

(12) SOLICITUD INTERNACIONAL PUBLICADA EN VIRTUD DEL TRATADO DE COOPERACIÓN EN MATERIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organización Mundial de la Propiedad
Intelectual
Oficina internacional



(43) Fecha de publicación internacional
19 de Abril de 2007 (19.04.2007)

PCT

(10) Número de Publicación Internacional
WO 2007/042585 A2

(51) Clasificación Internacional de Patentes: Sin clasificar

(21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2006/000556

(22) Fecha de presentación internacional:
5 de Octubre de 2006 (05.10.2006)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:
P200502533 11 de Octubre de 2005 (11.10.2005) ES

(71) Solicitante (para todos los Estados designados salvo US):
UNIVERSIDAD DE SEVILLA [ES/ES]; OTRI-Universidad de Sevilla, Pabellón De Brasil, Paseo De Las Delicias S/n, E-41012 Sevilla (ES).

(72) Inventores; e

(75) Inventores/Solicitantes (para US solamente): CASTELLANOS MATA, Antonio [ES/ES]; Dpto. Electrónica y Electromagnetismo, Facultad De Física, Avda. Reina Mercedes S/n, E-41012 Sevilla (ES). SÁNCHEZ QUINTANILLA, Miguel, Ángel [ES/ES]; Dpto. Electrónica y Electromagnetismo, Facultad De Física, Avda. Reina Mercedes S/n, E-41012 Sevilla (ES). VALVERDE MILLÁN,

José, Manuel [ES/ES]; Dpto. Electrónica y Electromagnetismo, Facultad De Física, Avda. Reina Mercedes S/n, E-41012 Sevilla (ES).

(81) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Estados designados (a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europea (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

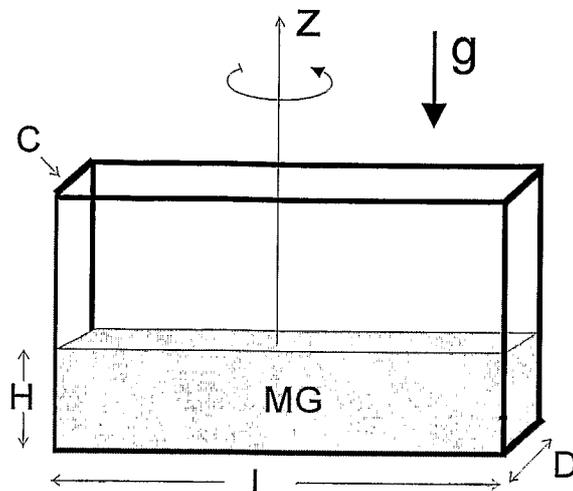
Publicada:

— sin informe de búsqueda internacional, será publicada nuevamente cuando se reciba dicho informe

[Continúa en la página siguiente]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR MEASURING THE ANGLE OF FRICTION AND THE COHESION OF GRANULAR MEDIA

(54) Título: PROCEDIMIENTO Y DISPOSITIVO PARA MEDIR EL ÁNGULO DE FRICCIÓN Y LA COHESIÓN DE MEDIOS GRANULARES



(57) Abstract: The invention relates to a device and a quick and simple method for ascertaining two properties of a granular material, such as the internal friction angle and cohesion thereof, which determine the degree of fluidity of same. The inventive device is based on a method that uses fluidisation to obtain an initial reproducible state and a gas as a compaction agent in order measure the response of the material as a function of the previous consolidation state thereof in a range of low consolidation operations.

(57) Resumen: La presente invención tiene por objeto un dispositivo y un procedimiento rápido y sencillo de conocer dos propiedades del material granular, como son su ángulo de fricción interna y su cohesión, que determinan su grado de fluidez. El aparato se basa en el procedimiento que usa la fluidización para conseguir un estado inicial reproducible y un gas como agente de compactación con el objeto de medir la respuesta del material en función de su estado de consolidación previa en un rango de bajas consolidaciones.

WO 2007/042585 A2



*Para códigos de dos letras y otras abreviaturas, véase la sección
"Guidance Notes on Codes and Abbreviations" que aparece al
principio de cada número regular de la Gaceta del PCT.*

Título

Procedimiento y dispositivo para medir el ángulo de fricción y la cohesión de medios granulares

5

Objeto de la invención

La presente invención tiene por objeto un dispositivo y un procedimiento rápido y sencillo de conocer dos propiedades del material granular, como son su ángulo de fricción interna y su cohesión, que determinan su grado de fluidez. El aparato se basa en el procedimiento que usa la fluidización para conseguir un estado inicial reproducible y un gas como agente de compactación con el objeto de medir la respuesta del material en función de su estado de consolidación previa en un rango de bajas consolidaciones.

15

Estado de la técnica

Tradicionalmente una forma de evaluar la fluidez de medios granulares es medir la capacidad con que estos materiales fluyen a través de ciertos dispositivos estandarizados. El "Book of American Society for Testing and Materials Standards" recoge una técnica consistente en medir el tiempo que tarda en descargar una determinada masa de material a través de una tolva (Book of ASTM Standards, Part 9, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 45, 1978). La medida de ciertos materiales demasiado cohesivos requiere dar golpes a la tolva para permitir el flujo de material (D. A. Hall and J. G. Cutress, J. Inst. Fuel, 33, 63, 1960), pero esta técnica puede consolidar el material, hecho que en materiales cohesivos puede aumentar aún más su cohesión. Una técnica similar, frecuentemente usada en la industria farmacéutica, consiste en hacer fluir el material a través de una serie de anillos dispuestos verticalmente y de diámetro decreciente (Cole-Parmer 1997-998 catalog, p. 541). El índice de fluidez queda definido mediante el diámetro menor a través del cual la muestra puede fluir en tres pruebas consecutivas. Existe también disponible en el mercado un reómetro adaptado a la medida de la viscosidad efectiva del medio granular (C. M. Iles, Bateson I. D., Walker J. A., Rheometer for testing flow characteristics of materials such as powders, liquids and semisolids such as pastes, gels and ointments.

Patent no. EP1102053A2, May 23, 2001). El reómetro posee una cuchilla con diferentes secciones situadas en lados opuestos del árbol de rotación. La superficie de la primera sección es paralela al árbol de rotación, y la superficie de la segunda se encuentra girada con respecto al árbol de rotación. En otro dispositivo, usado en la industria xerográfica, se hace pasar el material a través de una serie de cribas que son al mismo tiempo sometidas a una cierta agitación mecánica. Se da una estimación de la fluidez del material mediante la masa relativa de material que pasa a través de cada malla. Un problema presente en este conjunto de técnicas descritas y otras similares es que la interacción del material con partes mecánicas produce un estado heterogéneo puesto que las tensiones internas pueden cambiar abruptamente dentro de la muestra. Así pues los resultados obtenidos dependen de manera crítica del diseño particular del dispositivo y del procedimiento experimental. La correlación con propiedades físicas fundamentales del material es muy indirecta y puede ocurrir que el resultado de la diagnosis de ciertos materiales dependa de la técnica empleada. Es por tanto deseable diagnosticar la fluidez del material a través de una correlación más directa con sus propiedades físicas fundamentales. De acuerdo con este objetivo existen una serie de técnicas disponibles que a continuación resumimos.

Una propiedad que ha sido a menudo correlacionada con la fluidez de un material granular es su compresibilidad (R. L. Carr, Chap. 2, Gas Solids Handling in Process Industries, Marcel Dekker, NY, 1976). Aquellos materiales granules que fluyen con facilidad son difíciles de comprimir, mientras que por otro lado los materiales granulares muy cohesivos y que fluyen con dificultad presentan estructuras sólidas muy porosas y por tanto son fáciles de comprimir. Medidas de compactación en las que el material es comprimido mediante un pistón son frecuentemente realizadas en el ámbito de la ingeniería civil (British Standard 1377, Methods of tests for soils for civil engineering purposes (1975)). Una medida que se ha propuesto para clasificar la fluidez de un material granular es la razón de Hausner, definida como la razón entre la densidad del material compactado mediante vibración y la densidad del material no compactado (H. Hausner, Int. J. Powder Metallurgy, 3(4), 7 (1967)). Otro equipo usado tradicionalmente es la celda de cizalla de Jenike (J. Schwedes, Powder Technology, 88, 285 (1996)). Esencialmente consiste en compactar el material, que se sitúa en una celda cilíndrica y entre dos anillos metálicos, mediante una carga externa conocida. Con esta carga vertical aplicada se mide la fuerza que es necesaria aplicar para

desplazar horizontalmente un anillo con respecto al otro. Esta medida se repite para una carga vertical inferior y así sucesivamente. La relación entre la carga vertical aplicada y la fuerza horizontal necesaria para producir el desplazamiento proporciona el ángulo de fricción interna del material y su cohesión. Un defecto de este dispositivo es que no es apropiado para medir la respuesta del material cuando es sometido a compresiones pequeñas ($< 100\text{Pa}$). Para ello se ha desarrollado recientemente un dispositivo técnicamente mejorado (D. Schulze and A. Wittmaier, *Chem. Eng. Technol.* 26, 2 (2003)). Una alternativa comercial a la celda de Jenike es la celda anular de Peschl, en la que el esfuerzo de cizalla se aplica mediante rotación de la parte superior de la celda que contiene el material (L. Svarovsky, *Powder Testing Guide: Methods of Measuring the Physical Properties of Bulk Powders* (Elsevier Applied Science, England 1987)). La desventaja principal de estas técnicas es que no se puede conocer con exactitud la localización ni el estado de tensiones del plano de ruptura en el que se inicia el flujo del material. Estas tensiones, y no las externamente aplicadas, son las que realmente se encuentran relacionadas mediante el ángulo de fricción y la cohesión. Otra propiedad que se ha usado para cuantificar el grado de fluidez de un material granular es su ángulo de reposo (Classification and Symbolization of Bulk Materials ISO 34351977 E; M.I. Wouters and D. Geldart, *Part. Part. Syst. Charact.* 13, 254 (1996)), que se mide de manera estandarizada con el dispositivo "Hosokawa Micron Powder Tester". Sin embargo, esta propiedad no está bien definida en materiales granulares cohesivos, en los que su ángulo de reposo depende de la longitud de la pendiente. Recientemente ha sido comercializado un equipo destinado a medir la fluidez de los materiales granulares a través del análisis de las avalanchas que se suceden cuando el material llena parcialmente un tambor horizontal que rota lentamente (B. H. Kaye, J. GrattonLiimatainen and N. Faddis, *Part. Part. Syst. Charact.*, 12, 232 (1995)). Aquellos materiales que fluyen con facilidad presentan una serie regular de pequeñas avalanchas de casi idéntico tamaño. Por el contrario, aquellos materiales que fluyen con gran dificultad presentan una serie de avalanchas muy irregular, tanto en tamaño, como en separación temporal entre ellas (M. A. S. Quintanilla, J. M. Valverde, A. Castellanos, R. E. Viturro, *Phys. Rev. Lett.* 87, 194301 (2001)). En el equipo comercial las avalanchas son identificadas mediante el cambio de la intensidad de la luz detectada por una matriz de fotocélulas colocadas en la pared posterior del tambor. También es posible adaptar un sistema de acondicionamiento del gas ambiente con el objeto de medir su efecto sobre la fluidez del material (Poole T.

A., Apparatus for determining powder flowability. Patent no. WO9738297A1, Oct 16, 1997). Con este sistema es muy dificultosa la medida sobre materiales cohesivos, que se adhieren con facilidad a las paredes internas del tambor, lo cual falsea el resultado obtenido mediante la luz detectada por las fotocélulas conforme se van sucediendo las avalanchas. Por otra parte, el procedimiento de análisis de los resultados propuesto, basado simplemente en la medida del intervalo de tiempo entre avalanchas, es demasiado simple, como ha quedado demostrado por un análisis más profundo del comportamiento de materiales granulares cohesivos (M. A. S. Quintanilla, J. M. Valverde, A. Castellanos, R. E. Viturro, Phys. Rev. Lett. 87, 194301 (2001). M. A. S. Quintanilla, A. Castellanos, and J. M. Valverde, Europhys. Lett. 68, 818 (2004)). El dispositivo conocido como celda de división (L. Svarovsky, Powder Testing Guide: Methods of Measuring the Physical Properties of Bulk Powders (Elsevier Applied Science, England 1987)) se ha diseñado con el objetivo de medir el esfuerzo de resistencia a la tracción, que se encuentra directamente correlacionado con la cohesión del material. La muestra se coloca en una celda cilíndrica y es compactada verticalmente con un pistón. Acto seguido se somete a una fuerza lateral de tracción y se mide la tensión necesaria para romper el material. De nuevo esta técnica presenta como inconveniente que las tensiones externas aplicadas no tienen porque coincidir con las tensiones internas del material, por lo que no es seguro que la medida realizada sea un reflejo directo de las propiedades intrínsecas del material. Además no es posible medir la respuesta del material cuando es sometido a cargas pequeñas dado que no se pueden controlar mediante la técnica de consolidación por pistón.

La aplicabilidad del conjunto de técnicas revisadas y otras similares se encuentra condicionada por la dificultad de inicializar el material en un estado reproducible. Este defecto es especialmente relevante si se quiere medir la fluidez de materiales de grano fino (polvos), es decir, tamaño de partícula $d < \sim 50 \mu\text{m}$. En los polvos finos su estado actual presenta una fuerte dependencia de su historia debido a su elevado grado de cohesión y, usualmente, a la plasticidad de sus partículas (J. M. Valverde, A. Ramos, A. Castellanos and P. K. Watson, Powder Technol., 97, 237 (1998)). Nuestro grupo ha desarrollado y patentado un aparato basado en la fluidización como paso previo de inicialización. El dispositivo mide la resistencia a la tracción y la compresibilidad de polvos finos cohesivos en función de la consolidación y el tiempo de consolidación a los que previamente han sido sometidos (A. Castellanos, A. Ramos, and J.M. Valverde, Device and method for measuring cohesion in fine granular media. Patent no. WO9927345A. Patent

Assignee: University of Seville. Publication date: June 3, 1999). Mediante la fluidización se consigue un estado inicial reproducible y, además es posible evaluar la memoria del material midiendo su respuesta en función de su historia previa controlada. Para materiales de tamaño de grano superior, no demasiado cohesivos, el estado inicial no es tan crítico en la fluidez del material aunque su posible influencia debe ser tomada en cuenta.

A nivel microscópico la fluidez de un material granular se encuentra correlacionada con las fuerzas de atracción entre sus partículas constituyentes. Una técnica que se usa a menudo es medir directamente las fuerzas entre granos individuales mediante el microscopio de fuerza atómica (M. A. S. Quintanilla, A. Castellanos, and J. M. Valverde, Phys. Rev. E 64, 031301, (2001)) u otros dispositivos similares (Y. Shimada, Y. Yonezawa, H. Sunada, R. Nonaka, K. Katou, and H. Morishita, KONA 20, 223 (2002)). No obstante, los datos experimentales obtenidos presentan una gran dispersión debido a la fuerte dependencia de las fuerzas entre partículas de los detalles locales de la región de contacto. Ello obliga a la realización de una serie extensiva de medidas con el consiguiente coste temporal, además de requerir una formación muy especializada. Este problema se agrava cuando se intentan medir fuerzas entre granos cuya superficie ha sido artificialmente modificada, por ejemplo añadiendo nano-partículas con el objetivo de reducir la adhesión. Por contra la medida de tensiones macroscópicas son el resultado del promedio de las fuerzas entre un gran número de contactos y por consiguiente presentan un menor grado de dispersión. Así pues, en lo que se refiere a un método de diagnosis del material es preferible una técnica basada en la medida de propiedades macroscópicas. Sin embargo, y como se ha dicho anteriormente, las tensiones que miden la mayoría de los equipos disponibles en la actualidad son tensiones externas aplicadas, no directamente trasladables a las tensiones que verdaderamente existen en la región interna del material donde se produce la ruptura cuando éste fluye. En el dispositivo objeto de la presente invención esta dificultad queda salvada.

30

Descripción de las figuras

Figura 1. - Diseño de la celda usada en el dispositivo.

C: celda

35 g: sentido de la aceleración gravitatoria.

L: longitud de la celda

D: anchura de la celda.

MG: material granular.

H: altura de la muestra de material granular.

5

Figura 2.- Perfil típico de la superficie libre de un material granular no cohesivo cuando es sometido a la fuerza centrífuga en el interior de la celda rotante.

10 Figura 3.- Ejemplo experimental de la primera avalancha en un material granular cohesivo (la flecha señala el punto de inicialización de la avalancha) y de una avalancha que se produce en la parte externa a velocidades elevadas de rotación (obsérvese en la parte derecha cómo ha aumentado el ángulo de la pendiente).

15 Figura 4.- Modelo de bloques deslizantes para la primera avalancha en un material granular cohesivo. En la parte derecha se detallan las fuerzas que actúan sobre los bloques y sobre las superficies de deslizamiento que delimitan los bloques.

20 Figura 5.- Modelo de bloques propuesto para las avalanchas que ocurren a velocidades de rotación elevadas en un material granular cohesivo. Se indican las fuerzas tangencial y normal que actúan sobre la superficie de deslizamiento así como el peso y la fuerza centrífuga que actúan sobre el bloque deslizante.

Figura 6.- Diseño alternativo de celda apropiado para la medida de la cohesión y el ángulo de fricción interna de materiales granulares cohesivos.

25 C: celda

MG1: material granular 1.

MG2: material granular 2.

B: bloque separador solidario a la celda.

30 Figura 7.- Prototipo del dispositivo, donde

M: motor

V: controlador de velocidad

E: estructura

A: arco soporte de la cámara de vídeo.

35 C: celda.

S: soporte de fijación ajustable.

R: sistema de fijación y rodamiento.

T: correa de transmisión.

O: orificio soporte de la cámara

D. disco soporte de la celda.

5

Figura 8.- Celda usada en el prototipo de la figura 7.

Figura 9.- Esquema de la sección transversal del sistema de rodamiento y fijación a la estructura del prototipo de dispositivo.

10 D: disco soporte de la celda.

E: estructura.

J: eje de rotación.

L: cilindro hueco.

R: rodamientos

15 N: rueda dentada.

T: tornillos prisioneros para fijar el eje de rotación al disco y el cilindro hueco a la estructura.

Figura 10.- Ajuste teórico al perfil experimental de la superficie libre de un material granular no cohesivo (velocidad de rotación de la 318 r.p.m.) usando un ángulo de fricción interna de 35.8°

20

Figura 11.- Resultado experimental del ángulo de fricción interna para una serie de materiales granulares cohesivos experimentales en función del tiempo de procesado ("housing") al que previamente fueron sometidos.

25

Figura 12.- Resultado experimental de la velocidad angular de rotación a la que sucede la primera avalancha para una serie de materiales granulares cohesivos experimentales en función del tiempo de procesado ("housing") al que previamente fueron sometidos.

30

Figura 13.- Resultado experimental de la cohesión para una serie de materiales granulares cohesivos experimentales en función del tiempo de procesado ("housing") al que previamente fueron sometidos.

35

Descripción de la invención

El elemento básico del dispositivo objeto de la presente invención es una celda rectangular de longitud mucho mayor que su anchura, siendo la altura del orden
5 del centímetro, de manera que las tensiones de consolidación son pequeñas. Además, que la anchura de la celda sea bastante menor que su longitud garantiza un estado de tensiones que puede tratarse aproximadamente en dos dimensiones. La muestra de material granular se introduce en la celda, cuyo eje se encuentra
10 alineado con la dirección de la gravedad. La celda se hace girar alrededor de este eje a una velocidad de rotación controlada ω . La velocidad de rotación se incrementa lentamente mientras se mide la evolución del material. El material granular fluye para un cierto valor crítico de la aceleración centrífuga, observándose una avalancha hacia el exterior de la celda.

15 En el caso de materiales no cohesivos el flujo de material se produce a través de avalanchas superficiales en principio localizadas cerca de la pared externa de la celda. Conforme se incrementa la velocidad de rotación la localización de estas pequeñas avalanchas se desplaza hacia el interior. El resultado aparente es que el perfil de la superficie del material fluye de manera suave y continua. La medida de
20 este perfil en función de ω permite obtener el ángulo de fricción interna.

Por el contrario, las avalanchas que se observan en el caso de materiales cohesivos que fluyen con dificultad son de un gran tamaño, de modo que el flujo de material se produce a saltos discretos. La primera avalancha se produce en
25 una zona de la superficie alejada del eje de rotación mientras que la región cercana al eje permanece en estado estacionario. Cuando la velocidad de rotación es elevada el material se acumula en la parte externa de la celda y su superficie libre forma una pendiente cuyo ángulo con la horizontal está relacionado con el ángulo de fricción interna.

30 La base de la celda puede construirse de un material poroso de manera que el tamaño de poro sea menor que el tamaño de la partícula al objeto de que permita el flujo de gas hacia la muestra. Esto hace posible que mediante un flujo de gas intenso en el sentido contrario a la gravedad se lleve el material a un estado de fluidización. Entonces se corta bruscamente el suministro de gas y el material se
35 asienta en un estado inicial reproducible. El uso de un flujo de gas en sentido de la gravedad sobre la muestra permite asimismo estudiar como varían el ángulo de

fricción interna y la cohesión del material en función de la consolidación previa a la que ha sido sometida la muestra (que será función del flujo de gas con el que consolidemos el material. Para estudiar el efecto de consolidaciones extremadamente elevadas es posible usar un pistón de dimensiones adaptadas a las dimensiones internas de la celda y con el que es posible aplicar una fuerza determinada sobre la superficie libre del material.

En el caso de un material granular no cohesivo la evolución del perfil de la superficie libre conforme se aumenta la velocidad de rotación determina su ángulo de fricción interna. En el caso de un material granular cohesivo la evolución de la pendiente de la región externa determina su ángulo de fricción interna y la velocidad de rotación crítica a la que se produce la primera avalancha determina la cohesión del material una vez conocido su ángulo de fricción interna.

A continuación se detalla cómo obtener ambo parámetros, cuyos valores dan una idea clara de la fluidez del medio granular.

Materiales granulares no cohesivos

Consideremos un elemento de volumen diferencial sobre la superficie libre del material de área dA y masa dm . Sobre dicho elemento actúan su propio peso $dm g$ a lo largo del eje vertical z , donde g es la aceleración de la gravedad, y la fuerza centrífuga $dm \omega^2 r$, donde r es la distancia del elemento de volumen al eje de rotación y ω es la velocidad angular de rotación. Supongamos que la superficie posee una pendiente que forma un ángulo β con la horizontal. Entonces, la tensión normal σ y la tensión tangencial τ sobre la superficie vienen dadas por

$$\sigma = \frac{dm \omega^2 r \sin(\beta) + dm g \cos(\beta)}{dA} \quad \tau = \frac{dm \omega^2 r \cos(\beta) - dm g \sin(\beta)}{dA} \quad (2)$$

Según el criterio límite de Coulomb (R. Nedderman, Statics and Kinematics of Granular Materials, (Cambridge University Press, UK, 1992)), el estado crítico para el que se produce una avalancha viene determinado por la relación $\tau = \mu \sigma$, donde μ es la tangente del ángulo de fricción interna del material $\mu = \tan(\phi)$. Así

pues, la condición para que el material permanezca en estado estático viene dada por

$$\tan(\phi) \geq \frac{\tau}{\sigma} = \frac{\omega^2 r \cos(\beta) - g \sin(\beta)}{\omega^2 r \sin(\beta) + g \cos(\beta)} \quad (3)$$

5

La igualdad en esta inecuación proporciona la ecuación de la curva que toma la superficie libre del material para una velocidad de rotación dada superior a la velocidad mínima a la que se produce la primera avalancha:

10

$$\tan(\beta) = \left(\frac{\omega^2 r}{g} - \mu \right) / \left(1 + \frac{\omega^2 r}{g} \mu \right) \quad (4)$$

Mediante el ajuste de la función dada por la ecuación 4 a la curva experimental es posible obtener un valor para el ángulo de fricción interna del material granular no cohesivo.

15

Materiales granulares cohesivos. Análisis de la primera avalancha.

En el caso de materiales cohesivos la condición límite de ruptura viene dada por el signo igual de la ecuación

20

$$\tau \leq \mu \sigma + c \quad (5)$$

25 donde el nuevo parámetro c es la cohesión característica del material. Como se dijo anteriormente, en los materiales granulares cohesivos las avalanchas se producen a lo largo de superficies internas por lo que usualmente se habla de ruptura del material. Para el análisis teórico de este problema usaremos el método de los bloques de Coulomb (J. H. Atkinson, Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations (McGraw Hill International, UK, 1993)), que ha sido muy efectivo
30 en el estudio de avalanchas en otros dispositivos (J. M. Valverde, A. Castellanos, A. Ramos y P. K. Watson, Phys. Rev. E vol. 62, p. 6851 (2000), F. C. Genovesse, P. K. Watson, A. Castellanos, and A. Ramos, en Powders & Grains 97, Ed. R. P.

Behringer and J. T. Jenkins (Balkema, Rotterdam, 1997), p. 151). La hipótesis fundamental en la aplicación del método es que la ruptura inicial se produce a lo largo de superficies planas sobre las cuales se verifica la condición límite de ruptura (signo igual en la ecuación (5)). Además el conjunto de fuerzas volumétricas que actúan sobre los bloques deslizantes cumple la condición de equilibrio, es decir el material se encuentra en un estado de equilibrio límite. La información sobre la localización de estas superficies de ruptura se obtiene de las observaciones experimentales. De acuerdo con esto, proponemos que la primera avalancha puede modelarse en primera aproximación mediante el sistema de bloques triangulares que se ilustra en la figura 4. Se representan las fuerzas por unidad de longitud (en la dirección transversal) que actúan sobre cada uno de los bloques. W_1 y W_2 corresponden al peso de los bloques 1 y 2 respectivamente. F_1 y F_2 son las fuerzas centrífugas. A lo largo de cada una de las superficies de ruptura actúan fuerzas tangenciales T_i y normales N_i ($i=1,2$). Usando como condición de equilibrio $T_3=T_4$ y $N_3=N_4$, el resto de ecuaciones resultantes es:

Ecuaciones de equilibrio de fuerzas:

$$F_1 - N_1 \cdot \sin \beta - T_1 \cdot \cos \beta + N_3 = 0$$

$$F_2 - N_2 \cdot \sin \beta - T_2 \cdot \cos \beta - N_3 = 0$$

$$N_1 \cdot \cos \beta - T_1 \cdot \sin \beta - W_1 - T_3 = 0$$

$$N_2 \cdot \cos \beta + T_2 \cdot \sin \beta - W_2 + T_3 = 0$$

20

Condiciones límite de ruptura:

$$T_1 = N_1 \cdot \tan \phi + \frac{1}{2} \cdot c \cdot (R - x_0) \cdot \sec \beta$$

$$T_2 = N_2 \cdot \tan \phi + \frac{1}{2} \cdot c \cdot (R - x_0) \cdot \sec \beta$$

$$T_3 = N_3 \cdot \tan \phi + \frac{1}{2} \cdot c \cdot (R - x_0) \cdot \tan \beta$$

Este conjunto de 7 ecuaciones posee 6 incógnitas N_1 , N_2 , N_3 , T_1 , T_2 , T_3 . La condición de compatibilidad da lugar a una relación funcional $\omega(\beta, x_0)$ que viene dada por:

25

$$\Omega = \frac{f_1(\beta, \phi) + \frac{24 \cdot \gamma}{1 - \zeta} \cdot f_2(\beta, \phi)}{(2 + \zeta) \cdot f_3(\beta, \phi) + (1 + 2 \cdot \zeta) \cdot f_4(\beta, \phi)} \quad (6)$$

siendo:

$$\Omega = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \quad \gamma = \frac{c}{\rho \cdot g \cdot R} \quad \zeta = \frac{x_0}{R}$$

$$f_1(\beta, \phi) = 6 \sin(\phi) [\cos(2\phi) + \sin^2(\beta)] \quad f_2(\beta, \phi) = \frac{\cos(\phi) \cos(\beta)}{\sin(\beta)} [\cos(2\phi) + \sin^2(\beta)]$$

$$f_3(\beta, \phi) = \cos(\beta + \phi) \cos(\beta - 2\phi) \quad f_4(\beta, \phi) = \cos(\beta - \phi) \cos(\beta + 2\phi)$$

5 donde ρ es la densidad del material. La ecuación 6 posee un mínimo absoluto ω_{\min} para ciertos valores $\beta = \beta_c$ y $x_0 = x_{0c}$. Este es el valor mínimo necesario para que la configuración de bloques propuesta se encuentre en equilibrio límite. Será por tanto el valor teórico de la velocidad de rotación en el que se producirá la

10 primera avalancha. Los parámetros β_c y x_{0c} determinan la localización y la forma de la primera avalancha según la predicción teórica. Esta predicción ha de ser físicamente aceptable, es decir debe imponerse la condición $T_3 > 0$, de manera que el movimiento relativo de los bloques es del 1 hacia arriba y sobre el 2. La resolución teórica de las ecuaciones puede abordarse por métodos numéricos.

15 Cabe reseñar que la precisión del resultado arrojado por el método de bloques depende de cuanto de aproximado es la superficie de avalancha propuesta a la superficie real. Como puede observarse en la figura 3, la superficie de la primera avalancha tiene una forma más bien circular. Podríamos añadir un bloque central rectangular al sistema que se esquematiza en la figura 4 de manera que la

20 superficie de deslizamiento estuviera compuesta por tres superficies planas y así se aproximara más a la superficie experimental. De hecho hemos desarrollado dicho modelo, pero el análisis es bastante más complicado numéricamente y la corrección relativa al modelo de dos bloques triangulares es realmente pequeña (del orden de 5%) y menor que la dispersión experimental.

Materiales granulares cohesivos. Análisis de las avalanchas a velocidades elevadas de rotación.

En la figura 5 se representa el modelo de bloque único propuesto para las avalanchas que se producen en la parte exterior de la celda a velocidades de rotación elevadas. El ángulo θ es el formado por la superficie libre con la horizontal antes de la avalancha y α es el ángulo que forma después de la avalancha. F_c es la fuerza centrífuga sobre el bloque que desliza y W el peso de dicho bloque. De acuerdo con las observaciones experimentales el bloque deslizante es muy delgado es decir $\alpha \approx \theta$. Según esta aproximación podemos escribir:

$$\frac{F_c}{W} = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \Delta R}{3 \cdot R}\right) = \tan \chi \quad (7)$$

Así pues, el ángulo χ define la importancia relativa de la fuerza centrífuga sobre el peso. Para que la condición de equilibrio límite se verifique (signo igual de la ecuación 5), debemos encontrar el ángulo $\alpha = \alpha_c$ que maximice la parte izquierda de la ecuación 8

$$\sin(\alpha - \theta) \cdot \sin[\chi - (\alpha + \phi)] \leq \frac{2 \cdot c}{\rho \cdot g \cdot h} \cdot \cos \phi \cdot \cos \chi \cdot \sin \theta \quad (8)$$

Este valor viene dado por:

$$\alpha_c = \frac{\chi - \phi + \theta}{2}$$

De donde

$$\phi \approx \chi - \alpha_c \quad (9)$$

La ecuación 9 permite obtener un valor experimental para el ángulo de fricción interna del material granular cohesivo teniendo en cuenta la aproximación $\alpha \approx \theta$.

Es conveniente iniciar el procedimiento de medidas del ángulo de fricción interna y cohesión analizando el comportamiento del material al rotar la celda a velocidades elevadas. De este modo podemos determinar el ángulo de fricción interna, que se necesita conocer para determinar la cohesión del material mediante el análisis de la primera avalancha (éste será el segundo paso del procedimiento).

El análisis de las avalanchas que se producen en la parte externa a altas velocidades puede verse dificultado por la fuga de parte del material desde el núcleo central hasta la región externa (figura 2). Con el objeto de evitar este inconveniente es ventajoso usar una celda dividida en dos compartimentos simétricos y separados por un núcleo central sólido e inmóvil (véase figura 6). Este diseño permite además analizar dos materiales distintos (uno en cada compartimiento) al mismo tiempo.

15

Materiales granulares extremadamente cohesivos.

El caso de materiales extremadamente cohesivos, como por ejemplo el polvo de piedra caliza, merece especial atención. En estos materiales, en lugar de producirse avalanchas, la ruptura tiene lugar fundamentalmente mediante fracturas internas perpendiculares a la tensión ejercida por la fuerza centrífuga, es decir paralelas al eje de rotación. En estos casos el parámetro significativo que determina la condición límite de ruptura es la tensión de resistencia a la tracción σ_t que es del orden de la cohesión c del material. La fuerza centrífuga total sobre el bloque externo que se despega de la parte central viene dada por

25

$$F_c = \frac{\rho\omega^2}{2} \left[\left(\frac{L}{2} \right)^2 - x_0^2 \right] A_t$$

donde ρ es la densidad del material, x_0 es la distancia a la que se produce la fractura del eje de rotación y $A_t \approx DH$ es el área de contacto entre los bloques que se separan. La ruptura se produce cuando esta fuerza iguala a la fuerza de resistencia a la tracción, que viene dada por el producto de σ_t y A_t . De esta forma obtendríamos una medida de σ_t que vendría dada por

30

$$\sigma_t = \frac{\rho\omega^2}{2} \left[\left(\frac{L}{2} \right)^2 - x_0^2 \right]$$

La base de la celda puede construirse de un material poroso de manera que el tamaño de poro sea menor que el tamaño de la partícula al objeto de que permita el flujo de gas hacia la muestra. Mediante un flujo de gas intenso en el sentido contrario a la gravedad se lleva al material a un estado fluido, que en materiales granulares en los que el tamaño de partícula es del orden o mayor que 100 micras es de fluidización con burbujeo. En este estado el material pierde memoria de los procesos a los que hubiera podido ser sometido previamente (J. M. Valverde, A. Castellanos, y M. A. S. Quintanilla, Contemporary Physics, vol. 44, no. 5, pp. 389-399, 2003). Entonces se corta bruscamente el suministro de gas y el material se asienta en un estado inicial reproducible. La fluidización como paso previo de inicialización de la muestra es recomendable para polvos finos, que debido a su elevada cohesión conservan un alto grado de memoria. Para materiales de tamaño de grano superior a las 100 micras la técnica de inicialización no es muy relevante.

Finalmente, es bien conocido que tanto el ángulo de fricción interna como la cohesión de medios granulares puede ser muy sensible a su estado de consolidación (J. M. Valverde, A. Ramos, A. Castellanos, y P. K. Watson, Powder Technol. Vol. 97, 237 (1998). J. M. Valverde, A. Castellanos, A. Ramos y P. K. Watson, Phys. Rev. E vol. 62, p. 6851 (2000)). El uso de un flujo de gas en sentido de la gravedad sobre la muestra tal y como se describe en trabajos previos (J. M. Valverde, A. Castellanos, A. Ramos, A. T. Pérez, M. A. Morgan y P. K. Watson, Rev. Sci. Inst., vol. 71, p. 2791, 2000) permitiría estudiar como evolucionan estos parámetros en función de la consolidación previa a la que ha sido sometida la muestra (que será función del flujo de gas con el que consolidemos el material).

Para estudiar el efecto de consolidaciones extremadamente elevadas es posible usar un pistón de dimensiones adaptadas a las dimensiones internas de la celda y con el que es posible aplicar una fuerza determinada sobre la superficie libre del material.

30 **Modo de realización de la invención**

A continuación se describe en detalle un prototipo de dispositivo desarrollado (ver figura 7)

El componente que gobierna la rotación de la celda es un motor de imán permanente (M) alimentado por corriente continua (0-200VDC). El motor fue suministrado por Parvalux Co. (modelo PM60.LIS) y posee incorporada una caja

reductora (razón 1/6), de manera que en función del voltaje suministrado al motor puede controlarse de manera continua la velocidad de rotación del eje en el rango 4-500 r.p.m. Como fuente de alimentación (V) del motor se usa un controlador (Parvalux Co., modelo 126) alimentado por la corriente alterna de la red eléctrica (200/250VAC 50/60Hz) y que suministra al motor un voltaje continuo en el rango 0-200VDC y variable manualmente mediante un potenciómetro. Es posible variar dicho voltaje mediante el ordenador usando como interfaz una tarjeta de conversión A/D conectada al controlador. Esto permite conseguir un mayor grado de automatización del procedimiento experimental. La carcasa del motor se fija a la estructura (E) que soporta la celda rotante (C) atornillado a una placa de aluminio y usando juntas de caucho al objeto de evitar al máximo cualquier posible transmisión de vibraciones a la muestra de material granular. El diseño y dimensiones de la celda (fabricada en metacrilato) usada en el prototipo se encuentra representado en la figura 8. La estructura (E) tiene forma de mesa con tapa cuadrada de aluminio de dimensiones 40mm x 40mm. Las patas de la estructura poseen soportes ajustables (S) para que la celda (C) se sitúe siempre a nivel horizontal. La celda se encuentra atornillada a un disco de aluminio (D) de diámetro 200mm y que rota solidario al eje del motor. El disco (D) tiene practicados una malla regular de taladros con el objeto de poder usar celdas de diferentes tamaños. Esto permite además aprovechar la estructura para otro tipo de experimentos como el del disco rotante (F. C. Genovesse, P. K. Watson, A. Castellanos, and A. Ramos, en *Powders & Grains* 97, Ed. R. P. Behringer and J. T. Jenkins (Balkema, Rotterdam, 1997), p. 151). Sobre el disco (D) se encuentra también atornillado un arco rectangular de aluminio (A). Como puede observarse en la figura, el arco rectangular tiene practicado en uno de sus laterales un orificio de 16 mm de diámetro y a una altura de 20mm con el fin de fijar en su interior el objetivo de la cámara de video. Asimismo el arco sirve de elemento de sujeción para el cableado de la cámara que se fija sobre el arco hasta el punto del eje de giro, donde se conecta al cableado fijo del monitor y de la fuente de alimentación de la cámara mediante una conexión giratoria (en nuestro caso hemos usado una conexión rotatoria para auricular de teléfono). La distancia del objetivo de la cámara a la celda es igual a su distancia mínima focal, aproximadamente 170mm. La distancia entre el eje del motor (M) y el eje del disco (D) es 37mm. La transmisión de la rotación del eje del motor al disco es una parte importante del dispositivo ya que debe realizarse evitando la posible propagación de vibraciones a la muestra de material granular. El agente de transmisión del movimiento es una

correa (T). En la figura 9 se encuentra representado un esquema de la sección transversal del sistema de fijación y rodamiento (R). La correa (T) transmite el movimiento al eje mediante un disco dentado. El eje se fija al disco (D) mediante tornillo prisionero y se encuentra embutido en un cilindro hueco de aluminio que se ha fijado a la mesa de la estructura (E). En los extremos del interior de dicho cilindro se han colocado dos rodamientos. Este sistema facilita la estabilidad del disco en su movimiento de rotación y minimiza la transmisión de vibraciones procedentes del motor.

10 *Material granular no cohesivo.-*

Se han realizado medidas sobre un material granular no cohesivo constituido por partículas esféricas de polímero estireno-butadieno de varios cientos de micra de tamaño. En este ejemplo particular la muestra de material fue inicializada vibrando la celda de manera que los granos alcanzan un grado de empaquetamiento próximo al límite de máximo empaquetamiento aleatorio (fracción de volumen de las partículas alrededor de 0.64). Como puede observarse en la figura 10, existe un muy buen acuerdo entre el perfil experimental de la superficie y la predicción teórica (ecuación 4) cuando se ajusta el ángulo de fricción interna a $\phi = 35.8^\circ$. Éste es un valor cercano al ángulo de fricción interna medido para este material mediante procedimientos independientes y una inicialización similar (J. M. Valverde, A. Castellanos, A. Ramos y P. K. Watson, Phys. Rev. E vol. 62, p. 6851 (2000)). La posibilidad de fluidizar la muestra en este dispositivo permitiría estudiar su comportamiento en estados de menor compactación para los que, de acuerdo con nuestro trabajo previo (J. M. Valverde, A. Castellanos, A. Ramos y P. K. Watson, Phys. Rev. E vol. 62, p. 6851 (2000)), el ángulo de fricción interna puede ser sensiblemente menor.

Material granular cohesivo.-

Los "developers" son materiales granulares cohesivos empleados en la industria xerográfica y su cohesión depende del tiempo durante el cual han sido sometidos a un proceso conocido como "housing". En este proceso el material sufre altas tensiones de consolidación que incrementan su cohesión y por tanto disminuyen su fluidez.

En la figura 11 se muestran los resultados para el ángulo de fricción interna de los "developers" en función de su tiempo de "housing" t_H . Puede observarse que

dicho ángulo no depende esencialmente de t_H según nuestros resultados y su valor se encuentra en torno a 30° . Como cabría esperar, este valor es comparable al ángulo promedio de reposo obtenido en un estudio estadístico de las avalanchas en un tambor rotante (M. A. S. Quintanilla, J. M. Valverde, A. Castellanos, y R. E. Viturro, Phys. Rev. Lett., vol. 87, 194301 (2001)). Una vez se conoce este valor para el ángulo de fricción interna ϕ el paso siguiente consiste en usar la velocidad de rotación ω_{\min} para la que ocurre la primera avalancha. En la figura 12 representamos ω_{\min} vs. t_H . Puede observarse que ω_{\min} aumenta con t_H , indicando que la cohesión del “developer” aumenta con t_H como era de esperar. Siguiendo el procedimiento descrito en la sección anterior, derivamos la cohesión c a partir de ω_{\min} . Los resultados se muestran en la figura 13. En la misma gráfica se encuentran representados las medidas de c obtenidas mediante la técnica independiente del disco rotante (F. C. Genovesse, P. K. Watson, A. Castellanos, and A. Ramos, en Powders & Grains 97, Ed. R. P. Behringer and J. T. Jenkins (Balkema, Rotterdam, 1997), p. 151). Como puede verse ambos resultados coinciden dentro de la dispersión experimental, lo cual refuerza la validez del dispositivo y procedimiento descritos en la presente invención.

20

25

30

35

Reivindicaciones

- 1.- Dispositivo para medir el ángulo de fricción interna y la cohesión de medios granulares, caracterizado por el uso de una celda sometida a rotación alrededor de su eje y donde se encuentra emplazada la muestra de material granular, siendo la anchura de la celda menor que su longitud.
- 2.- Dispositivo para medir el ángulo de fricción interna y la cohesión de medios granulares según reivindicación 1, caracterizado por el uso de una celda dividida en dos compartimentos simétricos y separados por un núcleo central sólido e inmóvil, pudiendo analizar dos materiales distintos al mismo tiempo.
- 3.- Dispositivo para medir el ángulo de fricción interna y la cohesión de medios granulares según reivindicaciones 1 y 2, caracterizado porque la base de la celda es de un material poroso siendo el tamaño de poro menor que el tamaño de partícula.
- 4.- Dispositivo para medir el ángulo de fricción interna de medios granulares no cohesivos según reivindicaciones 1,2 y 3, caracterizado por el uso de un sistema óptico para medir el perfil de la superficie libre que forma un material granular no cohesivo contenido en la celda cuando ésta se hace rotar alrededor de su eje.
- 5.- Dispositivo para medir el ángulo de fricción interna y la cohesión de medios granulares cohesivos según reivindicaciones 1,2 y 3, caracterizado por el uso de un sistema óptico para detectar las avalanchas que se producen en un material granular cohesivo contenido en la celda cuando ésta se hace rotar alrededor de su eje.
- 6.- Dispositivo para medir el esfuerzo de resistencia a la tracción de medios granulares extremadamente cohesivos, caracterizado por el uso de un sistema óptico para detectar las fracturas que se producen en un material granular extremadamente cohesivo contenido en la celda cuando ésta se hace rotar alrededor de su eje.

7.- Dispositivo para medir el ángulo de fricción interna y la cohesión de medios granulares según reivindicaciones anteriores, caracterizado por el uso de un flujo de gas en sentido contrario al de la gravedad para inicializar el material en un estado reproducible.

5

8.- Dispositivo para medir el ángulo de fricción interna y la cohesión de medios granulares según reivindicaciones anteriores, caracterizado por el uso de un flujo de gas en el sentido de la gravedad para compactar la muestra de material en un estado inicial de consolidación controlada.

10

9.- Dispositivo para medir el ángulo de fricción interna y la cohesión de medios granulares según reivindicaciones anteriores, caracterizado por el uso de un pistón para compactar el material en un estado inicial de muy alta consolidación.

15

10.- Procedimiento para medir el ángulo de fricción interna y la cohesión de medios granulares utilizado en dispositivo descrito según reivindicaciones 1 a 9, caracterizado por el análisis según el método de bloques de las avalanchas que tienen lugar cuando el material es sometido a una fuerza centrífuga.

20

25

30

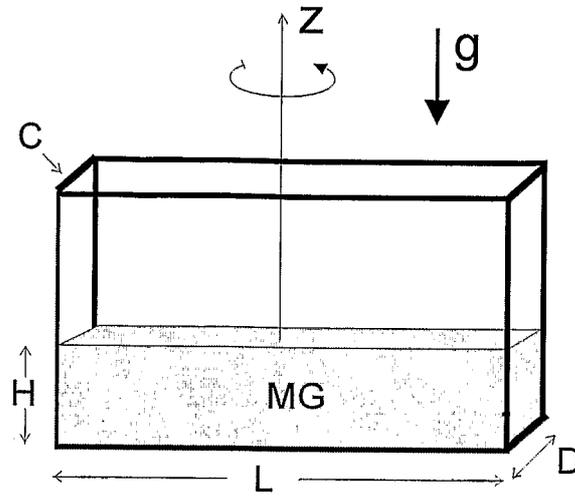


Figura 1

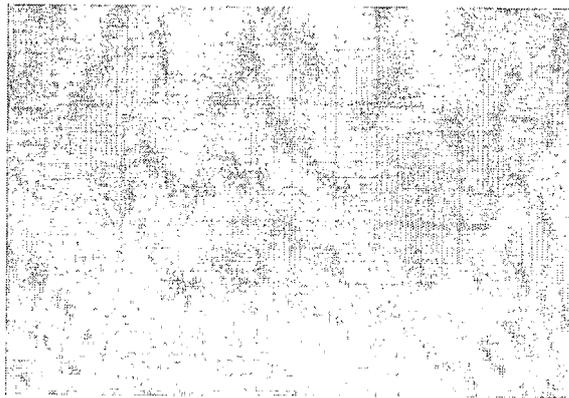


Figura 2

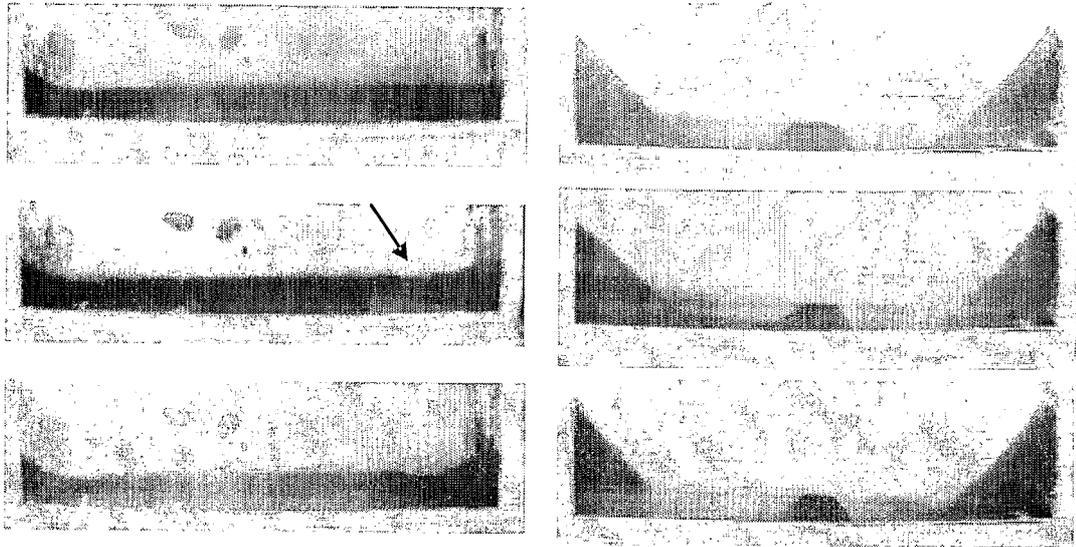


Figura 3

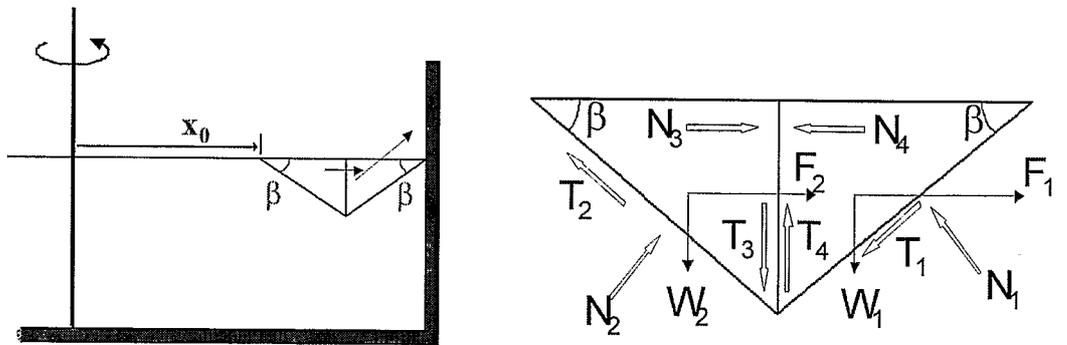


Figura 4

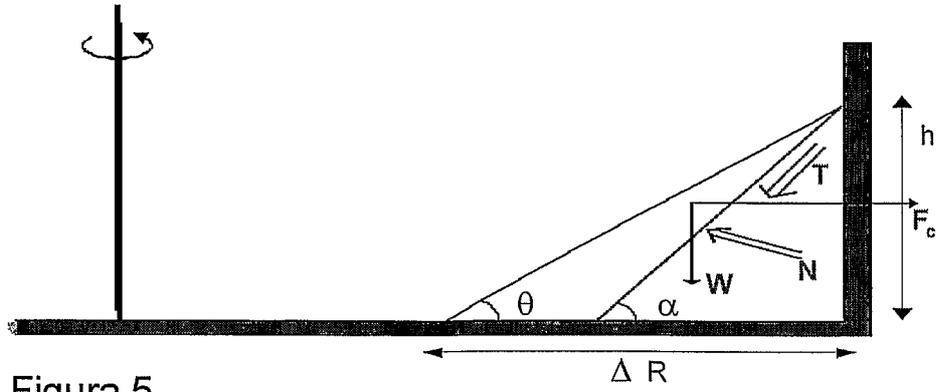


Figura 5

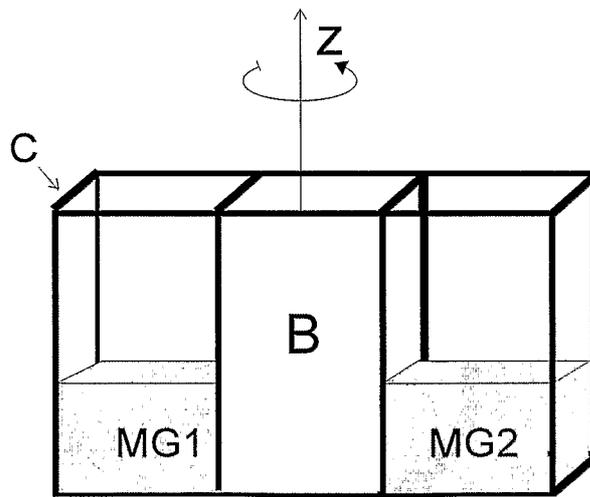


Figura 6

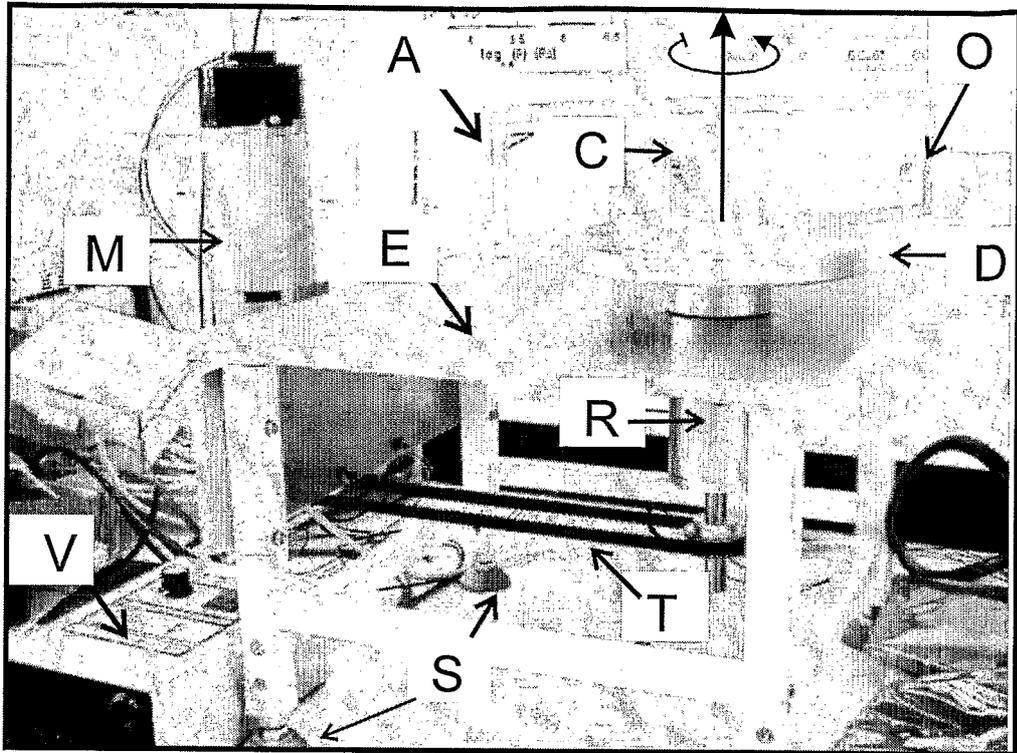


Figura 7

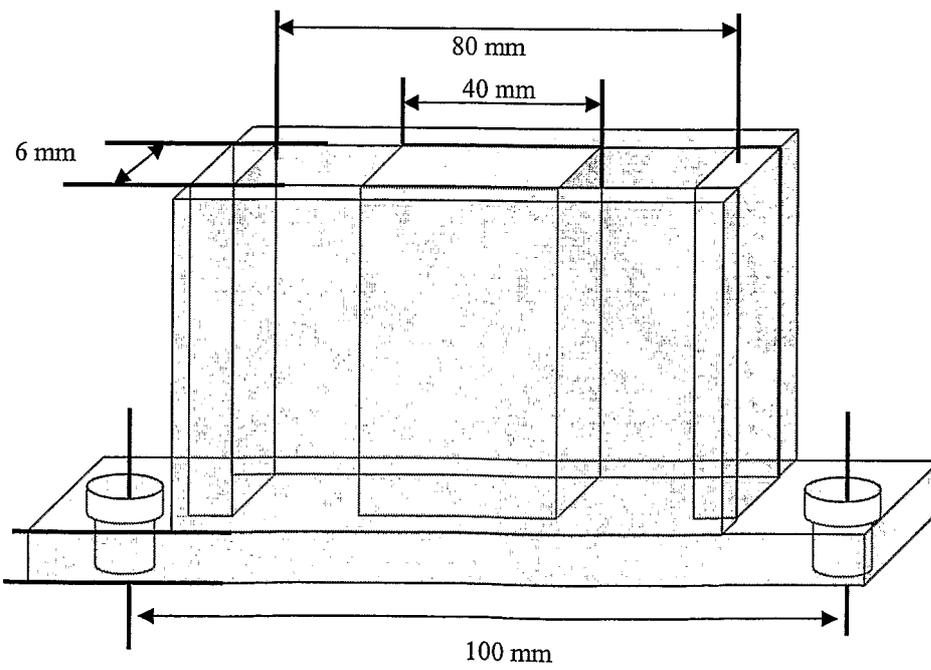


Figura 8

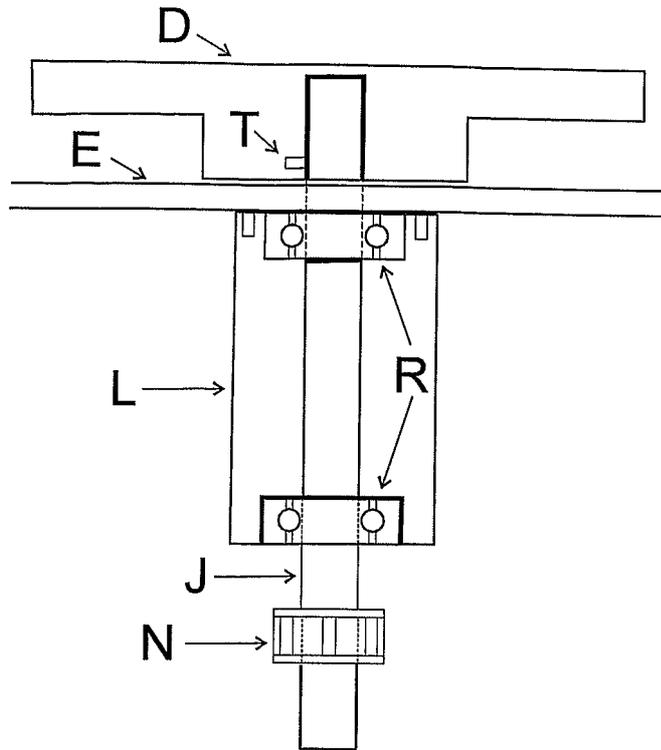


Figura 9

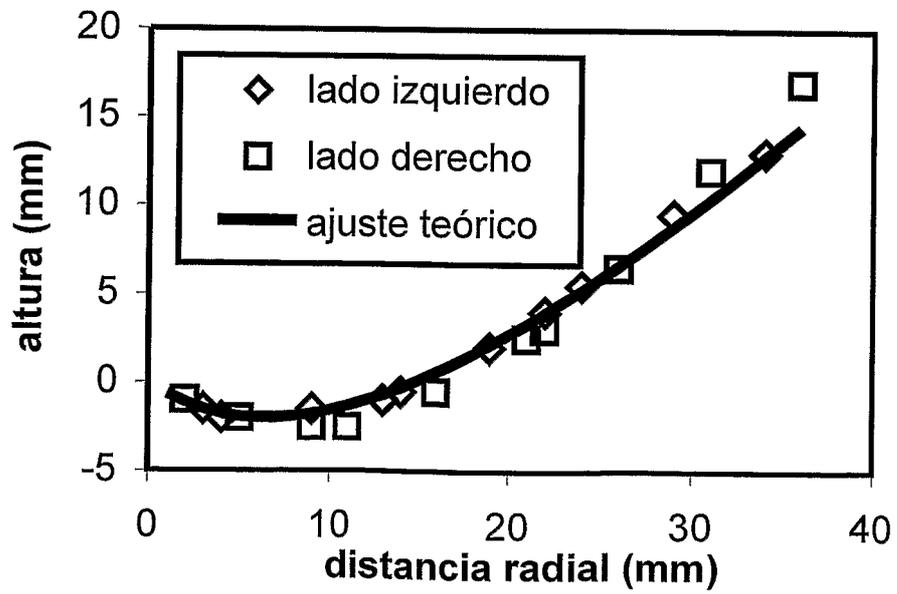


Figura 10

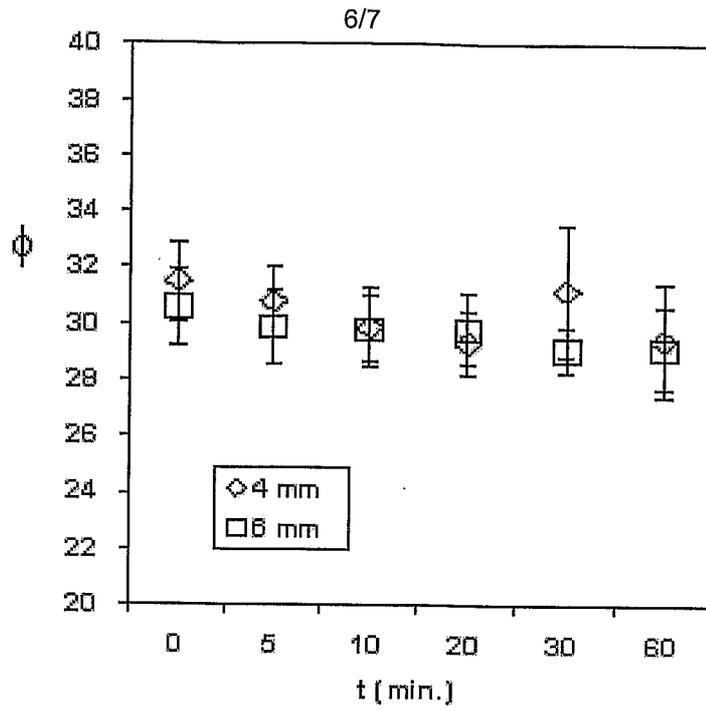


Figura 11

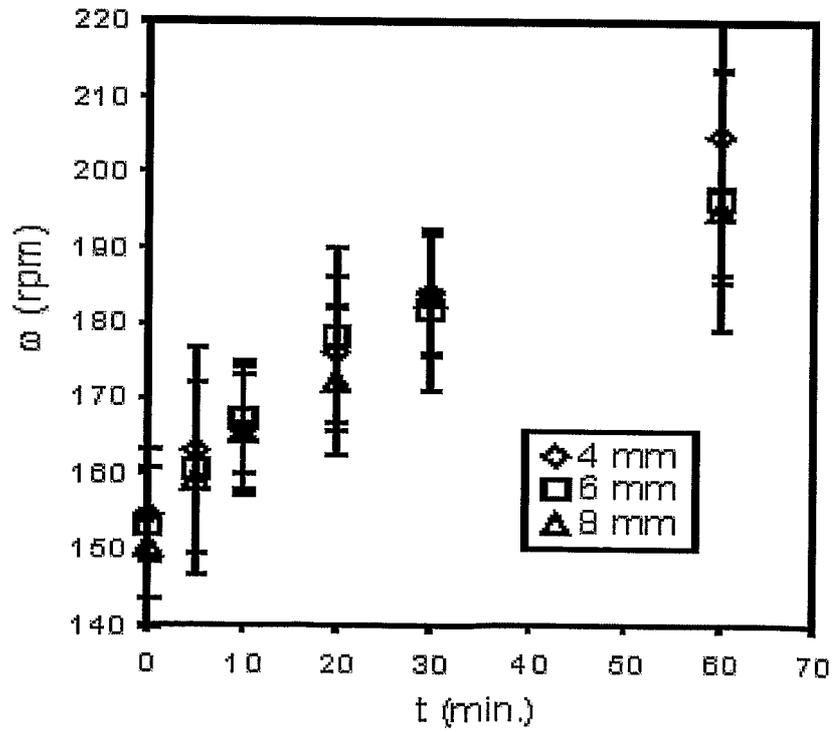


Figura 12

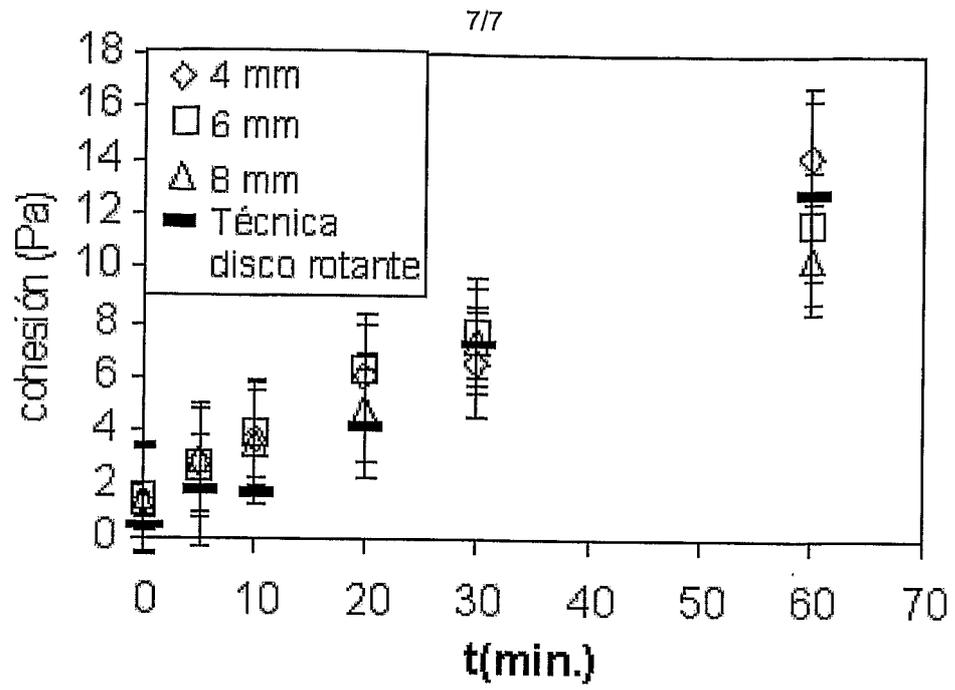


Figura 13