

DETERMINACIÓN DE LA PLASTICIDAD DE LAS ARCILLAS: EL MÉTODO DE INDENTACIÓN COMPARADO CON EL MÉTODO DE PFEFFERKORN

Fenili ⁽¹⁾, E.P.; Biz ⁽¹⁾, F.M.; Boa Hora ⁽¹⁾, P.R.M.; Madeira ⁽¹⁾, R; Modesto ⁽¹⁾,
C.O.; Bernardin²⁾, A.M.

⁽¹⁾ Colégio Maximiliano Gaidzinski
Rua Maximiliano Gaidzinski 245; Centro; 88845-000; Cocal do Sul, SC, Brasil
modesto@elianet.com.br.

⁽²⁾ Departamento de Engenharia de Materiais
Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC
Avenida Universitária 1105; Bairro Universitário; 88806-000; Criciúma, SC, Brasil
adriano@unesc.rct-sc.br.

RESUMEN:

Como base de desarrollo del proceso cerámico, la selección de las materias primas desempeña un papel fundamental en el diseño del producto final. Para una selección correcta, es preciso conocer todas las propiedades de las materias primas. La plasticidad es una de las propiedades más importantes en la conformación de los productos de arcilla. Sin embargo, los métodos habituales utilizados - el método de Pfefferkorn es uno de ello - no son ni exactos ni fiables. Dichos métodos se basan en una información cualitativa, extremadamente subjetiva y que depende de la habilidad técnica. La bibliografía recoge algunos intentos de mejorar el método de ensayo, basados todos en la fuerza necesaria para deformar la superficie de la muestra de arcilla, en relación con el contenido del agua.

En este trabajo se compara el método de Pfefferkorn con el método de indentación. Se han estudiado cuatro arcillas diferentes y se comparan los resultados obtenidos en función del contenido del agua (Pfefferkorn) y la fuerza requerida para deformar las muestras (indentación). Los resultados indican que el método de indentación es fiable y presenta una mayor precisión comparado con el método de Pfefferkorn. También es más rápido y más práctico.

Palabras clave:Minerales arcillosos, plasticidad; indentación; método de ensayo de Pfefferkorn.

1. INTRODUCCIÓN

La plasticidad es una propiedad básica de la arcilla que permite la conformación de la pasta plástica. Cuando una pasta plástica se somete a la acción de una fuerza, se deforma y conserva esta forma perfectamente después del cese de la aplicación de la fuerza. Las arcillas se componen predominantemente de silicatos de aluminio hidratados. Son productos de la alteración de la roca ígnea, metamórfica y sedimentaria, principalmente de los granitos, feldespatos y pegmatitas, por los agentes climáticos (lluvia, viento, etc.), proporcionándolos sus características plásticas.

Sin embargo, existe una relación entre la formación geológica y la plasticidad. Hay unas argilitas que poseen una mayor plasticidad que otras. Esto ocurre porque algunos materiales intersticiales se preservan mejor de la acción de los agentes climáticos, en comparación con otras argilitas. Lo mismo sucede con las arcillas sedimentarias transportadas desde sus lugares de formación; durante su transporte sufren un proceso de pulverización y contaminación con ciertos productos, convirtiéndolas en materiales más plásticos en comparación con las arcillas residuales, que no sufren transformaciones en el transporte. Esto es el caso, por ejemplo, de las arcillas residuales, que todavía contienen rocas inalteradas, que presentan poca plasticidad.

La constitución mineralógica de los distintos materiales arcillosos puede influir en su plasticidad. La fracción del mineral arcilloso y los tipos, proporción y tipo de los materiales naturales auxiliares pueden cambiar la plasticidad de la materia prima. Se han estudiado en profundidad y son bien conocidos algunos de los minerales arcillosos principales de las arcillas industriales, responsables de la plasticidad de las pastas cerámica. Los minerales plásticos naturales más importantes utilizados en la industria cerámica son la caolinita, illita, montmorillonita, etc.

Generalmente, en la plasticidad influye la distancia básica planar de los componentes de los minerales arcillosos; sin embargo, cuanto más grande es la distancia básica planar del mineral arcilloso, mayor es su capacidad de absorción de agua, haciendo necesario el análisis por separado de cada microcristal. Cuanto más grandes son los valores de la distancia planar en el eje c , mayor será el número de moles de agua que la estructura soporta; p. ej., la caolinita tiene una distancia c de $7\text{\AA}$ y la montmorillonita, $14\text{\AA}$, de modo que el último material presentará una mayor capacidad de absorción de agua que el primero.

Estos huecos se pueden llenar de agua o de otras moléculas no polares, y parcialmente de otros materiales que disminuyen la capacidad de absorción de agua de los microcristales, es decir, su plasticidad. Estos materiales pueden proceder de las arcillas, como impurezas, o se pueden adicionar para reducir los huecos basales, como en las formulaciones de las pastas cerámicas. Entre las impurezas principales con propiedades no plásticas se encuentran los minerales de hierro (principalmente Fe_2O_3), óxido de aluminio (Al_2O_3), feldespatos sódicos y potásicos, sales solubles (K_2SO_4 , NaCl , Na_2CO_3 , etc.), compuestos cálcicos (principalmente calcita), sílice libre, etc.

Las impurezas citadas actúan normalmente como materiales no plásticos. Sin embargo, en casos determinados, cuando su tamaño de partícula es inferior a $4\mu\text{m}$, es decir un tamaño coloidal, estos materiales pueden actuar como partículas suspensionantes, aumentando la plasticidad de la pasta cerámica en presencia de los

minerales arcillosos. La relación entre el tamaño de partícula y la plasticidad del mineral arcilloso es proporcional de forma inversa, ya que cuando el tamaño de partícula es más grande, su superficie específica es más pequeña, disminuyendo su plasticidad debido a la menor capacidad de absorción de agua de la superficie.

La presencia de sustancias orgánicas en las arcillas procede de la descomposición de hojas y madera, manifestándose con mayor intensidad en las arcillas sedimentarias. Normalmente presente de forma coloidal con un tamaño de partícula muy pequeño, la sustancia orgánica posee una alta superficie específica y una buena capacidad de moldeo, aportando las características untuosas y plásticas de los minerales arcillosos.

Para la medida de la plasticidad, el método de Pfefferkorn es el más utilizado. Este método determina el coeficiente de plasticidad de los materiales, es decir, la cantidad de agua necesaria para alcanzar una contracción de 30% con relación a la altura inicial de la pasta de ensayo, bajo la acción de un peso normalizado. Los resultados se expresan normalmente en forma de representaciones gráficas de la reducción de altura en función del contenido de humedad.

El método de Pfefferkorn da lugar a análisis de plasticidad con un cierto grado de error. Por lo tanto, los análisis no son ni coherentes ni exactos, y generan un análisis erróneo de la resistencia mecánica en crudo y en seco de los productos cerámicos, así como y de las características del secado y conformado.

Los principales problemas de la determinación de la plasticidad con el método de Pfefferkorn tienen que ver con el análisis de la humedad, relación entre la arcilla residual y sedimentaria, y el tiempo y dificultad del ensayo. De acuerdo con lo anterior, el método de Pfefferkorn determina la plasticidad de la materia prima en función del contenido de agua y no como resistencia a la penetración o a la deformación plástica. Este hecho genera errores en el análisis de la plasticidad de los minerales arcillosos y similares.

Con respecto a la relación entre las arcillas residuales y sedimentarias, las arcillas sedimentarias sufren una pulverización natural durante su proceso de transporte por el agua, reduciendo su tamaño de partícula, y tienen normalmente una mayor cantidad de material orgánico. Por lo tanto, las arcillas sedimentarias serán más plásticas que las arcillas residuales. Los ensayos realizados con estas dos arcillas, sin embargo, demuestran que el método de Pfefferkorn falla en este análisis, demostrando un resultado invertido, presentando las arcillas residuales como más plásticas que las arcillas sedimentarias, lo cual no era de esperar.

Finalmente, el ensayo de Pfefferkorn es laborioso y cuesta mucho tiempo. Es necesario eliminar y añadir sucesivamente la humedad de la muestra para alcanzar una contracción de altura del 30% con relación a la altura inicial de la pasta de ensayo, con lo cual este procedimiento se hace muy lento y engorroso. Además, para concluir el ensayo, es necesario secar la muestra y trazar un gráfico para obtener los resultados finales.

Debido a los errores y fallos presentados por el método de Pfefferkorn, en los últimos años se han presentado algunos nuevos métodos para la determinación de la plasticidad con una mayor precisión y procedimientos más sencillos. El presente trabajo presenta un método muy sencillo para el análisis de la plasticidad de las arcillas. El método utiliza un dispositivo sencillo, derivado del equipo de indentación.

La preparación de la muestra es igual para el análisis de indentación, y la plasticidad de la arcilla se determina por las fuerzas de la reacción.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO

El equipo es una adaptación de un viejo penetrómetro, con una base cilíndrica adaptada de cemento. Sin embargo, un nuevo proyecto especifica el uso de un cilindro de hierro fundido como base. Los accesorios principales incluyen una visualización digital (resolución de 0.01mm), para la medida del desplazamiento; cilindro intercambiables que contienen un resorte interno (50N/cm), para la determinación de la fuerza de reacción; un resorte de control, que garantiza una aplicación constante y gradual de la fuerza de indentación en la muestra; un cono cilíndrico de 30mm de base y ángulo de 30°.

El procedimiento de ensayo se basa en la aplicación de una fuerza de indentación en una muestra previamente preparada de mineral arcilloso, promoviendo la perforación de la muestra. En base a la reacción de la muestra contra la fuerza de indentación aplicada, el valor de la plasticidad se presenta como una lectura directa de esta fuerza de reacción medida en la visualización digital. La fuerza de reacción medida es la resistencia del mineral arcilloso contra la fuerza de indentación aplicada, es decir, su resistencia a la deformación plástica. Si la marca de perforación impresa en la muestra no presenta ningún tipo de grieta o ningún tipo de flujo plástico, el ensayo se considera válido y el valor de la fuerza presentado en el dispositivo del penetrómetro es el valor de la plasticidad.

La preparación de la muestra fue precedida por la molturación durante 30min de 700g de la materia prima en un molino excéntrico de jarra de porcelana. La suspensión cerámica obtenida se secó en un horno de infrarrojos. Los gránulos fueron desagregados y tamizados en un tamiz de malla 500. Al polvo seco se adicionó aproximadamente 25% en peso de agua, y la pasta se homogeneizó convenientemente. Finalmente, la pasta se sometió a indentación, ajustando el contenido de humedad para obtener una pared lisa y uniforme en la marca de deformación.

Las marcas con grietas o flujo plástico significan una falta de plasticidad (ausencia de agua, figura 1a) por una parte, y por otra parte, una falta de consistencia (exceso de agua, figura 1b). Estas situaciones extremas demuestran dos comportamientos, el límite plástico (falta de plasticidad) y el límite líquido (falta de consistencia), establecidos como los límites de Atterberg. Existen varios métodos para la determinación de la plasticidad que utilizan estos límites como normas. La diferencia entre ellos se determina como la plasticidad.

Después de la indentación, las marcas pueden presentar dos aspectos en sus lados: grietas, a consecuencia de la baja humedad de la muestra (figura 1a), y falta de consistencia, a consecuencia del exceso de humedad (figura 1b). La buena plasticidad se produce cuando las marcas no presentan ninguna grieta o humedad extrema, la pared formada es suficientemente lisa y, por lo tanto, tenga la humedad adecuada para la determinación de la plasticidad (figura 2).

Después de la indentación, la siguiente fase es la preparación de la pasta de ensayo para la determinación de la plasticidad. Las muestras que presentan una buena formación de pared se conforman entonces de nuevo en formas cilíndricas y se

realiza el ensayo de penetración. La fuerza de penetración en relación con el contenido específico de humedad, determinada en el ensayo de indentación, es el valor de plasticidad para el mineral arcilloso a analizar.

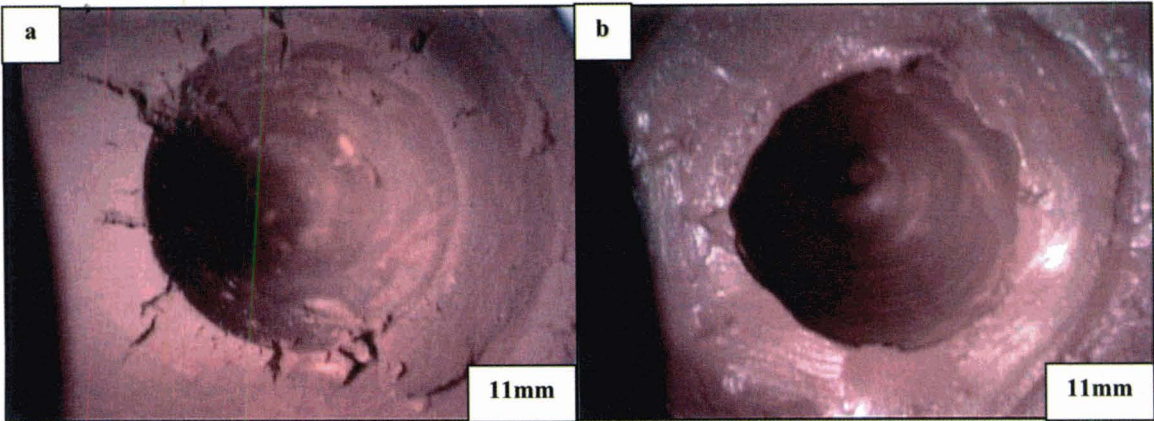


Figura 1. Indentación de la arcilla, mostrando (a) falta de agua y (b) exceso de agua.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se utilizaron cuatro materias primas para el ensayo del método propuesto, dos arcillas residuales (denominadas P y F) y dos argilitas (E y R). Los análisis químicos y mineralógicos se presentan en la tabla 1.

ANÁLISIS QUÍMICO												
R.M. ¹	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	S ²	Ppc ³
F	64.5	22.1	2.8	0.1	0.8	0.1	2.3	0.9	0.1	•	<0.1	6.4
P	55.0	30.1	0.6	•	0.2	0.1	2.7	1.1	•	•	<0.1	10.2
R	69.2	15.2	4.5	0.6	1.5	0.2	3.8	0.6	•	0.1	<0.1	4.3
E	71.8	11.8	3.9	1.6	1.5	2.0	2.6	0.4	0.1	0.1	<0.1	4.2
¹ Materias primas; ² S total; ³ Pérdida por calcinación (1000°C).												
ANÁLISIS MINERALÓGICO												
R.M. ¹	Caolinita	Illita	Cuarzo	Calcita	Feldespato potásico	Feldespato sódico	Magnetita	Fases accesorias ⁴				
F	31.0	27.0	36.5	•	<2.0	•	•	3.5				
P	71.0	6.7	19.3	•	•'5f	•	•	3.0				
R	7.5	25.0	41.0	•	13.0	5.0	3.8	4.7				
E	13.0	<2.0	41.0	3.6	23.0	14.0	2.6	0.8				
⁴ Fases sin identificar.												

Tabla 1. Análisis químico y mineralógico de las materias primas utilizadas en los ensayos.

La arcilla P posee una plasticidad baja en comparación con la arcilla F, porque el último contiene más fase illítica que el primero y la distribución granulométrica es probablemente más delgada al igual que el tamaño medio de partícula (no demostrado, sólo una suposición, basada en su docilidad). La arcilla F procedió de una formación geológica del paleozoico, siendo una arcilla residual de ladera con una cantidad baja de material orgánico.

En base a su composición mineralógica, la argilita R debería ser más plástica que la E (25.0% de illita en peso). La argilita R se compone de una formación geológica menos bien conservada en comparación con la E. Sin embargo, la argilita R posee una mayor proporción de minerales arcillosos y una menor cantidad de materiales no plásticos e impurezas, en comparación con E. Ya que presentan una distribución similar de tamaños, la argilita R debe ser más plástica que la E.

Las materias primas fueron ensayadas y analizadas por ambos métodos, el de Pfefferkorn y el método propuesto, para la comparación de las posibles relaciones y fallos entre ellas. Los resultados se detallan en la tabla 2.

MATERIA PRIMA	PLASTICIDAD	
	Pfefferkorn	Indentación
Arcilla F	31.0	19.9
Arcilla P	24.3	28.8
Argilita R	24.5	24.5
Argilita E	25.0	26.9
Unidades	Contenido de agua % en peso	Fuerza (n)

Tabla 2. Resultados del método de Pfefferkorn y del método propuesto para las materias primas utilizadas en los ensayos.

Al analizar los resultados obtenidos por el método de Pfefferkorn, se observa que para las dos argilitas y para la arcilla P, la plasticidad sería la misma -aproximadamente 24.5% de agua en peso. Esto demuestra la falta de precisión de este método.

El método de indentación, el método propuesto, basado en la fuerza necesaria para deformar cada muestra, presenta diferencias entre el comportamiento plástico de los minerales estudiados. La arcilla P es el mineral menos plástico, un aspecto que no resulta del método de Pfefferkorn. Este resultado se confirma por el análisis mineralógico, que indica una cantidad más pequeña de minerales arcillosos para la arcilla P en comparación con la arcilla F y las argilitas R y E, independientemente de su distribución de tamaño de partícula.

Como se desprende del método de indentación, la arcilla F es el mineral más plástico, ya que la fuerza necesaria para su deformación es la más pequeña; su análisis mineralógico confirma su comportamiento plástico debido la presencia masiva de minerales arcillosos, en forma de caolinita e illita (casi 70% en peso de su composición).

Finalmente, el ensayo de Pfefferkorn es un método laborioso que cuesta mucho tiempo. El tiempo necesario para la ejecución de los ensayos de la indentación, utilizando muestras humedecidas, requiere como mucho 10 minutos; el método de Pfefferkorn requiere 3 a 5 horas para realizarse. Es necesario secar las pastas de ensayo para la determinación de la humedad, así como trazar los gráficos para la determinación de los coeficientes de plasticidad.

4. CONCLUSIÓN

El método de Pfefferkorn se basa en la cantidad de agua para determinar la plasticidad de las materias primas cerámicas. No es coherente en su análisis de la plasticidad con respecto a la composición mineral de las materias primas, ni es exacto en los valores de plasticidad, ya que parece que la cantidad de agua no está relacionada directamente con la plasticidad, de forma aislada. De hecho la distribución de tamaño de partícula, el contenido de material orgánico y otros factores afectan la plasticidad, pero los métodos basados solamente en el contenido de humedad para la determinación de la plasticidad son vagos e imprecisos.

El método propuesto se basa en la fuerza de indentación necesaria para deformar una muestra; es mucho más preciso y rápido que el método de Pfefferkorn. Se habían desarrollado otros métodos basados en la fuerza de penetración, pero estos son más costosos, ya que utilizan dispositivos automáticos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Doménech, V. et al. Estimación de la plasticidad de masas cerámicas mediante la determinación de la fuerza de indentación. Qualicer 1994 Actas, v.2, 1994.
- [2] Baran, B. et al. Workability test method for metals applied to examine a workability measure (plastic limit) for clays. Applied Clay Science, v.20, i.1-2, p.53-63, 2001.
- [3] Abdallah I. et al. Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. Applied Clay Science, v.14, i.5-6, p.257-278, 1999.
- [4] Adnan A. Basma, et al. Effects of methods of drying on the engineering behavior of clays, Applied Clay Science, v.9, i.3, p.151-164, 1994.
- [5] Yannis, F.D. et al. A simple anisotropic clay plasticity model. Mechanics Research Communications, v.29, i.4, p.241-245, 2002.
- [6] Al-Shayea, N.A. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. Engineering Geology, v.62, i.4, p.319-342, 2001.
- [7] Sánchez-Girón, V. et al. Stress relaxation of five different soil samples when uniaxially compacted at different water contents. Soil and Tillage Research, v.62, i.3-4, p.85-99, 2001.
- [8] Christaras, B. A comparison of the Casagrande and fall cone penetrometer methods for liquid limit determination in marls from Crete, Greece. Engineering Geology, v.31, i.2, p.131-142, 1991.
- [9] Peters, J F. Determination of undrained shear strength of low plasticity clays. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, v.28, i.1, p.A13, 1991.
- [10] Atterberg A. Plasticity of clays. US ARMY C.R.R.E.L.: International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, v.12, i.7, p.91, 1975.