



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE INGENIERIA MECANICA E INDUSTRIAL

“CARACTERIZACION DEL FLUJO GRANULAR
IMPULSADO POR UN PISTON EN UNA
TUBERIA CIRCULAR”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO
P R E S E N T A :
DIEGO ARROYO CETTO



DIRECTORES:

DR. GUILLERMO PULOS CARDENAS

DR. ROBERTO ZENIT CAMACHO

MEXICO, D. F.

2002.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

**“CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO GRANULAR IMPULSADO
POR UN PISTÓN EN UNA
TUBERÍA CIRCULAR”**

DIEGO ARROYO CETTO

**TESIS PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA
MECÁNICA E INDUSTRIAL
DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**Directores:
Dr. Guillermo Pulos Cárdenas
Dr. Roberto Zenit Camacho**

2002

A mis padres, a mi hermano y a Virginia.

Resumen

A los materiales granulares en movimiento se les llama flujos granulares. De éstos, hay tres tipos: estático, lento y rápido. La presente investigación atiende al flujo granular estático en una tubería circular. Se realizaron pruebas desplazando material granular en un cilindro, impulsando el material con un pistón. Para poder caracterizar mejor el flujo, además de dichas pruebas, fue necesario medir el coeficiente de fricción del material granular, para lo cual fue necesario otro arreglo experimental.

Para ambos experimentos se utilizó un sistema automatizado, donde una PC carga los parámetros variables a los controladores, los cuales, a su vez, varían los parámetros necesarios para que funcione el experimento. Por otra parte, con la utilización de transductores se miden las variables de estudio que son recolectadas por una computadora mediante la cual las variables medidas se interpretan como voltajes, y los resultados se almacenan en archivos de texto.

En el experimento principal, el pistón desplaza al material por el cilindro en forma vertical. Al moverse, el material se compacta por la fricción con el cilindro, sufriendo una deformación radial. Por ello, para desplazar al material se requiere una fuerza que es dependiente de la altura de la cama de granos e, inesperadamente, de la velocidad con que se desplaza. Las pruebas se realizaron variando el diámetro de las partículas, el diámetro del cilindro, las velocidades y la altura de la cama de granos.

Para realizar mediciones del coeficiente de fricción —segundo experimento—, se mueve una superficie, misma que hace contacto únicamente con material granular que se encuentra confinado en una caja. Así, la fuerza que recibe la caja en dirección horizontal resulta ser la fricción del material granular contra la superficie. La fuerza tangencial F se mide por medio del transductor, mientras que la normal N es igual a la suma del peso de la caja y del material granular. El coeficiente de fricción se calcula como $m_p = F/N$. Estos experimentos se efectuaron para desplazamientos y velocidades similares a las del pistón del primer experimento.

Del experimento para medir el coeficiente de fricción, se comprobó que éste es función de la fuerza normal N y de la velocidad del flujo V . Ambas dependencias funcionales son no lineales, y dependen en gran medida de la compactación del material granular y de la rugosidad de las superficies.

Agradecimientos

Agradezco a la UNAM, de la que siempre me sentiré parte, así como a la FI y al IIM.

A mis asesores, Guillermo Pulos y Roberto Zenith, de quienes aprendí mucho. Siempre dispuestos a escuchar y aportar, no son sólo asesores, sino también amigos.

A mis padres, de quienes más he aprendido. Gracias por su apoyo y el tiempo que me han dedicado, durante toda mi vida.

A mi hermano, uno de mis mejores amigos.

A Virginia y mi hijo Leonardo, por quienes más me apuré a terminar para iniciar la vida juntos.

A los integrantes del heroico Sagrevsol: Víctor, Juárez, Ponchito, Marco, Luis, Daniel, Pedro, Saniger, y desde luego a Joel, Ángel y Carlos, quienes además de haber estado en Sagrevsol fueron con quienes compartí más desvelos a lo largo de la carrera, incluida la tesis, tanto para el estudio como para la diversión.

A los Doctores Baltasar Mena, Juan Hernández y Ramón Herrera.

A los compañeros de reología y mecánica de sólidos, especialmente: Eréndira y Miguel Ángel.

A mis amigos de toda la vida: Ruy, Claudio, Adrián, el Daños, Ismael.

A otros buenos amigos y amigas como Maria Elena, Vania, Mary Rosa, Hazel, Alonso y Bruno.

A los maestros: Félix Núñez, Rolando Peralta, Juan Ocariz, Francisco Solorio, quienes me enseñaron bases sólidas y me transmitieron su gusto por las ciencias.

A mis tutores, Jaime Martínez y Arturo Bonilla.

Al programa de Becas PROBETEL y a CONACYT.

Índice

Capítulo 1.- Introducción y conceptos básicos.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Marco teórico – conceptual	5
1.2.1 Antecedentes.....	5
1.2.2 Estudio de los materiales granulares	7
1.2.3 Análisis bidimensional de esfuerzos: Círculos de Mohr.....	7
1.2.4 El gradiente de esfuerzos y la ecuación de Euler	9
1.2.5 Propiedades del material granular	12
1.3 Justificación y alcances de la investigación.	13
Capítulo 2.- Diseño Experimental	14
2.1 Fuerza de compactación de un material granular.....	14
2.1.1 Fuerza de compactación	14
2.1.2 Descripción general	17
2.1.3 Descripción de las partes que integran el sistema	20
2.1.4 Pruebas	23
2.2 Medición del coeficiente de fricción	25
2.2.1 Coeficiente de fricción	25
2.2.2 Descripción General	29
2.2.3 Partes que integran el sistema.....	34
2.2.4 Pruebas	38
Capítulo 3.- Resultados y análisis	40
3.1 Parte 1: Cilindro – pistón:.....	40
3.1.1 Pruebas realizadas	40
3.1.2 Zona lineal	47
3.1.3 Equilibrio.....	48
3.2 Parte 2: Fuerza de fricción.....	53
3.2.1 Fricción contra una superficie de lisa	53
3.2.2 Fricción contra una superficie rugosa.....	55

Capítulo 4.- Conclusiones	59
4.1 Parte 1	59
4.2 Parte 2	61
Bibliografía	63
APÉNDICE 1: Esferas de vidrio.....	64
APÉNDICE 2: Comandos Básicos del controlador MTS 407.....	65
APÉNDICE 3: Prensa Hidráulica MTS series 359	68
APÉNDICE 4: Comandos básicos del controlador MM4000.....	69
APÉNDICE 5: Presentación realizada	71

1 Capítulo 1.- Introducción y conceptos básicos.

1.1 Introducción.

Un material granular se puede definir como un material compuesto de muchas partículas sólidas individuales, independientemente del tamaño de las mismas. Por ello, el término material granular abarca a una gran variedad de materiales, desde burdos trozos de carbón hasta fina harina. El manejo de estos materiales tiene una gran importancia, sobre todo en la industria química, donde se estima que tres cuartas partes de la materia prima son sólidos granulares. Si a esto añadimos que los cereales, las menas, el azúcar, el cemento, la arena y la grava tienen que ser transportados y almacenados, se vuelve evidente la gran importancia de los materiales granulares. El temprano dominio del petróleo en la industria química causó que se desarrollara mucho el campo de la mecánica de fluidos como uno de los principales elementos de la industria química, mientras que el estudio de los materiales granulares se considera importante desde hace relativamente poco tiempo. Una de las principales razones de ello es que los equipos para manejo de sólidos han sido diseñados empíricamente, y las bases numéricas sólidas se han desarrollado únicamente en los últimos 40 años. En contraste, la naturaleza cuantitativa de la mecánica de fluidos se conoce bastante bien desde el trabajo de Darcy, alrededor de 1840.

Normalmente, los materiales granulares se almacenan en tolvas o carboneras. Éstas pueden variar en tamaño, desde un salero convencional, que contiene sólo algunos gramos, hasta grandes instalaciones que contienen varios miles o, a veces, decenas de miles de toneladas. Los graneros grandes, utilizados para contener productos agrícolas, como cereales o azúcar, pueden llegar a tener hasta 20 m de diámetro y hasta 60 m de alto, y son elementos prominentes de la arquitectura rural.

El análisis de la deformación y las distribuciones de velocidad en materiales granulares se basa en los principios establecidos en el siglo XVIII por Coulomb, y que han sido desarrollados por los mecánicos de suelos; pero, mientras en la mecánica de suelos el

objetivo principal es prevenir el movimiento del suelo, lo opuesto es el objetivo en el manejo de sólidos, especialmente cuando se considera la frecuencia de descarga de los silos. Jenike y sus colaboradores fueron quienes, a principios de la década de 1960, aplicaron por primera vez los principios de la mecánica de suelos al diseño de silos, y desarrollaron procedimientos de diseño que aún hoy son de uso común.

Los creadores de códigos y manuales de diseño están obligados a proponer alguna recomendación para todos los aspectos pertinentes a la construcción de sistemas de almacenamiento y transporte de los materiales granulares en su basto campo de uso y, cuando no existe o no está a la mano ningún hecho científico, deben recurrir al empirismo. Desafortunadamente, la tentación de adaptar un resultado empírico de un código previo es muchas veces irresistible y, en lo sucesivo, lo que inició como un conocimiento empírico aceptado, adquiere el carácter de hecho establecido.

Quizá la propiedad más importante de un material granular es el tamaño de sus partículas, y muchos autores han buscado clasificar los materiales por esta propiedad. Sin embargo, el método para la medición del tamaño de las partículas debe escogerse con cuidado. Si las partículas son esféricas, el diámetro es la dimensión más conveniente, pero no lo es si las partículas no son esféricas. Debe entonces seleccionarse una dimensión característica. A menudo se aplica el diámetro esférico equivalente, que se refiere al diámetro de una esfera del mismo volumen, pero ésta no es la única posibilidad. Por si fuera poco, la mayoría de los materiales contienen un rango de tamaños de partículas, por lo que se debe tomar en cuenta la distribución de las partículas de distinto tamaño. Se ha comprobado que la presencia de algunas partículas finas puede tener un efecto marcado en el comportamiento del material, así que la clasificación basada únicamente en el tamaño medio de las partículas puede ser una sobre simplificación.

Aunque ultimadamente se espera poder predecir la mayoría de las propiedades de los materiales a través de las propiedades y distribución de sus partículas, este tema no ha sido desarrollado a ese nivel de comprensión, de manera que es conveniente tratar cada material como un continuum, y medir el total de sus propiedades sin entrar en detalle en

cuanto a su causalidad. En particular, tanto la densidad como las propiedades de fricción son más comúnmente medidas que predichas, y en este sentido los materiales granulares no difieren de los fluidos convencionales. Con el tiempo, sin lugar a duda, será posible predecir la densidad y viscosidad de un líquido mediante sus propiedades moleculares, pero hoy por hoy sólo se obtienen experimentalmente.

Existe, no obstante, un problema particular que concierne a la densidad, ya que interesan dos densidades: la de las partículas mismas, llamada "densidad de las partículas", ρ_s y la densidad de la mezcla del sólido y el gas entre partículas, que se denomina "densidad del flujo bifásico", ρ_b . Si partimos del hecho de que las partículas no son porosas, su densidad se puede medir por la técnica de desplazamiento de líquido, y la densidad de flujo bifásico puede obtenerse de la proporción de masa y volumen de la muestra.

La relación entre estas dos densidades es:

$$\rho_b = \rho_s(1 - \varepsilon),$$

donde ε es la fracción volumétrica del material ocupado por el gas intersticial.

Mientras que las partículas en sí pueden ser compresibles, el cambio en la densidad de las mismas a lo largo del rango de deformaciones que se suelen hallar es por lo general pequeño, de manera que es una constante efectiva para cualquier material dado. Por otra parte, la densidad de flujo bifásico varía de manera significativa al aplicarse una deformación, principalmente como resultado de un reacomodamiento de las partículas. Al reducir la fuerza de la deformación, el material no necesariamente se expande. Sin embargo, en los resultados se podrá ver un comportamiento pseudo visco - elástico, que se puede atribuir a la expansión. Como resultado, la densidad de flujo bifásico depende no sólo de la fuerza de la deformación actual, sino de su historia de deformaciones. Y, al variar la densidad, lo hacen también todas las propiedades mecánicas del material.

Cuando se considera el patrón de flujo en una carbonera en descarga, es normal distinguir entre el flujo másico y el flujo de centro. En una tolva de flujo másico, todo el material está en movimiento. En dicha tolva, el primer material que se introduce en ella es el primero que sale, dando un patrón de flujo *primero en entrar, primero en salir*. No obstante, el flujo másico sólo puede ocurrir en tolvas comparativamente angostas. En tolvas más anchas, el flujo se verá limitado a un centro angosto, rodeado de material. Si el centro es más angosto que la anchura del silo, el material que se encuentre hasta arriba caerá al centro donde hay flujo, y será descargado antes que el material que previamente estaba dentro, dando el patrón de flujo *primero en entrar, último en salir*. Sin embargo, es habitual que la anchura del centro de flujo aumente con la altura, de manera que, en un silo alto, el centro de flujo tocará la parte superior de las paredes.

1.2 Marco teórico – conceptual

1.2.1 Antecedentes

Cuando un fluido está en movimiento, se le conoce como flujo. Éste se comporta de dos formas muy diferentes, dependiendo del *número de Reynolds*: flujo laminar para baja magnitud del número de Reynolds y turbulento para alta. (White, 1994). Los flujos granulares también varían en su comportamiento, y para describirlo y analizarlo ha sido necesario modelarlo de tres maneras diferentes, dependiendo de su velocidad:

- Estático, se modela como sólido.
- Lento, se modela como fluido.
- Rápido, como un gas.

Seguramente es posible encontrar un número análogo al de Reynolds, que marque la frontera entre estos tres comportamientos, y que probablemente se denominará según quién o quienes lo descubran. Esto será en un futuro, y se necesita más investigación muchos experimentos para llegar a ello. Este trabajo, esperamos, aportará algo en esta dirección.

Los tres tipos de flujo además tienen un comportamiento no lineal en la mayoría de sus propiedades (tal vez todas excepto el peso), lo que hace que su estudio sea complejo.

El nombre Flujo Granular Estático es curioso, porque inicia con la palabra Flujo, que indica movimiento, pero acaba con Estático, que indica ausencia de movimiento. La explicación es que se refiere a dos movimientos diferentes: el flujo es el movimiento que hay en todo el material granular, pero es estático porque no hay movimiento relativo entre las partículas que lo forman: éstas se mueven en la misma dirección y sentido, y a la misma velocidad.

Hasta la fecha, existen pocos trabajos donde se analiza el flujo granular en una tubería circular.

En el trabajo de investigación *Evolution of a Shock Wave in a Granular Gas* (Kamenetsky V, 2000), se concluye que el flujo granular alcanza un estado asintótico de equilibrio después de cierto tiempo, y que las propiedades mecánicas en el equilibrio cumplen perfectamente las predicciones de la solución asintótica. El estudio presentado por Kamenetsky es para flujo granular rápido, a diferencia del presente, que es para flujo estático.

En otra investigación, *Rheology of a Confined Granular Material* (Ovarlez G., Kolb E, 2001), analizaron la fuerza para desplazar el material granular en una tubería circular. Utilizaron esferas de acero de 1.58 mm de diámetro. Sus variables principales fueron la velocidad y la humedad del material. Identificaron dos comportamientos diferentes según la velocidad: con velocidades menores a $1 \mu\text{m/s}$ y para velocidades superiores a $1 \mu\text{m/s}$. En el primer caso, la fuerza disminuye al aumentar la velocidad, y para el segundo, ésta aumenta. La fuerza también aumenta al haber más humedad (cohesión). Evidentemente, la velocidad crítica en la cuál cambia el comportamiento del material dependerá del material granular y del cilindro.

Los flujos granulares sobre superficies son muy importantes en la industria y en los sistemas naturales, pero el entendimiento de dichos flujos es incompleto hasta el momento. Para un mayor entendimiento del flujo en la tubería circular, se analizará la fricción del material granular contra una pared. Resultados experimentales muestran que la razón de corte en el plano de deslizamiento es casi independiente del gasto másico, y que el ángulo de fricción estática en la interfase con el plano de deslizamiento aumenta con el gasto másico. (Khakhar DV, 2001)

Pouliquen O. (2002) estudió la fricción para flujos granulares densos en un plano inclinado. Obtuvo una expresión para la fuerza de fricción a partir de mediciones de flujos en estado estable, y concluyó que la rugosidad de la pared es un parámetro muy importante para el desarrollo del flujo.

En algunos casos, sobre todo en flujos estáticos, el comportamiento de un material granular depende en gran medida de las condiciones iniciales: tiene mucha memoria. Para los experimentos realizados en este trabajo, esta condición se cumple. Es por ello que, para obtener resultados válidos, se tiene que tener mucho cuidado para tener las mismas condiciones iniciales. En estado de equilibrio, para materiales granulares sin cohesión, hay ausencia de disipación plástica por el reacomodo de los materiales. Entonces, la plasticidad y la histéresis se presentan cuando no hay equilibrio (Duran J, 1998).

Si las partículas no presentan fuerzas cohesivas entonces las fuerzas entre las partículas serán de contacto (de tipo repulsivo), de tal manera que la forma del material está determinada por las condiciones de frontera y por la gravedad. (Chehata, 2002).

1.2.2 Estudio de los materiales granulares

Para el estudio de los materiales granulares se debe recurrir a dos grandes campos de la Mecánica:

- Mecánica de Sólidos.
- Mecánica de Fluidos.

A partir de las ecuaciones fundamentales de estas dos ramas, se deducen las ecuaciones constitutivas para un material granular.

Por fortuna, la mayoría de los problemas que en la práctica se resuelven son esencialmente bidimensionales y, por ello, se pueden atacar con un método mucho más simple: los círculos de Mohr, que en la mayoría de los estudios de materiales granulares traen muy buenos resultados.

1.2.3 Análisis bidimensional de esfuerzos: Círculos de Mohr

- Gran parte de los problemas en la industria tienen la suficiente simetría para que el análisis bidimensional resulte aplicable.

- Los círculos de Mohr representan un método muy sencillo y bueno para el análisis bidimensional.
- Los materiales granulares en general sólo soportan esfuerzos de compresión, por lo que conviene considerar a la compresión como esfuerzos positivos.
- Los esfuerzos cortantes se consideran positivos cuando su dirección es al contrario de las manecillas del reloj.
-

A los círculos de Mohr los definen las siguiente ecuaciones.

$$\sigma = p + R \cos(2\theta + 2\lambda),$$

$$\tau = R \sin(2\theta + 2\lambda),$$

donde los símbolos p , R^2 y $\tan 2\lambda$ se definen como,

$$p = \frac{1}{2}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}),$$

$$R^2 = \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2$$

$$\tan 2\lambda = \frac{2\tau_{xy}}{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})}$$

Representan un círculo en los ejes (σ, τ) , es decir, ejes del esfuerzo normal y del cortante. Los círculos de Mohr tienen el centro en $(p, 0)$ y un radio R , como se muestra en la Fig. 1-1.

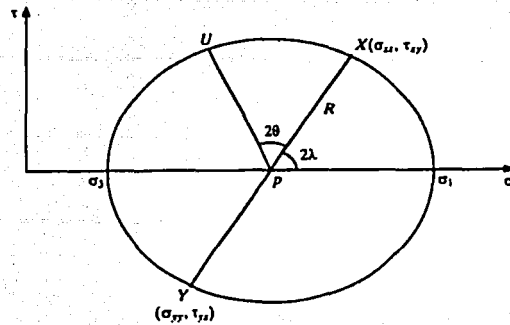


Fig. 1-1: Círculo de Mohr.

Cada punto en la circunferencia representa una combinación de σ y τ en algún plano, y en particular, los esfuerzos en los planos x e y , (σ_{xx}, τ_{xy}) y (σ_{yy}, τ_{yx}) se muestran con los puntos X y Y , respectivamente.

Los círculos de Mohr permiten hacer una aproximación si se emplea un método gráfico pero, si se emplea un método analítico con las ecuaciones que definen al círculo, se obtendrán resultados exactos.

1.2.4 El gradiente de esfuerzos y la ecuación de Euler

Si consideramos un elemento infinitesimal en dos dimensiones, como se muestra en la Fig. 1-2, se puede notar que los esfuerzos en lados opuestos del elemento serán diferentes si existe un gradiente de esfuerzos, el cual se denotará anteponiendo al esfuerzo la δ (por ejemplo: para el esfuerzo σ_{xx} , el gradiente será $\delta\sigma_{xx}$).

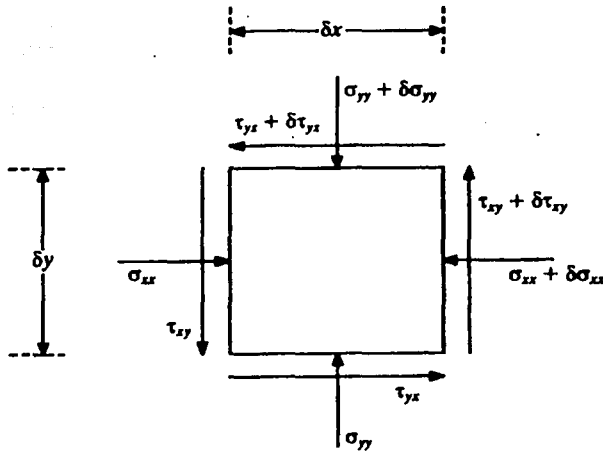


Fig. 1-2: Elemento infinitesimal.

Siendo los lados del elemento infinitesimal δx y δy , y para dar volumen considerando una distancia unitaria en dirección normal al papel, podemos evaluar la fuerza por unidad de volumen en la dirección x , P_x , como:

$$P_x \delta x \delta y = \sigma_{xx} \delta y + \tau_{yx} \delta x - (\sigma_{xx} + \delta \sigma_{xx}) \delta y - (\tau_{yx} + \delta \tau_{yx}) \delta x,$$

O bien,

$$P_x = -\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y},$$

Análogamente, en la dirección y :

$$P_y = -\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x},$$

La diferencia de signos entre las dos ecuaciones anteriores se debe a la convención de signos que el uso de los círculos de Mohr impone.

Debido al sistema coordenado, donde x se mide horizontalmente mientras y se mide verticalmente, se tiene que $P_x = 0$ y $P_y = -\rho_s g$, donde ρ_s es la densidad de la fase sólida. Sustituyendo esto en las dos ecuaciones anteriores, y considerando que $\tau_{yx} = -\tau_{xy}$, se tiene que:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = \rho_b g,$$

Si el material está en movimiento, la fuerza por unidad de volumen resulta de los efectos del gradiente de esfuerzo y los efectos gravitacionales:

$$P_x = \rho_b \frac{Du}{Dt} = \rho_b \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right),$$

donde u y v son las velocidades en las direcciones x e y , respectivamente, y Du/Dt es la derivada total.

Así, llegamos finalmente a las ecuaciones:

$$\rho_b \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} = 0,$$

en la dirección x

y

$$\rho_b \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} - \rho_s g = 0,$$

en la dirección y .

Estas dos ecuaciones son de gran importancia porque son aplicables tanto al movimiento de fluidos como al de materiales granulares, y gozan de una gran generalidad. Es por ello que estas ecuaciones son fundamentales para una interpretación profunda de los resultados obtenidos, que queda como trabajo a futuro.

1.2.5 Propiedades del material granular

Por simplicidad, para esta investigación se utilizó un material granular idealizado, conformado por esferas de igual tamaño. Las esferas utilizadas fueron de vidrio, que es un material muy apropiado para estos experimentos.

El modelo más simple para un material granular es conocido como *Material Ideal de Coulomb*. Aunque es un modelo muy idealizado, que en ocasiones resulta sobre simplificado, el concepto de material ideal de Coulomb es la base de la mayoría de los análisis para materiales granulares, ya que tiene un rol para el estudio de los materiales granulares como lo tiene el modelo de Fluido Newtoniano para los flujos viscosos.

Para seleccionar el material, se consideraron las siguientes propiedades.

- Tamaño de sus partículas. Debe seleccionarse una dimensión característica: el diámetro.
- Geometría de las partículas: esférica
- Distribución de los tamaños de las mismas: uniforme.
- Cohesión: nula.
- La densidad de flujo bifásico, que varía significativamente al aplicarse una deformación

Ver apéndice 1 para una descripción completa del material granular empleado.

Una vez obtenidos una gran cantidad de datos experimentales, se procede al análisis estadístico, para poder llegar a conclusiones del comportamiento del flujo granular.

1.3 Justificación y alcances de la investigación.

Justificación

- En virtud de que el entendimiento de flujos granulares no está cabalmente establecido, hay aún amplio campo de investigación.
- En muchos campos de la ingeniería se trabaja con materiales granulares, pero el poco conocimiento sobre ellos lleva a emplear métodos empíricos para su transporte y almacenamiento, los cuales pueden resultar poco eficientes.

Alcances

- Comprender el comportamiento del coeficiente de fricción en flujos granulares estáticos.
- Medir de la fuerza de compactación en una columna granular en un sistema tipo cilindro-pistón.

2 Capítulo 2.- Diseño Experimental

2.1 Fuerza de compactación de un material granular

2.1.1 Fuerza de compactación

Para medir la transferencia de carga por fricción en medios granulares, un sistema útil es el cilindro – pistón. En éste se tiene bien confinado el material y se pueden realizar muchas mediciones consecutivas, el control es fácil y, sobretodo, la medición de la fuerza para desplazar el pistón esta directamente relacionada con la fuerza de fricción. En la Fig. 2-1 se muestra el fenómeno de estudio.

Descripción del problema:

Tenemos un material granular dentro del cilindro (1), el cual se desplazará mediante un pistón. Primero hacia arriba, lo que causará su compactación, y por ello generará una fuerza de fricción considerable con la pared del cilindro (2); y luego de regreso, sentido que no causará compactación y por ello la fuerza de fricción será casi despreciable (3). Estos ciclos formados por la compactación y el retorno se repetirán muchas veces, midiéndose la fuerza necesaria para el desplazamiento del material.

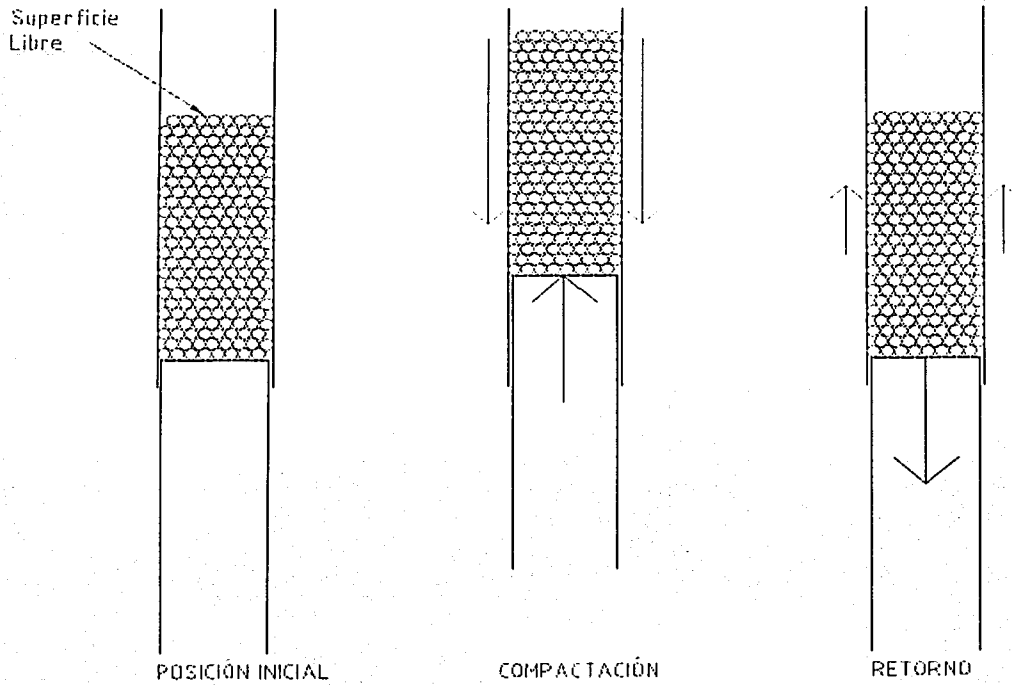


Fig. 2-1: El fenómeno de estudio.

El comportamiento del material puede separarse en varias etapas:

- 1.- Compactación.
- 2.- Relajación.
- 3.- Retorno.
- 4.- Relajación.

En la Fig. 2-2 se muestra las 4 etapas en el comportamiento del material a lo largo de un ciclo de ida y vuelta del pistón.

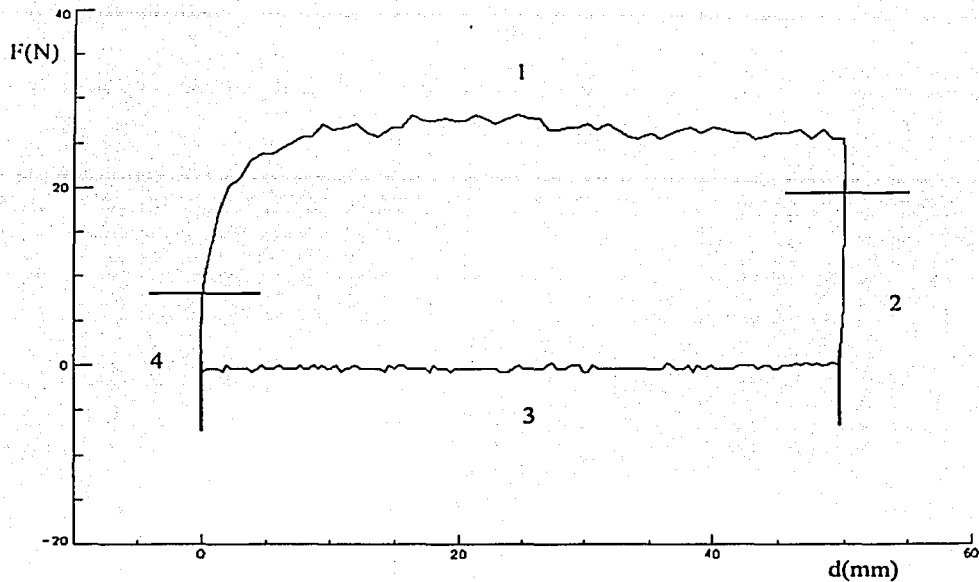


Fig. 2-2: Curva fuerza - desplazamiento.

Compactación (1): Es la fase donde más esfuerzos se generan. Al empujar el material y desplazarlo, éste se compacta axialmente y, debido a que existe una relación de Poisson efectiva, tiene una deformación en dirección radial. Esta genera que la fuerza necesaria para desplazarlo sea muy grande. Es importante aclarar que las partículas que forman el material granular son muy rígidas, más el comportamiento del material granular es muy diferente, y el factor de Poisson es mayor debido al acomodo de las partículas.

Relajación (2): Al dejar de desplazar el material granular, éste se reacomoda, buscando un estado de menor energía, y de esta forma la fuerza que genera contra la pared del cilindro disminuye gradualmente hasta alcanzar un estado de equilibrio, luego de unos segundos.

Retorno (3): Nuevamente hay un desplazamiento, pero éste es hacia abajo, de forma que el pistón no ejerce fuerza sobre el material más que la fuerza normal. El material granular casi no genera fuerza contra la pared del cilindro.

Relajación (4): Ocurre nuevamente, un reacomodo de partículas, pero como el material estaba sometido a esfuerzos muy bajos, esta relajación es más breve y menos notoria que la primera.

Donde se centrará el análisis es en las primeras dos etapas (Fig. 2-3), que son las que nos muestran el transporte de un material granular en una tubería. Las últimas dos etapas son básicamente el regreso al estado inicial. Es importante comentar que, aún después de la relajación se observan ciertos esfuerzos residuales en el material, es decir, que éste tiene memoria.

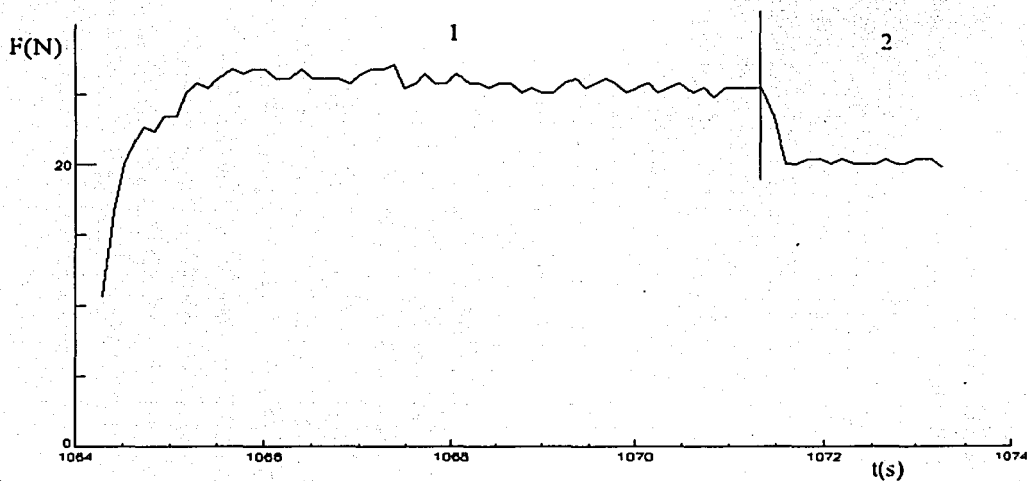


Fig. 2-3: Compactación (1) y relajación (2)

2.1.2 Descripción general

Para medir la carga por fricción, en este experimento se hace desplazar un pistón que empuja una cama de granos confinados en un tubo. Se utiliza una prensa hidráulica con capacidad de hasta 15 kN de fuerza axial, controlada por el controlador MTS 407. El

fluido de trabajo es aceite, suministrado por una bomba y servoválvulas MTS. En la Fig. 2-4 se muestra el sistema MTS.

Al desplazar la cama de granos, una celda de carga colocada en el mismo eje que el pistón y el tubo mide directamente la fuerza necesaria para desplazarla. Hay también un transductor LVDT, que registra el desplazamiento. Estas celdas de carga funcionan generando un voltaje según la deformación que tiene producto de la fuerza, y con una PC se captura la información en tiempo mediante el instrumento virtual Pistón_Xp, en el paquete Labview.

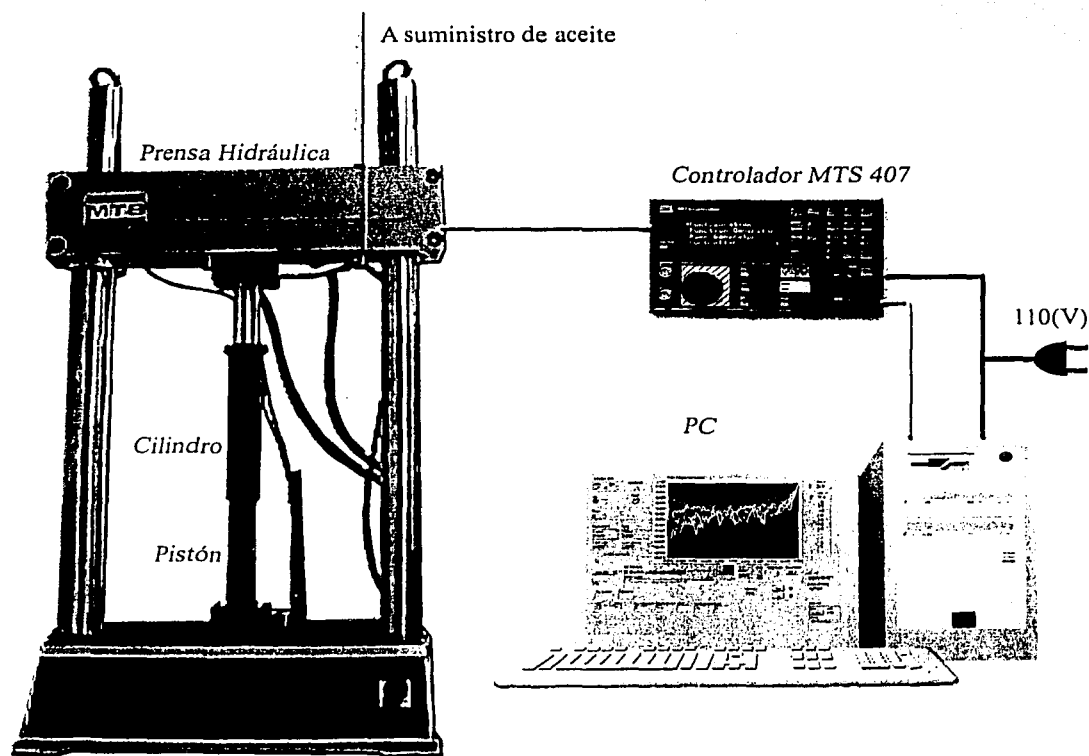


Fig. 2-4: El sistema MTS.

Los componentes principales del sistema de medición de fuerza:

- 1.- Cilindro y Pistón
- 2.- Prensa Hidráulica MTS
- 3.- Controlador MTS 407
- 4.- Bomba de aceite y tuberías
- 4.- Una computadora personal
- 5.- Software de captura y control

El sistema consta de dos subsistemas principales:

- Control
- Adquisición de datos.

2.1.2.1 Control

A la prensa hidráulica la controla el controlador MTS 407, que es la interfase entre la prensa y la computadora. El controlador 407 puede operar en dos modos, el Local y el Remoto. Se conecta a la prensa hidráulica mediante 10 cables distintos tipo ASSY. A su vez, se conecta a la computadora a través del puerto serial.

Entre el 407 y la prensa, el sistema de control es de lazo cerrado: el controlador manda los parámetros del movimiento a la prensa, y a la vez necesita recibir información de posición y fuerza que le manda la prensa. Así, las órdenes que el controlador manda a la prensa son dependientes de los parámetros que ella envía al controlador.

No obstante, el sistema de control en general es de malla abierta, ya que se programa una rutina con parámetros fijos, que se ejecutarán hasta terminar, independientemente de las lecturas de desplazamiento y fuerza.

2.1.2.2 Instrumentación

Dos sensores de fuerza y desplazamiento, mandan señales al controlador 407:

- Un LVDT, que mide el desplazamiento (AC).
- Una galga extensométrica, que mide la fuerza (DC).

Ambos sensores mandan las señales como voltajes, que el controlador amplifica según la calibración de los transductores. También se asignan unidades, que no influyen en la operación, son sólo para la interpretación de los datos por el usuario.

Estas lecturas van a la computadora de la misma forma, como voltajes, aunque ambos son DC. Ello se realiza a través del puerto serial. La PC los procesa mediante el instrumento virtual Pistón_XP, programado con Labview, que le asigna unidades, grafica fuerza vs. desplazamiento, y almacena los datos en forma de columnas en archivos de texto.

El sistema está automatizado, lo que permite programar toda una serie de corridas que se ejecutarán una por una.

2.1.3 Descripción de las partes que integran el sistema

2.1.3.1 Cilindro y Pistón

El cilindro y el pistón tienen una posición vertical, donde el pistón está abajo y permanece fijo, mientras que el cilindro está arriba y es la parte móvil. Así, se analiza el caso específico del transporte en dirección contraria a la gravedad, ello cuando el cilindro baja. Cuando el cilindro sube, se regresa a la posición inicial, y el material granular permanece en contacto con el pistón debido a la fuerza de gravedad.

Un material granular sin cohesión no soporta esfuerzos de tensión. Por ello se centra la atención en la compactación, cuando el pistón empuja al material.

Un cilindro casi perfecto es difícil de fabricar. Para evitar que el pistón roce al cilindro, y ello genere ruido en las pruebas, es necesario utilizar el diámetro mínimo posible del pistón, determinado por el material granular: el diámetro del pistón mínimo es el del diámetro del cilindro menos el de una partícula. Así, el material granular no puede pasar a través de ese espacio.

Realizar pruebas con cilindros de mayor diámetro sería preferible y por otra parte para obtener una buena caracterización del fenómeno se busca que la relación L/D sea grande. Pero dadas las limitaciones de la prensa hidráulica MTS (Altura máxima del pistón = 37 cm.), se fabricaron cilindros con diámetros $D = 25.4\text{mm}$ y $D = 50.8\text{mm}$, para los cuales $L/D = 11.81$ y $L/D = 5.905$.

2.1.3.2 Prensa Hidráulica MTS

Es una prensa cuyo fluido transmisor es aceite. Tiene una capacidad de 2.5 T, velocidad máxima de 25 cm/s y un desplazamiento máximo de 37 cm. En la Fig. 2-5 se muestra esta prensa.

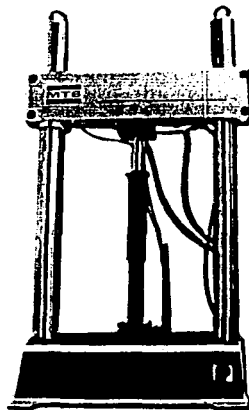


Fig. 2-5: Prensa Hidráulica

2.1.3.3 Controlador MTS 407

Puede operar en modos Local, Remoto y Pod. Local es cuando se controla todo en el panel del controlador, y remoto cuando se hace desde la computadora. Tiene 172 comandos, para controlar el movimiento, las válvulas, encendido, apagado, run, stop y las distintas configuraciones. Fig. 2-6.

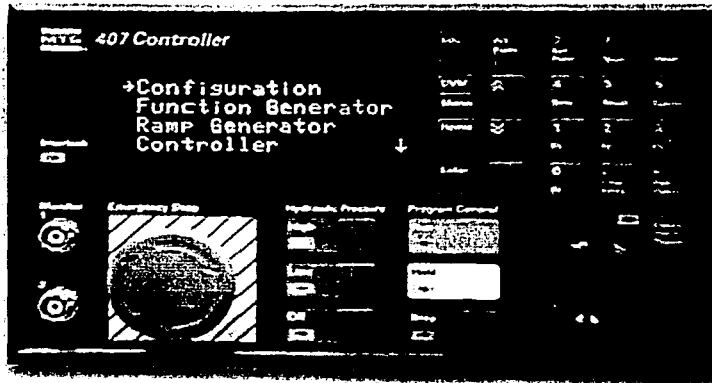


Fig. 2-6: Controlador MTS 407.

Ver apéndice 2 para la lista de comandos.

2.1.3.4 Software de captura y control

Para el control y la adquisición de datos, se creó el instrumento virtual Pistón_XP, mediante el software de instrumentación Labview. En la Fig. 2-7 se puede observar el diagrama de conexiones.

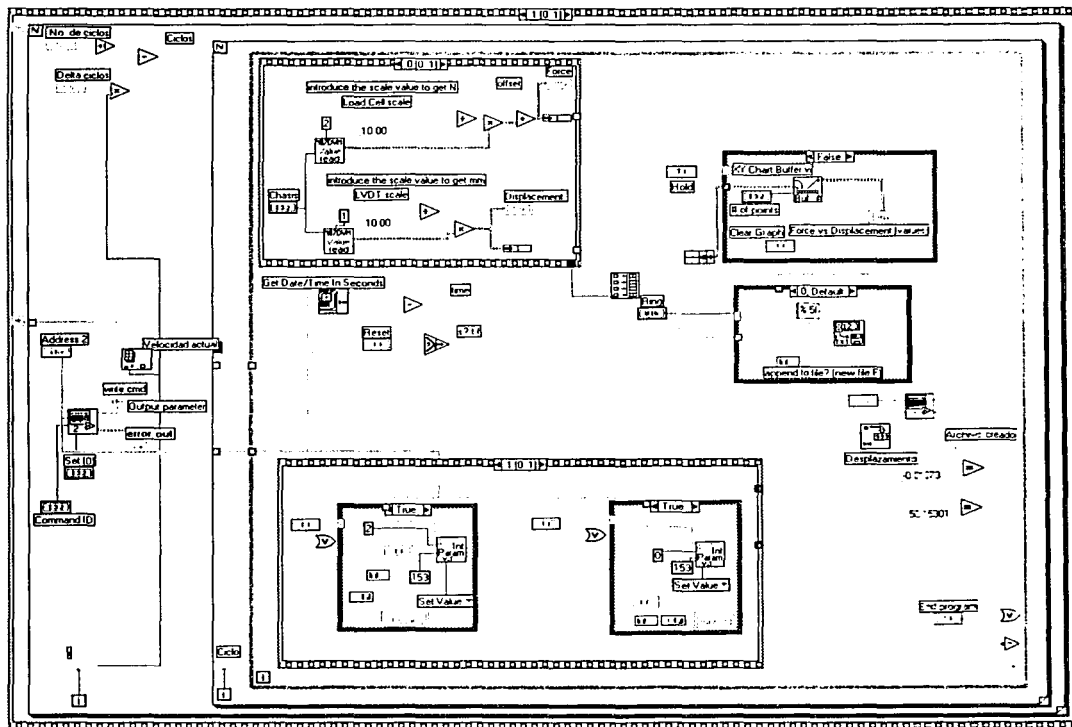


Fig. 2-7: Programa en LabView.

2.1.4 Pruebas

Gracias a la automatización del sistema, se realizaron numerosas pruebas variando los siguientes parámetros:

Diámetro de las partículas d : 3 y 6 mm.

Diámetro del cilindro D : 25.4 y 50.8mm.

Velocidad v : 10, 7, 5, 4, 3, 2, 1, 0.5mm/s

Altura de la cama de granos h : 100, 150, 200 mm.

En ambos casos, manteniendo una h constante y variando la velocidad v . Dependiendo de la velocidad, el número de ciclos: a 10 mm/s, 22 ciclos; decrementando el número de ciclos en 2 para cada velocidad, para al final tener 8 ciclos para $v=0.5\text{mm/s}$. 20. Ello se realizó para las tres diferentes alturas h , para las combinaciones de los diámetros: $D = 50.8\text{mm}$, con $d = 3$ y 6mm , y $D = 25.4\text{mm}$, con $d = 3$ y 6mm . En la Fig. 2-8 se observa el aspecto del panel de control durante una prueba.

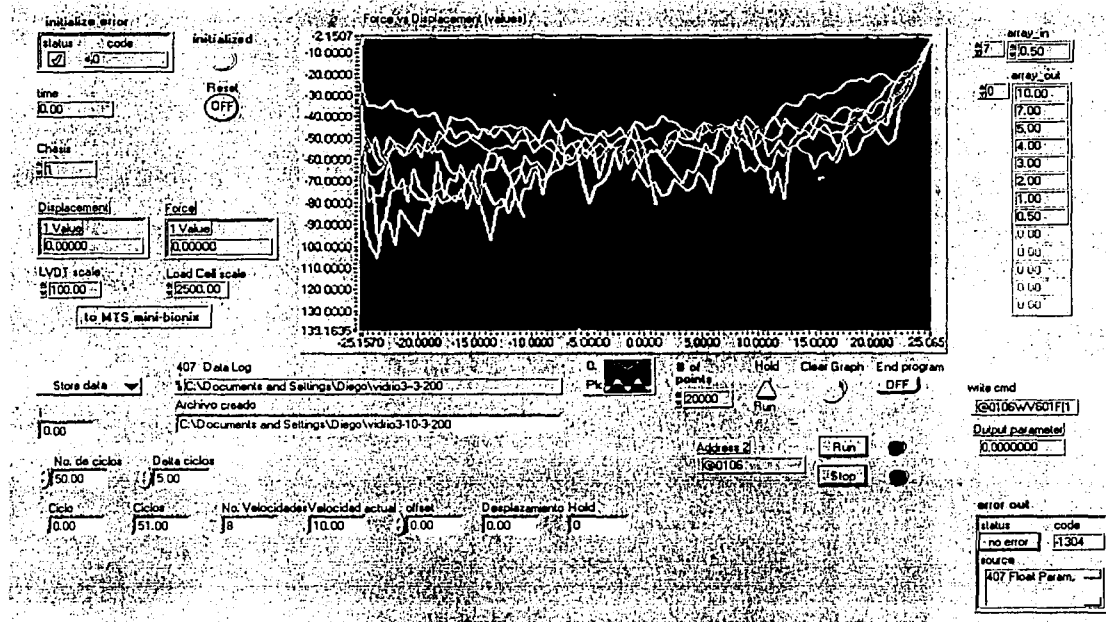


Fig. 2-8: Panel de control.

2.2 Medición del coeficiente de fricción

2.2.1 Coeficiente de fricción

Para comprender el flujo en el sistema pistón - cilindro es necesario conocer el coeficiente de fricción. Al desplazarse el material granular dentro del cilindro, hay dos fuerzas de fricción diferentes que influyen en el comportamiento del material. La fuerza de fricción interna, es decir, la que se presenta entre los granos F_i , y la que se presenta entre los granos y la pared del cilindro, F_p .

Debido a que se considera al material granular como un medio continuo, no es necesario estudiar la causalidad que hay entre las partículas (Nedderman, 1992), y por ello se centra la atención en la fricción que existe entre la pared y el material granular, μ_p . Estudiar la fricción interna, μ no es necesario para comprender que sucede al desplazar el material granular en el cilindro.

2.2.1.1 Considerando al coeficiente como constante

Una primera aproximación al coeficiente de fricción se puede realizar de una manera muy sencilla, considerando al material granular un material coulombico. La medición se realiza de manera indirecta, midiendo el ángulo de reposo del material, θ , y relacionando éste con las propiedades de fricción del material.

Considérese un plano de deslizamiento inclinado a un ángulo θ con respecto a la horizontal, como se muestra en la Fig. 2-11. Si el material es marginalmente inestable, se formará alguna superficie de deslizamiento como se muestra con la línea AB. Si asumimos que la superficie de deslizamiento es un plano y denotamos con α su inclinación con respecto a la horizontal, tenemos

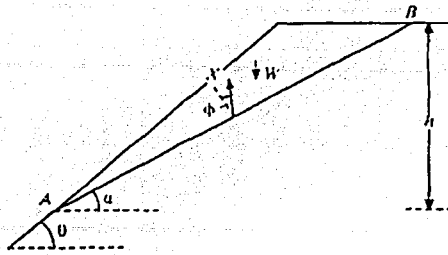


Fig. 2-9: Plano de falla.

Claramente $\alpha < \theta$.

De los círculos de Mohr y considerando nuestro material un material granular coulombico, tenemos que

$$\tau = \mu\sigma + c,$$

y como nuestro material es un material sin cohesión,

$$\tau = \mu\sigma,$$

Multiplicando por el área del plano de deslizamiento,

$$F = \mu N,$$

donde F es la fuerza de fricción y N la fuerza normal. Entonces, la fuerza total X sobre el plano tiene un ángulo de inclinación con respecto N dado por el ángulo ϕ , donde

$$\tan\phi = \mu = F/N,$$

se ve también que X está inclinado con respecto a la vertical con un ángulo $\alpha - \phi$.

El material arriba de AB está sujeto a dos fuerzas, X y a su propio peso. Cuando un cuerpo no acelerado está sujeto a sólo dos fuerzas, éstas son por ende colineales, y se tiene que X es entonces vertical y

$$\alpha = \phi$$

Entonces, el plano de deslizamiento se formará si:

$$\theta > \phi$$

Por lo que, el valor más grande para el ángulo θ de estabilidad será:

$$\theta = \phi$$

Ello quiere decir que, para un material coulombico sin cohesión, el ángulo de reposo es igual al ángulo de fricción interna, ϕ . De tal forma, se puede obtener un ángulo de fricción interna con sólo hacer una montaña del material granular y medir el ángulo que tiene con respecto a la horizontal. El ángulo de fricción contra la pared se puede obtener de manera análoga, inclinando la pared donde reposa el material, con respecto a la horizontal. Al aumentar la inclinación, se llegará a cierto ángulo en el que el material deslizará. Ese es el ángulo de fricción contra la pared,

$$\tan\phi_p = \mu_p = F/N,$$

Es importante aclarar que el análisis tridimensional, para un cono en lugar de para un triángulo, resulta mucho más complicado, pero al final se obtiene el mismo resultado, que por simetría es el mismo.

$$\theta = \phi.$$

Se realizó esta medición, y se tomaron las siguientes fotos, con las esferas de 6 mm (Fig. 2-10) y 3mm (Fig. 2-11) de diámetro d. De antemano se espera que tengan el mismo ángulo, independientemente de la altura de la montaña o del diámetro de las canicas.



Fig. 2-10: Ángulo de reposo, esferas de 6mm de diámetro.

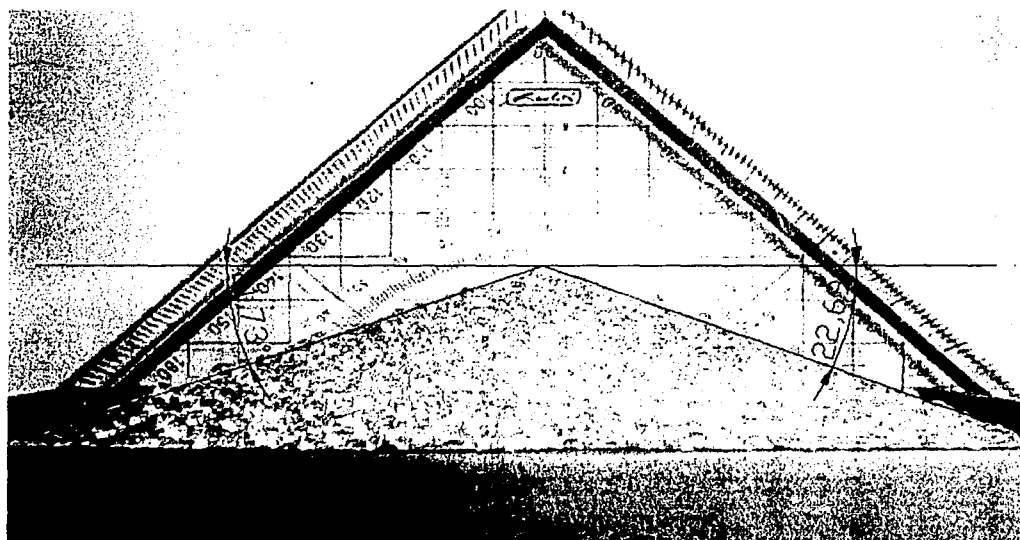


Fig. 2-11: Ángulo de reposo, esferas de 3mm de diámetro.

Midiendo el ángulo en las fotos, encontramos que $\theta_{\text{prom}} = \phi_{\text{prom}} = 22.25 \pm 0.25^\circ$.

Por último, $\mu_{\text{prom}} = \tan\phi_{\text{prom}} = \tan 22.25^\circ = 0.409$.

2.2.1.2 Considerando al coeficiente como una función

Para los materiales granulares, a diferencia de los sólidos, el coeficiente de fricción puede no ser constante. En la mecánica clásica, los materiales sólidos tienen 2 coeficientes: el coeficiente de fricción estática, μ y el coeficiente de fricción cinemática, μ_c . Si suponemos que ejercemos el objeto a una fuerza F que se incrementa, éste no se moverá hasta que $F > \mu N$. En ese momento, el objeto comenzará a moverse y el coeficiente de fricción será ahora μ_c , que es más pequeño, con lo que proseguirá el movimiento aún si se decrementara la fuerza un poco, siendo menor que μN . Ambos son proporcionales a la fuerza normal.

Los materiales granulares tienen un comportamiento distinto, ya que su naturaleza es no lineal. Con el experimento descrito en esta sección se busca investigar la naturaleza del coeficiente de fricción para un material granular.

2.2.2 Descripción General

El experimento tiene las siguientes características:

- Para desplazamientos similares que los del experimento con el pistón, es decir, de 50mm.
- Tanto el control como la medición realizadas por computadora.
- Versatilidad: se pueden medir coeficientes de fricción de las esferas contra diferentes superficies.

El material granular está confinado en una caja sin tapa, la cual se coloca hacia abajo, donde se halla una superficie plana del material cuya fricción contra el material granular se desea medir. La función de la caja es soportar el material, de forma que el contacto que existe es únicamente entre la superficie plana y el material granular. Ver Fig. 2-12.

Al mover la superficie plana (pared), se induce una fuerza sobre la caja superior que es la fuerza de fricción F . Un sensor de fuerza mide esta fuerza con la que intenta moverse la caja de arriba, la cual permanece fija. De esta forma, el sensor mide la fuerza de fricción, y se tiene:

$$\mu_p = F/N,$$

En donde N es igual a la fuerza normal, que en este caso es igual al peso (conocido). F es la fuerza de fricción, que mide el sensor de fuerza, y de esta forma se conoce el coeficiente de fricción, μ_p .

F puede variar con la velocidad del desplazamiento, las características y peso del material granular y el área del plano de deslizamiento. Si se tiene una cantidad constante de material, el peso será constante, y por lo tanto $N = \text{cte}$. Además, para el material granular esférico, sin cohesión, el parámetro más importante es el diámetro de partícula. Y por último, como el material estará confinado en una caja de sección constante, el plano de deslizamiento será siempre de la misma área. Por tanto, se tiene:

$$F = f(D, v),$$

$$\mu_p = f(D, v)/N.$$

En donde F expresa una relación funcional

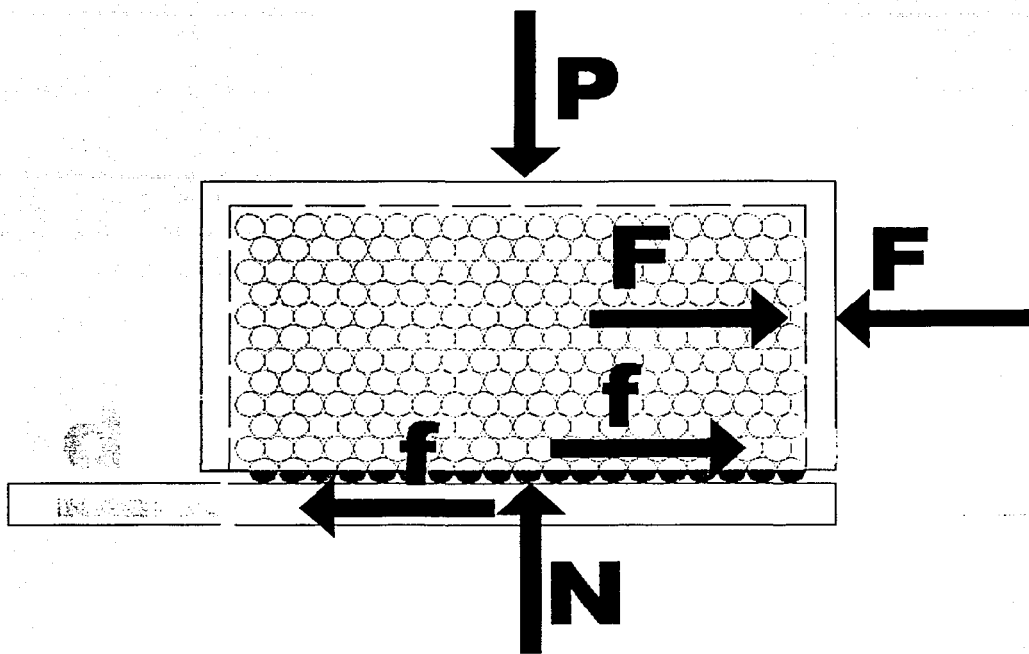


Fig. 2-12: Medición de la fuerza de fricción.

Para no generar momentos, F y f deben ser colineales. Por ello el sensor de fuerza debe hacer contacto con la caja lo más abajo posible. En las pruebas realizadas, estas fuerzas no son colineales, aunque la distancia entre ellas es muy pequeña y por ello el momento creado es muy pequeño y puede despreciarse.

En la Fig. 2-13 se muestran todas las partes que integran el sistema de medición de fricción, así las conexiones entre ellas.

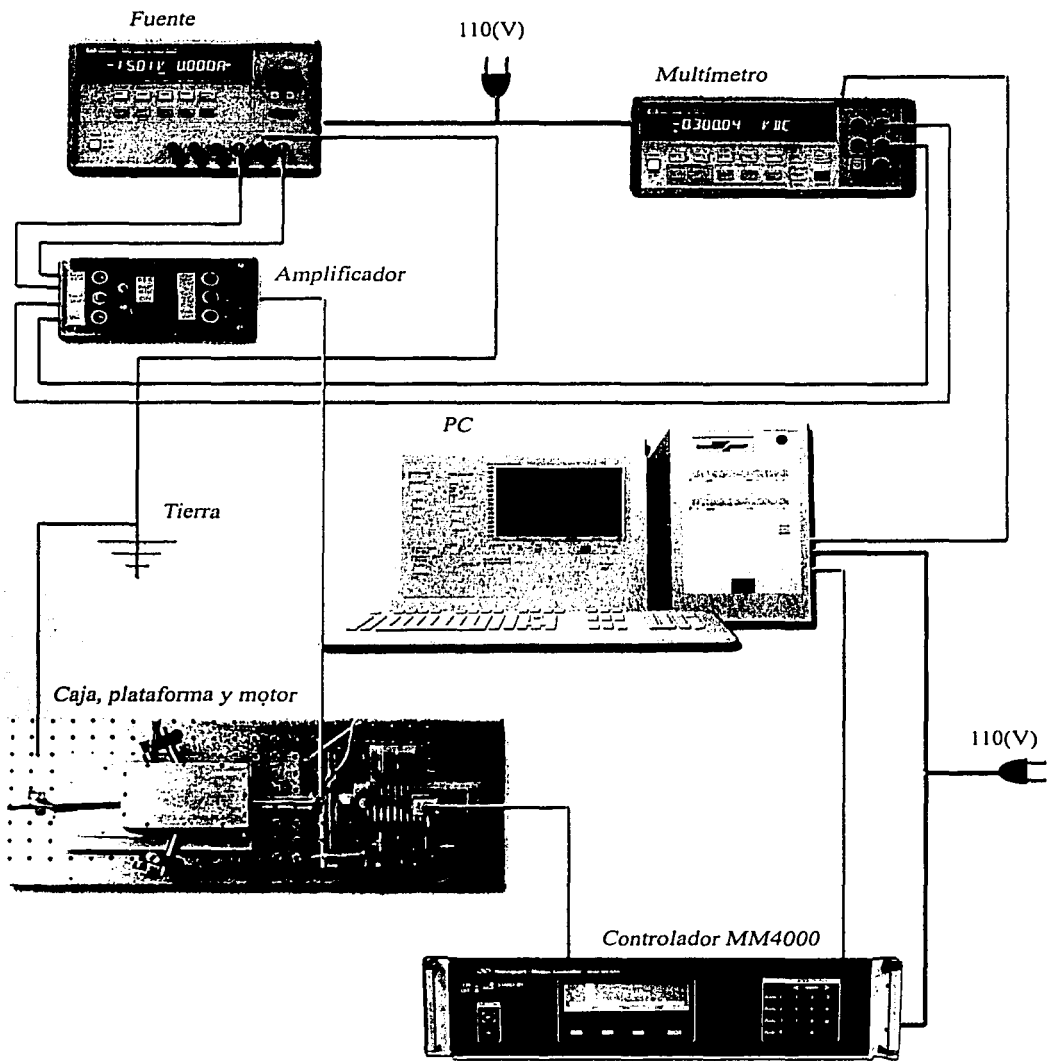


Fig. 2-13: Diagrama del sistema de medición de fricción.

2.2.2.1 Adquisición de datos

El sensor de fuerza es un transductor que, según la deformación que la fuerza le produce, genera un pequeño voltaje. Un multímetro (ver apéndice) mide este voltaje, y éste a su vez está conectado a una computadora, donde se capturan los datos del voltaje contra el tiempo, convirtiéndolos en fuerza vs. desplazamiento. Para hacer esta conversión, el sensor de fuerza debe estar calibrado, de manera que se conoce a cuantas unidades de fuerza corresponde cada unidad de voltaje. El desplazamiento se calcula con la velocidad del motor y el tiempo transcurrido. Finalmente, los datos se almacenan como archivo de texto, en dos columnas: fuerza y desplazamiento.

2.2.2.2 Control

Desde la computadora se mandan los parámetros de velocidad del motor y tiempo requeridos al controlador MM4000 (ver apéndice 4), el cual mediante un cable DB25 controla al motor.

2.2.2.3 Automatización

Como en el experimento del pistón – cilindro, la adquisición de datos y el control se realizan desde un programa realizado en el lenguaje visual LabView: Fricción_XP. De esta forma, es posible una vez montado el experimento controlar todo desde un mismo programa de PC. Así, se pueden dejar programados una serie de experimentos, variando la velocidad del motor y la duración de cada ciclo.

2.2.3 Partes que integran el sistema

2.2.3.1 Celda de carga

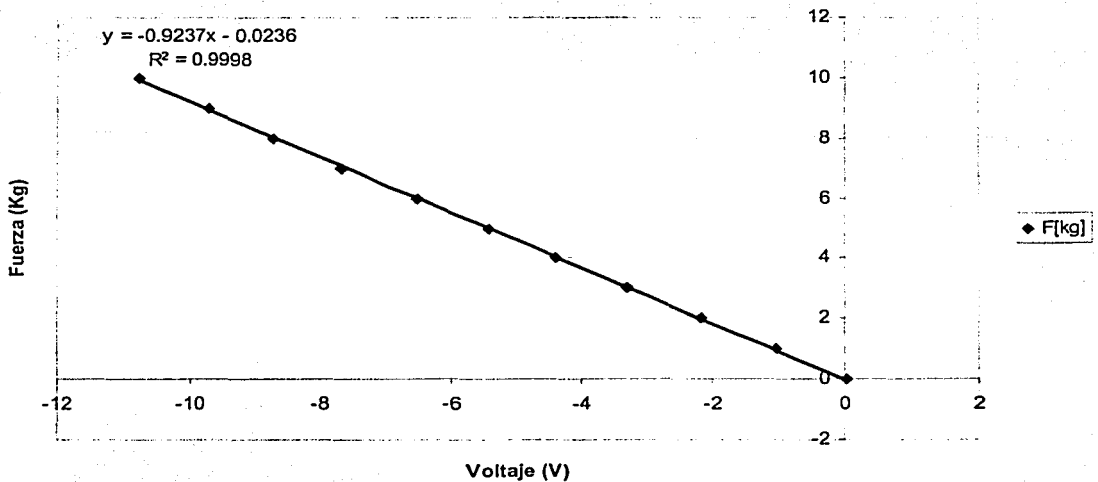
Se utilizó una celda de carga para un intervalo de fuerzas de -25 (lb) a + 25 (lb). Esto quiere decir, para fuerzas de hasta 25 libras tanto extensión como en compresión. Como en esta prueba solo hay fuerzas de compresión, se tiene que el intervalo en que puede operarse la celda sin dañarse es de 0 a -25 (lb).

Para poder interpretar los voltajes que esta manda, y conocer la fuerza que los produce, se requiere calibrarla. Para ello se le sometió a tensiones de 1 a 10 kg, obteniéndose estos voltajes:

E[V]	F[kg]
0.007	0
-1.062	1
-2.172	2
-3.309	3
-4.419	4
-5.441	5
-6.529	6
-7.69	7
-8.71	8
-9.71	9
-10.791	10

Tabla 1: calibración de la celda.

Calibración de la celda



Ajustando los datos con mínimos cuadrados, se obtiene la ecuación:

$$F(\text{Kg}) = -0.9237 E(\text{V}) - 0.0236(\text{Kg})$$

O bien,

$$F(\text{N}) = -0.090615 E(\text{V}) - 0.2315(\text{N})$$

Con una correlación de -0.9999099.

2.2.3.2 Motor

El motor que mueve la platina es un motor de pasos Newport modelo UE73PP de 3.7 V y 2.8A.(Fig. 2-14). Se puede controlar a pasos completos o a décimas de paso. Al ser un motor de la misma marca que el controlador, la configuración resulta sencilla ya que este tiene en la ROM la información de los parámetros del motor. Para las necesidades de mis pruebas, tuve que cambiar los límites máximo (Max. Position) y mínimo de

movimiento (Min. Position), de manera que los valores de los parámetros del motor son los que aparecen en la Tabla 2. Nota: 1 rev. = 200 pasos = 2000 micropasos = 2000 inc.

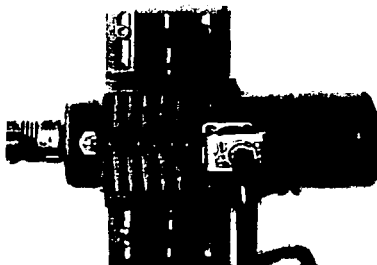


Fig. 2-14: Motor de pasos.

<i>Units</i>	Inc	<i>Acceleration</i>	80 000 [Incs*s]
<i>Motion Type</i>	Real	<i>Min. Position</i>	- 110 236.22 [Inc]
<i>Home Type</i>	Simulated	<i>Max. Position</i>	0 [Inc]
<i>Motor Type</i>	Stepper	<i>Home Preset</i>	0
<i>Control Loop</i>	Closed	<i>Kp</i>	0.015
<i>Periodicity</i>	No	<i>Ki</i>	0
<i>Motor Increment</i>	0.001[mm]	<i>Kd</i>	0.0001
<i>Encoder Resolution</i>	0.001[mm]	<i>Ks</i>	1
<i>Scaling Speed</i>	24 000 [Incs/s]	<i>Maximum Error</i>	1 000 [Inc]
<i>Maximum Speed</i>	20 000 [Incs/s]	<i>Backlash</i>	0 [Inc]
<i>Manual Speed</i>	10 000[Incs/s]	<i>Display Resolution</i>	0
<i>Home Speed</i>	10 000[Incs/s]		

Tabla 2: Parámetros del motor.

Desplazamiento y velocidad:

Ya que la medición de los coeficientes de fricción es un complemento de los experimentos realizados en el cilindro – pistón, el rango de velocidades así como el desplazamiento son muy similares: desplazamiento de 50 mm y velocidades que varían entre 9 mm/s a 1 mm/s.

2.2.3.3 Controlador MM4000

El MM4000 es un avanzado controlador con capacidad para manejar 4 ejes de movimiento en forma simultánea. Puede controlar motores tanto de CD como de pasos. Tiene dos modos de operación, el local y el remoto. Con el local, se controlan los motores a través del teclado en el panel frontal del MM4000, y se pueden realizar todas las operaciones del controlador; con el remoto el control se hace desde una PC, y no se pueden realizar todas las operaciones, como las configuraciones generales y de los motores. Pero una vez hechas las configuraciones, los motores se pueden controlar con modo remoto. El controlador debe conectarse a la PC por medio de una interfase, que puede ser RS-232 o IEEE-488. Se optó por la IEE-488, que tiene un mejor desempeño y menos interferencia.

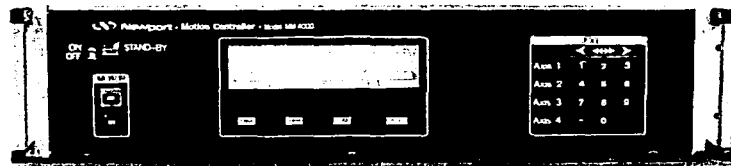


Fig. 2-15: Controlador MM4000

2.2.3.4 Multímetro

El sensor envía un voltaje, que se amplifica para ser leído por el multímetro. Se utilizó un multímetro HP3440 (Fig. 2-16), que de la misma manera que el MM4000 se puede controlar mediante modo local o remoto. Puede tomar desde 3 hasta 200 mediciones por segundo.

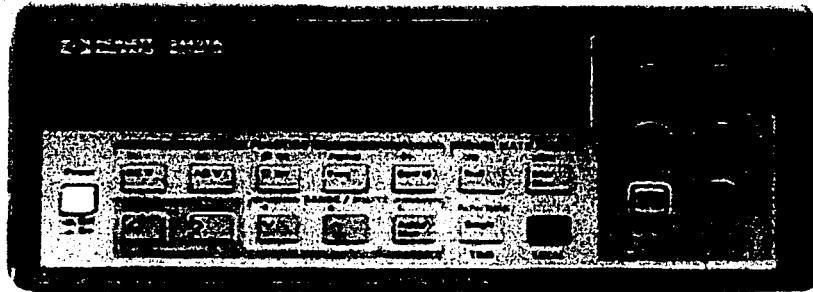


Fig. 2-16: Multímetro.

2.2.3.5 Amplificador

Recibe los voltajes de la celda de carga y lo amplifica gracias al voltaje suministrado por la fuente de poder. Se pueden regular el offset y el span. La celda se calibra junto con el amplificador.

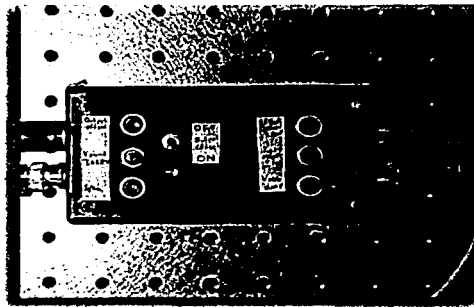


Fig. 2-17: amplificador.

2.2.4 Pruebas

Se realizaron también numerosas pruebas variando los siguientes parámetros:

- Fuerza Normal N : en múltiplos del 1 al 10 del peso de la caja + el material granular: 1380 gr.
- Velocidad v : 9, 7, 5, 4, 3, 2, 1, mm/s

Estos experimentos se realizaron únicamente con esferas de 6 mm de diámetro, manteniendo la velocidad constante y variando la fuerza normal.

3 Capítulo 3.- Resultados y análisis

El haber automatizado los experimentos permitió la realización de un gran número de pruebas. Asimismo, se eliminaron errores humanos que podrían haber ocurrido al operar el equipo.

3.1 Parte 1: Cilindro – pistón:

Debido al comportamiento complejo del material granular, se optó por hacer los ajustes con splines. Para obtenerlas se programó en el paquete Pv-wave. Cada línea mostrada a continuación es el promedio en puro para cada experimento.

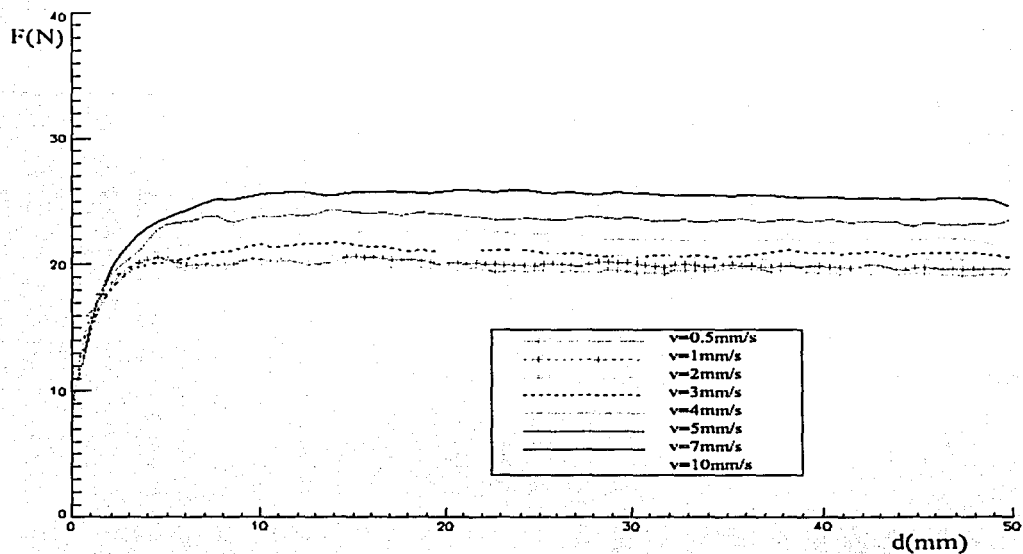
3.1.1 Pruebas realizadas

Para las combinaciones de diámetros del cilindro y de las esferas, es decir: $D = 50.8\text{mm}$, $d = 3\text{mm}$; $D = 50.8\text{mm}$, $d = 6\text{mm}$; $D = 25.4\text{mm}$, $d = 3\text{mm}$; $D = 25.4\text{mm}$, $d = 6\text{mm}$, se hicieron pruebas con tres diferentes alturas de la cama de granos: $H = 200$, 150 y 100mm . Para cada altura se realizaron pruebas variando la velocidad: 10 , 7 , 5 , 4 , 6 , 2 , 1 , 0.5 mm/s .

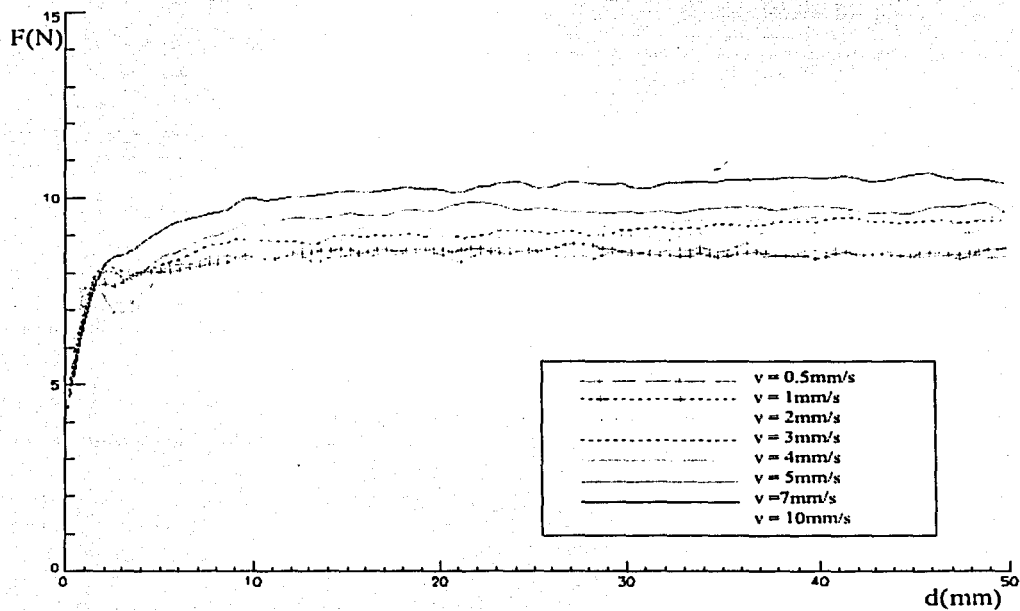
A continuación se presentan los resultados de todas estas pruebas.

Cilindro de 50.8mm de diámetro, esferas de 3mm de diámetro

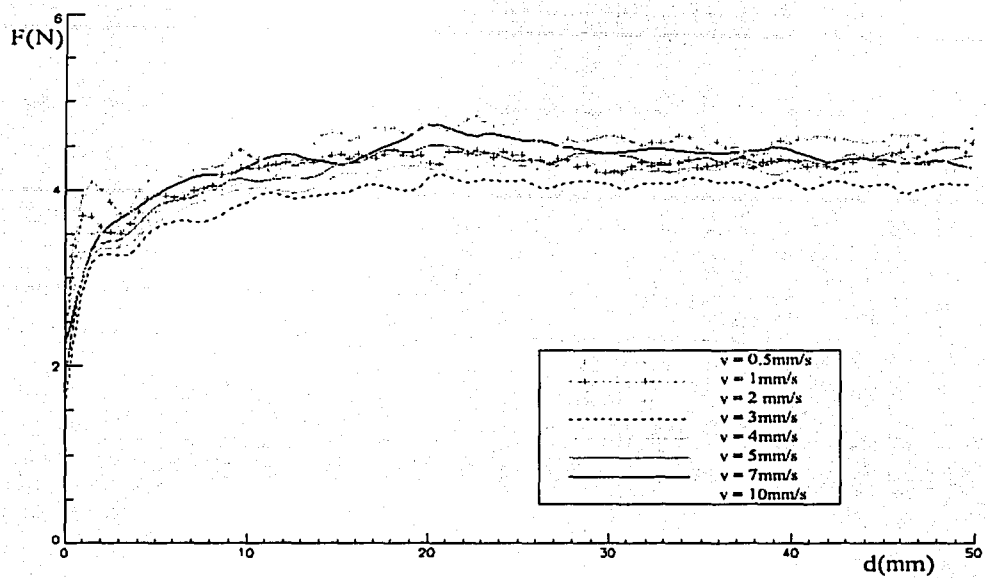
Fuerza vs. desplazamiento, $D = 50.8\text{mm}$, $d = 3\text{mm}$, $h = 200\text{mm}$



Fuerza vs. desplazamiento, $D = 50.8\text{mm}$, $d = 3\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$

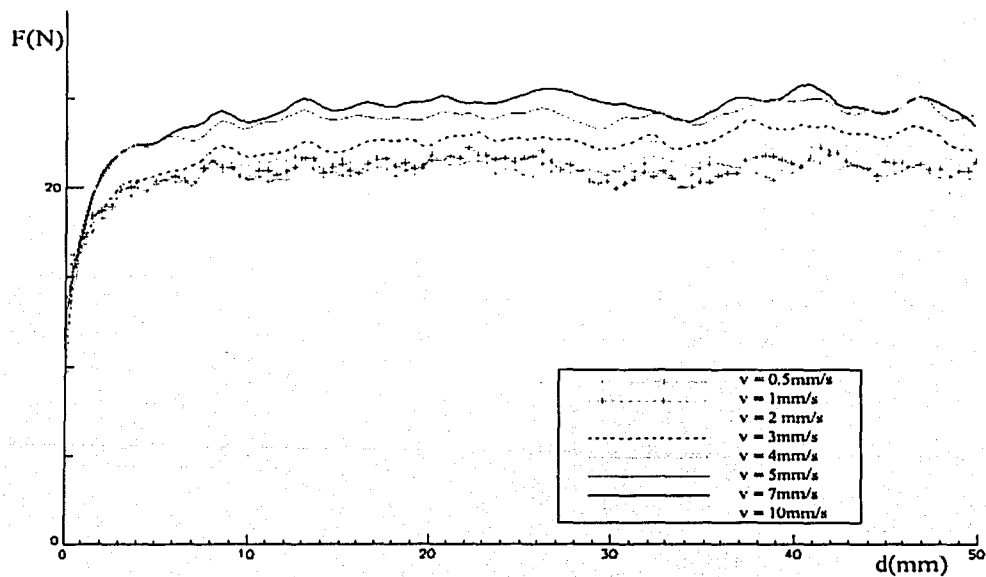


Fuerza vs. desplazamiento, D=50.8mm, d=3mm, h=100mm

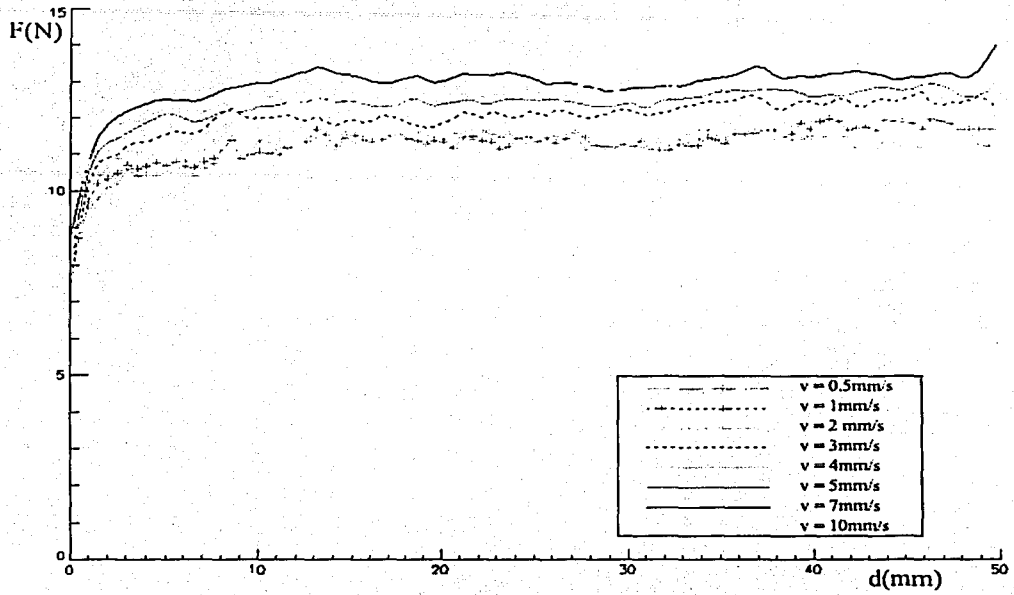


Cilindro de 50.8mm de diámetro, esferas de 6mm de diámetro

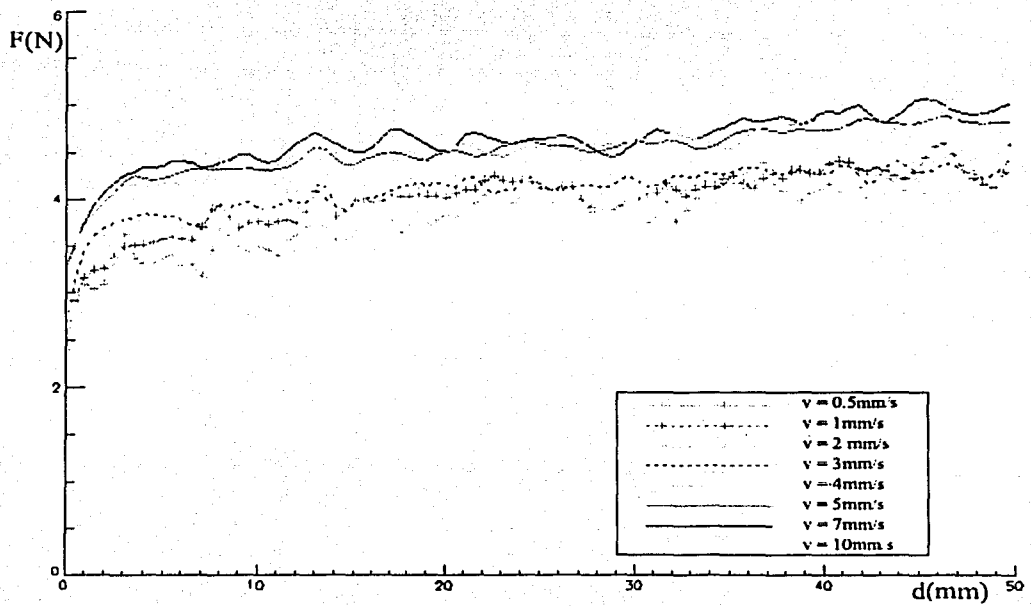
Fuerza vs. desplazamiento, D=50.8mm, d=6mm, h=200mm



Fuerza vs. desplazamiento, D=50.8mm, d=6mm, h=150mm

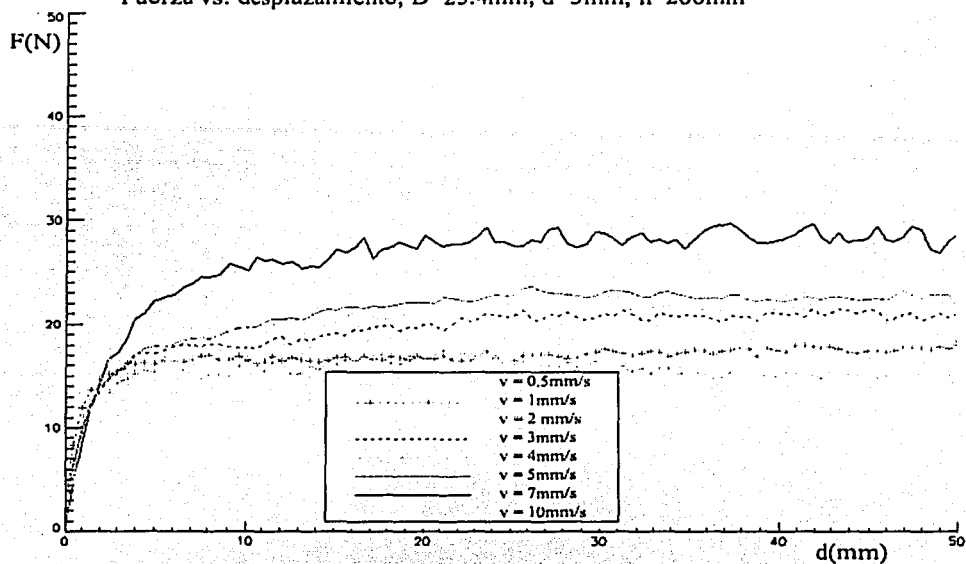


Fuerza vs. Desplazamiento, D=50.8mm, d=6mm, h=100mm

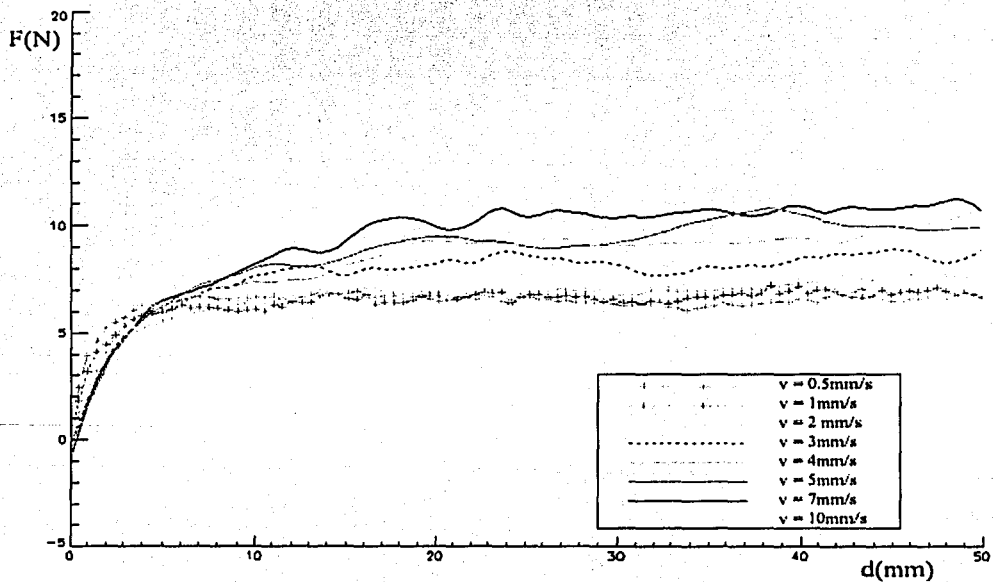


Cilindro de 25.4mm de diámetro, esferas de 3mm de diámetro.

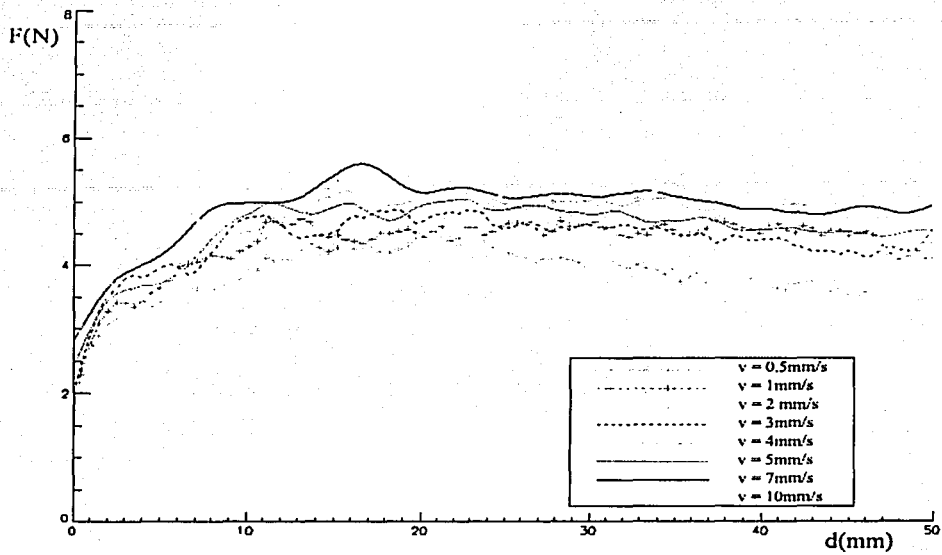
Fuerza vs. desplazamiento, D=25.4mm, d=3mm, h=200mm



Fuerza vs. desplazamiento, D=25.4mm, d=3mm, h=150mm

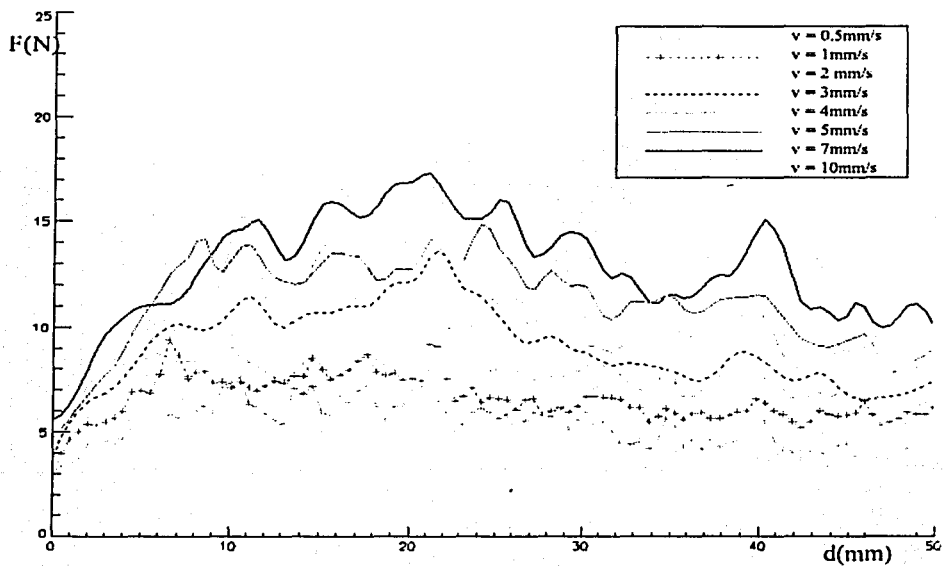


Fuerza vs. desplazamiento, D=25.4mm, d=3mm, h=100mm

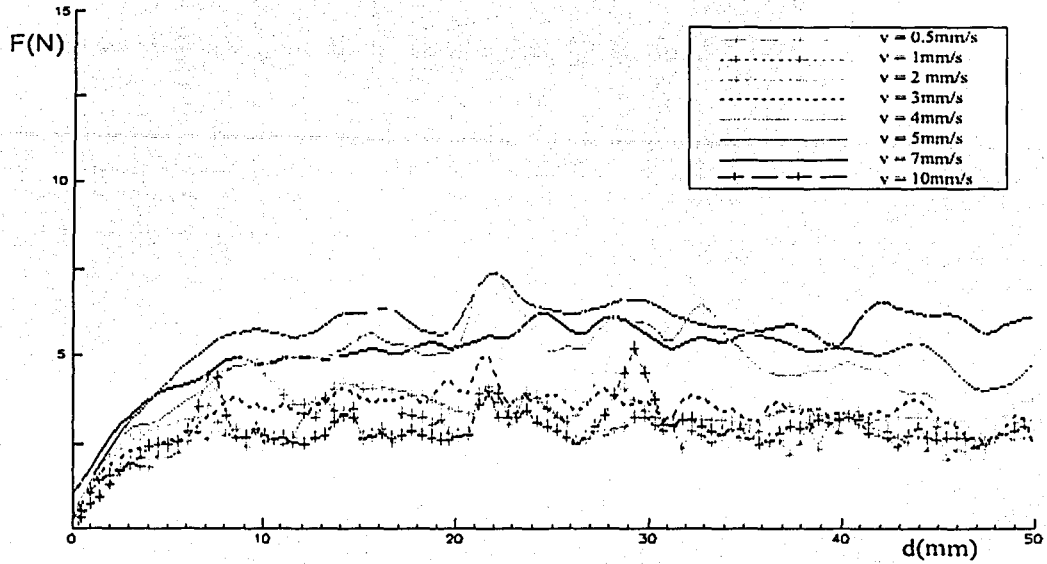


Cilindro de 25.4mm de diámetro, esferas de 6mm de diámetro

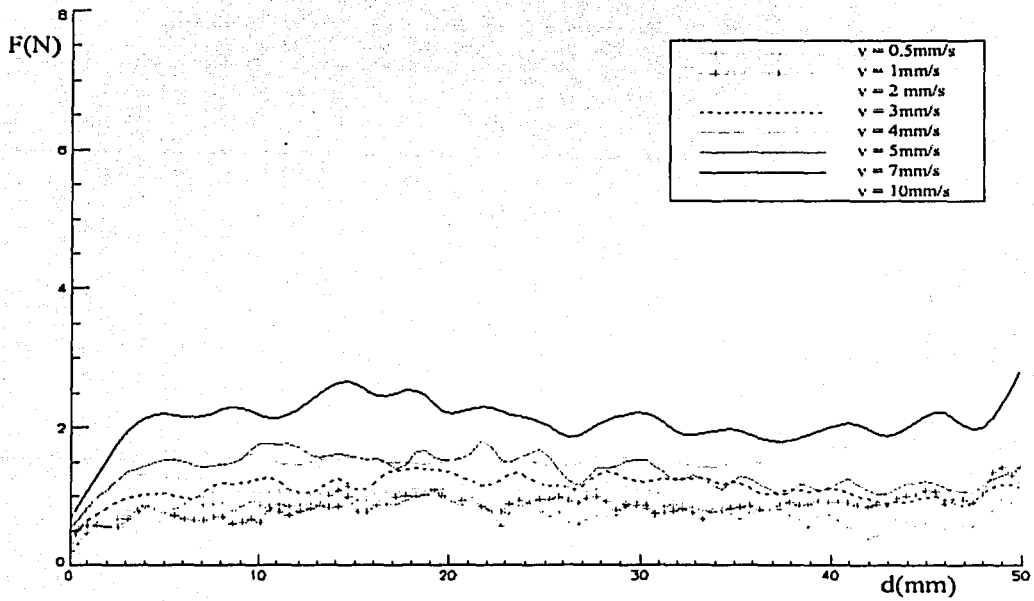
Fuerza vs. desplazamiento, D=25.4mm, d=6mm, h=200mm



Fuerza vs. desplazamiento, D=25.4mm, d=6mm, h=150mm



Fuerza vs. desplazamiento, D=25.4mm, d=6mm, h=100mm



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En las gráficas anteriores, se pueden identificar 3 zonas (Fig. 3-1) durante la compactación del material granular:

- Crecimiento lineal (1)
- Transición (2)
- Asintótico (3)

Este comportamiento más claro en las pruebas realizadas con el cilindro de 50.8mm de diámetro.

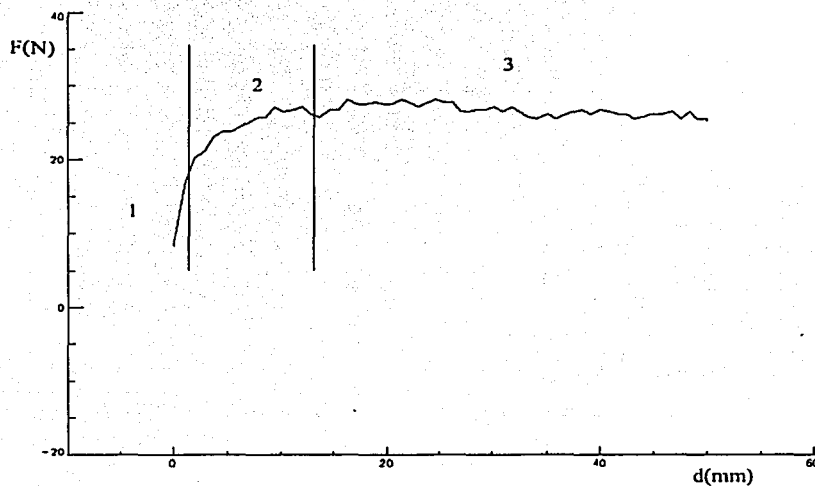
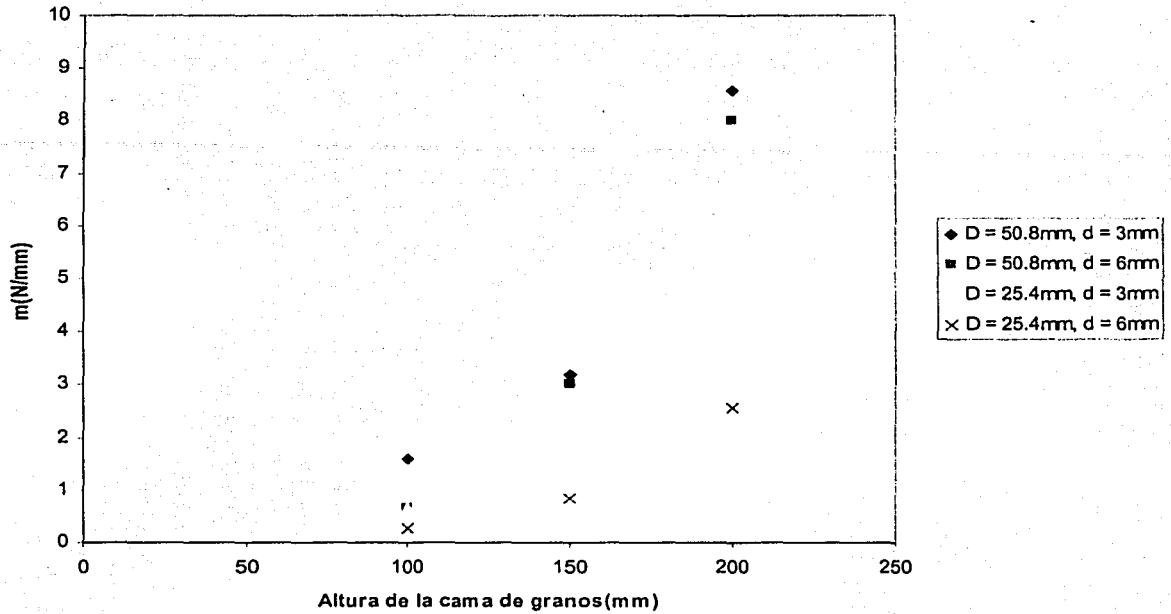


Fig. 3-1: Las tres etapas durante la compactación.

3.1.2 Zona lineal

En la gráfica siguiente se muestran los valores de las pendientes para las diferentes alturas de cama de granos, diámetros de esferas y cilindro. Los valores de la pendiente m son en (N/mm). Nótese que en este caso no hay dependencia de la velocidad.

Pendientes en la zona lineal

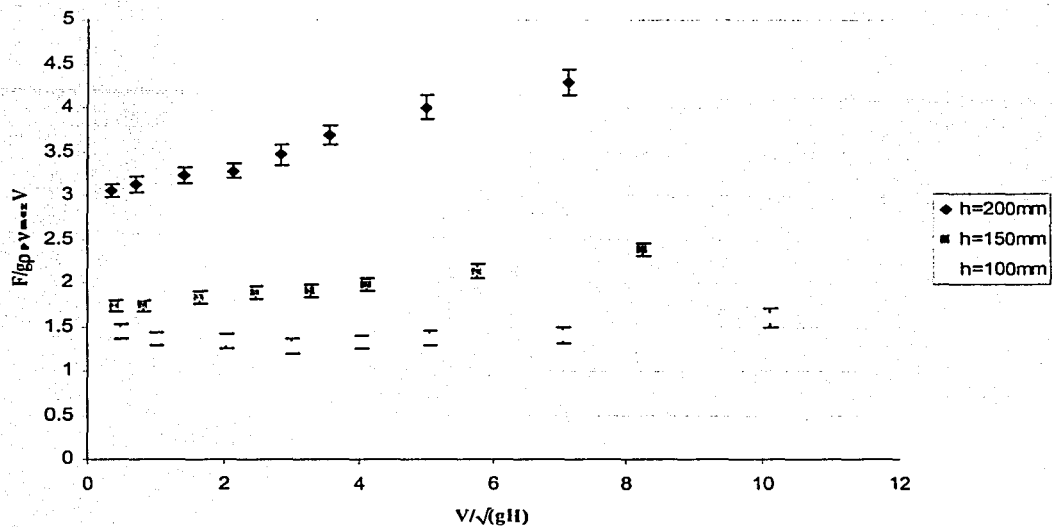


3.1.3 Equilibrio

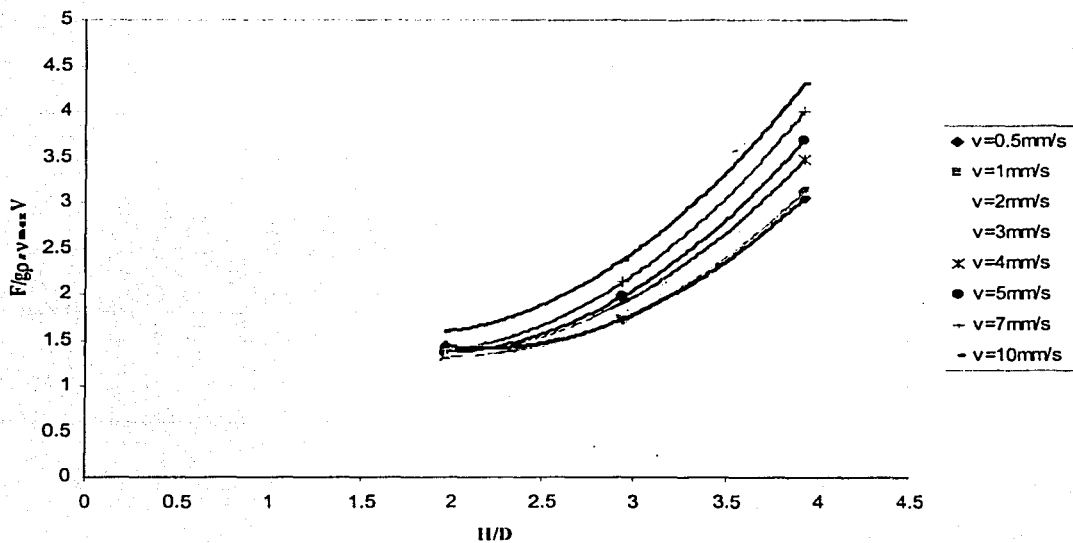
Después de la zona de transición, se llega a un estado de equilibrio y por ende un comportamiento asintótico. Entre mayor sea la relación de diámetros, D/d , este comportamiento es más claro. En las gráficas siguientes muestran las fuerzas promedio en el equilibrio, y como varían con respecto a la altura de la cama de granos y a la velocidad del pistón.

Cilindro de 50.8 mm de diámetro, esferas de 3mm de diámetro.

Fuerza adimensionalizada vs. Velocidad adimensionalizada, D=50.8mm, d=3mm

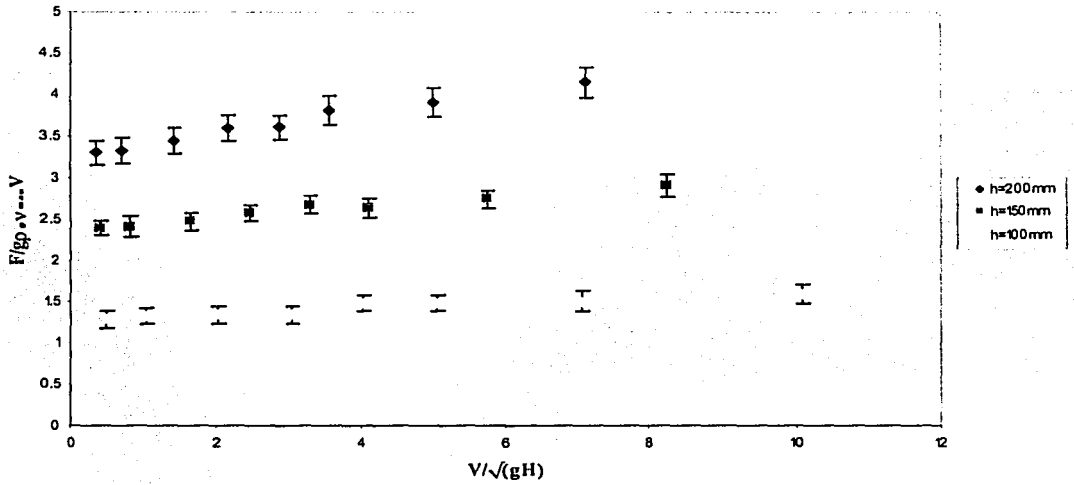


Fuerza adimensionalizada vs. Altura adimensionalizada, D=50.8mm, d=3mm

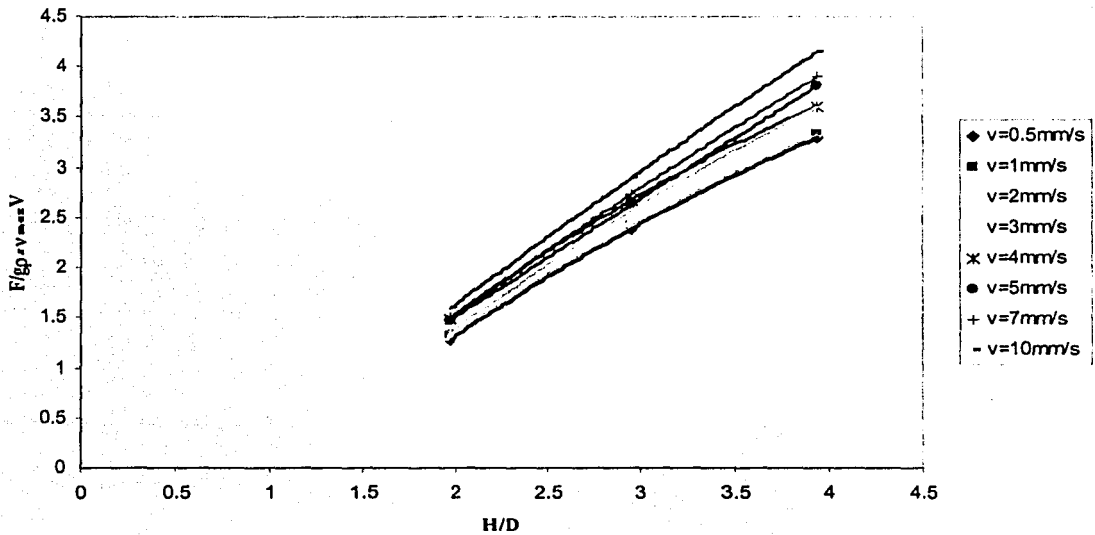


Cilindro de 50.8mm de diámetro, esferas de 6mm de diámetro.

Fuerza adimensionalizada vs. Velocidad adimensionalizada, D=50.8mm, d=6mm

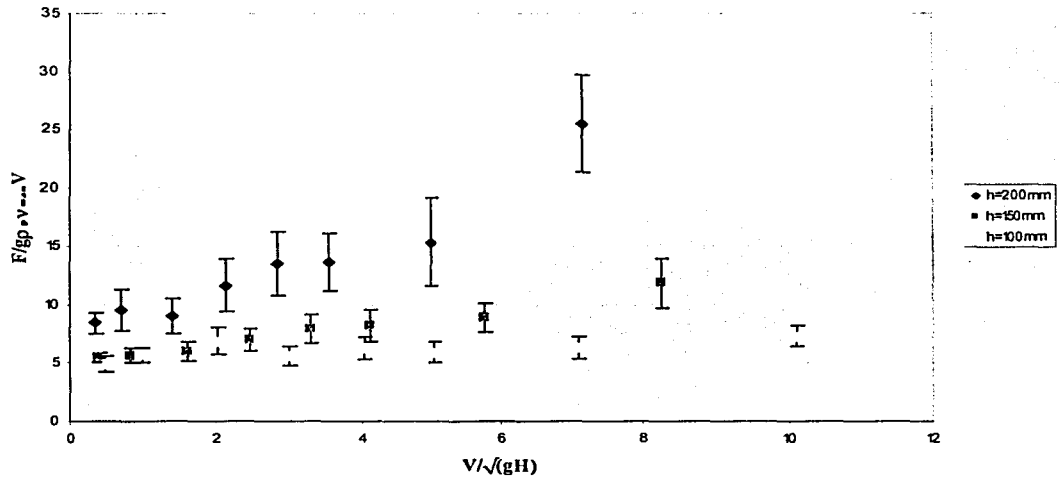


Fuerza adimensionalizada vs. Altura adimensionalizada, D=50.8mm, d=6mm

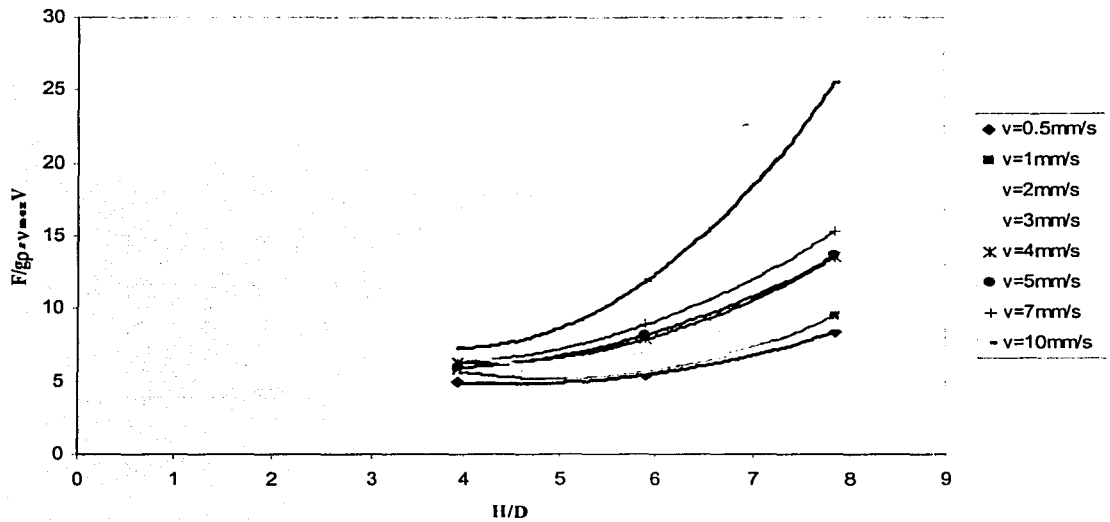


Cilindro de 25.4mm de diámetro, esferas de 3mm de diámetro

Fuerza adimensionalizada vs. Velocidad adimensionalizada, D=25.4mm, d=3mm

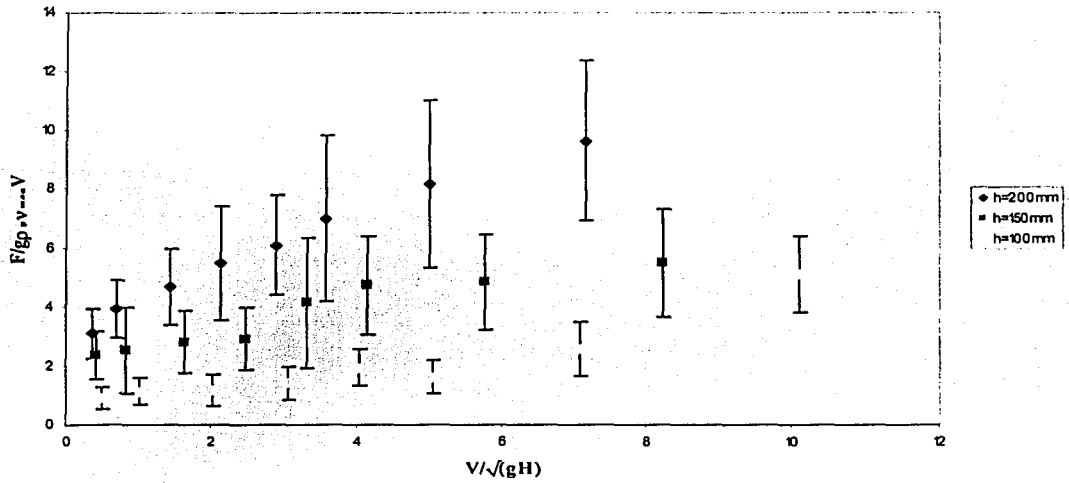


Fuerza adimensionalizada vs. Altura adimensionalizada, D=25.4mm, d=3mm

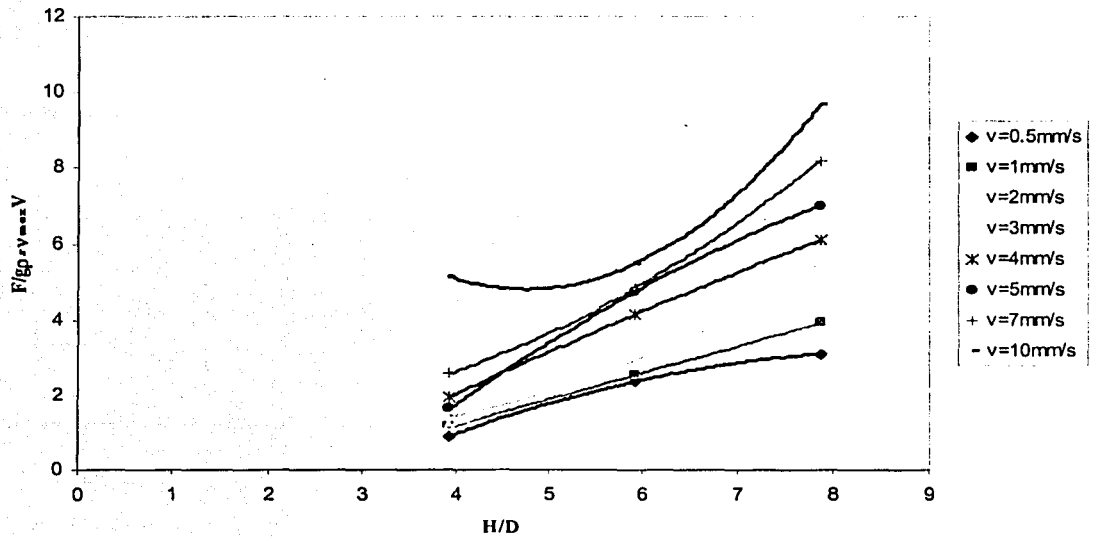


Cilindro de 25.4mm de diámetro, esferas de 6mm de diámetro

Fuerza adimensionalizada vs. Velocidad adimensionalizada, $D=25.4\text{mm}$, $d=6\text{mm}$



Fuerza adimensionalizada vs. Altura adimensionalizada, $D=25.4\text{mm}$, $d=6\text{mm}$

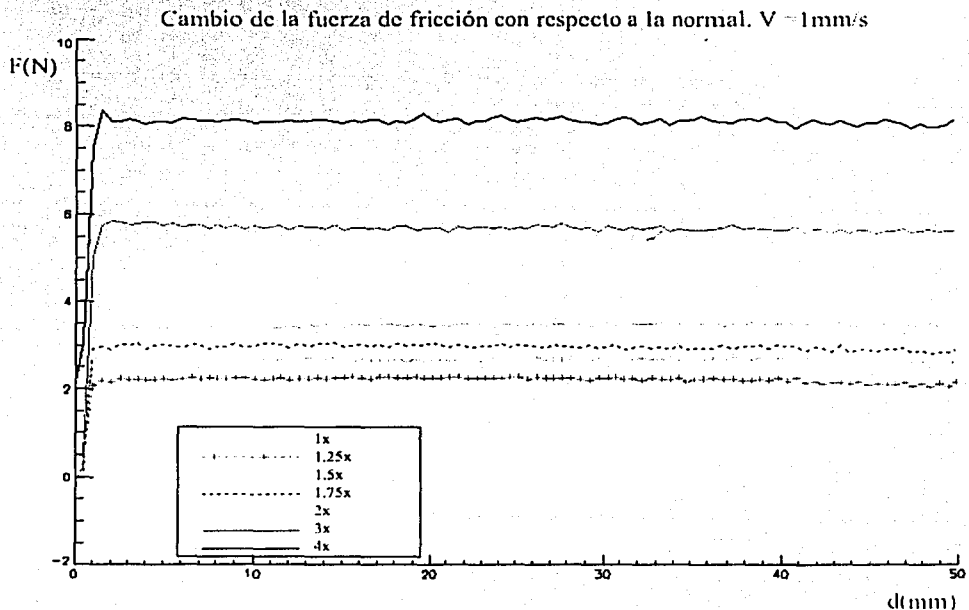


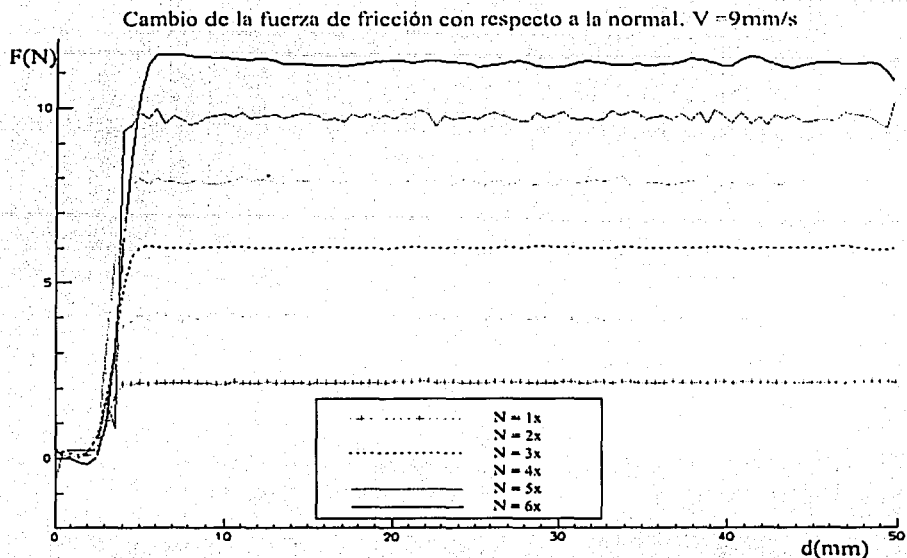
3.2 Parte 2: Fuerza de fricción

3.2.1 Fricción contra una superficie de lisa

Se realizaron pruebas para velocidades de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 mm/s. Para cada velocidad, se utilizaron diferentes fuerzas normales, en múltiplos del peso del sistema: peso de las esferas + el peso de la caja: 1380 gr. Así, $1x = 1380\text{gr}$, $2x = 2720\text{gr}$. y así sucesivamente. En el caso de 1mm/s se hicieron pruebas también con 1.25x, 1.5x, 1.75x. A continuación se muestran estos experimentos ajustados de la misma manera que los del pistón - cilindro: con splines.

Para poder comparar con un material sólido, se realizaron las mismas pruebas con un vidrio plano en vez del material granular. Así, se midió la fricción del material granular contra acero y de vidrio plano contra acero.

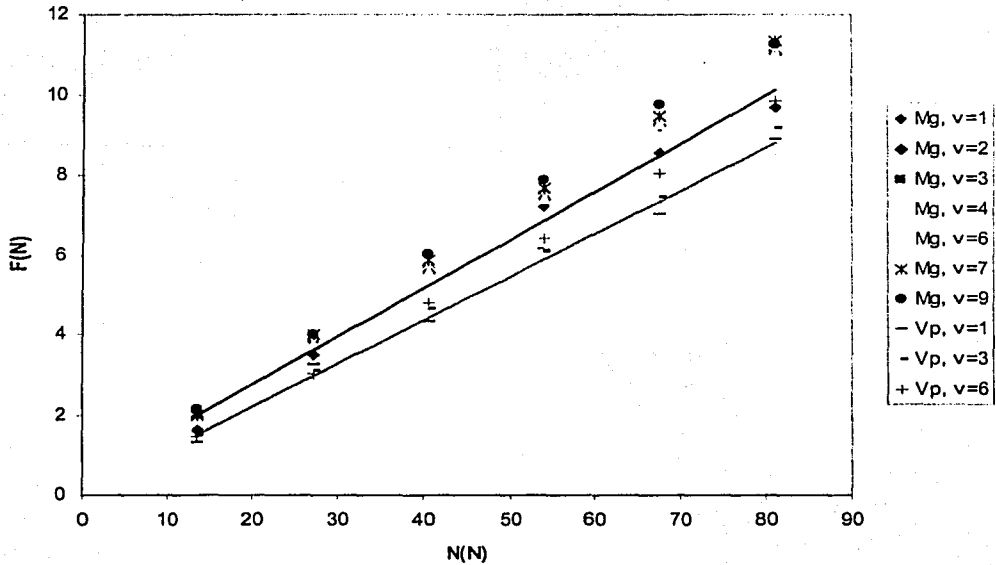




Es notorio el comportamiento lineal: la fuerza de fricción varía proporcionalmente con la fuerza normal, lo cual indica que el coeficiente de fricción es constante. Por ello no se presentan las demás gráficas, pues el comportamiento es muy similar. Si se comparan los valores extremos, para 1mm/s y para 9mm/s , se ve que la diferencia en el comportamiento es mínima. Los resultados fueron muy parecidos a los obtenidos con el vidrio plano, de manera que se puede concluir que el material granular tiene un comportamiento casi como el de un sólido. En la gráfica siguiente se muestra el resumen de todas las pruebas.

A manera de comparación, se muestra la recta de ajuste con mínimos cuadrados para el caso de la velocidad de 1mm/s , tanto para el material granular como para el vidrio plano. Las pendientes son muy parecidas: $\mu_p = 0.1203$ para el material granular y $\mu_p = 0.1074$ para el vidrio plano.

Fuerzas de fricción (superficie: acero)



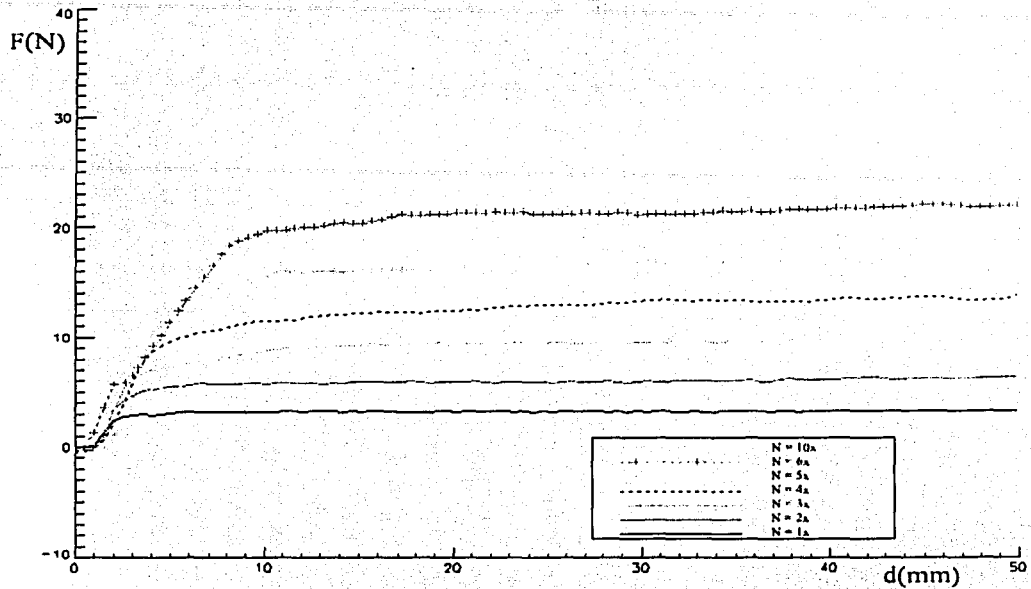
Mg: material granular
 Vp: vidrio plano

3.2.2 Fricción contra una superficie rugosa

En las pruebas realizadas con el material granular y con el vidrio plano en contacto con acero, se presenta linealidad. El comportamiento de material granular como un sólido se debe a que la fricción entre el vidrio y el metal es baja, y por ello no hace girar a las partículas ya que no vence la fricción entre las mismas. Pero, que las partículas tuvieran giro, se hicieron unas pruebas deslizando contra una lija en vez de contra metal. La fricción contra la lija es mucho mayor que contra acero, y con ello se produce giro entre las partículas.

En la gráfica siguiente se presentan las pruebas realizadas para el material granular contra la lija, a una velocidad de 1 mm/s.

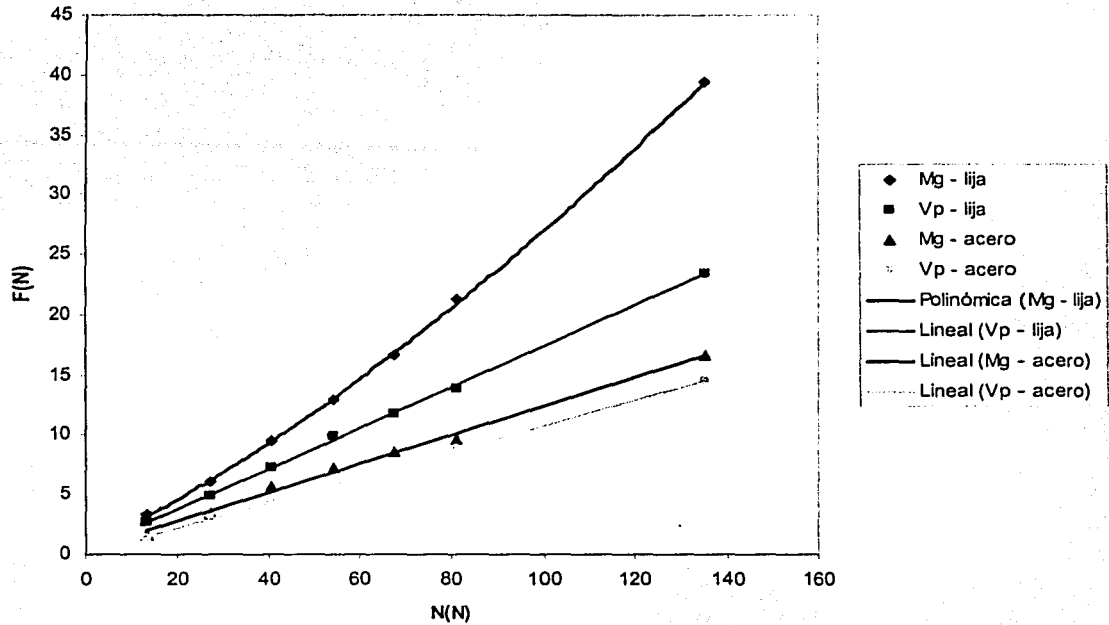
Fuerza de fricción variando la Normal, superficie: lija.



El comportamiento es muy diferente al que presenta el material granular al deslizarse contra el acero: primero tiene un comportamiento no lineal hasta que se llega a un estado de equilibrio, y se tiene un comportamiento asintótico. Además, la relación entre la fuerza de fricción F y la fuerza Normal N , no es lineal.

En el caso de la superficie rugosa (lija), al graficar Fuerza cortante (fricción) contra Normal, para materiales sólidos se obtiene una recta que tiene como pendiente μ . En los materiales granulares, se obtiene una curva, que es la función de fricción, μp . Se compara también con el comportamiento tanto del material granular como del vidrio plano contra una superficie lisa (acero).

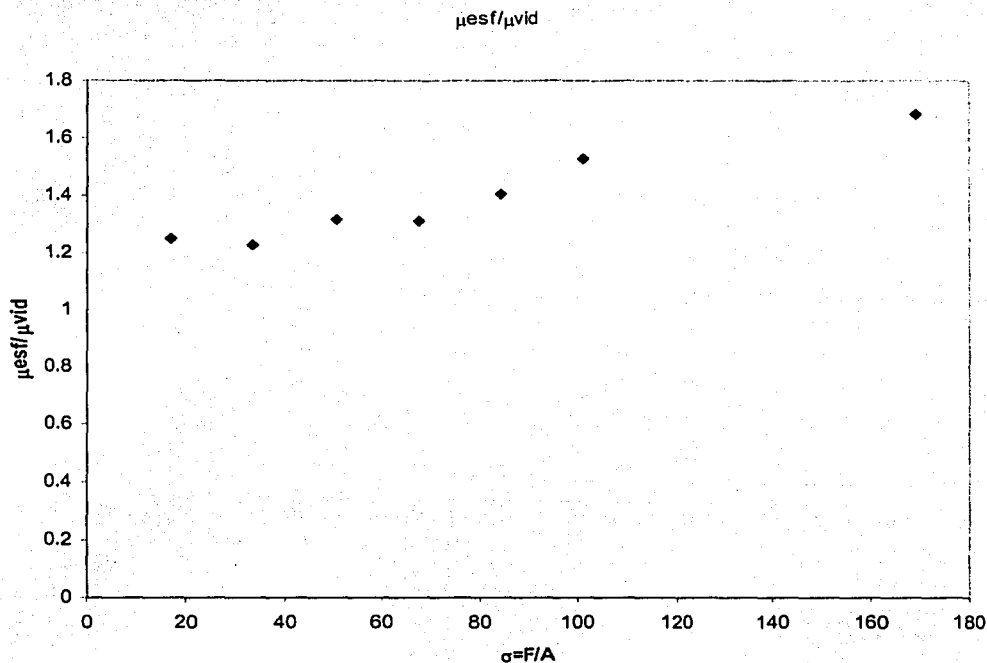
Fza. de Fricción para material granular y vidrio plano, superficies: lija y acero, $v=1\text{mm/s}$



Mg: material granular
Vp: vidrio plano

El coeficiente de fricción es la pendiente de las curvas anteriores. En las pruebas contra la lija, para el material granular, al inicio de la curva, en $N = 13.5378$, $\mu_p = 0.23$, mientras que en $N = 135.378$, $\mu_p = 0.29$. Para el vidrio plano, $\mu_p = 0.17$, y es constante. Se realizaron unas pruebas de visualización, encontrando que cuando N es baja, las esferas tienen mayor giro. Al aumentar la N , el giro va disminuyendo, hasta llegar a una N tal que las partículas no giran. Esto quiere decir que el giro disminuye al aumentar la fricción contra la pared. Como se vio con anterioridad, en las pruebas contra la superficie de acero, el coeficiente de fricción es constante tanto para el material granular ($\mu_p = 0.1203$) como para el vidrio plano ($\mu_p = 0.1074$).

Adimensionalizando la fuerza de fricción de la gráfica anterior, se obtiene la siguiente gráfica, donde en las ordenadas se tiene el cociente entre los coeficientes de fricción del material granular, μ_{esf} , y el coeficiente de fricción del vidrio plano, μ_{vid} ; y en el eje de las abscisas el esfuerzo normal, σ .



Se aprecia un cambio importante en el comportamiento, al aumentar la Normal: con pesos bajos, las partículas pueden girar entre ellas. Al alcanzar un peso crítico, estas se “amarran” y el material se comporta como un sólido. A partir de este momento, existe una proporcionalidad constante entre la fuerza de fricción y la fuerza normal.

4 Capítulo 4.- Conclusiones

Las conclusiones se separan en dos partes, una para los experimentos de compactación del material granular y la otra para la fuerza de fricción del material granular contra una pared.

4.1 Parte 1

- En las gráficas de la compactación (fuerza contra desplazamiento) se observan tres etapas distintas: inicialmente se presenta linealidad, luego hay una región de transición y por último se tiene un comportamiento asintótico.
- En la zona de crecimiento lineal, el valor de la pendiente crece exponencialmente con la altura de la cama de granos, y es independiente de la velocidad. A mayor pendiente, mayor será la fuerza cuando se alcanza el equilibrio. Es un comportamiento elástico del material.
- Durante la transición, ocurren reacomodos de las partículas hasta alcanzar un estado de equilibrio.
- En el equilibrio, la fuerza para desplazar el pistón aumenta exponencialmente al aumentar la altura de la cama de granos.
- En general, la fuerza necesaria para desplazar el pistón es proporcional a la velocidad, contrario a lo que pudiera esperarse. Si los contactos son de tipo friccional, podría esperarse que la fuerza fuera independiente de la velocidad puesto que el coeficiente de fricción (Promedio \pm desviación estándar) casi no cambia como función de la velocidad. Al ser desplazado el material, la fuerza de fricción con el cilindro causa que se compacte. Si la velocidad es muy pequeña, el material se puede reacomodar, liberando esfuerzos y buscando un nivel energético menor; a velocidades altas, el material no tiene tiempo de reacomodo y se compacta en dirección axial, expandiéndose en dirección radial y de esta forma generando mas fuerza contra la pared.
- La influencia de la velocidad es reducida cuando altura de la cama de granos es pequeña, pero a medida que esta aumenta, también lo hace su influencia: la compactación es mayor y con ello produce una mayor fuerza.

- A mayor relación D/d , la dispersión de los resultados es mucho menor, y con ello es más predecible el comportamiento del material. Por ejemplo, en el caso del diámetro del cilindro igual a 50.8mm y con las esferas de 3mm ($D/d = 16.93$), la desviación estándar es siempre menor a 1 N, mientras que para el caso de la relación D/d mínima, con el cilindro de 25.4mm y las esferas de 6mm ($D/d = 4.23$), la desviación estándar llega a ser superior a 4 N.
- En general, cuando la relación D/d es mayor a 10, se puede considerar un medio continuo. De cierta forma esta regla empírica se verificó. Sólo en un caso no se comporta como medio continuo: con $D/d = 4.23$, ya que el comportamiento resultó demasiado variable. En los otros casos, con $D/d = 8.46$ y $D/d = 16.93$, se puede considerar que sí es un medio continuo.
- Comparando el comportamiento del material granular de 3mm, se tiene que es mayor la fuerza para desplazarlo en el cilindro de 25.4mm que en el de 50.8mm de diámetro. A mayor relación D/d , la fuerza es menor.
- Para el cilindro de 50.8mm, el comportamiento del material granular es muy parecido para las esferas de 6 y 3mm de diámetro, tanto en la fuerza promedio como en la pendiente inicial. Pero se requirió más fuerza para desplazar el material de 6mm que el de 3mm, lo que apoya la idea de que la fuerza es inversamente proporcional a la relación D/d .
- Las pruebas realizadas con el cilindro de 25.4mm y las esferas de 6mm no pueden compararse con las demás, ya que la relación D/d es de apenas 4.23, por lo que no se puede considerar un medio continuo.

Trabajo a futuro:

- Un número mucho mayor de pruebas sin duda llevaría a caracterizar mejor el fenómeno, utilizando las mismas variables pero en rangos mayores: con diferentes relaciones D/d , h/D , h , v , y las rugosidades de los cilindros.
- Visualización de la compactación con cámara de video de alta resolución.

4.2 Parte 2

- Si las partículas de un material granular en un flujo granular estático no giran entre ellas, la fuerza de fricción, F , presenta linealidad con respecto a la fuerza normal, N . Si hay giro, la fuerza de fricción no presenta linealidad.
- En las pruebas realizadas contra una superficie metálica, el material granular se comportó igual que un sólido común: la fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal y casi no cambia con la velocidad. Esto se debe a que la fricción entre las esferas y el metal, μ_p es baja, de manera que no vence a la fricción interna del material, μ . Así, las partículas no giran entre ellas y el material granular se comporta como un sólido común.
- En las pruebas realizadas para el material granular contra la superficie rugosa (lija), se observó un comportamiento no lineal entre la fuerza normal, N y la fuerza de fricción, F . Con $N = 1x$, ($x =$ peso de la caja + el material granular) el coeficiente de fricción contra la pared, μ_p , resultó de 0.22. Al aumentar la fuerza normal, N , éste aumentó hasta llegar a 0.29, para $N = 10x$. Dicho comportamiento se debe al giro de las partículas, lo que significa que $\mu_p > \mu$.
- Si se comparan los valores de coeficiente de fricción contra la pared, μ_p , obtenidos en las pruebas contra la superficie rugosa, con el valor del coeficiente de fricción interna μ , medido mediante el ángulo de reposo ($\mu = 0.4$), se tiene que $\mu_p < \mu$. Pero, habiendo giro entre las partículas, evidentemente $\mu_p > \mu$, lo que sugiere que μ debe ser también no lineal con respecto a la N .
- La dependencia del coeficiente de fricción μ_p hacia la velocidad no es importante si la superficie es lisa. Se efectuaron algunas pruebas que sugieren que para superficies rugosas, μ_p aumenta con la velocidad. Sin embargo, se necesitan más pruebas para corroborarlo.

Trabajo a futuro:

- Utilizar superficies de diferentes rugosidades para caracterizar cómo afecta la rugosidad al coeficiente de fricción con la pared, μ_p .
- Medir el coeficiente de fricción interna del material, μ .
- Caracterizar la relación entre la velocidad y los coeficientes de fricción contra la pared, μ_p e interno, μ .

Bibliografía

- 1) *Annual Book of ASTM Standards 2000*, Sección 6, Volúmen 03.02, G115, American Society for Testing and Materials, EE. UU, 2000.
- 2) Awazu A, "Dynamic and Static Frictions of the System with two Particles in a Box", en *Journal of the Physical Society of Japan*, número 71, Physical Society of Japan, Japón, 2002.
- 3) Chehata D, *Flujo Granular Alrededor de un Cilindro*, UNAM, México, 2002.
- 4) Duran J, Kolb E, "Static Friction and Arch Formation in Granular Materials", en *Physical Review E*, número 58, American Physical Society, EEUU, 1998.
- 5) Hernandez-Cordero, Zenit R, Geffroy E, Mena B. "Experiments on Granular Flow in a Hexagonal Silo: A Design that Minimizes Dynamic Stresses". *Korea-Australia J. Of Rheo*, 2000.
- 6) Kamenetsky V, Goldshtein A, Shapiro M, Degani D, "Evolution of a Shock Wave in a Granular Gas", en *Physics of Fluids*, American Institute of Physics, número 12, EE. UU, 2000.
- 7) Khakhar DV, "Surface Flow of Granular Materials: Model and Experiments in Heap Formation", en *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, número 441, Port Chester, 2001.
- 8) Nedderman, R.M., *Statistics and Kinematics of Granular Materials*, Cambridge University Press, Gran Bretaña, 1992.
- 9) Ovarlez G, Kolb E, "Rheology of a Confined Granular Material", en *Physical Review E*, volumen 64, Francia, 2001.
- 10) Popov, E, *Introducción a la Mecánica de Materiales*, Limusa Editores, México, 1997.
- 11) Pouliquen O, "Friction Law for Dense Granular Flows: Application to the Motion of a Mass Down a Rough Inclined Plane", en *Journal of Fluid Mechanics*, número 453, Cambridge University Press, Nueva York, 2002.
- 12) Roux JN: "Geometric Origin of Mechanical Properties of Granular Materials", en *Physical Review E*, número 61, American Physical Society, 2000.
- 13) White, F.O.M., *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, EE.UU, Tercera Edición, 1994.

APÉNDICE 1: Esferas de vidrio.

Dragonite Solid Glass Beads

Our glass balls exceed the industry standards in all properties including: High Density, Abrasive Resistance, Uniform Size, Completely Spherical, Ease of Cleaning, No slivers, Broken or Fused Pieces, High Impact Strength, High Crushing Strength, Corrosion Resistance, No contamination of Product, No Surface Cracks and Reduced Mill Ware.

Glassbeads – type S; Art.

4500

Solid glass beads, with a diameter range of 0.1 to 4.0 mm, are produced from high quality and pure-type soda lime glass, in a rounding process which we have developed ourselves. The unique washing and porshing process for this application purpose, without addition of environment endangering additives such as hydro-fluoric add, gives the beads a pure, uncontaminated, and shiry surface. The very narrow and exact sleving of the individual diameter sizes is achieved in the last production process with a screening unit.

Grinding media in pearl mills:

The development of this type of beads is primarily based on its use as grinding media in pearl mills for grinding and dispersing color pigments, paint, ink, agro chemicals, pharmaceuticals, minerals and magnetic coatings.

Further applications:

- As an agent used for treating metal, wood and synthetic surfaces, mechanical plating.

Chemical characterization of soda lime glass:

SiO ₂	72.0%	MgO	4.0%
Na ₂ O			
CaO	9.0%	K ₂ O, Fe ₂ O ₃	1.05%

Slight deviations are possible. PbO free < 0.01 %

Approximate technical and physical values:

Hardness according to Mobs	: . 6
Elasticity module	: 63 Gpa
Specific weight	: 2.5 kg/dm ³
Bulk weight	: 1.5 kg/dm ³
Sphericity	: Art. Nr. 5210 – 5223 . 80 %
	: Art Nr. 4501 – 4513 . 95%
Abrasion after 100 h grinding	: 1.5 – 1.8 %

Quality and tolerance:

	mm	N
5210	1.00 – 0.05	-
5211	0.04 – 0.07	-
5212	0.07 – 0.11	-
5213	0.09 – 0.15	-
5214	0.10 – 0.20	-
5216	0.20 – 0.30	-
5217	0.30 – 0.40	-
4501	0.25 – 0.50	-
45015	0.40 – 0.60	-
4502	0.50 – 0.75	-
4503	0.75 – 1.00	-
4504	1.00 – 1.25	200 – 300
4505	1.25 – 1.55	300 – 400
4506	1.55 – 1.85	400 – 550
4507	1.70 – 2.00	500 – 650
4508	2.00 – 2.30	650 – 800
4509	2.30 – 2.60	800 – 1000
4510	2.50 – 2.85	900 – 1100
4511	2.85 – 3.30	1100 – 1400
4512	3.30 – 3.60	1400 – 1650
4513	3.70 – 4.10	1700 – 2000

All Jaygo's glass beads are available at Competitive prices. Call or write for sample.

JAYGO INCORPORATED

675 Rahway Avenue, Union NJ 07083
908/688-3600 Fax 908/688-6060
E-Mail: jaygoinc@aol.com

Chapter 3 407.36 Command Set

Overview of the Command Set

⚠ WARNING

Do not use any of these commands unless you know how it will affect the system.

The 407.36 command set must not be used by anyone who does not thoroughly understand both the operation of the 407 Controller and servo loop control. The command set includes commands that control all parts of the 407 control system, including hydraulics. Using such commands can cause unexpected actuator movement that can result in equipment damage or personal injury.

Make sure you understand both the operation of the 407 Controller and servo loop control before using the 407.36 command set.

General Commands

1	Type ID
2	Module Serial Number
3	Firmware Version
4	Loader Mode
6	Program Flash Application
7	Program Flash Boot
8	Download S-record
9	Terminate S-record
	Download
10	Press Key
11	Get Screen
12	Access Mode Change
14	Normalize

Conditioner/Valve Driver Commands

25	Dither Amplitude
26	Valve Balance
27	Demodulator Phase
28	Conditioner Gain
29	Delta K Gain
30	Coarse Zero
31	Fine Zero
32	Feedback Filter
33	Excitation
34	Feedback Polarity

35	Shunt Cal
36	Readout Select
37	Monitor Bus Select
38	Save Conditioner Setup
39	Recall Conditioner Setup
40	Full Scale
41	Engineering Units
42	Valve Polarity
43	Slot Setup
44	Slot Setup Changed

Program Commands

150	Cycle Count
151	Preset Count
153	Program Control
154	Setpoint Rate
155	Span Rate
156	EOC Action
157	Counter Input Select
158	Frequency
159	Setpoint
160	Span
161	Waveform

Overview of the Command Set (continued)

Interlock Commands

200	Interlock State
201	Reset Interlocks
202	Remote Interlock
203	Interlock Error Bitmap
204	Interlock Warn Bitmap
206	ESTOP State
207	EOC State
208	EOC Enable
209	Upper Limit 1 Level
210	Upper Limit 1 State
211	Upper Limit 1 Enable
212	Lower Limit 1 Level
213	Lower Limit 1 State
214	Lower Limit 1 Enable
215	Upper Limit 2 Level
216	Upper Limit 2 State
217	Upper Limit 2 Enable
218	Lower Limit 2 Level
219	Lower Limit 2 State
220	Lower Limit 2 Enable
221	Upper Limit 3 Level
222	Upper Limit 3 State
223	Upper Limit 3 Enable
224	Lower Limit 3 Level
225	Lower Limit 3 State
226	Lower Limit 3 Enable
227	Error Limit 1 Level
228	Error Limit 1 State
229	Error Limit 1 Enable
230	Error Limit 2 Level
231	Error Limit 2 State
232	Error Limit 2 Enable
233	Underpeak Signal Select
234	Underpeak Peak Level
235	Underpeak Peak State
236	Underpeak Peak Enable
237	Underpeak Valley Level
238	Underpeak Valley State
239	Underpeak Valley Enable
240	Backplane Interlock State
241	(See note for this command)
242	HPS1 Interlock State
243	HPS1 Interlock Enable
244	HPS2 Interlock State
245	HPS2 Interlock Enable
246	External Interlock State
247	External Interlock Enable
248	Digital Input Interlock State
249	Digital Input Interlock Enable
250	HPS Off State
251	HPS Off Enable

Hydraulics Commands

300	Hydraulic Configuration
301	Hydraulic Control

Data Monitoring Commands

350	DVM1 Signal
351	DVM2 Signal
352	DVM3 Signal
353	DVM4 Signal
354	DVM1 Value
355	DVM1 Peak
356	DVM1 Valley
357	DVM1 Max
358	DVM1 Min
359	Reset DVM1 Max/Min
360	DVM1 Value
361	DVM2 Peak
362	DVM2 Valley
363	DVM2 Max
364	DVM2 Min
365	Reset DVM1 Max/Min
366	DVM3 Value
367	DVM4 Value
368	Peak Sensitivity
370	Monitor 1 Select
371	Monitor 2 Select

Configuration Commands

400	Change Security Level
401	Change Password
402	Enter Password
403	Engineering Units
404	Span Configuration
405	Interlock Configuration
406	Span Scale
407	CMD Select
408	Prog Out

Overview of the Command Set (continued)

Digital I/O Commands

450	Digital In 1 Function
451	Digital In 1 Polarity
452	Digital In 2 Function
453	Digital In 2 Polarity
454	Digital Out 1 Function
455	Digital Out 1 Polarity
456	Digital Out 2 Function
457	Digital Out 2 Polarity
458	DIO Bitmap
459	Digital In 1 State
460	Digital In 2 State
459	Digital Out 1 State
460	Digital Out 2 State

Amplitude Control Commands

500	Amplitude Control Enable
501	Amplitude Control Input Select
502	Amplitude Controller Mean
503	Amplitude Controller Ampl
504	Amplitude Controller Gain

Controller Commands

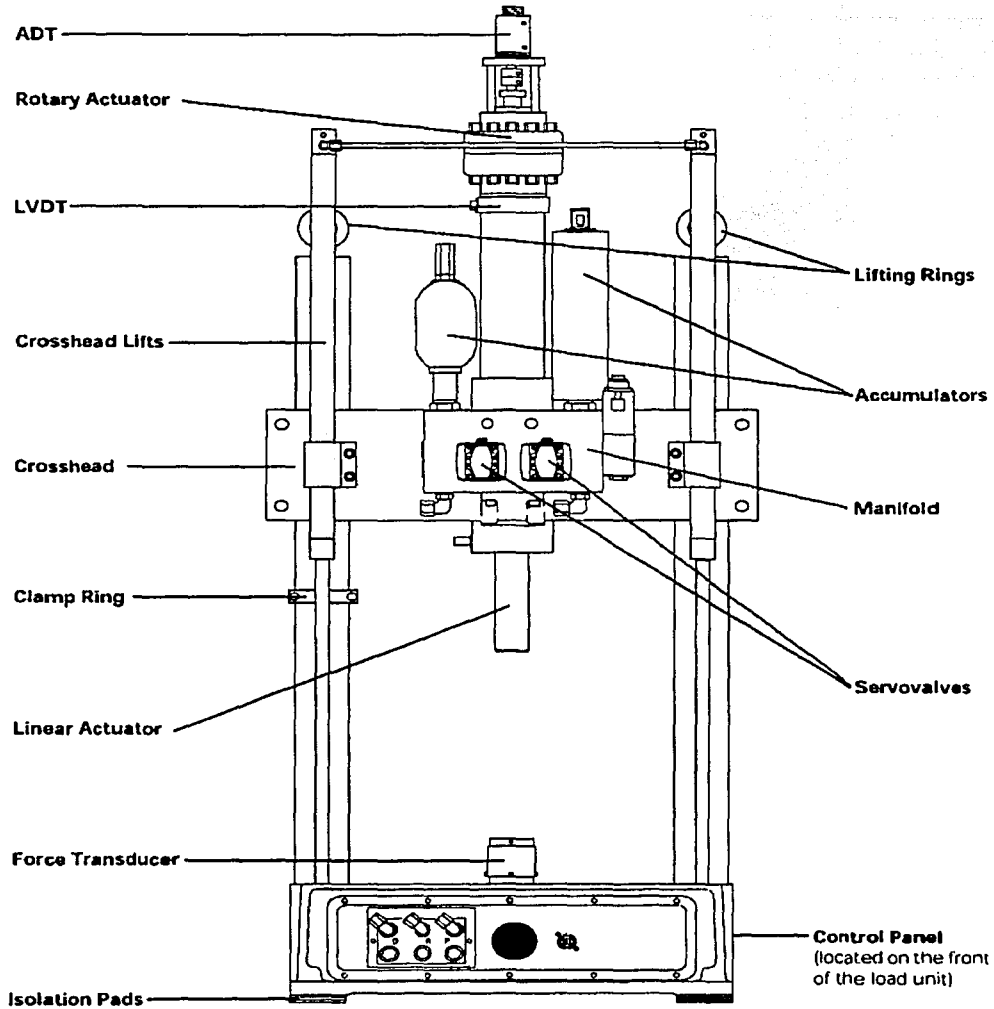
550	Controller Input Select
551	Proportional Gain
552	Integral Gain
553	Derivative Gain
554	Feedforward Gain
556	Differentiator Input Select
557	Delta P Gain
558	Delta P Input Select
559	Read Setpoint DAC Value

Ramp Generator Commands

600	Ramp End Value
601	Ramp Run Rate
602	Ramp Stop Rate
603	Ramp Timebase Units
604	Hold Adjust Mode Enable
605	Hold Adjust Value

APÉNDICE 3: Prensa Hidráulica MTS series 359

Components Identification



Rear View of an Axil-Torsional Load Unit

APÉNDICE 4: Comandos básicos del controlador MM4000.

MM4006

Remote Mode

3.5.1 Command List by Category

Command	Description	IMM	PGM	MIP	Commande	Description	IMM	PGM	MIP
General mode selection									
xx CD nn	Set cycle value and activate periodic display mode	■	■	□	xx FE nn	Set maximum following error	■	■	□
CM [nn]	Change communication mode	■	■	□	xx KD nn	Set derivative gain	■	■	□
MC	Set manual mode	■	■	□	xx KJ nn	Set integral gain	■	■	□
[xx] MF	Motor OFF	■	■	■	xx KP nn	Set proportional gain	■	■	□
ML	Set local mode	■	■	□	xx KS nn	Set saturation level of integral factor in position loop PID corrector	■	■	□
MO	Motor ON	■	■	□	[xx] FW	Save parameters	■	■	□
MR	Set remote mode	■	■	□	xx TF	Read filter parameters	■	■	□
QW	Save general parameters	■	■	□	[xx] UF	Update servo filter	■	■	■
Motion and position control									
AB	Abort motion	■	□	■	xx XD	Read derivative gain factor	■	■	■
[xx] DH	Define home	■	□	□	xx XF	Read maximum following error	■	■	■
xx MT nn	Move to travel limit switch	■	■	□	xx XI	Read integral gain factor	■	■	■
[xx] OR [nn]	Search for home	■	■	□	xx XP	Read proportional gain factor	■	■	■
xx PA nn	Move to absolute position	■	■	□	Motion device parameters				
xx PR nn	Move to relative position	■	■	□	xx BA [nn]	Set backlash compensation	■	■	□
SE	Start synchronized motion	■	■	□	xx SC [nn]	Set control loop type	■	■	□
[xx] ST	Stop motion	■	■	■	xx SF name	Set axis mechanical motion device	■	■	□
[xx] ZP	Zero position	■	■	□	xx SL nn	Set left travel limit	■	■	□
Trajectory definition parameters									
xx AC nn	Set acceleration	■	■	■	xx SN name	Set axis displacement units	■	■	□
xx DA pp	Read desired acceleration	■	■	■	xx SR nn	Set right travel limit	■	■	□
[xx] DF	Read following error	■	■	■	xx TA	Read motion device	■	■	■
[xx] DP	Read desired position	■	■	■	xx TC	Read control loop type	■	■	■
xx DV pp	Read desired velocity	■	■	■	xx TL	Read left travel limit	■	■	■
xx MV - or -	Infinite movement	■	■	■	xx TN	Read displacement units	■	■	■
SD nn	Speed scaling	■	■	□	xx TR	Read right travel limit	■	■	■
[xx] TH	Read theoretical position	■	■	■	xx TU	Read encoder resolution	■	■	■
[xx] TP	Read actual position	■	■	■	xx XB	Read backlash compensation	■	■	■
xx VA nn	Set velocity	■	■	■	xx ZH nn	Set and save home preset position	■	■	□
xx VB nn	Set base velocity (Stepper motor only)	■	■	■	xx ZL nn	Set and save left travel limit	■	■	□
Special motion parameters									
xx AU nn	Set maximum acceleration	■	■	□	xx ZR nn	Set and save right travel limit	■	■	□
xx DM	Read manual velocity	■	■	■	[xx] ZT [nn]	Read Axis/General parameters configuration	■	□	■
xx DO	Read home search velocity	■	■	■	I/O functions				
xx HT nn	Set home type	■	■	□	xx AM nn	Set analog input mode	■	■	■
xx MH nn	Set manual velocity	■	■	□	[xx] CB [nn]	Clear I/O outputs bits	■	■	■
xx OA nn	Set home search acceleration	■	■	□	FT nn	Set output frequency	■	■	■
xx OH nn	Set home search high velocity	■	■	□	[xx] RA	Read analog input	■	■	■
xx OL nn	Set home search low velocity	■	■	□	[xx] RB	Read I/O input	■	■	■
xx PB nn	Set start position of generation of pulses of synchronisation	■	■	□	[xx] RO	Read I/O output	■	■	■
xx PE nn	Set end position of generation of pulses of synchronisation	■	■	□	[xx] SB [nn]	Set I/O output bits	■	■	■
xx PI nn	Set step of generation of pulses of synchronisation	■	■	□	SO [nn]	Set I/O output byte	■	■	■
xx PS pp	Allow generation of pulses on motion	■	■	□	[xx] TG [nn]	Toggle I/O output bits	■	■	■
xx PT nn	Calculate necessary time for axis displacement	■	■	□	xx YO nn	Send a value to an user analog port	■	■	□
xx SU nn	Set encoder resolution	■	■	□	xx YR nn	Read a value from an user analog port and affect variable	■	■	■
xx SV nn	Set stepper motor resolution	■	■	□	Programming				
xx SY nn	Axis synchronization	■	■	□	AP	Abort program	■	■	■
xx YU nn	Set maximum velocity	■	■	□	xx CP	Compile program	■	□	□
xx VW nn	Set scaling velocity	■	■	□	xx EO nn	Automatical execution on power on	■	■	□
xx XH	Read home preset position	■	■	■	xx EP nn	Edition of program	■	□	□
Trace mode									
xx AQ nn	Axis positions acquisition	■	■	■	xx EX [nn]	Execute a program	■	□	□
GQ nn	Set global trace mode	■	■	■	xx LP	List program	■	□	□
NQ	Read global acquisition nr.	■	■	■	MP	Download EEPROM to RAM	■	□	□
SP [nn]	Set trace sample rate	■	■	■	QP	Quit program mode	■	□	□
SQ [nn]	Set global sample rate	■	■	■	SM	Save program	■	□	□
xx TM nn	Set trace mode	■	■	■	xx XL nn	Delete one line of program	■	□	□
[xx] TQ [nn]	Read global trace data	■	■	□	xx XM	Read available memory	■	■	■
[xx] TT	Read trace data	■	■	□	[xx] XX	Erase program	■	□	□
xx XN	Read number of acquisitions	■	■	■					
xx XQ	Read global sample rate	■	■	■					
xx XS	Read trace sample rate	■	■	■					



Command	Description	IMM	PGM	MIP	Command	Description	IMM	PGM	MIP
	Flow control and sequencing					Commands to define a trajectory			
CT [nn]	Read or set the controller time	■	■	■	AD [nn]	Define the maximum allowed angle of discontinuity	■	■	□
xx DL	Define label	□	■	□	xx AX	Assign a physical axis as X geometric axis	■	■	□
{xx} IE [nn]	If I/O input is equal	■	■	□	xx AY	Assign a physical axis as Y geometric axis	■	■	□
xx JL	Jump to label	□	■	□	CA [nn]	Define sweep angle and build an arc of circle = f (CR, CA)	■	■	□
KC	Abort command line	■	□	■	CR [nn]	Define radius for an arc of circle = f (CR, CA)	■	■	□
{xx} OE [nn]	Test I/O output	■	■	□	CX [nn]	Define X position to reach with an arc of circle = f (CX, CV)	■	■	□
RP [nn]	Repeat command line	■	■	□	CY [nn]	Define Y position to reach and build an arc of circle = f (CX, CV)	■	■	□
RQ [nn]	Generate service request (SRQ)	■	■	□	EL	Erase the last element of trajectory	■	■	□
{xx} UI	Wait for I/O high	□	■	□	FA [nn]	Define the tangent angle for the first point	■	■	□
{xx} UL	Wait for I/O low	□	■	□	LX [nn]	Define X position and build a line segment = f (LX, tangent)	■	■	□
WA [nn]	Wait	■	■	□	LY [nn]	Define Y position and build a line segment = f (LY, tangent)	■	■	□
WE	End While loop	■	■	□	MX [nn]	Define X position for a line segment = f (MX, MY)	■	■	□
xx WF	Wait for function key	□	■	□	MY [nn]	Define Y position and build a line segment = f (MX, MY)	■	■	□
xx WG [nn]	While variable is greater	□	■	□	NT	Start definition of a new trajectory	■	■	□
xx WH [nn]	While I/O input is equal	□	■	□		Commands to execute a trajectory			
xx WK [aa]	Wait for key	■	■	□	ET	Execution of trajectory	■	■	□
xx WL [nn]	While variable is less	□	■	□	VS [nn]	Define the vector acceleration on trajectory (trajectory acceleration)	■	■	■
xx WP [nn]	Wait for position	■	■	□	VV [nn]	Define the vector velocity on trajectory (trajectory velocity)	■	■	■
{xx} WS [nn]	Wait for motion stop	■	■	□	W1 [nn]	Wait for a trajectory (curvilinear) length	□	■	□
WT [nn]	Wait	■	■	□	WN [nn]	Wait for a element of trajectory	□	■	□
xx WY [nn]	While variable is different	□	■	□		Commands to help geometric definition of a trajectory			
xx YE [nn]	If variable is equal	□	■	□	AT	Tell the element number under execution	■	■	■
xx YG [nn]	If variable is greater	□	■	□	xx LT	Extended list of the trajectory	■	■	□
xx YL [nn]	If variable is less	□	■	□	XA	Tell the current maximum allowed angle of discontinuity	■	■	□
xx YN [nn]	If variable is different	■	■	□	XE	Tell the last element	■	■	□
xx YW	Wait and read key	□	■	□	XT	Tell number of elements in the trajectory	■	■	□
	Variable manipulation				XU [nn]	Tell the vector acceleration on trajectory (trajectory acceleration)	■	■	■
xx AS [nn]	Affect string	■	■	□	XV [nn]	Tell the vector velocity on trajectory (trajectory velocity)	■	■	■
xx CS [nn]	Concatenate two strings	■	■	□		Master-slave mode definition			
xx TY	Read a variable	■	■	■	xx FF [nn]	Set maximum master-slave following error	■	■	□
xx YA [nn]	Add to variable	□	■	□	xx GR [nn]	Set master-slave reduction ratio	■	■	□
xx YB	Negate variable	□	■	□	xx SS [np]	Set master-slave mode	■	■	□
xx YC [nn]	Add variables	■	■	□		Trace mode on trajectory			
xx YD [nn]	Divide variables	■	■	□	NB [nn]	Set trajectory element where the generation of pulses starts	■	■	□
xx YF [nn]	Scale variable	■	■	□	NE [nn]	Set trajectory element where the generation of pulses ends	■	■	□
xx YK	Read key to variable	■	■	□	NI [nn]	Set step (curvilinear distance) between synchronisation pulses	■	■	□
xx YM [nn]	Multiply variables	■	■	□	NN [nn]	Set number of synchronisation pulses to generate	■	■	□
xx YP [nn]	Set theoretical position in variable	■	■	□	NS	Allow generation of pulses on interpolation	■	■	□
xx YQ [nn]	Set current position in variable	■	■	□					
xx YS [nn]	Initialize variable	■	■	□					
xx YV	Read value from keyboard in a variable	■	■	□					
xx YY [nn]	Copy variable	■	■	□					
	Display functions								
xx DS [nn]	Display strings on screen	□	■	□					
xx DY [nn]	Display a variable	□	■	□					
xx FB [aa]	Label function key	□	■	□					
FC	Clear function key line	□	■	□					
FD	Display function keys	□	■	□					
xx NP [nn]	Set decimal digits number of position display	■	■	□					
RD	Disable display refresh	■	■	■					
RE	Enable display refresh	■	■	■					
	Status functions								
ED [nn]	Display program error	■	■	□					
{xx} MS	Read motor status	■	■	■					
TB [aa]	Read error message	■	■	■					
TD	Read error line of program	■	■	□					
TE	Read error code	■	■	■					
TS	Read controller status	■	■	■					
TX	Read controller activity	■	■	■					
TXI	Read controller extended status	■	■	■					
VE	Read controller version	■	■	■					

APÉNDICE 5: Presentación realizada

“SEMINARIO”

El Departamento de Reología y Mecánica de Materiales
le invita al Seminario:

“Manejo estadístico de datos”
***“Procesos de Fricción en un Material
Granular”***

Impartirán:

Carlos Alberto Ramírez Pascualli
Diego Arroyo

y

Dr. Guillermo Pulos Cárdenas,
***Quien hablará de los Proyectos que actualmente se desarrollan
en el Laboratorio de Mecánica de Sólidos.***

El manejo de datos experimentales es una parte crucial de cualquier investigación, de ahí la importancia de contar con un método adecuado para la interpretación de éstos. La teoría de probabilidad y la estadística proporcionan herramientas útiles para este fin; así, el manejo estadístico de datos es una alternativa viable para interpretar cualquier tipo de datos. Aunque ya existe gran variedad de herramientas para el análisis a posteriori, el manejo estadístico y probabilístico que se está proponiendo pretende realizar análisis en tiempo real reduciendo el volumen y la complejidad de la información a procesar, facilitando enormemente la elaboración de conclusiones respecto a cualquier fenómeno de interés.

El jueves 4 de abril de 2002, a las 12:00 hrs., en la Sala de Conferencias del IIM.

*Café y Galletas