

Análisis de los métodos tradicionales utilizados para evaluar la plasticidad

GINÉS, F.; FELIU, C.; GARCÍA-TEN, J.; SANZ, V.

Instituto de Tecnología Cerámica (ITC).

Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE).

Universitat Jaume I. Castellón (España)

A pesar de la existencia de numerosos métodos para estimar la plasticidad de los materiales arcillosos, la elección del método de medida idóneo puede no ser sencilla, ya que ésta dependerá del proceso de conformado empleado (prensado, extrusión, etc.) y de la finalidad de la medida (control o caracterización). De este modo, para seleccionar el procedimiento más adecuado se deberán considerar los parámetros medidos, los factores de los que dependen, la duración del ensayo, la precisión de los resultados y el coste del equipo.

En el presente estudio se describen los métodos más utilizados en la actualidad para estimar la plasticidad, así como las ventajas e inconvenientes que éstos presentan. Así mismo, se comparan los resultados obtenidos para materias primas arcillosas de características fisicoquímicas muy diferentes.

Se ha comprobado que, aunque en general existe bastante consenso en los resultados, cuando se realizan comparaciones entre materiales de características muy diferentes pueden obtenerse resultados contrapuestos. Estas discrepancias se deben, fundamentalmente, a que en muchos de estos métodos no se evalúa exactamente el comportamiento plástico del material, sino otras propiedades relacionadas indirectamente con el mismo.

Palabras clave: plasticidad, medida de la plasticidad, método de Atterberg, índice de Pfefferkorn, método de Barna, método de Moore, resistencia mecánica.

Analysis of traditional methods used for plasticity evaluation

Though numerous methods exist for assessing the plasticity of clay materials, the choice of a suitable method may be not easy, as this will depend on the forming process used (pressing, extrusion, etc.) and the purpose of the measurement (control or characterization). Thus, selecting the most suitable procedure requires considering which parameters are to be measured, the factors on which they depend, test duration, accuracy of resulting data, and cost of equipment involved.

The present paper describes the currently most widely used methods for measuring plasticity, as well as the advantages and drawbacks each entails. The results obtained with clays having very different physico-chemical properties are also compared.

It is shown that although good agreement is generally found, using different methods to compare materials with highly varying characteristics may yield contradictory outcomes. Such discrepancies mainly arise because many tests do not actually assess a material's plastic behaviour, but other indirectly related properties.

Key words: plasticity, plasticity assessment, Atterberg plasticity test, Pfefferkorn Number, Barna plasticity test, Moore plasticity test, Modulus of rupture.

1. INTRODUCCIÓN

Cuando una arcilla se mezcla con una cantidad limitada de agua se obtiene una masa cohesiva que puede ser moldeada con facilidad. Esta propiedad, característica de los minerales arcillosos, se denomina plasticidad y en ella se ha fundamentado el moldeado de los productos cerámicos desde la antigüedad.

La importancia de esta propiedad no solo se limita al conformado de la pieza sino que se extiende a las diferentes etapas del proceso de fabricación. De este modo, es habitual atribuir un elevado porcentaje de los defectos o problemas que se producen durante el proceso de fabricación (grietas y laminaciones en el conformado, grietas de secado, roturas en el transporte y manipulación de la pieza cruda, etc.) a una plasticidad inadecuada en la pasta.

Estas relaciones se pueden establecer debido a que las características fisicoquímicas que determinan la plasticidad del

mineral arcilloso (tamaño de partícula, composición mineralógica, etc.) también influyen sobre las propiedades que controlan las diferentes etapas del proceso de fabricación (resistencia mecánica, permeabilidad, compacidad, etc.).

En consecuencia, la plasticidad se puede correlacionar con un gran número de propiedades importantes para la fabricación de las baldosas cerámicas, pudiendo servir su medida para integrar en un solo valor al conjunto de todas ellas. De ahí la importancia que tiene su determinación para el control de materias primas y pastas, así como su utilidad para la formulación y ajuste de estas últimas.

1.1. Definición de la plasticidad

La plasticidad puede definirse (1)(2)(3) como « la capacidad de un material para ser deformado sin ruptura por la acción de

un fuerza y de retener, posteriormente, la deformación alcanzada cuando esta fuerza es eliminada».

Con el objeto de poder comprender mejor esta definición, en la figura 1 se ha representado la deformación que sufre un material al ser sometido a un esfuerzo creciente. Puede observarse que, inicialmente, la deformación es función lineal de la fuerza aplicada. Sin embargo, una vez se supera un valor f , denominado esfuerzo crítico de fluencia, la deformación deja de ser proporcional a la fuerza y el material puede ser deformado con mayor facilidad. Si en ese momento se cesa la acción deformadora, el material no recupera su forma original, conservando cierta deformación permanente denominada deformación plástica. Finalmente, si se continúa deformando el material, se alcanza una deformación máxima, d , a la cual se produce la rotura.

De acuerdo con la definición anterior, la plasticidad carece de un significado físico concreto, por lo que, más que una propiedad específica del material, indica un tipo general de comportamiento. Este comportamiento, que depende de las condiciones en las que se aplique la fuerza deformadora (dirección y velocidad, fundamentalmente), lo presentan una amplia variedad de materiales al aplicarles un esfuerzo superior a su esfuerzo crítico de fluencia.

El esfuerzo crítico de fluencia y la deformación máxima antes de ruptura se utilizan a menudo para describir el comportamiento plástico de los materiales. En la figura 2 se muestra la variación que experimentan dichos parámetros con el contenido en agua, para dos masas arcillosas diferentes.

De acuerdo con esta figura se puede concluir que el comportamiento plástico de cualquier masa arcillosa es función de la relación agua/arcilla. Sin embargo, algunas arcillas presentan mayor capacidad que otras para desarrollar dicho comportamiento, con independencia del contenido en humedad de la masa. Esta capacidad, directamente relacionada con las características fisicoquímicas del material, ha sido considerada tradicionalmente como una propiedad tecnológica del mismo. Así, habitualmente se considera que una arcilla es más plástica que otra cuando soporta deformaciones mayores sin que aparezcan grietas. Para que esta comparación sea correcta, debe realizarse con masas ajustadas a unos contenidos en humedad, en los que el esfuerzo crítico de fluencia sea similar. Si observamos el ejemplo de la figura 2, puede comprobarse que, para un mismo esfuerzo crítico de fluencia, la arcilla 1 soporta sin ruptura una deformación mayor que la arcilla 2; por lo tanto, de acuerdo con la anterior definición la arcilla 1 es más plástica que la 2.

En definitiva, se puede indicar que el término plasticidad se utiliza indistintamente para designar un comportamiento de las arcillas, dependiente de la humedad, o una propiedad tecnológica de las mismas, también denominada «plasticidad intrínseca», independiente del contenido en humedad. Esta ambigüedad en su significado es particularmente importante cuando se desea obtener un índice de plasticidad, siendo interesante, en tal caso, considerar si su valor depende del contenido en humedad o, si no es así, como ha sido eliminada dicha dependencia. En adelante, cuando se emplee el término plasticidad nos referiremos a la «plasticidad intrínseca».

1.2. Medida de la plasticidad

Dado lo ambiguo del término plasticidad, no es sorprendente que no exista ningún índice numérico válido para la diversi-

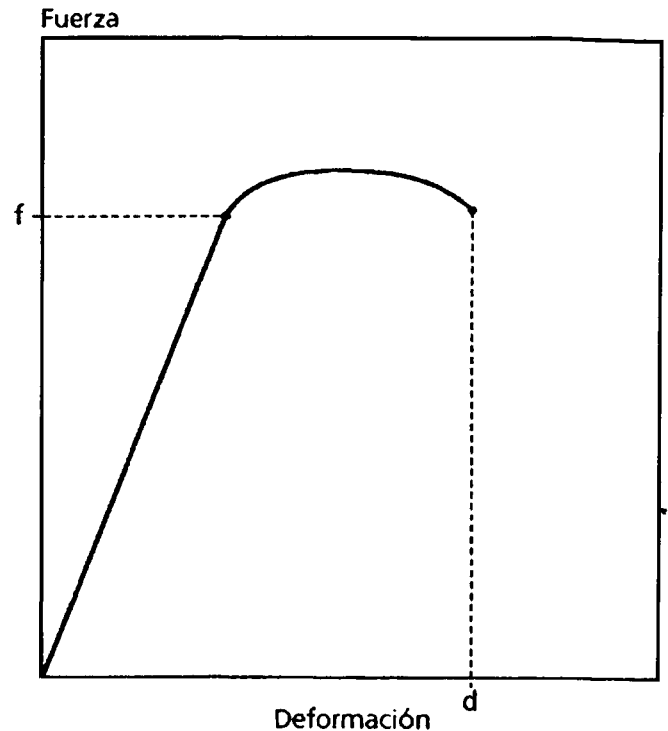


Fig. 1. Relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida.

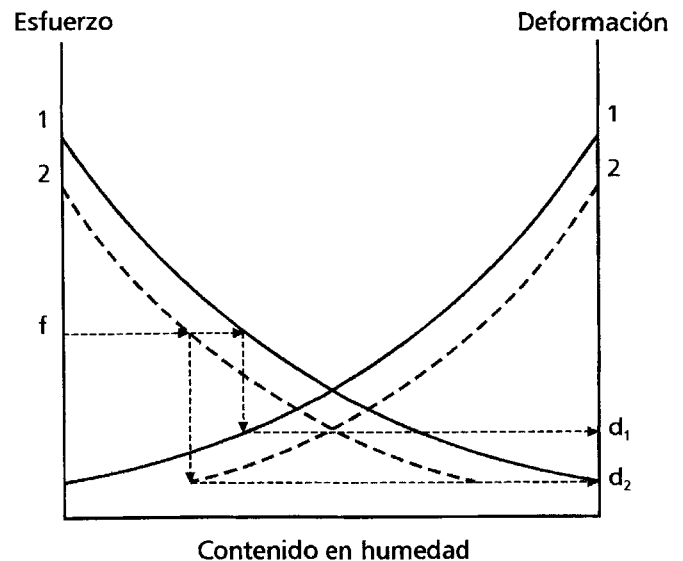


Fig. 2. Variación del esfuerzo crítico de fluencia y de la deformación máxima antes de ruptura con el contenido en humedad.

dad de procesos de fabricación existentes (moldeo manual, extrusión, prensado, colado ...) o para los diferentes factores que abarca su concepto; como consecuencia de ello, se han desarrollado numerosos procedimientos para poder estimarla. Estos métodos se pueden dividir en dos grupos (1):

a) *Métodos directos*. Estos métodos se considera que son los que definen de manera más aproximada el comportamiento plástico del material, ya que determinan el efecto que produce el contenido de humedad sobre la relación existente entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida.

Se caracterizan por el modo de en que se aplica el esfuerzo. Así, dentro de este grupo se encuentran métodos de compre-

sión, como el propuesto por Moore, métodos de extrusión, tracción, flexión, cizalla o torsión (1)(3)(4)(5)(6)(7)(8).

En general, la utilización de los métodos de estimación directos, debido principalmente al excesivo coste de los equipos utilizados, se encuentra restringida a materiales de alto valor añadido y a la investigación.

b) *Métodos indirectos*. Son aquellos que no evalúan la plasticidad propiamente dicha sino propiedades más o menos relacionadas con la misma.

Así, en algunos de estos métodos, se mide el contenido en humedad al cual una masa presenta un esfuerzo crítico de fluencia, o consistencia, determinados. En general, se asocian elevados contenidos en humedad con altas plasticidades. Estas relaciones se pueden establecer debido a que la plasticidad de una pasta o arcilla es, normalmente, más elevada cuanto mayor es la superficie específica de las partículas y, por tanto, mayor su capacidad para rodearse de agua. Entre los métodos más conocidos se encuentran el de Atterberg y el de Pfefferkorn.

Otros métodos indirectos se basan en la medida del módulo de ruptura. En general, una resistencia mecánica alta está relacionada con materiales de elevado contenido en partículas de naturaleza arcillosa y/o de gran finura, por lo que se considera que la plasticidad es tanto mayor cuanto más elevado es dicho parámetro.

Los métodos indirectos, a pesar de haber sido muy criticados por diversos autores, ya que no estiman realmente la plasticidad, son en la actualidad ampliamente utilizados en controles rutinarios, o incluso en formulación de pastas. Esto es debido a que el coste de los equipos empleados es reducido, los ensayos sencillos de realizar y se determina, en mayor o menor medida, la «trabajabilidad» de la pasta.

A continuación se describen algunos de los métodos más utilizados. Todos ellos tienen en común el tratar de estimar la «plasticidad intrínseca» de la muestra arcillosa, obteniéndose un índice numérico que es independiente del contenido en humedad.

i) **Método de Moore**. Se define un índice de plasticidad como el cociente entre las presiones necesarias para deformar una probeta cilíndrica un 10 y un 50 % en su altura (1)(9).

Para el cálculo del índice de Moore, se emplean probetas cilíndricas de 1.5 pulgadas de altura y 1.1 pulgadas de diámetro. Estas probetas se comprimen axialmente a una velocidad constante de 1 pulgada/minuto entre dos platos paralelos. Finalmente, a partir del registro de las curvas carga/deformación, se determinan los esfuerzos de compresión necesarios para deformar la probeta un 10 y 50% (Figura 3a).

Entre las ventajas que presenta este índice se encuentran, según su autor, su escasa sensibilidad a pequeñas modificaciones en la velocidad de deformación y su independencia con el contenido en humedad de la muestra. Este último hecho permite obtener el índice de forma rápida sin necesidad de determinar el contenido en humedad de las probetas.

ii) **Método de Atterberg**. Este método determina el intervalo de humedades en el que una masa arcillosa es moldeable, definiéndose un índice de plasticidad, IP, como la diferencia de humedades entre el límite líquido, LL, o humedad por encima de la cual una masa no tiene la suficiente consistencia para ser moldeable, y el límite plástico, LP, o porcentaje mínimo de agua para hacer moldeable una masa (10).

El límite líquido se determina mediante la cuchara de Casagrande (11). Para ello, la masa se coloca en la cazoleta y se determina el número de golpes que son necesarios para que los dos lados de un surco, realizado con la ayuda de un acanalador estandarizado, se junten en al menos 1 cm. Los ensayos se repi-

ten varias veces con masas preparadas a distintos contenidos en humedad, definiéndose el límite líquido como el contenido en humedad al cual el surco se cierra en 25 golpes.

Por otro lado, el límite plástico se determina a partir del molde manual de pequeños cilindros (12). En el momento en que no se pueden moldear cilindros con un diámetro inferior a 3 mm, se considera que el contenido en humedad de la masa corresponde al límite plástico.

Un procedimiento alternativo y de mayor precisión para el cálculo de los límites de Atterberg es el denominado de indentación (Figura 3b) (13). La técnica experimental consiste en determinar la fuerza necesaria para introducir un punzón con terminación cónica en masas preparadas a distintos contenidos en humedad. Representando en coordenadas logarítmicas la fuerza de indentación frente a la humedad, se obtiene una recta, a partir de la cual se determinan los contenidos de humedad correspondientes a los límites de Atterberg.

iii) **Método de Pfefferkorn**. El índice de plasticidad se define como el contenido en humedad al cual la probeta cilíndrica sufre una deformación axial del 70% (1)(14)(15)(16).

El método consiste en moldear una probeta de 40 mm de altura, h_0 , y 33 mm de diámetro. Posteriormente, la probeta se deforma axialmente por impacto de un disco metálico soltado desde una altura de 186 mm. Los ensayos se repiten varias veces con probetas obtenidas a partir de masas con distintos contenidos en humedad. Una vez finalizados, se representa en coordenadas lineales el factor de deformabilidad, a , definido como la razón entre la altura inicial, h_0 , y la altura final, h_f , frente al contenido en humedad de las probetas. El índice de Pfefferkorn se obtiene finalmente como el contenido en humedad al cual « a » vale 3.3 (Figura 3c).

iv) **Método de Barna**. En este método se considera que el mecanismo de la plasticidad es función del agua de contracción, y define un índice como la razón entre dicha agua y el agua de amasado (17).

El agua de contracción o coloidal, se obtiene como diferencia entre el contenido de agua de masado o total, HI, y el contenido de agua en el límite de retracción, LR. (Figura 3d). Para que el índice sea comparativo, el agua de amasado se determina sobre probetas preparadas a partir de masas con igual consistencia.

El límite de retracción se define como la cantidad de agua que contiene un material en el momento en que cesa la disminución de volumen que acompaña la desecación. Existen varios modos de determinar este límite. Así, Barna propone obtenerlo a partir del contenido en keroseno que absorben probetas totalmente secas. Por otro lado, para calcular dicho límite también pueden utilizarse las curvas de Bigot (18). Estas curvas se construyen a partir de la medida de las variaciones del peso y longitud que sufre una probeta durante su secado.

v) **Resistencia mecánica**. Consiste en determinar el módulo de ruptura de probetas secas, considerándose que la plasticidad es tanto mayor, cuanto más elevada es la resistencia mecánica (1).

Generalmente, los ensayos se realizan mediante flexión por tres puntos de apoyo (Figura 3e) (19). En dicho caso, la resistencia mecánica se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{3F_{max}L}{2be^2} \quad [1]$$

F_{max} = fuerza máxima antes de la rotura o carga de rotura.

L = distancia entre apoyos.

B = anchura de la probeta.

e = espesor de la probeta.

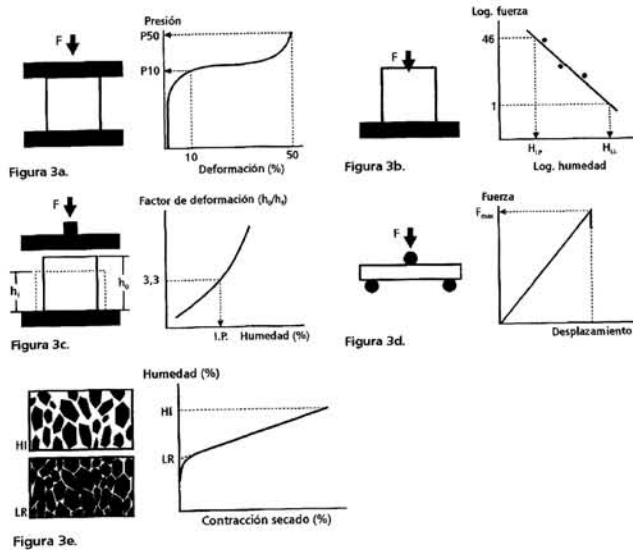


Fig. 3. Métodos de medida de la plasticidad.

2. OBJETIVOS

A pesar de la existencia de numerosos procedimientos para estimar la plasticidad de los materiales arcillosos, la elección del procedimiento idóneo puede no ser sencilla, ya que ésta dependerá del método de moldeado empleado (prensado, extrusión, etc.) y de la finalidad de la medida (control o caracterización).

En el presente trabajo se analizan y comparan algunos de los métodos tradicionales más empleados para evaluar la plasticidad, con el propósito de mostrar sus ventajas e inconvenientes y, así, proporcionar un criterio que permita la selección del procedimiento más adecuado para cada caso concreto.

Los factores que se van a tener en cuenta a la hora de discutir estos métodos, van a ser los siguientes:

- Aptitud del índice para evaluar la «plasticidad intrínseca» del material.
- Sensibilidad del método, es decir, la capacidad que tiene para distinguir entre materiales de características muy parecidas.
- Reproducibilidad de los resultados.
- Tiempo requerido para la obtención de resultados.
- Coste de los equipos.

3. EXPERIMENTAL

3.1. Materiales

Las muestras arcillosas seleccionadas para realizar el estudio han sido las siguientes:

I Una arcilla de la Cañada de Verich (Teruel) utilizada habitualmente en la fabricación de gres extruido.

II y III. Dos arcillas procedentes de Galve (Teruel) y San Juan de Moró (Castellón) empleadas en la fabricación de pavimento gresificado.

IV. Un caolín inglés utilizado como aditivo en engobes y esmaltes.

V. Un caolín de Guadalajara utilizado en la fabricación de porcelana y loza.

En la tabla I se detalla el análisis químico de las muestras.

TABLA I. ANÁLISIS QUÍMICO

REF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P.C.*
I	48.15	28.51	9.33	0.10	0.26	0.10	0.51	1.48	11.2
II	61.24	18.75	6.70	1.50	1.37	0.28	3.80	0.82	5.3
III	62.50	17.50	6.90	1.39	1.56	0.37	3.11	0.91	5.6
IV	48.00	37.00	0.65	0.07	0.30	0.10	1.75	0.02	12.5
V	49.0	37.0	0.46	0.17	0.12	0.06	0.48	0.25	12.8

*P.C.= Pérdida por calcinación (%)

3.2. Procedimiento experimental

Las muestras se han molturado, vía seca, en un molino de martillos con un tamiz de salida de 0.5 mm. Posteriormente se han amasado con la cantidad de agua requerida para realizar los ensayos. Las masas así obtenidas se han guardado en recipientes cerrados durante 24 horas, con el objeto de homogeneizar la humedad.

Los ensayos de plasticidad se han llevado a cabo de acuerdo con los procedimientos experimentales descritos en la introducción. Los límites de Atterberg se han calculado por el método de indentación y el índice de Barna a partir de las curvas de bigot.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla II se muestran los resultados obtenidos por los diferentes procedimientos, para las cuatro muestras arcillosas. Asimismo, en la citada tabla se añaden la superficie específica y compacidad de estos materiales, medida esta última como la densidad relativa de probetas moldeadas por extrusión.

TABLA II. ÍNDICES DE PLASTICIDAD, SUPERFICIE ESPECÍFICA Y DENSIDAD RELATIVA

Ref.	Métodos				Resist. (kg/cm ²)	Super. especif. (g/m ²)	Dens. relativa (%)
	Moore	Atterberg	Pfefferkorn	Barna			
I	0.88	31.5	36.0	0.58	51	34.4	70
II	0.77	18.5	29.3	0.50	90	20.5	73
III	0.66	9.8	20.6	0.45	65	13.6	78
IV	0.74	24.0	41.5	0.47	36	15.4	63
V	0.61	18.0	38.0	0.38	8	11.7	60

Al observar esta tabla, puede comprobarse que, aunque hay bastante consenso en los resultados obtenidos, cuando se realizan comparaciones entre materiales de características muy diferentes (por ejemplo entre arcillas y caolines) pueden existir algunas discrepancias.

Dichas discrepancias se pueden explicar en base a los fundamentos teóricos de los métodos analizados. Así, como ya se comentó en la introducción, los métodos que evalúan la plasticidad se pueden clasificar en dos grupos, en función de que determinen propiedades relacionadas directa o indirectamente con la misma.

Los métodos directos, entre los que se encuentra el de More, se considera que son los que estiman de forma más aproxima-

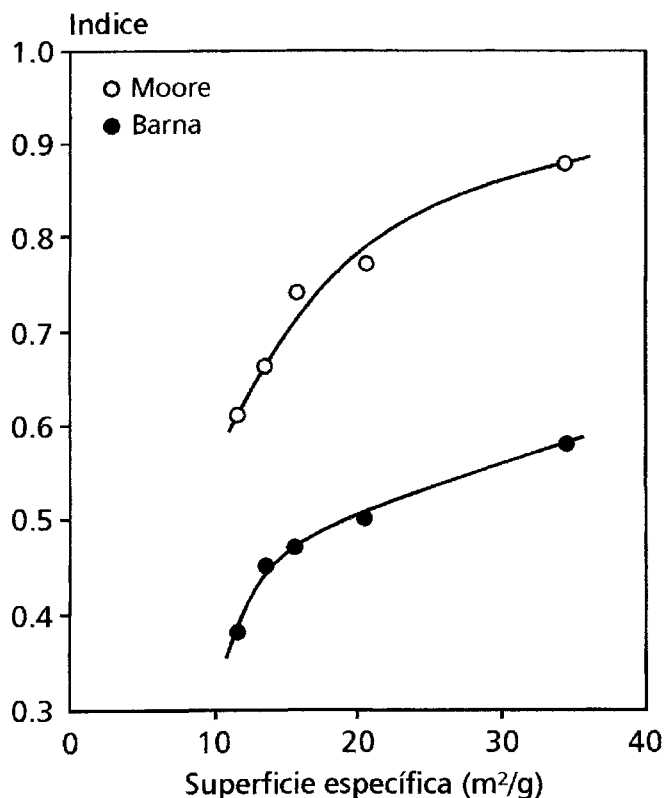


Fig. 4. Relación entre los índices de Moore y Barna y la superficie específica.

da el comportamiento plástico del material, ya que determinan la relación existente entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida. Así, cuando se representa el índice de More en función de la superficie específica de las partículas (Figura 4), se observa una correlación bastante buena entre ambos parámetros. Esto es debido a que el comportamiento plástico se encuentra asociado a partículas muy pequeñas (partículas coloidales), por lo que, en general, la plasticidad y, por tanto, el índice de More, son tanto más elevados cuanto mayor es la superficie específica del material.

Por el contrario, el resto de los métodos analizados en este trabajo no evalúan la plasticidad propiamente dicha sino propiedades más o menos relacionadas con ella. Estas propiedades (contenido en agua, resistencia mecánica, etc.) pueden depender de otros factores ajenos a la plasticidad, hecho que explicaría la existencia de resultados contradictorios.

Uno de los mayores problemas que se observa en los métodos indirectos es la gran influencia que ejerce el empaquetamiento de las partículas sobre los resultados obtenidos. Así, el índice Pfefferkorn de materiales con mal empaquetamiento, tales como los caolines, es muy alto (muestras IV y V), a pesar de que su plasticidad sea normalmente baja (Figura 5). Esto se debe a que a medida que empeora el empaquetamiento de las partículas más alto es el contenido en agua necesario para conseguir una consistencia determinada, ya que el volumen de poros que deben ser llenados es mayor.

El grado de empaquetamiento también influye notablemente sobre la resistencia mecánica. Así, aunque en ocasiones se puede establecer una correlación entre esta propiedad y la plasticidad, existen bastantes casos en los que esto no es posible. Este hecho se debe a que la resistencia mecánica depende tanto de la acción ligante, que proporcionan las partículas de

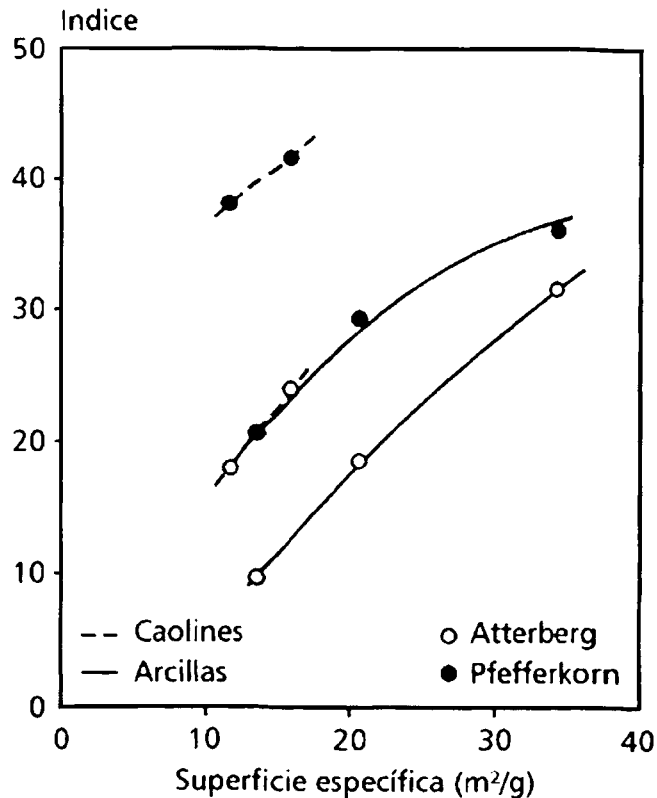


Fig. 5. Relación entre los índices de Atterberg y Pfefferkorn y la superficie específica.

pequeño tamaño, como del empaquetamiento del medio, siendo el resultado final función de cual de los dos efectos predomine. Así, por ejemplo, la muestra arcillosa I, muy plástica pero con un empaquetamiento deficiente presenta una resistencia mecánica menor que la muestra III, de escasa plasticidad pero elevada compacidad.

El índice de Atterberg también depende del empaquetamiento, sin embargo esta dependencia es menor que en los dos casos anteriores. En efecto, a pesar de que los materiales arcillosos con mal empaquetamiento tienen los límites de Atterberg desplazados a contenidos en humedad elevados, el índice obtenido no es tan dependiente de esta característica. Esto es debido a que dicha dependencia se reduce, en parte, al restar un límite del otro. No obstante, como se comprueba en la Figura 5, cuando se comparan materiales de características muy diferentes también pueden existir algunas discrepancias.

Por el contrario, la influencia que ejerce el grado de empaquetamiento del material sobre el índice de Barna es reducida. Esto es debido a que en dicho método se considera que la plasticidad es función únicamente del agua de contracción, obteniéndose ésta como la diferencia entre el contenido de agua total y el agua de poros (límite de retracción). En consecuencia, como puede comprobarse en la Figura 4, existe también una buena correlación entre el índice de plasticidad y la superficie específica.

Finalmente, de acuerdo con lo anteriormente expuesto, en la tabla II se evalúa, de forma cualitativa, la aptitud de los diferentes índices para evaluar la «plasticidad intrínseca». No obstante, se debe indicar que a la hora de seleccionar el procedimiento más adecuado se tienen que tener en cuenta otros factores, tales como la sensibilidad del método, la reproducibilidad de los resultados, el tiempo requerido para su obtención

de resultados y el coste de los equipos. Así pues, en la Tabla III también se evalúan de forma cualitativa dichos factores. Esta valoración se ha realizado a partir de las referencias bibliográficas encontradas y de la propia experiencia adquirida durante el desarrollo del estudio.

TABLA III. COMPARACIÓN CUALITATIVA ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA PLASTICIDAD

Métodos	Criterios				
	Aptitud	Sensibilidad	Reproduc-tibilidad	Rapidez	Coste
Moore	3	1	1	3	1
Atterberg (indentación)	2	3	3	1	1
Atterberg (Casagrande)	2	3	1	1	2
Pfefferkorn	1	2	2	1	2
Barna	3	0	2	0	3
Resistencia	1	2	3	0	1

Los baremos utilizados han sido: 0 = deficiente, 1 = regular, 2 = adecuado y 3 = óptimo

5. CONCLUSIONES

En el presente estudio se han analizado las ventajas e inconvenientes de algunos de los métodos que actualmente se utilizan más para estimar la plasticidad.

La elección de uno u otro método dependerá de la finalidad de la medida (caracterización o control) y del proceso de fabricación utilizado, ya que en ocasiones puede ser conveniente someter al material a condiciones semejantes a las que sufrirá en el proceso industrial. Así, la evaluación directa de la plasticidad tiene especial relevancia en los procesos de conformado en estado plástico. Por otro lado, la rapidez en la obtención de resultados y la reproductibilidad de los mismos es primordial en el control de calidad, siendo un factor menos determinante en la caracterización. Finalmente, tanto la sensibilidad del método como el coste de los aparatos de ensayo serán importantes en todos los casos.

La medida de la resistencia mecánica en seco, debido a los diferentes problemas que presenta, no es un parámetro muy útil para caracterizar la plasticidad de los materiales arcillosos.

El método de Barna presenta mayores ventajas, pero su utilización también se encuentra restringida como consecuencia de su baja sensibilidad y el tiempo requerido para obtener resultados.

El método Pfefferkorn, debido a su sencillez, se considera interesante para el control de materias primas y pastas, presentando como único inconveniente el tiempo requerido para obtener los resultados. Sin embargo, su utilidad para caracterizar la plasticidad es escasa, debido a la gran influencia que ejerce el empaquetamiento sobre el resultado final.

Los métodos de Atterberg y Moore se consideran interesantes tanto para el control de calidad como para la caracterización de materiales; sin embargo también poseen ciertos inconvenientes. Así, el método de Moore, además de requerir un equipo de elevado coste, proporciona resultados poco reproducibles y de escasa sensibilidad. Por su lado, el método de Atterberg presenta como principales inconvenientes su dependencia con el empaquetamiento y el tiempo requerido para obtener resultados. Cuando los límites se obtienen a partir del procedimiento de indentación el coste del equipo es elevado; el valor del equipo se reduce cuando se emplea el procedimiento tradicional de Casagrande, sin embargo, dicho procedimiento presenta como principal problema la baja reproductibilidad de los resultados. ♦

6. BIBLIOGRAFÍA

1. F.R. Moore. «Ceramic pastes and bodies», pp. 45-77 en *Rheology of ceramic systems*: Maclaren, London 1965.
2. G.A. Ackley. «Plastic yield strength determined using the direct shear test, and extrusion behavior of an electrical porcelain». Thesis. Alfred University, New York 1982. M.S.
3. E.C. Bloor. «Plasticity: a critical survey». *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, **56**, 423-481 (1957).
4. G. Schober and H. Mortel. «Plastic ceramic bodies in shear testing and in comparison with a rheological model». *Ceram Forum Int.*, (Part 1) **3/4**, 67-69 (1988); (Part 2) **5**, 134-136 (1988).
5. G. Ackley and J.S. Reed. «Shear strength test for plastic bodies», p. 171-186 en *Technical innovations in Whitewases (Proceedings of 1981 Alfred Whitewases Conference)*. (Edited by James S. Reed et al.). New York: Alfred University Press, 1981.
6. G. Hurias and H. Henniche. «Compresion-Test measuring of plasticity». *Ceram. Forum Int.*, **65** (5) 127-133 (1988).
7. A. Baudran and C. Deplus. «Rheological Behaviour of Clay Bodies». *Trans. Br. Ceram. Soc.*, **58**, 454-469 (1959).
8. J. Graezyk and W. Gleißle. «Rheologie and extrudability of ceramic compounds». *Rheology*, **3**, 28-38 (1993).
9. F. Moore. «Two instruments for studying the plasticity of clays». *J. Sci. Instrum.*, **40**, 228-231 (1963).
10. E. Gippini. «Plasticidad», pp. 45-64. en *Pastas Cerámicas*. Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Madrid 1979.
11. Norma UNE 7-377-76. «Determinación del límite líquido de un suelo por el método de la cuchara».
12. Norma UNE 7-378-75. «Determinación del límite líquido de un suelo».
13. V. Domenech, E. Sánchez, V. Sanz; et al. «Estimación de la plasticidad de masas cerámicas mediante la determinación de la fuerza de indentación», pp.61-71. en III Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico QUALICER. Cámara de Comercio, Industria y Navegación, Castellón 1994.
14. J.H. Velden. «Van Der. Analysis of the Pfefferkorn test. Ziegelind». *Int.* **32** (9) 532-542 (1979).
15. A.M. Querol. «Aplicación del método Pfefferkorn al control de la plasticidad en pastas de extrusión». *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, **22** (5) 285-289 (1983).
16. T. Haase. «Der Pfefferkorn-Apparat als absolute meßgerät». *Ber. Dtsch Keram.*, **43** (10) 593-594 (1966).
17. L. Barna. «Plasticity of clay minerals». *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **46** (11) 1091-1093 (1967).
18. Von B. Chiari. «Investigations on drying sensitivity (a survey)». (Part 2); *Cfi/DKG*, **9/10**, 482-486 (1986).
19. F. Negre; E. Sánchez; F. Ginés; et al. «Procedimiento experimental para determinar la resistencia mecánica mediante flexión por tres puntos de apoyo». *Técnica Cerámica*, **225**, 452-463(1994).

Recibido 5/8/96
Aceptado 2/12/96