630-43

# los límites de Atterberg y su significado en la industria cerámica y ladrillera

P. Sembenelli Dr. Ingeniero
Miembro de la ASCE (American Society of Civil Engineers).

(«L'Industria Italiana dei Laterizi», febrero 1966, pág. 43).

# la importancia de los límites de Atterberg en el estudio de los materiales arcillosos

Los límites de consistencia de Atterberg suministran los elementos para una rigurosa clasificación de las arcillas y para valorar muchas de sus propiedades. Pueden emplearse con utilidad para emprender un estudio riguroso, bien de los materiales destinados a la industria cerámica y de los ladrillos, o bien para proyectar las plantas de producción, integrando o sustituyendo algunos criterios todavía en uso.

Desde hace mucho tiempo la técnica de la cerámica y de la ingeniería han tratado de definir cuantitativamente, de una manera sencilla y unívoca, cual era la propiedad fundamental y distintiva de los materiales arcillosos, es decir, la plasticidad, sin conseguir resultados apreciables.

Fue el sueco Atterberg el primero que dio una respuesta satisfactoria al problema. A él se debe el haber indicado que la plasticidad no se puede expresar con un solo valor numérico, sino que es una función de dos cantidades combinadas. Expresó este conocimiento en algunos artículos publicados entre 1911 y 1922, e indicó esta cantidad como los contenidos de agua del material cuando se encuentra en dos condiciones características de transición entre diferentes estados de consistencia. Estos contenidos de agua son ahora llamados comúnmente límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg están directamente relacionados con la cantidad de agua que contiene un material y es capaz de absorber; en otras palabras, con el tanto por ciento de partículas con dimensiones coloidales presentes en el material y su tendencia a comportarse como verdadero coloide. Está claro que debe existir una relación estrecha entre los *límites* y las características físicas y tecnológicas de un determinado material.

Las investigaciones desarrolladas por A. Casagrande sobre la idea base de Atterberg han conducido a demostrar la exactitud y a poner en claro la importancia de los límites para establecer las propiedades de todos los materiales finos, y de las arcillas en particular.

5

Ninguna otra prueba de laboratorio hoy en uso permite establecer de manera tan sencilla, rápida y, sobre todo, unívoca, la propiedad fundamental de una arcilla. Es más que sabido, por ejemplo, que arcillas con características casi opuestas pueden presentar la misma curva granulométrica.

Las técnicas espectrográfica y difractométrica, o el análisis térmico diferencial, no obtienen mejores resultados. Basta que varíe solamente el tipo o la concentración de los iones presentes en el líquido que rodea un cristal de arcilla, para que sean sustituidos, aun en pequeña proporción, algunos de los átomos que forman parte del cristal (sin modificar su red cristalina) y obtener un material cuyas propiedades resultan sustancialmente distintas. Hoy día, las técnicas espectrográfica, difractométrica y análisis térmico diferencial no son capaces de poner en evidencia variaciones tan pequeñas, aunque sí tan importantes. Estas variaciones son, no obstante, puestas en claro por los valores de los límites de Atterberg, y la clasificación de los materiales arcillosos se basa esencialmente en ellos.

Parece, por lo tanto, evidente el interés en estudiar el significado de los límites de Atterberg en relación con los problemas ligados con la elección de materias primas y el proyecto de las fábricas para la industria cerámica y ladrillera.

### 2. definiciones de los límites de Atterberg

Vista la importancia de los límites, será útil definirlos aclarando su significado.

Si se considera una pasta de agua y arcilla, que se seca y endurece progresivamente pasando del estado flúido o líquido al estado plástico y, finalmente, al estado sólido, es fácil intuir que existen puntos de paso de un estado al otro; esto es, límites de cada estado. Estos puntos son los límites definidos por Atterberg, y de los cuales los más interesantes son: el límite líquido, el límite plástico y el límite de retracción.

Límite líquido: Es el punto de paso del estado líquido al estado plástico, y se mide por la cantidad de agua que contiene un material en el momento que pierde la fluidez y la capacidad de escurrir como un líquido denso.

Límite plástico: Es el punto de paso del estado plástico al estado de semisólido, y se mide por la cantidad de agua que contiene un material en el momento que pierde la plasticidad y que no puede ser modelado.

Límite de retracción: Es el punto de paso del estado semisólido al estado sólido, y se mide por la cantidad de agua que contiene un material en el momento que cesa la disminución de volumen que acompaña al secado.

### 3. determinación de los límites de Atterberg

Sin duda alguna, algo más complicado ha sido establecer un procedimiento para determinar estos límites experimentalmente, de forma sencilla y standard.

A. Casagrande, en 1927, propuso un aparato y un procedimiento para determinar el límite líquido de un material granular fino. El aparato consiste en una taza en forma de

casquete esférico; un perno fijado al borde de la taza misma le permite girar alrededor de un eje horizontal. El operador hace girar una manivela que levanta y deja caer de golpe, desde 1 cm de altura, la taza que golpea rítmicamente sobre el soporte del aparato, constituido por un bloque de resina sintética.

En la taza se pone cierta cantidad de material, debidamente empastado con agua, en el centro del cual se practica una incisión de forma y dimensiones determinadas y constantes. El golpeteo rítmico de la taza contra la base hace que se cierren los labios de esta incisión. El límite líquido se alcanza cuando, para hacer cerrar la incisión en una longitud de 12 mm, es necesario dejar caer la taza 25 veces. En la práctica este valor se obtiene interpolando gráficamente los valores obtenidos en 3 ó 4 pruebas, haciendo variar sistemáticamente el contenido de agua del material.

La resiliencia del material sobre el que golpea la taza tiene gran importancia. La norma estadounidense, hoy la más extendida, emplea una resina sintética, mientras que la norma inglesa prevé el empleo de goma endurecida. Al ser la goma menos resiliente que la resina, los valores del límite determinados con las normas inglesas deben ser multiplicadas por 0,9 aproximadamente para ser confrontables con los valores obtenidos aplicando las normas americanas.

El límite plástico se determina con el procedimiento de Atterberg, al que se han aportado ligeras modificaciones. Con el material se forma un cilindro, de unos 3 mm de diámetro, haciéndole girar entre la palma de la mano y una hoja de papel a fin de provocar un secado progresivo. El límite plástico se alcanza cuando el cilindro se rompe en fragmentos más cortos de 1 cm y no es posible volver a aglomerar la masa en un todo uno. A pesar de la aparente vulgaridad de esta prueba, los resultados obtenidos por diferentes operadores son sorprendentemente próximos y bastan pocas determinaciones del límite plástico para definirlo con la precisión necesaria.

Entre los diversos métodos para medir el límite de retracción, el más simple es el propuesto por K. Terzaghi. Este método se reduce a la medida exacta del peso y del volumen de un sólido de arcilla completamente seco.

El límite de retracción se puede también calcular, una vez conocidos los límites líquido y plástico, con la fórmula aproximada:

$$SL = \frac{2.5 \text{ LL} + 45 \text{ PL}}{\text{LL} - \text{PL} + 45}$$

o con los métodos gráficos ilustrados más adelante.

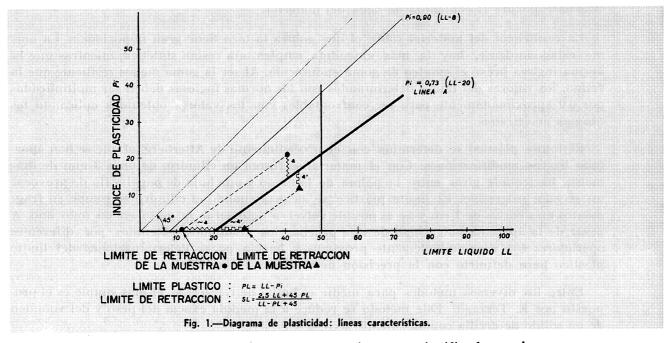
Los límites líquido, plástico y de retracción vienen indicados con los símbolos LL, PL y SL, respectivamente. La cantidad de agua que les corresponde viene expresada en tanto por ciento del peso del material seco, omitiendo el signo de %.

Tiene gran importancia el estado de la muestra empleada para la determinación de los límites. Especialmente para los materiales con límite líquido elevado y para los que contienen materia orgánica, el valor de los límites varía drásticamente, según que se empleen materiales en estado natural, materiales desecados al aire o materiales desecados en estufa. Es importante emplear materiales que hayan sufrido el mismo tratamiento, si se quiere hacer posible el contraste de los valores obtenidos.

# 4. significado de los límites de Atterberg para la industria cerámica y de los ladrillos

El diagrama de plasticidad puesto en uso por A. Casagrande es de gran utilidad para representar e interpretar el significado de los límites de Atterberg.

En el diagrama de plasticidad (fig. 1) se llevan: en abscisas, los valores del límite líquido; y en ordenadas, los valores del *índice de plasticidad*, diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, es decir, Pi = LL - PL.



En el diagrama comparecen varios elementos y tienen un significado preciso.

La recta a 45° es el límite entre puntos reales y puntos imaginarios: todos los puntos representativos de un material real deben caer necesariamente por debajo de ella.

La recta de la ecuación Pi=0.90 (LL -8) indica el límite superior de los puntos encontrados experimentalmente hasta ahora: todos los materiales que se encuentran comúnmente se representan por puntos que caen entre esta recta y el eje de las abscisas.

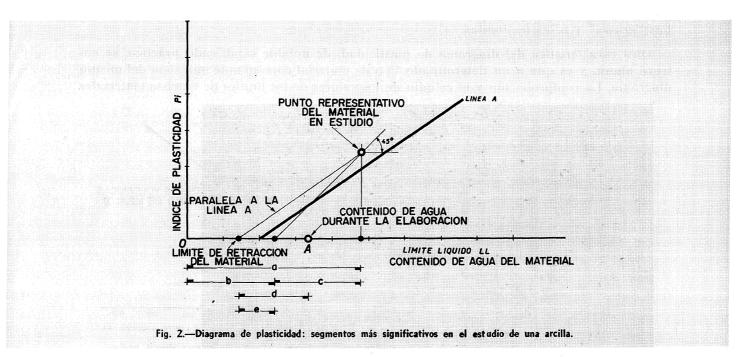
La recta de la ecuación Pi = 0.73 (LL -20) o línea A es una línea empirica importante que divide las arcillas inorgánicas típicas de los materiales que contienen coloides orgánicos. Estos últimos están en general representados por puntos que caen por debajo de la línea A.

La recta vertical en correspondencia con LL = 50 es una línea convencional de separación entre arcillas de alta plasticidad, a la derecha, y arcillas de plasticidad media y baja, a la izquierda.

Finalmente, del diagrama de plasticidad se puede determinar gráficamente el valor aproximado del límite de retracción, trazando, desde el punto en examen, la paralela a la línea A, o bien obteniendo, en horizontal, desde el punto de intersección entre la línea A y el eje de las abscisas, los segmentos a o a', según los casos.

La posición de un punto en el diagrama tiene un significado bien preciso, como ilustra la figura 2.

La longitud del segmento a representa el contenido de agua que el material considerado debe tener para alcanzar una determinada consistencia o una resistencia de alrededor
de 0,03 kg/cm²; en otros términos, un cierto grado de trabajabilidad. Cuanto más largo
es el segmento a, tanto mayor es la cantidad de agua que requiere el material para conseguir dicha trabajabilidad y el segmento es, por otra parte, proporcional a la cantidad
de agua que debe eliminarse del material elaborado, durante las fases de secado y cocción.



La longitud del segmento b representa el contenido de agua mínimo que el material debe tener para ser aún plástico y moldeable. Cuanto más corto es este segmento, tanto menor es la cantidad de agua necesaria para hacer el material trabajable.

La longitud del segmento c es, en consecuencia, proporcional al intervalo dentro del cual debe mantenerse el contenido de agua del material durante la elaboración. Si este segmento no supera un cierto valor, puede hacerse problemático controlar la humedad del material a fin de mantenerla dentro de los límites requeridos por las diversas tecnologías.

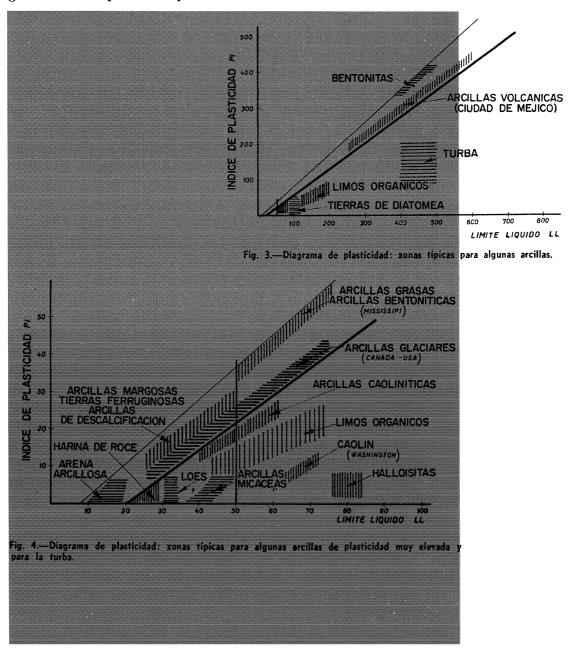
Suponiendo que las operaciones de producción tengan lugar sobre un material cuyo contenido de agua esté comprendido entre los valores b y a, representado por el punto A en el eje de la abscisa, la distancia OA representa la cantidad de agua total a eliminar. Cuanto más reducida es esta distancia, tanto menores serán las calorías a consumir en el secado. El segmento d representa la cantidad de agua a eliminar del material trabajado antes de reducir a cero la retracción. Cuanto más corto sea este segmento, tanto más limitada será la retracción de las piezas.

Admitiendo poder trabajar sobre materiales en el límite plástico, es decir, conteniendo una cantidad de agua que apenas le permite poseer una cierta plasticidad, el agua por ex-

traer antes de eliminar la retracción viene dada por la longitud del segmento e, que representa el valor mínimo al cual puede reducirse el segmento d.

La posición del punto representativo de una arcilla en el diagrama de plasticidad adquiere ahora un significado preciso aun con fines prácticos. Está claro que el material ideal es aquel que permite ser moldeado con el mínimo contenido de agua y que ofrece la mínima retracción. Este material resultará fácilmente trabajable y desecará con una deformación limitada y bajo consumo de calorías. Cuanto menores sean las longitudes de los segmentos b y e, tanto mejor se cumplirán estas condiciones. Alejándose de estas condiciones, el material presentará problemas tecnológicos crecientes y será de más difícil elaboración. De acuerdo con esto, los valores mínimos de d y e se encontrarán en los caolines y en las arcillas caoliníticas, mientras que los valores máximos corresponderán a las arcillas "grasas" y a las bentonitas.

Otra característica del diagrama de plasticidad, de notable significado práctico, se entrevé ahora, y es que a un determinado tipo de material corresponde una zona del mismo diagrama. La comprobación y el estudio de los valores de los límites de muchos materiales



ha permitido verificar que los puntos representativos de materiales que tienen el mismo origen geológico yacen a lo largo de una recta prácticamente paralela a la línea A, y que materiales de una determinada categoría ocupan partes bien precisas en el diagrama, como indica la figura 3, en el cual se señalan las zonas en las que recaen las arcillas que se encuentran con más frecuencia.

Valores del límite líquido superior a 100 son muy raros; no obstante, las arcillas formadas por alteración química de cenizas volcánicas como la bentonita, yacen en valores de LL que, a veces, son superiores a 400 ó 500. La misma propiedad extrema poseen las turbas de los varios tipos (fig. 4).

## 5. aparatos y procedimiento correcto para la determinación de los límites

Aparatos.

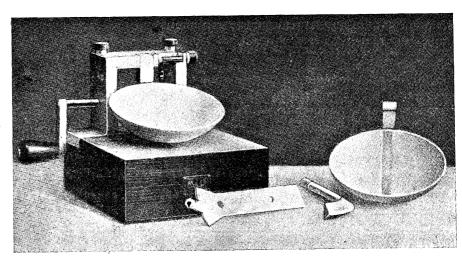
La determinación de los límites de Atterberg, requiere, como hemos señalado, un equipo bastante modesto:

- tamiz núm. 40 de la serie Tyler;
- 2 recipientes en cerámica de 500 cm³;
- espátula;
- aspersores;
- agua destilada;
- hojas de papel grueso liso;
- 8 pesasustancias de unos 50 cm³, con su contraseña;
- estufa con regulación de temperatura a 105° C;
- balanza analítica de una capacidad de, por lo menos, 100 g; sensibilidad, 0,001 g;
- aparato para el límite líquido.

Periódicamente deben controlarse algunos detalles del aparato para el límite líquido; a saber:

— la anchura de la punta del utensilio empleado para seguir la incisión del material puesto en la taza debe ser exactamente de 2 mm;

Fig. 5.-Aparato para el límite líquido: a recha, la taza fuera del aparato; en el centro, dos utensilios para producir la incisión; el utensilio de la izquierda, de Casagrande, es el de uso más frecuente y apto para materiales arcillosos, y el de la dere-cha se emplea en el Bureau of Reclamation de Estados Unidos; este último presenta el inconveniente de no permitir el control del espesor del material en las proximidades de los bor des de la incisión.



- los apoyos del aparato no deben desgastarse;
- la taza no debe presentar señales de excesivo desgaste en el punto donde bate sobre la base;
- la resiliencia de la base debe ser tal que, dejando caer desde 25 cm de altura una esfera de acero de 5 mm de diámetro, rebote por lo menos 12 cm, pero no más de 15 cm. Este control de la resiliencia sirve para valorar, más que las características de la base del aparato, que son de por sí constantes y suficientes, las condiciones del plano sobre el que se apoya la base durante la prueba.

Con cierta frecuencia, y en cada caso antes de una serie importante de ensayos, debe rectificarse el aparato para el límite líquido. Para esta rectificación:

- marcar el punto de la taza que está en contacto con la base;
- alzar la taza al máximo girando la manivela;
- controlar que el punto señalado diste de la base exactamente 1 cm. En caso contrario, actuar sobre los tornillos convenientes.

Determinación de los límites.

Antes de proceder a la determinación de los límites, es necesario preparar el material del modo siguiente:

— verter la muestra en el tamiz núm. 40 y recoger la fracción que pasa. Si la muestra está húmeda y el tamizado es imposible, se deberá desleir el material sobre el tamiz, trabajándolo hasta que lo haya atravesado la cantidad deseada;

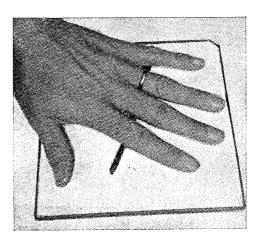


Fig. 6.—Determinación del límite plástico: el material se moldea en un cilindro de unos 3 mm de diámetro, girándolo, entre la palma de la mano y una superficie lisa y moderadamente absorbente, hasta que se rompa en fragmentos inferiores a 1 cm y no sea posible volver a aglomerar y modelar un nuevo cilindro.

— colocar en un recipiente unos 250 g de la fracción inferior al núm. 40. Trabajar después añadiendo agua destilada hasta obtener una pasta densa. Si el material es muy plástico, dejar reposar 24 horas antes de determinar los límites.

El límite líquido se determina con las siguientes operaciones:

- a) pesar 4 pesasustancias y anotar los pesos  $W_t$ ;
- b) colocar del 50 al 75 por 100 del material en la taza y alisar el material cuidando de que no queden incluidas burbujas de aire. Si el aparato a disposición lo permite, durante esta operación la taza debe estar separada y mantenida en la mano;
- c) incidir el material con la herramienta adecuada a lo largo de un plano vertical normal al eje de rotación de la taza, manteniendo el utensilio perpendicular a la super-

ficie de la propia taza. Al hacer esto, tratar de evitar que el material se mueva en la taza y, si es posible, hacer la incisión en una sola pasada;

- d) mover la manivela a un ritmo de unas dos vueltas por segundo hasta que el fondo de la incisión se haya cerrado en unos 12 mm, contado el número de vueltas o golpes. Anotar este número N:
- e) mezclar el material en la taza y repetir la operación de incisión y recuento de golpes hasta obtener aproximadamente el mismo resultado tres veces;
- f) tomar unos 10 g del material de la zona de la incisión si está cerrada y colocarla en un pesasustancias. Pesar rápidamente todo el recipiente con su material y anotar el peso  $W_{sw}$ ;
- g) limpiar la taza del aparato. Añadir un poco de agua al material, homogeneizándolo con cuidado;
- h) repetir otras tres veces las operaciones de b) a g), tratando de variar el contenido de agua del material de tal forma que los valores de N oscilen de 15 a 30, obteniendo, por lo menos, dos valores de N superiores a 20;
  - i) colocar los pesasustancias en estufa a 105° C, durante 24 horas;
  - l) pesar los pesasustancias una vez fríos y anotar los pesos  $W_{sd}$ ;
  - m) calcular los contenidos de agua correspondientes a los distintos valores de N:

$$w = \frac{W_{sw} - W_{sd}}{W_{sd} - W_t}$$

n) colocar en el diagrama w (ordenadas) y log N (abscisas), interpolando los puntos obtenidos con una recta. Leer en N = 25 el valor de LL, es decir, el limite liquido.

\* \* \*

El límite plástico se determina con las siguientes operaciones:

- a) pesar tres pesasustancias y anotar los pesos  $W_t$ ;
- b) tomar alrededor de 1 cm³ del material y, girándolo entre la palma de la mano y una hoja de papel, hacer un cilindrito de 3 mm de diámetro;
  - c) volver a aglomerar el cilindrito formando una pequeña bola;
- d) repetir las operaciones b) y c) hasta que, mientras se trata de formar el cilindrito, éste no se rompa en fragmentos de 1 cm de longitud aproximadamente. Puede ocurrir que cuando se haga esta determinación la primera vez, se crea haber alcanzado el límite plástico antes de lo que realmente sea. Es aconsejable, después de haber alcanzado lo que se estima como límite plástico, tratar de repetir las operaciones b) y g) una o dos veces más; esto no conducirá a una variación apreciable del contenido de agua si el límite plástico se ha alcanzado de verdad;
- e) colocar los fragmentos del cilindrito en un pesasustancias, pesar rápidamente recipiente y material y anotar el peso  $W_{sw}$ ;
  - f) repetir desde b) a e) otras dos veces;
  - g) colocar los pesasustancias en estufa a 105° C, durante 24 horas;
  - h) pesar los pesasustancias una vez frios y anotar los pesos  $W_{sd}$ :
  - i) calcular los contenidos de agua:

$$w = \frac{W_{sw} - W_{sd}}{W_{sd} - W_{t}}$$

13

l) Calcular PL, es decir, el límite plástico, como media de los valores w. Estos valores de w no deben diferir del valor medio má de 0.02.

Caso de que existan mayores diferencias, hacer algunas determinaciones adicionales.

Varios factores pueden concurrir para alterar los valores obtenidos para los límites líquido y plástico; los más frecuentes son:

- materiales no homogeneizados suficientemente;
- empleo de un aparato para el límite líquido no rectificado;
- excesiva o escasa resiliencia de la base;
- ejecución imperfecta de la escisión;
- interrumpir demasiado pronto las operaciones para llevar el material al límite plástico.

En lo que respecta a la determinación de límite de retracción, es aconsejable, desde el punto de vista práctico, servirse de la fórmula o de los métodos gráficos citados en este mismo artículo. Estos métodos, aún siendo aproximados, tienen la ventaja de ser simples y rápidos, y los resultados así obtenidos difieren de los valores reales en cantidades que, para las aplicaciones corrientes, pueden considerarse despreciables.

#### 6. conclusiones

Los límites de Atterberg y su interpretación por medio del diagrama de plasticidad, permiten asignar una arcilla con cierta precisión a una determinada clase de materiales y prever las características principales, anticipando algunos de los problemas y de las ventajas relacionados con su empleo, así como los requisitos que deben satisfacer las instalaciones para su elaboración.

El empleo de estas informaciones puede tener dos vertientes: En primer lugar, en la elección y en la valoración del área de cantera y, sucesivamente, en el control preciso de la uniformidad de materias primas empleadas.

En segundo término, no por ello menos importante, en la elección del tipo de maquinaria para su elaboración, de los secaderos y su dimensionamiento en lo que se relaciona con las calorías necesarias, volumenes de aire requeridos y duración mínima del ciclo de secado.

El empleo sistemático de los límites de Atterberg conduce en breve plazo a la réunión de una gran cantidad de datos para permitir establecer una serie de criterios, que podrían ser la base para una solución más rigurosa de numerosos problemas que surgen en el campo de la industria cerámica y ladrillera.

### bibliografía

- A. Atterberg: Ueber die physikalische Bodenuntersuchung u. über die Plastizität der Tone Internationale Mitteilung für Bodenkunde, Vol. I, 1911.
- Statens Jarnvagars Geotekniska Kommission 1914-1922 Statens Järnvägar Geotekniska Meddelanden, Stockholm, 1922.
- A. CASAGRANDE: Research on Atterberg's Limits of Soils Public Roads, Vol. 13, 1932.
- T. W. LAMBE: Soil testing for Engineers Wiley & Sons, New York, 1958.
- A. S. T. M.: Book of Standards, Part 4-American Society For Testing Materials, 1958.
- G. Wetter: Appunti di Meccanica delle Terre L'Energia Elettrica, Vol. IX, 1941; Vol. II e III, 1942.