

Plasticidad. Método de indentación.

¿Qué es la plasticidad?

La **plasticidad** puede definirse como “la capacidad de un material para ser deformado sin ruptura durante la aplicación de una fuerza externa que exceda de un valor crítico, y conservar la deformación tras el cese de la fuerza deformadora”. De acuerdo con este concepto de plasticidad, el material únicamente sufrirá la deformación cuando se supere este esfuerzo mínimo o umbral que se denomina “esfuerzo crítico de fluencia”

El **comportamiento plástico de una arcilla o pasta** puede resumirse del siguiente modo (1): a medida que vamos añadiendo agua (y amasando) a una arcilla o pasta en polvo, llega un momento en que se hace moldeable, es decir, que al aplicar una fuerza a la pasta aparece una deformación que permanece después de ceder la fuerza que la produjo. Pero este comportamiento plástico no se presenta en cualquier estado de la arcilla; para que ésta pueda considerarse deformable su contenido en agua debe estar comprendido entre ciertos valores de forma que no sea excesivamente rígida (arcilla seca), o que presente las propiedades de un líquido viscoso (barbotina). Estos puntos reciben el nombre de **límites de Atterberg** y permiten caracterizar la plasticidad de arcillas. Efectivamente, al añadir progresivamente pequeñas cantidades de agua a una masa en polvo de arcilla seca, va cambiando de aspecto y propiedades, pasando del estado seco (sólido) al de barbotina. Se intuye fácilmente que existirán una serie de puntos o contenidos de agua en que la arcilla pasa de un estado a otro como se muestra en la figura 1:



Figura 1. Límites de Atterberg.
Imagen: Ana Monferrer.

- El **límite plástico (LP)** es la mínima cantidad de agua que permite el moldeo de una arcilla o de una pasta. Por debajo de esta cantidad consideramos que el material está en estado semiseco.
- El **límite líquido (LL)** es la máxima cantidad de agua que permite el moldeo de una arcilla o de una pasta. Por encima de este valor consideramos que el material es una barbotina viscosa.

Una evaluación de la plasticidad del material nos la puede dar la **diferencia entre estos dos contenidos de humedad o rango de humedades entre las cuales la arcilla o la pasta es moldeable**. Este rango se denomina “**Índice de plasticidad**” (IP).

- El “**índice de plasticidad**” (IP) se define como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP). Da una medida del comportamiento plástico de un material.

$$IP = LL - LP$$

Métodos de medida de la plasticidad.

Existen dos tipos de métodos para la medida de la plasticidad ^{(1) (2)}:

- **Métodos indirectos:** que no evalúan directamente el comportamiento plástico, sino alguna propiedad relacionada con el mismo (contenido en humedad, módulo de ruptura...). Son métodos ampliamente utilizados en controles rutinarios y en la formulación de pastas debido al reducido coste de los equipos necesarios y a la sencillez de los procedimientos operativos. Algunos de los métodos indirectos empleados son:

1. Método de Atterberg.
2. Método de Pfefferkorn.
3. Determinación de la resistencia mecánica.
4. Determinación de la fuerza de indentación.

- **Métodos directos:** son los que definen de manera más aproximada el comportamiento plástico del material, ya que determinan el efecto que produce el contenido en humedad en la relación entre la fuerza aplicada y la deformación producida. Uno de los métodos directos más sencillos y utilizados es el método de Moore, aunque debido principalmente al elevado coste de los equipos empleados está restringido a materiales de alto valor añadido y a la investigación.

Fundamento teórico de la medida del índice de plasticidad por determinación de la fuerza de indentación.

El método de medida de la plasticidad por indentación se basa en el hecho de que el índice de plasticidad puede determinarse mediante medidas de la resistencia a la cizalla del material a distintas humedades, dado que los ensayos que determinan los límites de Atterberg miden, de forma aproximada, el contenido en agua al cual el material posee dos resistencias a la cizalla específicas ⁽³⁾.

En el intervalo de consistencia en el que el material se encuentra en estado plástico, la variación de la fuerza de cizalla o “consistencia” (**W**) con la humedad (**H**) es aproximadamente parabólica y puede a una ecuación de la forma:

$$W = a \cdot H^b \quad \text{[Ecuación 1]}$$

siendo:

W: Consistencia
 H: Contenido en humedad (%)
 a y b: Parámetros característicos del material.

Esta ecuación es fácilmente linealizable aplicando logaritmos:

$$\log W = \log a + b \log H \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Se considera que los límites de Atterberg se encuentran a unas consistencias preestablecidas, tales como:

Límite líquido: $W_{LL} = 1 \text{ N}$
 Límite plástico: $W_{LP} = 46 \text{ N}$

y se dispone de un conjunto de valores “consistencia–humedad” en la zona de comportamiento plástico, es sencillo mediante el ajuste lineal expresado en la ecuación 2 obtener la humedad de estos límites y, en consecuencia, el índice de plasticidad.

En una escala doble logarítmica se tiene (figura 1)

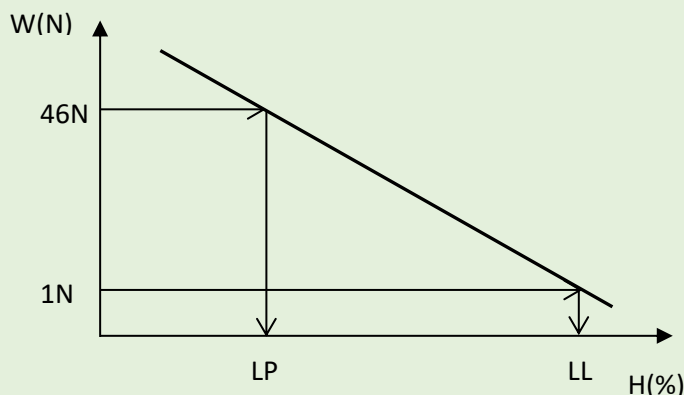


Figura 2. Cálculo gráfico de los límites de Atterberg a partir de la ecuación 2.

Procedimiento operativo.

Para realizar el ensayo es necesario disponer de un **plasticímetro**, que en realidad puede ser una máquina universal de ensayos mecánicos (figura 3) equipada con una célula de 200 N con punzón cónico de 15 mm de altura y 30° de ángulo ⁽⁴⁾ (figura 4) para ensayos de plasticidad, un molde cilíndrico de aproximadamente 5 cm de diámetro y 5 cm de altura, una estufa de desecación y una balanza ($\pm 0,01$ g).



Figura 3. Plasticímetro.
Fotografía: Rafael Galindo.



Figura 4. Célula y punzón del plasticímetro.
Fotografía: Rafael Galindo.

Se prepara masa plástica a diferentes humedades a partir de muestra seca mezclada con la cantidad de agua necesaria, preferiblemente en una amasadora de laboratorio, durante el tiempo suficiente para garantizar su homogeneidad. Una vez preparadas las masas se dejan reposar durante 24 horas, cerradas en bolsas de plástico, con el fin de obtener una buena homogeneización.

Se realiza una medida de consistencia a cada una de las masas amasadas según el siguiente procedimiento: se amasa manualmente la pasta durante 5 minutos y después se llena el molde cilíndrico, retirando el exceso de pasta con una espátula de forma que la superficie superior quede completamente lisa. Se debe tener especial cuidado en que no quede aire atrapado en la masa. Se sitúa el molde cilíndrico sobre un soporte adecuado y se coloca debajo del punzón de terminación cónica que se halla enroscado a la célula de carga del plasticímetro. Seguidamente se aproxima unos 2 mm el punzón a la superficie de la muestra y a continuación se inicia el ensayo. El punzón se detiene automáticamente una vez recorrida la distancia preestablecida desde la detección de la carga (figura 5).

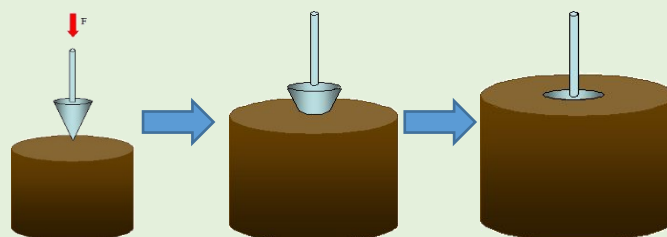


Figura 5. Realización de una medida de consistencia a una humedad determinada.
Imagen: Rafael Galindo.

Se debe determinar la humedad de la masa plástica a la que se ha realizado cada ensayo inmediatamente.

Los datos experimentales se anotan en una tabla W-H (ver ejemplo) y se ajusta por mínimos cuadrados a la ecuación 2

$$\log W = \log a + b \log H$$

La pendiente de la recta es **b** y la ordenada en el origen **log a**. Con estos datos es posible calcular la humedad cuando la consistencia es 46 N (límite plástico LP) y 1 N (límite líquido LL) y por tanto determinar el índice de plasticidad (IP):

$$IP=LL-LP$$

Ejemplo

A título orientativo, en la figura 6 se muestra una captura de pantalla de una hoja Excel con los cálculos relativos a un ensayo de una arcilla empleada en la fabricación de baldosas cerámicas

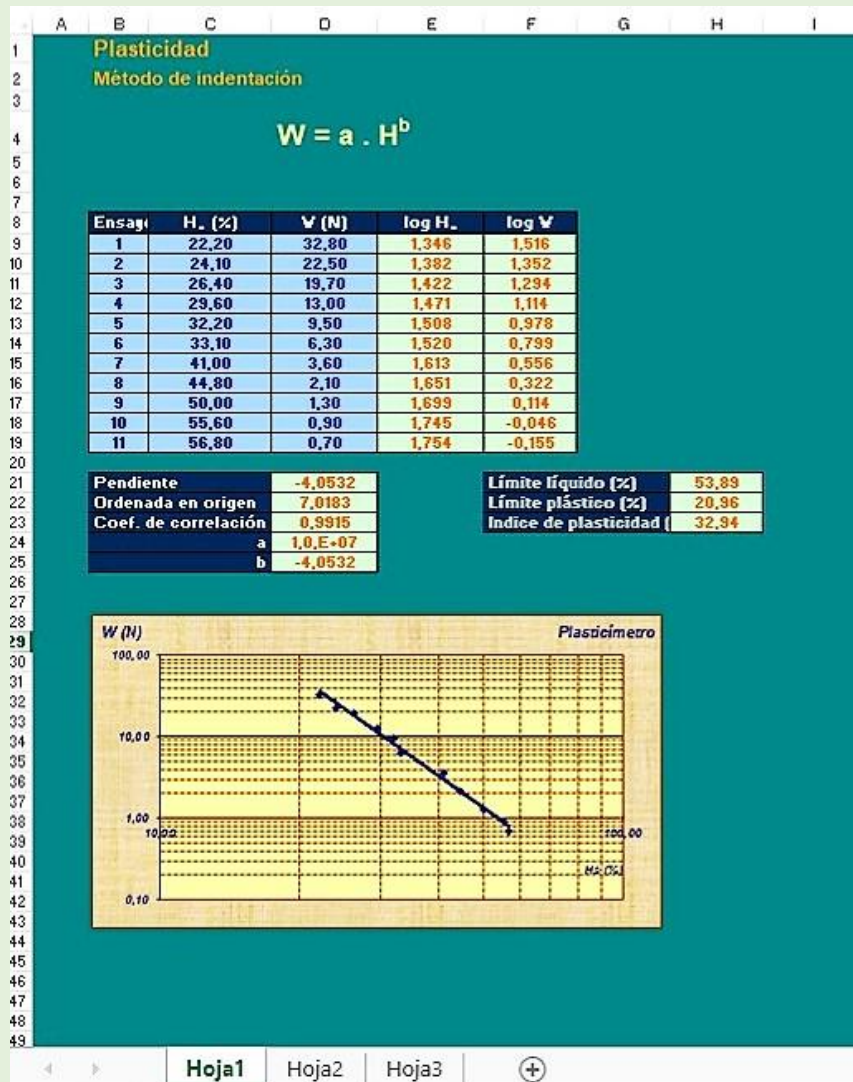


Figura 6. Cálculo del índice de plasticidad. Método de indentación..
Imagen: Rafael Galindo.

Bibliografía

- (1) GIPPINI, E. "Pastas cerámicas" Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento. Pgs 45 a 64. Madrid, 1979.

- (2) GINÉS, F. et al. *“Análisis de los métodos tradicionales utilizados para evaluar la plasticidad”* Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio, 36 [1] Pgs 25 a 30 (1997). Disponible en <http://boletines.secv.es/upload/199736025.pdf> [Consulta realizada 18/03/2022].
- (3) DOMENECH, V. et al. *“Estimación de la plasticidad de masas cerámicas mediante la determinación de la fuerza de indentación”*. En Qualicer 1994. III Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico. Castellón: Cámara de Comercio, Industria y Navegación. Pgs. 61 a 71. (1994). Disponible en <https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/9423041s.pdf> [Consulta realizada 18/03/2022].
- (4) AMORÓS, J.L. et al. *“Manual para el control de calidad de materias primas arcillosas”* ITC. Castellón. (1998).