en que son examinadas en las condiciones más cercanas a su estado natural. De aquí que cualquier tratamiento que se haga debe ser considerado en la interpretación final.

Análisis químico

Cuando es completo es por SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, MgO, CaO, MnO, Na_2O, K_2O, SO_3 y pérdida por calcinación a 900°C, más aquellas impurezas (metales, sulfatos solubles, etc.) de interés particular.

pH

Es la acidez de la arcilla dispersa en agua, medida por inmersión de un electrodo de vidrio en una suspensión de 100 gms de muestra en 250 mlt de agua destilada recientemente hervida, agitada eléctricamente durante 10 minutos, a 25°C.

Color

Es el color estimado visualmente. Puede también referirse al color del material quemado a alta temperatura, normalmente mayor de 1000°C.

Brillo

Es el porcentaje de reflectancia en comparación con la del blanco estandar de óxido de magnesio, medida a longitud de onda de 485 milimicrones en el reflectómetro General Electric. No es una prueba normativa pero sí indicativa de la calidad. La técnica consiste en colocar en una balanza una gruesa placa de vidrio y sobre ella un cilindro de bronce de 7.72 cm de alto y 4.12cm. de diámetro interior, conteniendo 15 gms de arcilla secada a 105°C y tamizada por malla 200. Se introduce en el cilindro un émbolo de 4 cm de diámetro, 3.17 cm de alto y peso de 567 gms, aplicándole la presión equivalente a una carga de 25 kgs. La pastilla obtenida es colocada directamente sobre el reflectómetro para medir la reflectancia. Humedad, tamaño de partícula y marcas en la superficie afectan apreciablemente la determinación.

Viscosidad relativa

Es un índice del comportamiento de la arcilla en suspensiones o barbotinas y en pastas extruidas. Se mide en una suspensión preparada con 4.5 kgs de muestra en agua, tamizando a malla 60 y ajustando la gravedad específica a 1.20 antes de comparar la viscosidad con la medida para agua, en las mismas condiciones, en un viscosímetro Stormer.

Velocidad de colado

Es un índice del comportamiento en procesos de vaciado sobre yeso. Parte de la suspensión anterior se vacía sobre moldes cilíndricos de 426 cm^2 de superficie interior, manteniéndolos llenos 15 min antes de drenarlos por la parte inferior, secar al ambiente, retirar la pieza,

secarla y pesarla. La velocidad de colado se expresa en gramos por 426 cm^2 por 15 min.

Agua de plasticidad

La barbotina anterior se deja secar a una masa plástica (20 a 30% de agua) y se extruyen 10 barras para la determinación de módulo de ruptura a cada temperatura y 4 barras para la medición de agua de plasticidad, siendo todas ellas marcadas por contracción. Se secan a 110°C, hasta peso constante, y la diferencia entre los pesos con agua y seco, entre el peso seco, multiplicado por 100, indica el porcentaje de agua de plasticidad. La extrusión de las barras puede hacerse en máquinas apropiadas o, en su defecto, en un buen molinillo manual de carne con boquilla de 2 cm. Las dimensiones de las barras son de 18 por 2 cm.

Contracción

Las barras anteriores secadas a 110°C máximo, hasta peso constante, son medidas y la diferencia entre la longitud original y la secada, dividida entre la original, representa la contracción lineal al secado. La misma medición hecha en barras quemadas a conos pirométricos 04, 8 y 11 corresponde a la contracción lineal al quemado.

Módulo de ruptura

Las barras anteriores, secas, son medidas por módulo de ruptura al secado en aparatos tipo Dillon, con claros de 5 cm., entre las cuchillas. Cuando son piezas quemadas a conos 04, 8 u 11, los claros son de 10 cm. La lectura del dinamómetro en kilogramos por ocho veces el claro entre las cuchillas, dividido entre π veces el diámetro de la barra en centímetros, da el módulo de ruptura en Kgs/cm^2.

Absorción

Las barras quemadas se hierven en agua, totalmente sumergidas, durante cuatro horas y se dejan permanecer durante 12 horas. La diferencia entre el peso de la pieza saturada de agua menos el peso seca, todo entre el peso seco y por 100, representa la absorción.

Cono pirométrico

Es la temperatura a la que una pequeña pirámide triangular de la arcilla dobla por su propio peso y que corresponde aproximadamente

al comienzo de la fusión en el material. Las dimensiones de dicha pirámide, su ángulo de inclinación forma de preparación y velocidad y forma de calentamiento son las especificadas por la norma de la Sociedad Americana de Prueba de Materiales.

Tamaño de partícula

Para partículas mayores de 40 micrones la técnica establecida es la bien conocida de las cribas pero, para tamaños menores, se prefiere la flotación en flúidos según la ley de Stokes:

$$D = \frac{30\ nL}{980(G - G_M)T}$$

D diámetro de partículas en milímetros de partículas esféricas equivalentes
n viscosidad del mdeio de suspensión, agua, en poises
L distancia en centímetros a través de la que las partículas se asientan en un tiempo dado (32.5 cm)
T tiempo de sedimentación en minutos
G gravedad específica de las partículas (2.65)
G_M gravedad específica del medio de suspensión.

Para una temperatura de 18°C, siendo agua el medio de suspensión, es aplicable la siguiente tabla:

Tiempo (min)	Diámetro (micrones)	Tiempo (min)	Diámetro (micrones)
1	78.42	30	14.32
2	55.46	35	13.26
3	45.28	40	12.40
4	39.21	45	11.69
5	35.07	50	11.09
6	32.02	60	10.12
7	29.64	70	9.37
8	27.72	80	8.77
9	26.14	90	8.27
10	24.80	100	7.84
15	20.25	150	6.40

Tiempo (min)	Diámetro (micrones)	Tiempo (min)	Diámetro (micrones)
20	17.45	200	5.53
25	15.68	250	4.96
300	4.53	1300	2.17
350	4.19	1500	2.02
400	3.92	2000	1.75
450	3.70	2500	1.57
500	3.50	3000	1.43
600	3.20	3500	1.33
700	2.96	4000	1.24
800	2.77	4500	1.17
900	2.61	5000	1.11
1000	2.48	6000	1.01
1100	2.36	7000	0.94
		8000	0.88

De la ley de Stokes, o de la tabla anterior, se tiene solamente el diámetro aparente máximo. Si se usa el hidrómetro de Bouyoucos, * que indica directamente gramos de material en solución, hay una constante de corrección (K_L) dada por la distancia entre el nivel superior de la suspensión y el inferior del hidrómetro, y que es de 0.1135 veces la raíz cuadrada de dicha distancia en centímetros. De aquí el diámetro verdadero de las partículas es

$$D = D_A . K_L . 1.015$$

siendo 1.015 una corrección cuando la gravedad específica de las partículas es de 2.60.

El procedimiento aceptado para la determinación de tamaño de partícula requiere que 150 grms de arcilla con 1.5 grm de hexametafosfato sódico sean agitados eléctricamente en 3 lt de agua durante 2 horas. Un litro de esta suspensión es medido en una probeta y en ella se toman lecturas con el hidrómetro de Bouyoucos a intervalos de 0, 10, 30, 50, 100, 300 minutos y cada 24 hr hasta un total de 5 días, registrando además la temperatura. Si esta es mayor de 18.4°C, se agregan 0.105

* El hidrómetro de Bouyoucos es producido por Taylor Instrument Co. Rochester, N.Y., U.S.A. Hidrómetro Nº 22295, margen de —2 a +60— grm.

por cada unidad arriba y, si es menor, se substrae en la misma forma. Las lecturas del hidrómetro se grafican en papel semilogarítmico contra el tiempo y de aquí, se calcula el diámetro verdadero de las partículas.

Arcillas en la Industria Papelera

Es conocido que el papel es una delgada hoja de fibras entrelazadas de celulosa producidas por tratamiento mecánico o químico de la madera. Por si sola, esta hoja es irregular, transparente, y no permite los finos procesos de imprenta pero, cuando se le agregan ciertos materiales inertes que penetran y recubren las fibras, se desarrollan hojas uniformes, opacas, brillantes, de suave textura, que permiten los amplios usos del papel.

La preparación del papel comienza con el tratamiento de la madera para formar una pulpa de fibras de celulosa a la que se le agregan arcillas, carbonato de calcio, etc. como carga inerte antes de vaciarla sobre mallas vibratorias en la que por succión se forma una capa afelpada que, al secarse sobre rodillos continuos, desarrolla la hoja de papel burdo, escaso brillo y numerosas aplicaciones como papel de envoltura, de periódico, blanco común, etc. Este papel, sin embargo, tiene el inconveniente de que no permite desarrollar la fina reproducción de imprenta ni los delicados matices de los colores pero, al recubrírsele de una delgada película preparada con pigmentos y adhesivos y "plancharlo" sobre rodillos calientes, desarrolla una textura suave, brillante, que sí permite tales procesos.

Dos son los usos del material inerte en la industria papelera: (1) como carga en la pulpa de celulosa y (2) como pigmento recubriendo la hoja de celulosa y carga. En el primer caso, en que se requiere un inerte que no reaccione con la celulosa, que se emulsifique fácilmente, sea económico y relativamente abundante, de fácil secado, sin gran absorción, blanco, brillante, y de fino tamaño de partícula, las arcillas caoliníticas son abundantemente usadas. Y como pigmento para recubrir, las mismas arcillas, con su facilidad para orientarse sobre sus planos basales y reflejar la luz, fino tamaño de partícula, relativa pureza y abundancia y facilidad para emulsificarse con una variedad de substancias, son el pigmento más ampliamente usado.

Las especificaciones impuestas a las arcillas caoliníticas para la industria papelera varían según su uso sea como carga en la pulpa o como pigmento cubriente. Si el empleo es como carga, se prefieren caolines bastante puros, formados casi exclusivamente por caolinita bien cristalizada, libre de cuarzo u otros minerales abrasivos —de arcillas bentoníticas que puedan afectar el comportamiento de las emulsiones y de óxidos de hierro, titanio u otros

colarantes—. Por el fino tamaño de partícula que se requiere, pueden ser mecánicamente reducidas, en cuyo caso se tiene un amplio margen de distribución de partícula, o, de preferencia, ser flotadas a manera de separar fracciones cercanas y tener un mejor control de algunas características físicas blancura y densidad.

En la Tabla V se han indicado las características principales de arcillas para carga de papel. El análisis químico prácticamente corresponde al de caolinita pura con escasos contenidos de óxidos colorantes y de alcalies o alcalinoterreos, generalmente en forma de hidrómica o montmorrillonitas que procuran mantenerse a un mínimo. Su acidez varía de 4 a 7 y su brillo de 80 a 86%. La gravedad específica de 2.58 corresponde a caolinita, mientras que la densidad bruta varía entre 0.72 y 0.92 gm/cm^3 según el proceso de beneficio empleado. La distribución de partícula es de 56 a 92 menor de 6 micrones, 40 a 83 menor de 4, 20 a 67 menor de 2, 10 a 46 menor de 1, 7 a 34 menor de 0.7 y de 1 a 23% menor de 0.5 micrones, siendo generalmente los caolines flotados más finos y uniformes que los molidos. La pérdida o índice de abrasión es de 13 a 15 miligramos (Tablas V y VI).

Las arcillas usadas para recubrimiento, si bien son básicamente de las mismas características que las empleadas para carga, son consideradas, libres de cuarzo u otros abrasivos y de minerales que puedan colorear o modificar la naturaleza de las suspensiones. El análisis químico corresponde al de la caolinita (39.6 Al_2O_3, 46.5% SiO_2). La acidez varía entre 4.2 y 7.0; brillo de 83 a 88%; gravedad específica de 2.58 y densidad bruta varía de 0.48 a 0.96 gm/cm^3. La distribución de partícula es de 93 a 98 menor de 6 micrones, 88 a 99 menor de 4, 72 a 92 menor de 2, 49 a 73 menor de 1, 25 a 59 menor de 0.7 y de 1 a 43% menor de 0.5 micrones. La viscosidad máxima a 10 rpm es de 300 a 500 y a 100 rpm, de 180 a 200. (Tabla VII).

La industria papelera, al igual que la industria cerámica, mantiene ciertas características y métodos de prueba para sus caolines, aplicables tanto a materiales brutos como beneficiados y que son propios de ella. Tales métodos se indican a continuación:

Estudio Mineralógico

Se estudia la muestra en su estado natural y después se fracciona separando la parte arcillosa de la no arcillosa para determinar mineralogía, origen e historia geológica. Se emplean las técnicas antes mencionadas de defloculación, floculación, lavado, difracción de rayos X, análisis térmico y microscopía electrónica. El interés es en caolinitas bien cristalizadas, libres de impurezas, de fino tamaño de partícula.

CARACTERISTICA	ORIGEN						PROMEDIO
	Devon Inglaterra	Georgia, New Jersey, y South Carolina, EUA					
Análisis Químico							
SiO_2	47.20	45.42	45.42	45.42			45.00–47.00
Al_2O_3	37.60	38.79	38.79	38.79			37.00–40.00
Fe_2O_3	0.61	0.31	0.31	0.31			0.30– 0.60
TiO_2	0.12	1.59	1.59	1.59			0.10– 1.60
MgO	0.28						
CaO	0.13	0.35	0.35	0.35			0.10– 0.40
K_2O	1.76	0.02	0.02	0.02			0.00– 1.80
Na_2O	0.10	0.13	0.13	0.13			0.00– 0.15
Pérdida a 900° C	12.00	13.79	13.79	13.79			12.00–14.00
Humedad		0.10	0.10	0.10			0.00– 0.10
Propiedades Físicas							
pH	4.5	6.3 – 7.0	3.8 – 4.6	3.8 – 4.6	4.5– 5.5	4.5– 5.5	4.0 – 7.0
Color	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco
Brillo G.E. (%)		84.5 –86.0	82.5 –84.0	80.5 –83.0	80.0–82.0	82.0–83.5	80.0 –86.0
Gravedad específica		2.58	2.58	2.58			2.58
Densidad bruta (gm/cm³)		0.84– 0.92	0.72– 0.80	0.72– 0.80			0.72– 0.92
Tamaño promedio partícula (Micrones)		1.2	3.5	4.8			1.2 – 4.8
Distribución de partícula % menor de 10 μ	93	98	88	83			83 –98
6	85	92	72	60	56	81	56 –92
4	77	83	59	40	50	76	40 –83
2	62	67	37	20	33	57	20 –67
1	46	46	21	10	21	37	10 –46
0.7	40	34	18	7	12	18	7 –40
0.5	32	23	16	4	8	1	1 –32
Pérdida por abrasión (mlgm)					15	13	13 –15

Tabla V. Características de Caolines Lavados para Carga de Papel

CARACTERISTICA	ORIGEN South Carolina, EUA		PROMEDIO
Análisis Químico			
SiO_2			45.00–47.00
Al_2O_3			37.00–40.00
Fe_2O_3			0.30– 0.60
TiO_2			0.10– 1.60
CaO			0.10– 0.40
K_2O			0.00– 0.10
Na_2O			0.00– 0.15
Pérdida a 900° C			12.00–14.00
Humedad			0.00– 0.10
Propiedades Físicas			
pH	6.0– 7.0	4.5– 5.5	4.5 – 7.0
Color	blanco	blanco	blanco
Brillo G.E.	80.0–81.0	79.0–80.0	79.0 –81.0
Distribución de partícula % menor de 6 μ	84	76	76 –84
4	80	71	71 –80
2	66	56	56 –66
1	47	39	39 –47
0.7	31	22	22 –31
Densidad bruta (gm/cm^3)			0.40– 0.50

Tabla VI. Características de Caolines sin Lavar para Carga de Papel

CARACTERISTICA	ORIGEN					PROMEDIO
	South Carolina y New Jersey, EUA					
Análisis Químico						
SiO_2	45.42	45.42	45.42			45.00– 47.00
Al_2O_3	38.79	38.79	38.79			38.50– 40.00
Fe_2O_3	0.31	0.31	0.31			0.10– 0.50
TiO_2	1.59	1.59	1.59			0.10– 1.60
CaO	0.35	0.35	0.35			0.10– 0.50
K_2O	0.02	0.02	0.02			0.02– 0.10
Na_2O	0.13	0.13	0.13			0.02– 0.20
Pérdida a 900° C	13.79	13.79	13.79			12.00– 15.00
Humedad	0.10	0.10	0.10			
Propiedades Físicas						
pH	6.3 – 7.0	4.2 – 4.6	6.3 – 7.0	4.5– 5.0	4.5– 5.0	4.2 – 7.0
Color	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco
Brillo G.E.	87.0 –88.0	85.5 –87.0	85.0 –86.5	83.5–84.5	84.0–85.0	83.0 – 88.0
Gravedad específica	2.58	2.58	2.58			2.58
Densidad bruta (gm/cm³)	0.84– 0.92	0.48– 0.56	0.88– 0.96			0.48– 0.96
Tamaño promedio de partícula	0.55	0.80	1.00			
Distribución de partícula % menor de 6 μ		98	95	96	93	93 – 98
4	99	93	88	93	89	88 – 99
2	92	79	72	80	73	72 – 92
1	73	58	50	55	49	49 – 73
0.7	59	44	38	30	25	25 – 59
0.5	43	31	26	1	1	1 – 43
Viscosidad máxima 10RPM(')	500	350	300			300 –500
Viscosidad máxima 100RPM(')	200	200	180			180 –200

(') Método Tappi con viscosímetro Brookfield modificado, 71% de sólidos, rotor No. 3

Tabla VII. Características de Caolines Lavados para Recubrimiento de Papel.

Análisis Químico

Completo por SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, húmedad y pérdida por calcinación a 1000°C.

Indice de Abrasión

Representa el poder abrasivo de la arcilla medido según la pérdida de peso de un alambre calibrado, aceptándose comercialmente el empleo del "Valley Clay Tester" (producido por Valley Iron Works Co., Appleton, Wiscounsin, EUA). Se prepara una suspensión de 100 gms de arcilla en 3600 mlt de agua destilada y se pasa por un bloque perforado de hule y sobre un delgado alambre tipo Fourdrinier. La pérdida de peso del alambre cuando gira a 6000 rpm, mientras pasa sobre el la suspensión, en miligramos, representa el índice de abrasión de la arcilla. El alambre es acondicionado previamente pasándole agua durante 2 hrs y secando 1 hr a 110°C.

Brillo

Se emplea la misma técnica descrita del reflectómetro General Electric.

Prueba de Desintegración

Permite estimar rápidamente la calidad de la arcilla según su facilidad de dispersión sin formar conglomerados. En un agitador eléctrico de alta velocidad se mezclan durante 15 min 250 gm de arcilla, 15 mlt de pirofosfato tetrasódico al 5% y 152 mlt de agua destilada. A 250 gm de esta suspensión se le agregan 240 gm de emulsión de almidón al 10%, se agita 10 min a alta velocidad y se pasa por malla 120. De ésta sobre una placa de vidrio, se aplica una capa delgada con un rodillo de 15.24 cm que deje un espesor de 0.00381 cm (producido por Brid & Son, East Walpole, Mass., EUA). Se seca 5 min a 105°C y se examina con lente de aumento por dispersión y formación de conglomerados, comparando con patrones de referencia.

Tamaño de Partícula

Se determina según la técnica antes descrita, basada en el empleo de la ley de Stokes y del hidrómetro de Bouyoucos.

pH

Se usa el método ya indicado.

Residuo en Malla 325

Es un índice la calidad del caolín, debiendo ser casi nulo. En un agitador de alta velocidad se mezclan durante 10 min 100 gm de caolín, 375 mlt de agua y 25 mlt de pirofosfato tetrasódico preparado disolviendo 20 gm de $Na_4P_2O_7$ ó 33.35 gm de $Na_4P_2O_7.10H_2O$ en 1 lt de agua. Se pasa la suspensión a través de malla 325, ayudando con agua si es necesario. El residuo se seca a 105°C y se admite como residuo en malla 325.

Viscosidad

Se mide con diferentes viscosímetros que producen diversos esfuerzos y con fórmulas similares a las de uso final de la arcilla. Una fórmula normalmente aceptada usa 42% de sólidos con 15 partes de caseina por 100 de arcilla y otra, 57.5% de sólidos con 17 partes de almidón de viscosidad media por 100 partes de arcilla. Es, sin embargo, común, que se usen también suspensiones de arcilla en agua, preparadas con 300 gms de arcilla seca y 128.6 gms de solución de pirofosfato tetrasódico al 0.585%, agitando eléctricamente 10 min. Se pasa la suspensión a través de malla 100 y se mide la viscosidad a 25°C, en unidad Stormer de cilindro hueco y carga de 150 gm. Si la lectura es mayor de 200 rpm se estima que la arcilla fluye libremente.

Arcillas en la Industria Hulera

Las arcillas son usadas en formulaciones de hules naturales o sintéticos y plásticos por sus propiedades de endurecimiento y reenforzado y bajo costo en comparación con otros pigmentos. Se las emplea en formulaciones de hule natural, hule sintético (copolímeros-butadieno-estireno), neopreno, hule butílico y hules resistentes a grasas (butadieno-acronitrilo), en productos tales como suelas, tacones, llantas, bandas transportadoras, tubería, mangueras, juguetes, recubrimiento de alambres, esponjas, artículos caseros, etc.

Dos son los tipos de arcillas, duras y blandas, que se usan en la industria hulera, según las características físicas propias y que imparten a los productos en que se usan. Ambas tienen la misma mineralogía, caolinita en placas hexagonales, con escasas impurezas de óxidos de hierro o titanio (ilmenita,

rutilo) y prácticamente libre de hidrómica, montmorrillonita, cuarzo o impurezas metálicas de cobre o manganeso. Su análisis químico, Tabla VIII, es el de caolinita de 46.5 SiO_2 y 39.6% Al_2O_3. Gravedad específica 2.60, índice de refracción 1.56, color crema a blanco. Las arcillas duras son normalmente molidas o pulverizadas en seco y clasificadas en aire, con lo que su calidad es ligeramente menor de las blandas que están más finamente pulverizadas o, de preferencia, son lavadas y flotadas en agua, con o sin ayuda de surfactantes. En las arcillas duras, el brillo es de 76 a 77%, acidez de 4.5 a 5.5, residuo en malla 325 de 0.03 a 0.17%, absorción de aceite de 34 a 35 mlt de aceite de linaza por 100 gm de arcilla, absorción de la sal de zinc del verde de malaquita de 1.60 gm por 100 gm de arcilla, distribución de partícula de 97 menor de 5 micrones, 96 menor de 4, 93 menor de 3, 90 menor de 2, 81 menor de 1, y 62% menor de 0.5 micrones. En las arcillas blandas, el brillo es de 78 a 88%, acidez de 4.5 a 10.5, residuo en malla 325 de 0.01 a 0.05%, absorción de aceite de linaza de 28 a 38 mlt, absorción de la sal de zinc del verde de malaquita de 1.3 a 1.6 gm, distribución de partícula de 91 a 100 menor de 10 micrones, 79 a 100 menor de 5, 64 a 100 menor de 4, 59 a 98 menor de 3,50 a 92 menor de 2, 33 a 74 menor de 1 y 16 a 45% menor de 0.5 micrones, siendo la viscosidad de 73 a 82 centipoises.

Tienen además propiedades ópticas (índice de refracción 1.56) más cercano a las del hule (1.52 para hule natural, 1.51 a 1.56 para hules sintéticos) que otros pigmentos (barita 1.64, litopon 1.84 óxido de zinc 2.04, óxido de titanio 2.76) y, por su carácter polar, puede substituirse en hules libres de azufre. La concentración que se usa en formulaciones de hules puede llegar hasta 50 ó 60%.

Las siguientes técnicas son recomendadas para la determinación de características de arcillas para la industria hulera:

Gravedad Específica

Según la técnica conocida del picnómetro.

Indice de Refracción

Por inmersión en aceites de índice de refracción conocido.

Brillo General Electric

Empleando la técnica anteriormente descrita del reflectómetro General Electric, comparando con el óxido de magnesio.

pH

Según la técnica indicada.

Residuo en Malla 325

Simplemente se pasa la arcilla a través de malla 325, en húmedo o ayudando con alcohol o acetona a romper los conglomerados. Sin embargo, se prefiere preparar una suspensión con 100 gm de arcilla, 375 mlt de agua y 25 mlt de una solución de pirofosfato tetrasódico preparada disolviendo 20 gm de la sal en 1 lt de agua. Se agita mecánicamente 10 min y se pasa a través de la malla, reportando el peso seco como residuo en malla 325, en porcentaje.

Asentamiento en agua

25 gm de arcilla se agitan mecánicamente durante 7 min en 225 mlt de agua. La suspensión preparada se vacía en tubos de Nessler y se deja asentar durante 48 hrs, midiendo la altura de la columna y reportando como índice de asentamiento el porcentaje respecto a la altura original. Normalmente se tiene valores de 70 a 85% para arcillas duras y de 40 a 50% para blandas, considerándose ello como un índice del reforzado y endurecimiento que pueden desarrollar.

Distribución de partícula

Según los métodos anteriormente descritos de la Ley de Stokes y el hidrómetro de Bouyoucos.

Viscosidad

En viscosímetros tipo Stormer, usando suspensiones preparadas con 35 gm de arcilla en 65 mlt de agua.

Absorción de Aceite

Se prepara una pasta agregando a 100 gm de arcilla suficiente aceite de linaza, gota a gota, como para formar una pasta de consistencia tal que pueda enrollarse sobre una superficie litográfica sin romperse. Generalmente varía de 25 a 40 gm de aceite por 100 gm de arcilla.

CARACTERISTICA	ORIGEN									PROMEDIO	
	South Carolina, EUA				Georgia, EUA		EUA				
Tipo Proceso	Duro Flot. Aire	Duro Flot. Aire	Blando Flot. Aire	Blando Flot. Aire	Blando Flot. Aire	Blando Lav. Agua	Blando Lav. Agua	Blando Lav. Agua surfactantes	Blando Lav. Agua surfactantes	Duro Flot. Aire	Blando Lav. Agua
Análisis Químico											
SiO_2							45.40	45.40	45.40		45.00– 47.00
Al_2O_3							38.80	38.80	38.80		37.00– 40.00
Fe_2O_3							0.30	0.30	0.30		0.10– 0.40
TiO_2							1.50	1.50	1.50		0.10– 1.50
CaO							0.10	0.10	0.10		0.00– 0.10
Na_2O							0.10	0.10	0.10		0.00– 0.10
K_2O							Ind.	Ind.	Ind.		Ind.
Pérdida a 900° C							13.80	13.80	13.80		12.00– 14.00
Humedad							1.00	1.00	1.00		0.00– 1.00
Características Físicas											
Gravedad específica	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60	2.58	2.58	2.58	2.60	2.60
Densidad bruta (gm/mlt)	0.16	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	1.05	1.05	1.05	0.45	0.45– 1.05
Indice de refracción	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
Brillo G.E.	76 –77	76 –77	78 –79	78 –79	81	83 –84	85.5 –87	86.5 –88	86.5 –88	76 –77	78 – 88
pH	4.5 – 5.5	4.5 – 5.5	4.5 – 5.5	4.5 – 5.5	6.0 – 7.0	4.5 – 5.5	3.8 – 5.6	9.5 –10.5	6.3 – 7.6	4.5 – 5.5	4.5 – 10.5
Residuo en No. 325 (%)	0.17	0.03	0.30	0.05	0.30	0.02	0.01	0.03	0.01	0.03– 0.17	0.01– 0.05
Distribución de partícula % menor de 10 μ	99.9	99.9	91.7	91.7	93.4	98.8	98			100	91 –100
5	97.1	97.1	79.3	79.3	81.2	90.6	96			97	79 –100
4	95.6	95.6	64.8	64.8	80.0	86.4	93	100	100	96	64 –100
3	93.3	93.3	59.1	59.1	74.3	79.9	85	98	98	93	59 – 98
2	89.9	89.9	50.5	50.5	65.4	70.5	78	92	92	90	50 – 92
1	80.9	80.9	33.4	33.4	47.0	55.0	56	74	74	81	33 – 74
0.5	61.9	61.9	16.2	16.2	30.8	39.0	27	45	45	62	16 – 45
Viscosidad (cfp)	366	366	73.5	73.5	76.0	82.0				366	73 – 82
Absorción de aceite (gm)	31 –35	31 –35	28 –29	28 –29	29 –30	32 –33	34 –38	28 –31	37 –41	34 –35	28 – 38
Absorción de malaquita Zn (gm)	1.60	1.60	1.30	1.30	1.46	1.58				1.60	1.3 – 1.6
Color	crema	crema	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	blanco	crema	blanco

Tabla VIII. Características de Arcillas para la Industria Hulera

Absorción

Cuando es de substancias orgánicas, se emplea la difenil guanidina agregando 5 gm de arcilla a una solución 0.01N de dicha substancia en metanol. Se agita, centrifuga y titula la solución clara de metanol con ácido clorhídrico 0.01N, reportando la absorción en gramos por 100 gm de arcilla. Normalmente varía de 0.75 a 1.70 gm. Si la absorción es por colorantes, como verde de malaquita, se agitan 5 gm de la arcilla en 100 ml de solución 0.1% del colorante. Se agita, centrifuga y mide el color de la solución colorimétricamente.

Arcillas en la Industria de la Fundición

En la industria de la fundición, piezas metálicas son formadas por colado del metal fundido sobre moldes de arena. Estas, llamadas arenas de moldeo, contienen sílice, arcillas, agua y otros aditivos para desarrollar una masa plástica fácilmente moldeable que, al secar y endurecer, permite el colado de metales fundidos. El componente principal, la sílice, es normalmente arenisca cuarcífera, de composición variable, tamaño de partícula de 0.05 a 2.00 mm, anhedral, cuyo único tratamiento no pasa de simple cribado y lavado. Las arcillas imparten plasticidad a la mezcla y prácticamente pueden ser de cualquier tipo, esto es, caolinita, montmorrillonitas o hidrómicas, primarias o secundarias, si bien se prefieren las montmorrillonitas sódicas de origen marino por su alto poder de hinchamiento.

El comportamiento de la arena de moldeo depende tanto de la arena cuarcífera como de la arcilla y sus aditivos. Al igual que para otros minerales no metálicos, no hay especificaciones y las pruebas de control se aceptan como índices del comportamiento en servicio. De hecho, la única especificación que puede darse es la de que produzcan piezas coladas de acabado terso, libres de incrustaciones, gránulos o rugosidades.

El control de la arena de moldeo se hace en ella y en sus componentes. En el caso actual de las arcillas, se estudian estas manteniendo constante la arena cuarcífera, lavada y seca, de fragmentos arredondados menores de malla 40, 95 de menos malla 50 y 5% mayor de malla 7. Si esta arena es muy gruesa, se admite el uso de un patrón de 0 a 1 sobre malla 20, 2 a 4 sobre 50, 11 a 25 sobre 70, 87 a 43 sobre 100, 23 a 29 sobre 140, 6 a 11 sobre 200, 0 a 2 sobre 270 y 0 a 1% a través de malla 270.

La proporción de arcillas en la mezcla es variable según su mineralogía y propiedades. Normalmente es de 4 a 6% de montmorrillonita sódica con

1.5 a 3% de agua o de 10 a 12% de caolinitas plásticas con 3 a 5% de agua, pero es variable y el único criterio válido es el de producir piezas coladas de buena superficie.

Las pruebas de control recomendadas por la Sociedad Americana de Fundidores especifican el uso de briquetas cilíndricas de 5.08 cm de diámetro y 5.08 cm de longitud, preparadas por martillado de la mezcla en cilindros de acero endurecido (65-70° Rockwell) de 5.08 cm de diámetro interior, paredes de 0.45 cm y longitud de 12.19 ± 0.0175 cm, con martillo de 6350.3 gm de carga y carrera de 5.08 cm, a tres golpes. Para pruebas a temperaturas elevadas, se usan briquetas de 2.85 cm de diámetro y 5.08 cm de largo.

Se hacen las siguientes mediciones:

Finura

Se distingue entre fracción arenosa o mayor de 20 micrones y arcillosa o menor, que no se asienta su agua a la velocidad de 2.54 cm por min. La primera se mide por cribado en mallas y la segunda, con el hidrómetro de Bouyacous o la pipeta de Andreasen, según la técnica anteriormente descrita. La preparación de la muestra requiere la separación completa de las fracciones por agitación eléctrica y si es necesario, con ayuda de dispersantes (30 gm de sosa en 1 lt de agua).

Humedad

A 100°C.

Permeabilidad

Representa el comportamiento de la mezcla de moldeo al ser atravesada por un gas a presión. Depende de la distribución y acomodamiento de la partículas, sus características, aditivos, etc. Se distinguen los índices de plasticidad (1) verde o de la mezcla húmeda moldeada, (2) seca o de mezcla secada a 105°C, (3) de mezcla quemada a más de 105°C, y (4) de mezcla curada a más de 110°C por radiación infrarroja, gases calientes o alta frecuencia. Se miden en aparatos apropiados pasando a través de las briquetas indicadas 2000 mlt de aire a 10 gm/cm².

Resistencia

Es la propiedad de la arena moldeo que más depende de las características de la fracción arcillosa. Con aparatos apropiados se determi-

nan resistencias a la (1) compresión en verde, (2) compresión en seco y (3) compresión de mezcla fraguada en aire que conserve su humedad relativa de equilibrio. Dado que la resistencia depende del contenido de agua de la mezcla, debe de especificarse el agua de plasticidad o, mejor su relación con la resistencia. Para montmorrillonitas sódicas, la resistencia a la compresión en seco varía de 1.40 a 7.00 Kg/cm^2, entre 6 y 15% de humedad.

Dureza de la superficie verde

Representa la resistencia de la superficie del molde, medida con penetrómetros. Depende de la plasticidad, densidad, distribución granulométrica, etc., de la mezcla.

Densidad

Relación peso-volumen de la mezcla compactada por martillado y que depende del agua de plasticidad. Varía entre 1.58 y 1.64 gm/lt., para contenidos de agua de 3.0 a 6.5%.

Fluidez

Es la propiedad de la mezcla de adquirir forma por martillado o extrusión. La briqueta descrita se martilla y el cambio de longitud después del quinto golpe representa la fluidez. Una variación de 0cm., en longitud corresponde a una fluidez de 100% y, una de 0.254 cm., a 0%. Para mezclas con 2 a 10% de arcillas y 1 a 10% de agua de plasticidad, la fluidez es del orden de 80%.

Durabilidad

Es la resistencia de la mezcla a sucesivas coladas sin removerse o sin agregar nuevos componentes.

Arcillas en la Industria Petrolera

En la exploración y perforación de pozos petroleros, el pozo se mantiene lleno de un flúido viscoso con los propósitos de (1) extraer a la superficie la roca cortada, (2) evitar el asentamiento y (3) mantener presión interior, hacerlo impervio y evitar filtraciones. Estos flúidos, llamados lodos de perforación, se preparan normalmente con 65 a 98% de agua, 2 a 30% de ar-

cillas, 0 a 25% de barita y 0 a 10% del mismo material extraído de la perforación.

La calidad de las arcillas para lodos se mide según (1) los barriles de lodo de 15 centipoises de viscosidad que se preparan con 1 Ton de arcilla en agua fresca salada, (2) la resistencia del gel o diferencia entre la oposición al movimiento después de agitar y después de reposar 10 min., (3) el espesor de la capa que se forma al pasar por un filtro un lodo de 15 centipoises de viscosidad a una presión de 7 Kg/cm^2 durante 30 min. Las características de las principales arcillas se indican en la Tabla IX.

Se observa que la arcilla más recomendable para lodos es la hectorita, pero, por su escasa abundancia no es muy usada y se prefiere la bentonita sódica tipo Wyoming que produce lodos de excelente viscosidad y toxotropia. Sin embargo, la práctica común es preparar lodos con los materiales propios más cercanos a la perforación y de las características más indicadas para el suelo perforado.

La importancia de las arcillas en la industria petrolera no se limita a los lodos de perforación. Por el contrario, su estudio es muy importante en la localización de petróleo en donde sirven como índice geoquímico o para caracterizar una formación o estructura geológica. Así, los yacimientos de petróleo de California están asociados a estructuras del Terciario que se caracterizan por abundante montmorrillonita, caolinita, hidrómica y minerales expandibles; los depósitos en arenas del Paleozoico Superior de Pennsylvania, E.U.A., tienen hidrómica y escasas montmorrillonita y caolinita y los del Precámbrico de Africa del Norte se caracterizan por hidrómica y caolinita.

Arcillas en Síntesis Orgánicas

Las arcillas, en su estado natural o por tratamiento químico con ácidos minerales, adquieren propiedades catalíticas de interés para la industria en procesos tales como fraccionación de gasolinas, polimerización de aceites esenciales, ciclización de ácidos alifáticos y oxidación y reducción de benzol y fenol.

Se dijo anteriormente que los minerales arcillosos son filosilicatos con cationes interlamelares absorbidos (Na, Ca, Mg, Al, H_3O) y con amplia substitución iónica en su estructura de Si^{4+} por Al^{3+} o Fe_3^+, $Mg^{++}{}_{(6)}$ + $Si^{4+}{}_{(4)}$ por $Al^{3+}{}_{(6)}$ + $Al^{3+}{}_{(4)}$ en la capa tetrahédrica y de Al^{3+}, Mg^{++}, Fe^{++}, Fe^{3+}, Li^+, OH^-, F^- y Cl^- en su capa octahédrica. Por tratamiento ácido y dependiendo de su intensidad, es posible substituir parcial o totalmente estos iones por protones para dejar estructuras de mayor porosidad y área superficial y

	Barriles de lodo de 15 ctp. en agua fresca	Sólidos en filtro (% peso)	Permeabilidad de torta filtrada (microdarcys)	pH	Arcilla en lodo (%)	Resistencia a torsión después de agitar	Resistencia a torsión después de asentar 10 min	Viscosidad Stormer a 600 rpm
Montmorrillonita sódico (wyoming)	125	10.0	1.80	8.2	5– 7	3– 20	20–100	8– 40
Hectorita (California)	160	6.5	0.85	8.6				
Montmorrillonita cálcica	71	16.0	2.10	8.7	18–33	55–120	20–130	5– 50
Montmorrillonita cálcica	18	50.0	1.50	7.5				
Montmorrillonita-atapulgita					38–55	5–130	15–150	6–100
Hidrómica	13	67.0	38.00	7.4				
Caolinita	14	70.0	285.00	7.0				
Atapulgita	105	23.0	68.00	7.1				
Haloisita	17	60.0	15.00	7.7				

Tabla IX. Características de Arcilla para Lodos de Perforación

menor densidad, defectuosas, comparables a algunas estructuras orgánicas, y capaces de donar protones durante un proceso catalítico. Durante el tratamiento, la substitución protónica es primeramente por los cationes interlamelares que son los menos sujetos a la estructura para seguir con aquellos en las capas octa y tetrahédrica. La intensidad del tratamiento y la naturaleza de la arcilla original fijan la actividad final del catalizador.

El proceso de activación en términos generales, incluye tratamiento con ácidos minerales en condiciones más o menos enérgicas, eliminación del exceso de ácido y calcinación a una temperatura suficiente como para consolidar la estructura desarrollada sin llegar a destruirla. Es aplicable, preferentemente, a montmorrillonitas pero también a haloisitas y caolinitas sedimentarias, siendo de suponer que sean preferidas aquellas en que la substitución iónica o el desorden estructural estén más desarrollados. Se estima quedarían exceptuados aquellos minerales altos en hierro o en metales pesados (venadio, níquel, etc.) que normalmente se consideran como venenos para catalizadores.

Entre las arcillas actualmente usadas se citan montmorrillonitas de Arizona y Mississippi, , E.U.A., montmorrillonitas alumínicas con reemplazo de magnesio por aluminio, haloisita de Eureka, Utah, E.U.A., y caolinitas sedimentarias de Georgia. En México, algunos casos simples de activación ácida para procesos de decolorización han sido desarrollados con montmorrillonitas localizadas al N del Valle de México y en los Estados de México, Morelia, Puebla y Coahuila.

Catalizadores tipo silicoaluminato son preparados por tratamiento ácido y activación térmica de minerales arcillosos o sintéticamente. El empleo más común es en fraccionación de gasolinas en que vapores de aceites pesados se pasan a través de lechos de catalizador o en lechos fluidificados, a 425-500°C, presión atmosférica, de 5 a 20 seg para producir 5% de metano y propano, 10% de butano, 45% de gasolina y 40% de aceite sin alterar. Otros usos incluyen polimerización de aceites esenciales (a sesqui y politerpenos), deshidratación de canfor y aceites de pescado, síntesis de alcoholes alifáticos, condensación de aldehidos y cetonas a bases de piridina, isomerización de aldehidos, inversión de azúcares, etc.

Arcillas en Ingeniería Civil

En ingeniería civil y particularmente, en mecánica de suelos, es fundamental el conocimiento de los suelos y su comportamiento bajo condiciones diversas que dependen de su historia geológica y composición. Así, en suelos arcillosos, son importantes sus características actuales y sus reacciones a la

acción de soluciones químicas, corrientes eléctricas o al contacto con otros minerales que pueden variar completamente su permeabilidad, resistencia, etc. En general, el estudio de suelos en ingeniería civil incluye mineralogía y comportamiento bajo condiciones diversas. La determinación mineralógica es importante por que permite predecir su comportamiento y la forma de controlarlo. Suelos arcillosos pueden contener predominantemente montmorrillonita, hidrómica, caolinita, haloisita o alófano. Los primeros son de plasticidad, actividad e índice de liquidez elevado, baja resistencia a la presión no confinada, alto hinchamiento y absorción de agua, mientras que los suelos caoliníticos son de baja actividad, índice de liquidez y plasticidad bajo y de alta resistencia a la presión no confinada. Más aún, el conocimiento mineralógico permite controlar sus propiedades aprovechando la facilidad de intercambio iónico, de reacción a corrientes eléctricas, etc.

La mineralogía permite estimar las características de un suelo pero no calcular los valores absolutos representativos de su comportamiento actual o bajo condiciones como las correspondientes a una presa o un edificio. De aquí que se hagan una serie de pruebas características entre las que se citan las siguientes:

Plasticidad

Es posiblemente la propiedad más importante en el estudio del suelo. Depende de su mineralogía, distribución de partícula, intercambio iónico, historia geológica, etc. Se determina en función del (1) límite plástico (Lp) o humedad mínima expresada como porcentaje de la correspondiente a suelo seco que puede enrrollarse en hilos de 0.319 cm de diámetro sin romperse, correspondiente al agua absorbida, sobre la condición rígida, sin separación de partículas; (2) límite líquido (L_1) o humedad como porcentaje de suelo secado que fluye al agitarse ligeramente y (3) índice de plasticidad o diferencia entre límites líquido y plástico. Valores comunes para dichos límites son:

	L_p	L_1
Montmorrillonita	51-97	125-700
Atapulgita	100-124	161-232
Hidrómica	36-43	69-100
Caolinita	26-38	34-73
Haloisita	29-60	34-65
Alófano	78-131	85-207
Clorita	36-40	44-47

Actividad

Es la relación de índice de plasticidad a contenido de fracción seca o porcentaje de tamaño menor de 2 micrones. Varía entre 0.5 y 7.0 para montmorrillonitas, 0.57 a 1.23 para atapulgita, 0.23 a 0.58 para hidrómica, 0.01 a 0.41 para caolinita y 0.02 a 0.16 para haloisita. Se diferencía entre arcillas (1) inactivas, de índice de plasticidad menor de 0.5, (2) inactivas con índice entre 0.50 y 0.75, (3) normales, entre 0.75 y 1.25, (4) activas, entre 1.25 y 2, y (5) activas de índice mayor de 2. Desde el punto de vista de construcción, son recomendables las arcillas poco plásticas, gruesas, de baja calidad.

Indice de liquidez

Es la relación de contenido de agua menos límite plástico a índice de plasticidad. Varía con el grado de consolidación del depósito y normalmente, son de alto índice las montmorrillonitas sódicas y de bajo, las arcillas floculadas.

Resistencia a compresión no confinada

La resistencia a la compresión de un suelo fijo en condiciones no confinadas, distingue entre suelos (1) muy blandos, si la resistencia es menor de 0.25Kg/cm^2, (2) blandos, entre 0.25 y 0.50 Kg/cm^2, (3) medios, entre 0.50 y 1.00 Kg/cm^2, (4) rígidos, entre 1.00 y 2.00 Kg/cm^2, y (5) muy rígidos, de resistencia entre 2.00 y 4.00. La medición se hace en prensas y con briquetas específicas. Son de mayor resistencia las caolinitas que las montmorrillonitas, pero depende mucho de factores como humedad, cationes intercambiables, etc.

Resistencia a la tensión

Es la resistencia de una briqueta sometida a carga progresiva mayor pero varía mucho con la humedad, orientación de partículas, etc. Se mide con equipos específicos.

Sensibilidad

Es la relación entre la resistencia de suelo no disturbado y la de suelo remoldeado, con la misma humedad. Se diferencía entre suelos (1) insensibles, si el índice es menor de 1, (2) de baja sensibilidad, si es

entre 1 y 2, (3) de sensibilidad media, entre 2 y 4, (4) sensibles, entre 4 y 8, (5) extrasensibles, mayor de 8 y (6) rápidos, de índice mayor de 16.

Permeabilidad

Es la capacidad del suelo de ser atravesado por un flúido. El coeficiente de permeabilidad es

$$K = 200\ D^2e^2$$

D tamaño efectivo de partícula
e relación de espacios vacíos

que se determina con aparatos apropiados comparables a los usados con arenas de moldeo. Normalmente, montmorrillonitas sódicas son las más impermeables y atapulgita, caolinita o alófano las más permeables.

Distorsión por congelación

Es la deformación del suelo causada por absorción de agua y formación de hielo. En mezclas de arena y arcilla, ocurre cuando los contenidos de arcilla son menores de 25%.

Absorción de agua

Es la propiedad de algunos suelos de absorber agua e incrementar su volumen. Normalmente se debe a montmorrillonitas y en menor grado, a otras arcillas. En suelos confinados, el hinchamiento puede desarrollar presiones de hasta 167 Ton/mt^2.

Comprensibilidad y consolidación

Es la capacidad del suelo de soportar carga y reducir sus espacios vacíos al comprimirse verticalmente, estando confinado lateralmente y entendiéndose por espacios vacíos la relación entre volumen total de poros a volumen de la fracción sólida. Es mayor en montmorrillonitas que en caolinitas.

Usos Varios de las Arcillas

Arcillas activadas, preparadas por tratamiento ácido de montmorrillonitas cálcicas, encuentran amplia aplicación en proceso de decolorización y deso-

dorización de aceites minerales, vegetales (soya, algodón, coco) o animales, alimentos, bebidas (cerveza, vinos, licores), y productos químicos (azufre). Generalmente son arcillas de escaso poder de decoloración original pero que fácilmente lo desarrollan por tratamiento ácido, bajo hinchamiento y retención de aceite, área superficial de 120 a 140 mt^2/gm, y pH de ligeramente alcalino a ligeramente ácido.

Atapulgita, sin más tratamiento que lavado o activación por ligera calcinación, es usada en purificación de aceites para uso eléctrico para subir su conductividad de 4000 a 7000 megahoms; en desulfurización de derivados del petróleo por convertir los sulfuros de alquilo a sulfuro de hidrógeno; como emulsiones acuosas para recubrir productos químicos y evitar su hidratación y conglomeración; en preparaciones contra trastornos intestinales; como antídoto, sola o mezclada con fosfato monosódico, para morfina, cocaina y nicotina; como absorbente de los principios coagulantes de los venenos de serpientes; en lodos de perforación especiales para agua salada, yeso, etc., en plásticos, por sus propiedades tixotrópicas estables con el calor; etc. Se caracteriza por tener una composición química de 65 a 70 SiO_2, 10 a 15 Al_2O_3, 10 a 12 MgO, menos de 6 por ciento Fe_2O_3, pérdida por calcinación de 6 a 25% y contenidos menores de CaO, K_2O, Na_2O, etc., tamaño promedio de partícula varía desde 0.1 hasta 20 micrones, pH de 7.5 a 9.5, gravedad específica de 2.36 a 2.47, densidad bruta de 0.20 a 0.72 gm/cm^3 área superficial de 120 a 230 mt^2/gm.

Montmorrillonita sódica, de alto hinchamiento, es útil para coagular las impurezas coloidales, reducir el contenido de hierro y la acidez de vinos, licores y jugos ácidos fermentados. También en purificación de miel, aceite de coco y grasas, limpiado de papel de periódico, emulsiones bituminosas para concreto, alimento para pollos, estabilizante de grasas, etc.

Caolinitas de buena cristalización y fino tamaño de partícula (1 a 10 micrones) se usan como adhesivo en cartoncillos; como inerte en pinturas, telas de pana y plásticas para mejorar su resistencia química, opacidad, flujo y acabado; en tintas de imprenta, permitiendo controlar sus propiedades reológicas, para suavizar y mejorar el color de cueros, etc.

CONCLUSIONES

Características geológicas y mineralógicas, métodos de identificación y propiedades de interés tecnológico han sido presentadas, en forma simple, para las principales arcillas y minerales arcillosos. Se notará que, para un

mismo mineral, pequeñas variaciones de partícula, cristalización, minerales asociados, etc., definen su mineralogía, significado geológico y uso y aplicación industrial y que, entre ciertos límites, estas propiedades pueden ser modificadas.

En geología, los datos y observaciones comunes de campo son suficientes para determinar el significado geológico o el interés tecnológico de una arcilla. De aquí que se requieran estudios mineralógicos tan complejos como los presentados y que, hasta ahora no han podido simplificarse lo suficiente como para hacerlos fácilmente adaptables a la exploración de campo. En tecnología, la serie de características indicadas se estiman como índices que, para una aceptación final, requieren de una prueba actual de producción. Se concluye entonces que, todo estudio de arcillas, independientemente de sus fines, requiere análisis complejo para determinar la naturaleza de la arcilla y conocimientos avanzados, más que los aquí indicados, para estimar su origen, usos y modificaciones posibles.