

01121
115



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

FLUJO ALREDEDOR DE UNA
PLACA INMERSA EN
UNA CORRIENTE GRANULAR

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
ERNESTO / RAMÍREZ CORNEJO

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ROBERTO ZENIT CAMACHO



MÉXICO

2003

Yo, el abajo firmante, a la Dirección General de Biblioteca
UNAM a difundir en formato electrónico el
contenido de mi trabajo titulado
NOMBRE: Ernesto Ramírez Cornejo
FECHA: 11/08/03
FIRMA: [Firma]

A



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.

PAGINACION

DISCONTINUA

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/039/02

Señor
ERNESTO RAMÍREZ CORNEJO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. JOSÉ ROBERTO ZENIT CAMACHO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"FLUJO ALREDEDOR DE UNA PLACA INMERSA EN UNA CORRIENTE GRANULAR"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL
- III. DESARROLLO EXPERIMENTAL
- IV. RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria a 13 Junio 2003
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

B

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	v
JUSTIFICACIÓN	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1. CIENCIA, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA	3
1.2. MATERIALES GRANULARES	7
1.2.1. Definición	7
1.2.2. Los materiales granulares en el desarrollo de la sociedades	7
1.2.3. Los materiales granulares en nuestro entorno	10
1.2.4. Los materiales granulares dentro de la Ingeniería Civil	12
1.2.4.1. Materiales granulares en el Diseño Estructural	12
1.2.4.2. Materiales Granulares durante el proceso Constructivo	13
1.2.4.3. Situaciones reales con materiales granulares en Ingeniería Civil ..	15
Materiales granulares en la composición del concreto	15
Los suelos como materiales granulares	16
Bancos de materiales	18
Movimientos de tierras	18
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	
2.1. Investigaciones previas	20
2.2. Comportamiento de los materiales granulares	20
2.3. Parámetros cuantificables de los materiales granulares	22
2.3.1. Ángulo de reposo	23
2.3.2. Compacidad	23
2.3.3. Densidad	23
2.3.4. Diámetro equivalente	23
2.3.5. Dilatancia	24
2.3.6. Distribución de presiones	25

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1	Objetivo	26
3.2	Modelo Experimental	27
3.3.	Sistema de medición	32
3.4.	Captura de imágenes	35
3.5.	Variables del experimento	35
3.6.	Proceso experimental	36
3.6.1.	Obtención de la velocidad del flujo	36
3.6.2.	Captura de imágenes	38
3.6.3.	Medición de fuerza de arrastre y momento	39
3.6.4.	Calibración de la galga	40
3.6.5.	Registro de resultados	42
3.6.6.	Cálculo de la fuerza de sustentación	44

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1.	Velocidad del flujo	45
4.2.	Fuerza de Arrastre, Fuerza de Empuje y Momento	48
4.2.1	Gráfica típica de variación de la fuerza	48
4.2.2.	Fuerza como función de la Velocidad	50
4.2.3.	Dependencia de la fuerza con el ángulo de colocación	54
4.2.4.	Coefficientes de arrastre y sustentación	57
4.3.	Visualización del flujo	61
4.3.1.	Imagen típica del flujo alrededor de la placa	61
4.3.2.	Series fotográficas	63
4.3.2.1	Serie 1. Variación respecto al tamaño de la placa	63
4.3.2.2	Serie 2. Variación respecto a la velocidad del flujo	67
4.3.2.3.	Serie 3. Variación respecto al ángulo de colocación de la placa	72

CONCLUSIONES	80
--------------------	----

BIBLIOGRAFÍA	82
--------------------	----

APÉNDICES	84
-----------------	----

Desde niño he tenido la idea de que la vida es algo parecido a un libro, a una serie de televisión, a una obra de teatro, a una película, a un argumento dentro del cual uno es el protagonista, donde alguien tiene el poder de que cada día sucedan situaciones que escriben un guión, donde las personas a tu alrededor son tan únicamente personajes/actores a los que nunca conocerás por completo y que comparten contigo las escenas, donde las personas importantes son parte del elenco y las demás, simples extras.

De unos años a la fecha, esa idea se ha manifestado de una manera increíble, con la diferencia de que ahora no soy sólo el protagonista, sino el productor de mi propia serie...

A todas las personas que tienen este texto en sus manos y que, espero, lean más que estas dos hojas.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por todo lo que me ha dado y también por lo que no.

A mi papá, Pedro Ramírez Degollado, la persona más inteligente que podré conocer en la vida. Gracias por procurarnos la mejor educación que estuvo a tu alcance.

A mi mamá, Susana Cornejo Muñoz. Dios es tan grande que a pesar de todo lo que me ha hecho vivir desde el día que nací, me recompensó dándome a la persona más maravillosa para cuidarme, entenderme, apoyarme y amarme. Te dedico todo lo que hago en la vida.

A mi hermano Felipe. La persona que más admiro; a mi cuñada Verónica por ser parte indispensable de nuestra familia.

A mi hermano Renato. Lo que ahora soy no existiría sin el niño tan feliz que fui a su lado.

A mi hermana Ana Elisa. La niña a quien quiero más de lo que ella puede imaginar y más de lo que puedo querer a alguien.

A mi sobrina María Emilia. El día que puedas entender estas líneas, sabrás lo mucho que te queremos y la alegría que nos das con el simple hecho de sonreír.

A la Familia Cornejo Muñoz, por hacerme sentir parte de la gran familia que somos, a mis abuelos María Luisa y Eufracio.

A la Familia Ramírez Degollado. A mis abuelos Pedro y Consuelo.

Gracias al Ing. César Buenrostro Hernández, Secretario de Obras y Servicios del Gobierno del Distrito Federal, de quien he aprendido que ser un gran ingeniero no es tan importante como ser un gran ser humano.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, la mejor escuela en la que pude haber estudiado.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales, al Dr. Roberto Zenit Camacho por dirigir este trabajo, por su tolerancia, comprensión pero sobretodo por su amistad.

A los Ingenieros Fernando Ruíz Jacques, Héctor Cortes Jácome y Francisco Barrera García.

A todos los servidores públicos y personal de la Secretaría de Obras y Servicios, especialmente al Ing. Eduardo Esquivel Herrera.

A mis amigos:

Mi mejor amigo: Raymundo Zamarripa Flores.

Mis hermanas: Sandra Luz Ortiz Reyes y Bianca Paola Quezada Vázquez.

Mi mejor amiga: Karlita Morales Romero.

Rubén González Moreno, José Guadalupe Padua Monroy y Fabiola Martínez Martínez.

Jessica Huerta Dávila, Yanet Cruz Aceves y a mis colegas: Javier Guerrero Rodríguez y César Guerrero Puentes.

Sergio Hernández Romero

Orión Madrigal Herrera, Fernanda Miranda Salgado y Michelle Cano Nava.

Mis compañeros de la Facultad: Ma. Berta Machinena de la Mora, Víctor Hugo Pérez Valdez y muy especialmente a Christian Balcazar Benítez.

Y finalmente a Fundación Telmex, Fundación ICA, Probetel, CONACYT y al Gobierno del Distrito Federal, por todas las personas que conocí, por el apoyo recibido desde el inicio de mi carrera, el desarrollo de mi proyecto de tesis y el inicio de mi vida profesional.

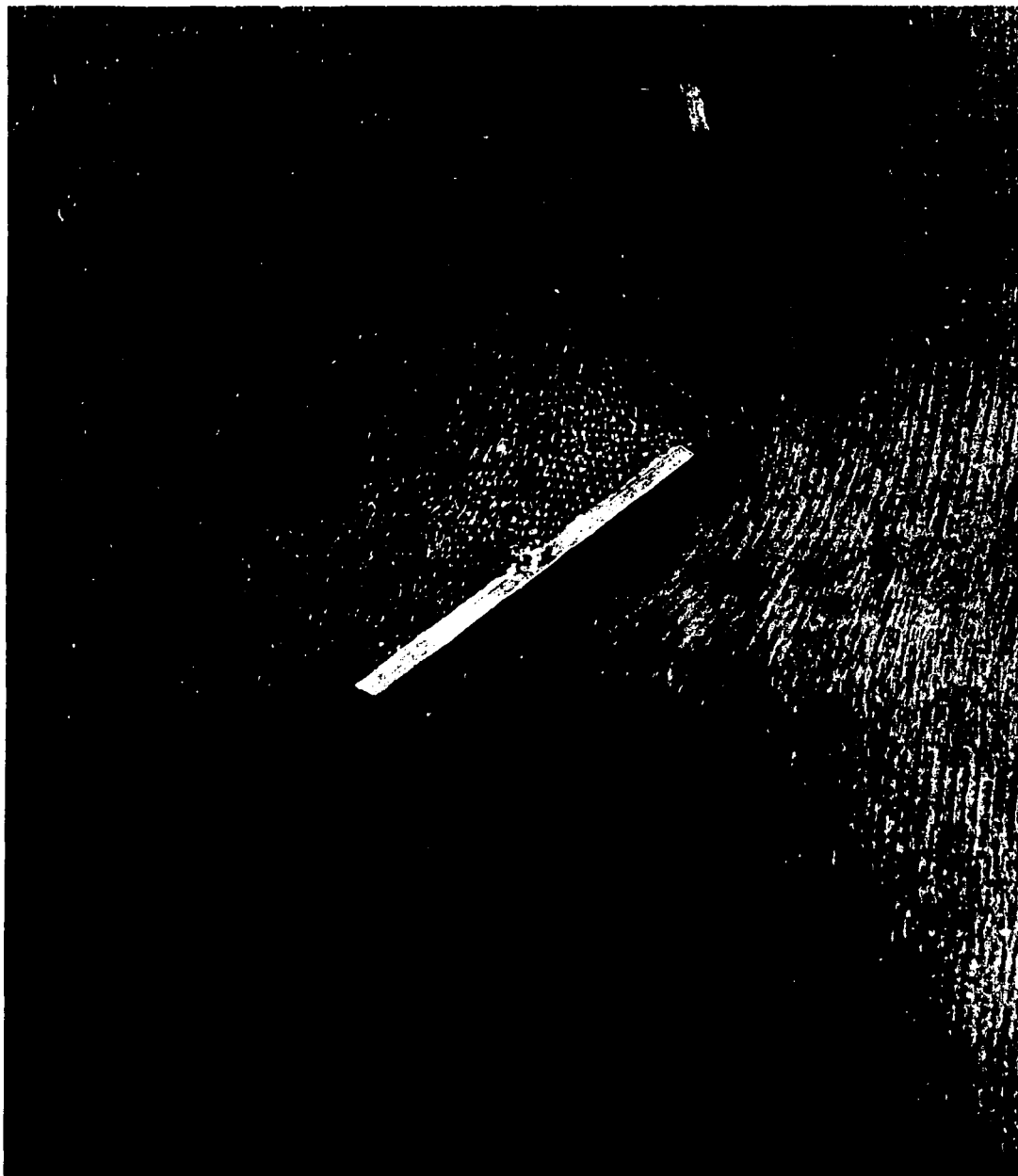
RESUMEN

Se realizaron experimentos de flujo de material granular alrededor de una placa. Para ello se construyó un canal vertical de paredes de vidrio de 5 mm de espesor y sección rectangular de 4 cm x 30 cm, la altura del canal fue de 125 cm. Con estas dimensiones se generó un flujo granular cuasi-bidimensional. El material granular utilizado consistió en esferas de vidrio de 3 mm de diámetro. La velocidad del flujo fue controlada mediante la abertura de las compuertas en la parte inferior del canal. Por encima del canal se colocó un contenedor que almacenaba las partículas antes del comienzo del flujo y que mediante un sistema de elevación neumática eran elevadas nuevamente para realizar el siguiente experimento.

Se fabricaron tres placas de latón de 5 mm de espesor y dimensiones 3 x 3.8 cm², 5 x 3.8 cm² y 10 x 5.8 cm² a las que les fue colocado un perno que permitió la flotación de la placa en orificios realizados al centro del canal. La placas fueron colocadas a 0°, 20°, 45°, 70° y 90°. La fuerza de arrastre fue medida con una galga extensométrica calibrada que generó señales de voltaje al momento de ser deformada. Las mediciones de voltaje fueron amplificadas y recopiladas en un programa de cómputo que permitió tomar 1000 mediciones por segundo. Posteriormente dichos valores fueron transformadas en mediciones de fuerza.

La fuerza de empuje fue calculada en base a las mediciones de fuerza de arrastre obtenidas. El momento generado alrededor del centro de la placa fue obtenido mediante la colocación de un brazo de palanca de 11.5 cm sujeto a una segunda galga conectada de igual forma al sistema de adquisición de datos.

Adicionalmente se tomaron fotografías del flujo granular con una cámara digital utilizando una técnica de obturador abierto. Con ello se logró rastrear la trayectoria de las partículas durante su interacción con la placa e identificar diversas configuraciones de flujo.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La fotografía muestra la interacción entre una placa de 10 mm de largo por 5 mm de espesor colocada a 45°, con un flujo granular denso formado por partículas de 3 mm de diámetro a una velocidad de 179 mm/s.

JUSTIFICACIÓN

Los materiales granulares forman parte de nuestra vida diaria; hoy en día en la gran mayoría de los fenómenos naturales, procesos industriales y en los procesos cotidianos, se presentan casos en que un objeto se encuentra en contacto con una corriente de material granular. La información conocida de los materiales granulares es limitada pero su estudio ha avanzado significativamente en un período muy corto. La forma en que actúan las fuerzas sobre un objeto sumergido en una corriente granular no es del todo entendida, por ello es de suma importancia su estudio. El resultado de este estudio podría arrojar una mejora en los procesos de ingeniería actual y en un diseño más real de estructuras sometidas a este tipo de corrientes.

A pesar de estar presentes en la vida cotidiana, no se conoce ampliamente la física fundamental que describa el comportamiento de los materiales granulares y que permita entender su comportamiento; por ello hasta ahora han sido manejados bajo principios empíricos.

Hoy en día existe un enorme desconocimiento del comportamiento de los materiales granulares, ya que éstos son tratados como materiales elástico-homogéneos, cuando en realidad su comportamiento depende de varios factores.

Con este proyecto se pretende estudiar el comportamiento de las fuerzas sobre un objeto cuando este se encuentra inmerso en una corriente de flujo granular, como podría presentarse cuando una pala mecánica interactúa con agregados pétreos y así también, conocer que reforzadas deberán ser las estructuras dentro

de una corriente de materiales para que no fallen, en caso del deslave de una ladera.

En la práctica específicamente de la Ingeniería Civil se requiere de infraestructura y maquinaria eficiente para transportar, elevar, triturar y la realización de diversos procesos con materiales granulares. Es necesario, por ello, conocer la forma más eficiente del manejo de los materiales, lo cual resultaría en menor desgaste de los equipos, mayor eficiencia y menores costos. Es decir, se podrían mejorar procesos industriales y diseños estructurales que tengan factores de seguridad elevados que por lo general se utilizan cuando no se conoce la naturaleza de los fenómenos y quiere reducirse de gran medida la probabilidad que se presenten fallas.

En particular para el diseño de ingeniería adecuado es necesaria la predicción de fuerzas, conocer el desgaste de los materiales y los patrones de flujo alrededor de objetos sumergidos. Para lograr alguna mejora en los diseños que se realizan en nuestros días es necesario llevar a cabo investigaciones que permitan comprender de una mejor manera el comportamiento de los materiales.

INTRODUCCIÓN

1.1. CIENCIA, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA

Ciencia es el proceso sistemático de descubrir y explicar lo que existe y lo que ocurre en la naturaleza. Esto se logra principalmente mediante la observación y la experimentación; la investigación básica consiste en una serie de investigaciones destinadas a la ampliación del conocimiento científico, a aumentar nuestra comprensión de la naturaleza. Es, por lo tanto, una exploración de lo desconocido o de lo insuficientemente conocido; así, con los resultados obtenidos de una investigación básica, una investigación aplicada intenta darles una aplicación práctica, real e inmediata a un problema específico.

La investigación científica básica es universal en el sentido de que sus descubrimientos son igualmente válidos en cualquier sociedad y bajo cualquier sistema político, además de que una conclusión científica conduce tarde o temprano a distintos tipos de aplicaciones llamadas "tecnologías".

La investigación básica y el desarrollo tecnológico nacen enfocados a una necesidad o a una aplicación real, que debe ser identificada en conjunto por los ingenieros, quienes pueden aplicar el resultado de la investigación. Los resultados de la investigación científica abren camino a aplicaciones concretas, prácticas y útiles, por ello, los adelantos tecnológicos de una nación dependen cada vez más del número de científicos y técnicos, así como del nivel educativo de la población. La velocidad en la creación de nuevas tecnologías depende de

cuán estrecha es la relación entre el conocimiento de las ciencias fundamentales y las aplicaciones reales que estas puedan ofrecer.

Es deseable que una investigación básica deba estar sustentada en una necesidad real que permita recuperar el esfuerzo invertido. Así, la selección de una “buena” línea de investigación es fundamental. La identificación de una buena línea de investigación es decisiva para tener una buena aplicación de los resultados obtenidos; entonces la investigación básica no solo producirá artículos de revistas científicas o libros científicos, sino que, por medio de desarrollar marcos teóricos en las disciplinas científicas (matemáticas, física, química, biología) se pueden llegar a resolver problemas tecnológicos. El desarrollo tecnológico emplea los resultados de una investigación básica para utilizarlos en la construcción de productos como aparatos, dispositivos, programas de cómputo, entre otros o mejoramiento de procesos.

La investigación básica y su aplicación real como productora de nuevas tecnologías son un factor importante para el desarrollo de un país, así como la falta de conocimientos científicos son un factor real del atraso de una sociedad ya que el desarrollo económico no depende sólo de inversiones y mano de obra, sino también de nuevos diseños de ingeniería, nuevas técnicas productivas, de poder encontrar nuevas formas de energía. Este es el papel de la vital de la ciencia no solo como fuente de conocimiento puro sino como fuente de tecnología para producir riqueza.

Los países desarrollados tienen plena conciencia del papel que desempeña la investigación básica, a través de sus posibles aplicaciones en la ingeniería para

impulsar la expansión económica. Es por ello que si no se estimula el desarrollo sistemático y la búsqueda del conocimiento científico, se carecen de instrumentos básicos para un avance tecnológico propio, lo que conlleva a la importación de tecnología de punta con altos costos.

La utilización de la ciencia y la tecnología para un rápido desarrollo de un país no puede limitarse a esta simple importación de conocimientos y técnicas elaboradas y patentadas en el exterior. La investigación básica debe ser estimulada para generarse en nuestro país dentro de las Universidades, Institutos, pero en cooperación a nivel mundial con una visión real de las nuestras necesidades y de las aplicaciones reales que una línea de investigación puede ofrecer.

El principal objetivo de la investigación universitaria es la generación de nuevos conocimientos y su difusión, en el cual participan recursos humanos especializados. Los productos de investigación deben ser originales y la originalidad puede manifestarse de diferentes maneras, ya sea en la selección y planteamiento de algún problema, el método utilizado para resolverlo, en la generación e interpretación de los resultados y en la aplicación de éstos.

Así, en las instituciones de enseñanza superior y centros de investigación, se adquieren cada día nuevos conocimientos científicos y tecnológicos que posteriormente pueden ser utilizados por la industria para dar soluciones a problemas de la sociedad o en el mejoramiento de las técnicas actuales de procesos específicos para hacerlas más eficientes. El interflujo de información sobre el adelanto de las técnicas y el encauzamiento de la investigación científica

y tecnológica es condición necesaria para el desarrollo de nuestro país, es así como un trabajo de investigación ofrece soluciones o mejoras reales en distintas ramas de la industria.

Nuestra infraestructura científica es todavía insuficiente para satisfacer estas necesidades de la industria. No obstante, existen instituciones de investigación científica y tecnológica en nuestro país que pueden ofrecer líneas de investigación útiles para evitar en gran medida la importación de técnicas y procedimientos tecnológicos de otros países.

La importancia del desarrollo tecnológico radica en la cooperación intelectual entre los científicos puros y los ingenieros que utilizan sus resultados en el diseño de soluciones. Aquí está el gran reto para los ingenieros mexicanos: de su adecuada organización a fin de que exploren las posibilidades reales de los recursos naturales del país.

1.2. MATERIALES GRANULARES

1.2.1. Definición

Un material granular se puede definir como un conglomerado de partículas macroscópicas sólidas dispersas en un flujo o en vacío. Es una clase de material bifásico (sólido-gas) en el cual el material intersticial se puede despreciar para efectos prácticos.

El comportamiento de materiales granulares depende de factores como tamaño, forma, aspereza y elasticidad de las partículas, así como la cohesión entre los granos y la humedad en que se encuentran.

Cuando un material granular es sometido a un esfuerzo cortante las partículas que conforman el material pueden fluir de manera similar a un fluido o resistir este esfuerzo cortante como lo hace un sólido. Esta dualidad en el comportamiento de los materiales granulares es lo que los hace difíciles de estudiar.

1.2.2. Los materiales granulares en el desarrollo de la sociedades

La búsqueda de una comprensión científica de las leyes de la naturaleza y los esfuerzos para la explotación y el dominio de las reservas de materias primas y riquezas naturales surgen como procesos fundamentales en el desarrollo histórico y económico de un país.

La agricultura ha sido desde la antigüedad y continúa siendo la principal fuente de abastecimiento de productos alimenticios. Su descubrimiento propició el desarrollo de las civilizaciones, el adecuado manejo de la tierra, los procedimientos de siembra y cosecha, pero primordialmente el almacenamiento de los granos fueron factores de gran importancia para la permanencia de las culturas durante largos períodos.

Desde el período neolítico, la tierra se ha utilizado para la construcción de monumentos, tumbas, viviendas, vías de comunicación y estructuras para retención de agua; las antiguas civilizaciones mostraron la importancia de su desarrollo a través de la construcción de grandes obras de ingeniería, así, los materiales granulares son los más antiguos materiales de construcción.

En los pueblos antiguos, los materiales de construcción eran elegidos de acuerdo a sus recursos naturales disponibles como el zacate, estacas, limos, carrizos, arena, cal, piedras de diferentes clases y tamaños, el tezontle, piedras calizas, barro crudo cocido, así como diversas maderas tanto de bosques de altura y clima frío como de las zonas tropicales y subtropicales.

Consumada la conquista, las técnicas de construcción se vuelven una fusión de procedimientos americanos y europeos, como el uso combinado del adobe, el tepetate y el tezontle, con el ladrillo cocido, la argamasa de cal y arena. En México, los primeros constructores de templos y edificios, tuvieron que enfrentar la poca resistencia de los suelos, en los que no se podía excavar para la cimentaciones en virtud de que a muy poca profundidad encontraban agua, por

lo que las edificaciones se erigieron sobre muy reducidos cimientos, o sin éstos, lo que ocasiono que edificios altos y pesados comenzaran a hundirse.

Para evitar esta inestabilidad en las construcciones se procedió a hincar estacas de madera y sobre ellas la cimentación correspondiente, en otros casos se utilizaron como cimentación los restos de templos y palacios prehispánicos.

Resuelta en buena parte los problemas de cimentación, a fines de Siglo XVI se emplean a utilizar materiales como el tezontle, la chiluca y el tecali. En la construcción de casas-habitación se incorpora el uso del tepetate, que a su resistencia de carga sumaba su fácil corte y ligereza de peso.

Para el Siglo XVI se alcanzaron notables avances en los procesos de explotación y transformación de metales, esto debido a que la minería constituía una de las actividades más importantes y productivas tanto en la explotación de carbón para producción de energía o de la explotación de metales preciosos como el oro y la plata que constituían la principal fuente de riqueza.

A pesar del enorme uso que tenían los materiales granulares como materiales de construcción y de la importancia económica que otorgaba su explotación en la industria minera, los principales problemas de ingeniería eran resueltos en forma intuitiva o por tanteos, conllevando serios riesgos en lo referente tanto a seguridad como economía.

En la síntesis industrial de los compuestos de carbono, se utilizaba el alquitrán mineral como principal material de base de nuevos productos. Cuando se

dispuso de petróleo y otros recursos fósiles en grandes cantidades, los hidrocarburos sustituyeron al alquitrán como materia prima de la mayoría de los materiales sintéticos.

Así fue como la gran importancia que tomo el petróleo como generador de energía y el temprano dominio de ésta sobre la industria química provocó un amplio desarrollo en el campo de la mecánica de fluidos, así como un estancamiento en las investigaciones referentes al estudio de los materiales granulares.

Considerando todo lo anterior, el manejo de materiales granulares es uno de los procesos más antiguos pero también los más complejos, su variedad es enorme y sus propiedades variables en el tiempo y en el espacio, son difíciles de entender y de medir, a pesar de esto, antes del Siglo XX no se hizo un esfuerzo serio para atacar su estudio científicamente.

1.2.3. Los materiales granulares en nuestro entorno

Los materiales granulares son ubicuos, es decir, se pueden encontrar en cualquier parte, al definir el material granular como conjunto de partículas sólidas, independientemente de su tamaño. Este término abarca entonces un gran campo de materiales, desde la piedra braza de gran tamaño utilizada en la industria de la construcción hasta la harina para repostería.

Los materiales granulares están presentes en nuestra vida cotidiana en pequeña o gran escala, en la agricultura tenemos todos los granos alimenticios como el frijol

y el maíz. En la industria los tenemos en la producción de medicamentos, de caramelos, entre muchos otros. En la naturaleza, los suelos cualesquiera que sea su clasificación son entendidos como materiales granulares; así, la arena, la grava, el cemento y los procesos en los que se involucran estos dentro de una construcción son claro ejemplo de un flujo de material granular.

Los materiales granulares se almacenan en tolvas o silos que pueden variar de tamaño, desde un pequeño salero hasta un enorme silo dentro una planta de producción de asfalto.

Otra referencia a flujos de materiales granulares son los procesos físicos como la erosión, los deslaves de montañas, formación de dunas, flujos de maíz, frijol o cualquier semilla dentro de silos y de una forma generalizada el transporte y explotación de materias primas en diversas industrias.

A pesar de su aparente sencillez, los materiales granulares son materiales complejos y forman parte de un estado muy particular de la materia ya que no son sólidos, ni fluidos, sino un conjunto de partículas elementales en contacto unas con otras.

El flujo granular alrededor de objetos, ocurre con frecuencia en la naturaleza y en la industria. En la naturaleza con estructuras diseñadas para soportar las fuerzas que los suelos pueden generar y en la industria en los dispositivos diseñados para almacenar o transportar cualquier tipo de material.

1.2.4. Los materiales granulares dentro de la Ingeniería Civil

1.2.4.1. Materiales granulares en el diseño estructural

Los materiales granulares están presentes en muy diversos ámbitos dentro de la Ingeniería Civil, podemos hablar de todos ellos de una forma muy general dentro del ámbito del diseño estructural. Aquí se abarcan las diversas actividades que desarrolla un proyectista con el fin de determinar la forma, dimensiones y características detalladas de una estructura.

El diseño estructural se encuentra inserto en el proceso más general del proyecto de una obra civil. Es en la cual se definen las características que debe tener la construcción para cumplir de manera adecuada las funciones que esta destinada a desempeñar.

Así, la función de la estructura es absorber las sollicitaciones que se derivan del funcionamiento de la construcción. La estructura debe soportar una serie de acciones externas que ocasionan deformaciones, desplazamientos y ocasionalmente daños, todos estos constituyen su respuesta a dichas acciones.

Por acciones se entiende lo que generalmente se denominan cargas, incluye todos agentes externos que inducen en la estructura fuerzas internas, esfuerzos y deformaciones (Meli, 1985). De una forma particular el empuje de tierras, el empuje de materiales a granel o los deslaves son casos típicos en los cuales materiales granulares se presentan como ejemplos de acciones que deben soportar una estructura.

Todas estas acciones deben ser soportadas por estructuras especialmente diseñadas como muros de contención, túneles, tablaestacas, sótanos de edificios, silos, entre otros. Sin embargo, para poder diseñar estos de una forma adecuada, se debe conocer el comportamiento de las acciones del modo más real posible.

Las presas de tierra y/o enrocamiento representan un caso en el cual los materiales granulares forman una estructura y de una forma más amplia tenemos como materiales granulares al cemento, la grava y la arena, que junto con el agua forman el concreto con el cual se realizan innumerable número de construcciones.

1.2.4.2. Materiales Granulares durante el proceso Constructivo

Durante el desarrollo de un proyecto de Ingeniería Civil los materiales granulares se encuentran presentes en diversas etapas del proyecto. Los estudios de mecánica de suelos y las pruebas de exploración son necesarios para conocer la resistencia del mismo y así identificar el tipo adecuado de cimentación que requerirá la estructura.

La determinación de las fuerzas que actúan sobre una estructura enterrada no se puede hacer en forma correcta considerando únicamente la estructura o el terreno circundante, ya que el comportamiento de aquella dependerá del comportamiento de éste. Por tanto, se deben tener conocimientos sobre la interacción suelo - estructura para proyectar adecuadamente las estructuras sometidas a cargas de tierras

Dentro del proceso de diseño estructural, en caso de que se trate de una estructura construida a base de concreto reforzado, la relación agua-cemento y la dosificación de agregados son uno de los más importantes para el diseño de las mezclas a utilizar y para obtener la resistencia necesaria en el proyecto

Durante el desarrollo de la construcción, en el sitio de los trabajos tienen cabida gran número de procesos relacionados con maquinaria y movimientos de tierra, excavaciones, nivelaciones y compactaciones por mencionar solo algunos, además de las estructuras provisionales, como tablaestacados, que deben construirse durante las excavaciones y la construcción de la cimentación para que algún deslave de taludes cercanos no interfiera el proceso constructivo.

La explotación de los bancos de materiales y su adecuado manejo permite que la granulometría de los agregados sea la más favorable para la mezcla, los procesos de traslado de agregados, ladrillos, piedra brasa, cemento y otros materiales a la obra mediante camiones volteo. El manejo de éstos y la fabricación de concreto en la zona de construcción son procesos comunes de manejo de materiales granulares en cualquier obra.

Las acciones que ocurren en una planta productora de concreto son de vital importancia para que la mezcla llegue a la obra con la calidad adecuada. Aunado a lo anterior, en la obra los procedimientos de colocación del concreto, ya sea manual o con ayuda de una bomba, los procedimientos en el vibrado, son los que de igual forma darán a la estructura la resistencia con la cual se diseñó.

Después terminada la obra negra y finalmente en la parte de detallaje de obra, la colocación de yesos, algunos otros acabados y los morteros para aplanados y firmes, son realizados con materiales que de igual manera pueden clasificarse como granulares.

1.2.4.3. Situaciones reales con materiales granulares en Ingeniería Civil

Materiales granulares en la composición del concreto

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta compuesta de cemento Pórtland y agua une a los agregados para formar una masa semejante a una roca pues la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.

Los agregados son materiales granulares que se dividen en dos grupos: finos y gruesos, los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla No. 16 y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 o el de 25 mm.

Los agregados constituyen aproximadamente del 60 al 75% del volumen total del concreto, su selección y tratamiento es importante, deben consistir en partículas con resistencia adecuada, así como resistencia a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar un deterioro del

concreto. Es indispensable también el contar con una granulometría continua de tamaños de partículas.

Para el diseño de una mezcla de concreto, los ingredientes se especifican para alcanzar objetivos específicos, tales como resistencia a la abrasión, bajo cambio de volumen y costo mínimo. Los ingredientes se mezclan para asegurarse que los agregados gruesos, o de gran tamaño, se encuentren uniformemente distribuidos, que los agregados finos llenen los huecos entre los agregados más grandes y que todos se encuentren cubiertos por el cemento.

Los concretos se pueden clasificar como flexibles o rígidos. Estas características están determinadas principalmente por los materiales cementosos que se utilizan para aglutinar los agregados.

Los morteros se fabrican solo de cemento, agregado fino (arena) y agua; las propiedades de los morteros varían grandemente dependiendo de las propiedades del cemento que se utilice, de la proporción entre cemento y arena, de las características y granulometría de la arena, y de la proporción entre agua y sólido.

Los suelos como materiales granulares

El suelo es una estructura formada por partículas minerales y vacíos que pueden o no estar ocupados por agua y que ocasionalmente contiene materia orgánica (Juárez Badillo, 1980).

El suelo es el material de construcción más abundante del mundo y en muchas zonas constituye, de hecho, el único material disponible localmente. Cuando se emplea el suelo como material de construcción debe seleccionar el tipo adecuado de suelo, así como el método de colocación, y luego, controlar su colocación en la obra. Una parte esencial es cerciorarse que las propiedades del material colocado correspondan a las supuestas en el proyecto, o modificar el proyecto durante la construcción, teniendo en cuenta cualquier diferencia entre las propiedades de la obra construida y las que se consideraron en el proyecto.

Las condiciones imprevistas del subsuelo que se presentan durante la construcción constituyen la principal fuente de fallas. Las fallas de las estructuras como consecuencia un desconocimiento del suelo de construcción y de una deficiente cimentación puede exponer hasta la seguridad de los usuarios.

Las fallas de las estructuras durante la construcción se relacionan con condiciones indeseables del subsuelo no detectadas previamente o durante la construcción, así como con diseños deficientes o baja calidad en los trabajos. Ejemplos de aquellos son las cimentaciones soportadas por suelos expansivos o colapsables, rocas pegadas o sobre subsuelos débiles o compresibles no detectados; diseños de cimentación demasiado difíciles para construir apropiadamente, cimentaciones que no se comportan conforme a lo previsto; y materiales o técnicas de construcción deficientes.

Graves fallas se relacionan con la licuación de suelos, donde se sabe que los suelos saturados sin cohesión, relativamente sueltos, se vuelven inestables bajo cargas cíclicas como las que imponen los terremotos. Otras fallas son producidas

por una presión hidrostática baja y también daños en estructuras causados por el agua debido a la elevación del nivel freático, desestabilización de las cimentaciones por socavación y desbordamientos, o erosión por oleaje en diques o presas de tierra.

Bancos de materiales

La explotación de los bancos de materiales es un factor importante de la economía de dentro de la industria de la construcción. La explotación de un banco de materiales presupone el conocimiento preciso del proyecto, su alcance, claridad de sus especificaciones, el procedimiento de explotación y la calidad de los materiales utilizados.

La importancia de la adecuada explotación de un banco de materiales radica en que estos materiales serán utilizados en la construcción de carreteras, puentes, aeropuertos, presas, obras marítimas, construcción industrial, vivienda, desarrollo urbano, servicios municipales, etc. Un banco de materiales estará definido por la naturaleza del proyecto, por la calidad de los materiales que requiere, así como las especificaciones que debe cumplir el producto obtenido.

Movimientos de tierras

El movimiento de tierras es el movimiento de una parte de la superficie de la tierra de un lugar a otro y, en su nueva posición, crea una forma y condición física deseadas. El tipo de material que se va a excavar determina la gran parte de las ocasiones la maquinaria a utilizar, teniendo en cuenta el tipo de material

que se va a excavar, tipo y tamaño de equipo para transporte, capacidad de soporte de carga del piso original, capacidad de carga del material que se va a excavar, volumen de material excavado que se va a mover, volumen que se va a mover por unidad de tiempo, longitud de acarreo y tipo de camino con el que se cuenta para llevar a cabo el acarreo.

Un tractor es la máquina de mayor uso para excavaciones, el tractor con una cuchilla frontal se desplaza verticalmente para empujar la tierra de un lugar u otro y conformar la superficie. Durante el proceso constructivo se emplea infinidad de maquinaria durante los diversos procesos como son cargadores frontales, motoconformadoras para nivelar el terreno, equipos para perforación y compactadoras para la eliminación de ayudar a eliminar asentamientos y para hacer el suelo más impermeable al agua.

Así vemos que toda esta maquinaria constituye un caso explícito donde se puede identificar objetos sumergidos en materiales granulares en movimiento.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. Investigaciones previas

El estudio de los materiales granulares tiene una historia larga. Grandes científicos se han ocupado de su estudio, Coulomb en 1773 fue el primero en proponer la idea de fricción estática. En 1831 Faraday descubrió la inestabilidad convectiva en polvos con movimiento vibratorio. Reynolds para el año de 1885 observó que “un material granular muy compactado colocado en una envoltura flexible, su volumen aumenta invariablemente cuando la envoltura es deformada. Si no es posible estirar la envoltura pero si deformarla, no es posible causar ninguna deformación hasta que se llegue a una fuerza tal que esta rompa la envoltura o se fracture el material granular” definió con ello el término dilatancia de materiales granulares.

En épocas recientes y refiriéndonos al estudios en fuerzas en objetos sumergidos en corrientes de material granular, Weighardt en 1974 experimentó con cilindros inmersos parcialmente en arena y observó que la dependencia entre la velocidad de traslación y la sección transversal del cilindro era pequeña pero que sin embargo existía una relación cuadrática con el diámetro proyectado del cilindro. Dedujo que la fuerza de arrastre sobre el cilindro era generada por la fricción entre las partículas. En 1998 Albert *et al.* retomaron la idea observando resultados similares pero llegaron a establecer una dependencia lineal con respecto al diámetro proyectado, en lugar de la cuadrática establecida por Wighardt.

En el año de 1983 Atkinson *et al.* experimentaron con cuerpos sometidos a flujos granulares densos con velocidades bajas. Encontraron que la fuerza de arrastre no depende de la velocidad del flujo atribuyendo el fenómeno a las interacciones friccionales entre las partículas.

Tüzün y Nedderman en 1985 realizaron experimentos en un silo con obstáculos cuadrados y triangulares, al estudiar los patrones de flujo alrededor de los obstáculos descubrieron regiones de estancamiento en la parte superior de los objetos y una región vacía en la parte inferior de los mismo.

En el 2000, Hernández Cordero *et al.* encontraron que los cuerpos en silos toman gran parte del esfuerzo dinámico durante el vaciado del silo reduciendo las pérdidas. Wassgren *et al.* en 2003 mediante estudios numéricos ha encontrado que el arrastre de un flujo diluido aumenta al cuadrado de la velocidad. En 2003, Chahata *et al.* comprobaron que la fuerza de arrastre no depende de la velocidad del flujo, pero que si depende del tamaño del cilindro sumergido dentro del medio granular.

2.2. Comportamiento de los materiales granulares

Los materiales granulares son complejos y ello radica en que su comportamiento cambia en relación a las condiciones en las que se hallan sujetos. Por citar un ejemplo, en un proceso de compactación de suelos, los materiales granulares tendrían un comportamiento diferente al que se presentaría con el mismo material pero en movimiento dentro en una banda transportadora de agregados.

Al igual que un flujo se comporta de dos formas muy diferente dependiendo del número de Reynolds: flujo laminar para baja magnitud del número de Reynolds y turbulento para alta, los flujos de material granular también varían en su comportamiento dependiendo de su velocidad. Para analizarlo se modela de tres maneras diferentes, un flujo estático, se modela como sólido, un flujo lento se modela como fluido y un flujo rápido, como un gas.

Cuando las partículas del material no presentan fuerzas cohesivas, las fuerzas generadas entre ellas son de tipo repulsivo de tal suerte que la forma del material estará determinada por las condiciones de gravedad y de frontera. Cuando un material granular es sometido a un esfuerzo cortante, las partículas que lo conforman pueden fluir de manera similar a un fluido o resistir este esfuerzo cortante de igual forma que un material sólido.

El estudio de los materiales granulares esta basado en la mecánica de sólidos y la mecánica de fluidos. A partir de las ecuaciones fundamentales de ambas se deducen las ecuaciones constitutivas para un material granular.

2.3. Parámetros cuantificables de los materiales granulares

2.3.1. Ángulo de reposo

Ángulo entre la horizontal y el talud máximo que toma el suelo debido a procesos naturales. En los suelos granulares, el efecto de la altura del talud es despreciable; en los suelos cohesivos el efecto de la altura del talud es tan grande que el ángulo de reposo no tiene ningún significado.

2.3.2. Compacidad

El término compacidad se refiere al grado de acomodo alcanzado por las partículas del material dejando más o menos vacíos entre ellas. En un material muy compacto, las partículas sólidas que lo componen tienen un alto grado de acomodo y la capacidad de deformación bajo la carga del conjunto será pequeña, por el contrario en materiales poco compactos, el grado de acomodo es menor y por ende, su capacidad de deformación será mayor.

2.3.3. Densidad

La densidad de un material granular tiene que definirse tomando en cuenta tanto la densidad de las partículas sólidas que lo conforman, como la densidad del fluido existente entre dichas partículas; así la densidad del medio (ρ_s) puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$\rho_b = \rho_s (1 - \varepsilon) + \rho_g \varepsilon$$

Donde:

ρ_b es la densidad del medio

ρ_s la densidad del sólido

ρ_g la densidad del fluido intersticial, y

ε una fracción de vacíos definida como la fracción volumétrica del material que es ocupada por el fluido intersticial.

El término ρ_g generalmente se desprecia porque representa una porcentaje muy pequeño respecto a la densidad del sólido.

2.3.4. Diámetro equivalente

Los materiales granulares difícilmente tienen partículas de forma de una esfera perfecta, por ello se introdujo el concepto de diámetro equivalente, definido como una esfera que tiene un volumen igual al volumen una partícula.

$$D_s = (6V/\pi)^{1/3}$$

Donde

V es el volumen de la partícula

2.3.5. Dilatancia

Si un material granular muy compacto es colocado en un deposito flexible, tiene un aumento en su volumen cuando el depósito es deformado. Así, la dilatancia puede

definirse como la expansión de los suelos sin cohesión cuando se sujetan a una deformación por fuerzas de corte.

2.3.6. Distribución de presiones

Si la distribución de presiones respecto a la altura, de un material granular depositado por ejemplo en un contenedor alto, tuviera el mismo comportamiento que un fluido convencional, encontraríamos que la presión máxima en el fondo del depósito crecería indefinidamente conforme aumentara la altura de la columna de material. Sin embargo, este fenómeno es más complejo debido a la fricción interna existente entre las partículas, así, en una columna de material granular suficientemente alta, la presión llega a un valor máximo el cual es independiente de la altura, lo anterior tiene como explicación a las fuerzas de contacto generadas entre los granos y la fricción estática producida por las paredes del depósito, siendo estas paredes las que contienen el peso restante de la columna de material.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Objetivo

El objetivo de este trabajo es estudiar el flujo alrededor de una placa inmersa en una corriente granular: se experimentó mediante la utilización de un canal que permitió generar un flujo cuasi-bidimensional consistente en esferas de vidrio de 3 mm, de diámetro. Se probaron diversas relaciones largo-espesor de una placa metálica colocada con diversos ángulos de colocación dentro del canal y sometida a diversas velocidades de flujo.

Se obtuvieron mediciones de fuerza de arrastre y fuerza de sustentación sobre la placa. Se identificó la manera en que varían dichas fuerzas respecto a las propiedades del flujo.

Se tomaron fotografías para flujos con diferentes velocidades, ángulo de colocación y longitud de la placa.

3.2 Modelo Experimental

Se fabricó un canal de sección rectangular de 30 cm x 4 cm y una altura de 125 cm, (figura 1). La estructura del canal fue construida de madera y las paredes del canal fueron construidas con vidrio de 5 mm de espesor, con objeto de visualizar el flujo y realizar posteriormente la captura de imágenes fotográficas.

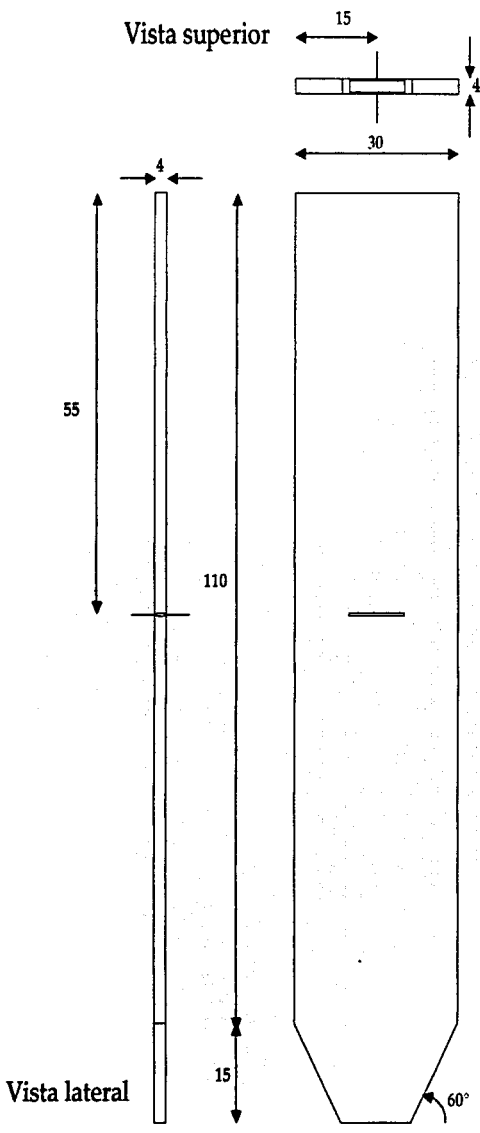
El espesor de 4 cm permite idealizar el flujo como cuasi-bidimensional. El ancho 30 cm nos permite despreciar los efectos de las paredes en la placa. La altura del canal 125 cm permite el desarrollo completo del flujo.

La parte final del canal cuenta con una tobera con un ángulo de 60° mediante la cual se controla la velocidad de salida del material de acuerdo a la apertura de las compuertas de la parte inferior. Esta varió de 1 a 14 cm

El material granular utilizado consistió en esferas de vidrio de 3 mm de diámetro con una densidad aproximada de 2500 kg/m^3

Las tres placas que se usaron se fabricaron de latón de 5 mm de espesor con las siguientes dimensiones: $3 \times 3.8 \text{ cm}^2$, $5 \times 3.8 \text{ cm}^2$ y $10 \times 3.8 \text{ cm}^2$ (figura 2). A estas se les colocó un perno de 2 mm de diámetro que permite que la placa quede flotando entre las paredes del canal, ajustar el ángulo de colocación de placa y también, contar con un apoyo en el cual se puede realizar la medición de fuerzas

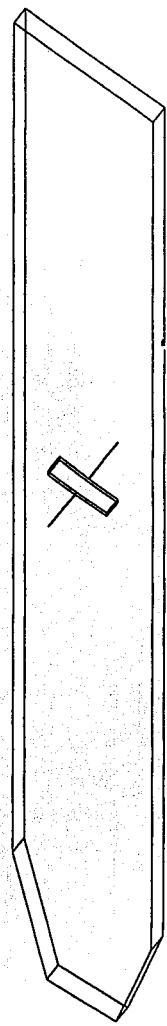
Para el apoyo de estos pernos se realizó un orificio de 3 mm en la parte central de las paredes del canal.



Vista frontal

Dimensiones en cm.

Figura 1
DIMENSIONES DEL CANAL



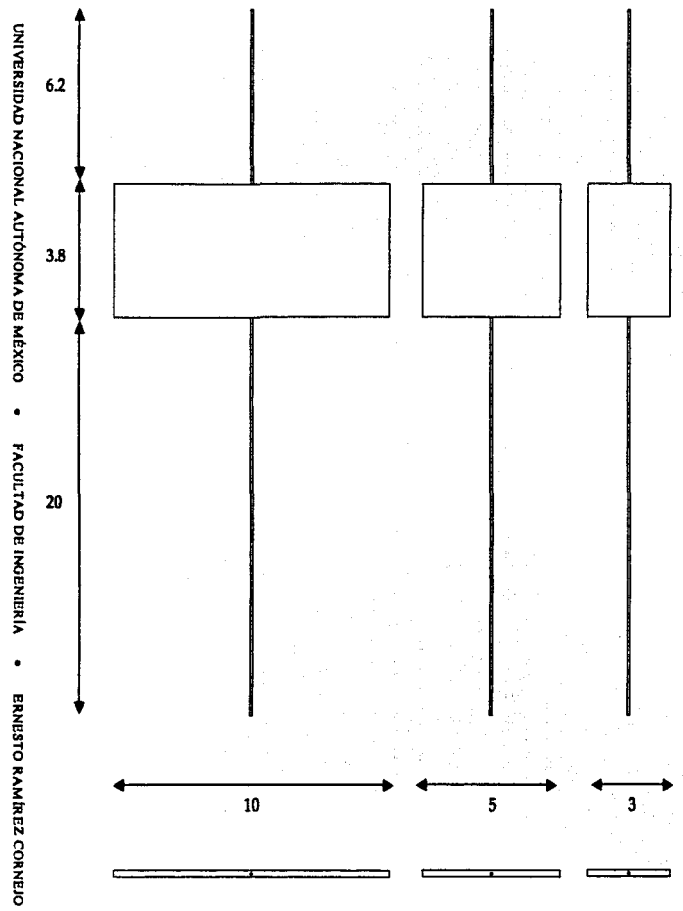
Isométrico

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2

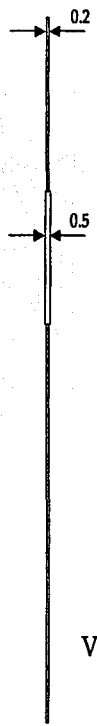
DIMENSIONES DE LAS PLACAS

Vista superior



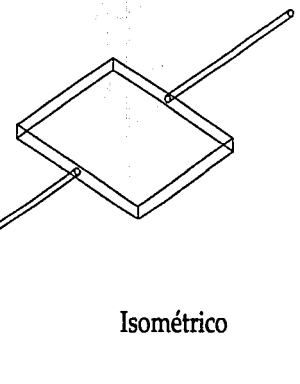
Vista frontal

Dimensiones en cm.



Vista lateral

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



FLUJO ALREDEDOR DE UNA PLACA INMERSA EN UNA CORRIENTE GRANULAR

El canal se encuentra sostenido mediante una base de madera que permite su colocación de manera vertical. Adicionalmente, en la parte exterior del canal se colocó una estructura metálica la cual permite colocar un contenedor en la parte superior del canal. En esta misma estructura se apoya la placa al ángulo con el cual se experimentará y se sujeta el sistema de medición de fuerzas (figura 3).

El contenedor colocado sobre el canal permite tener almacenadas las esferas de vidrio necesarias para generar un flujo continuo en un período de tiempo suficiente para realizar los experimentos.

Adicionalmente, se implementó un sistema de recirculación de material. Las partículas se transportan neumáticamente del recipiente inferior donde se deposita cuando termina el flujo dentro del canal, al contenedor de la parte superior. Para ello se adaptó una aspiradora que al ser encendida permitía elevar el material y mantenerlo en su interior, cuando la aspiradora se apagaba depositaba inmediatamente el material al interior del canal. Este sistema se uso con el fin de agilizar el proceso de llenado del canal y evitar su realización de manera manual.

Se colocaron también 6 reflectores para obtener una iluminación adecuada durante la captura de imágenes.

MODELO EXPERIMENTAL

- 1.- Canal
- 2.- Placa
- 3.- Galgas
- 4.- Compuertas
- 5.- Contenedor
- 6.- Contenedor
- 7.- Sistema de aspersión
- 8.- Reflectores
- 9.- Tarjeta de adquisición de datos
- 10. Computadora

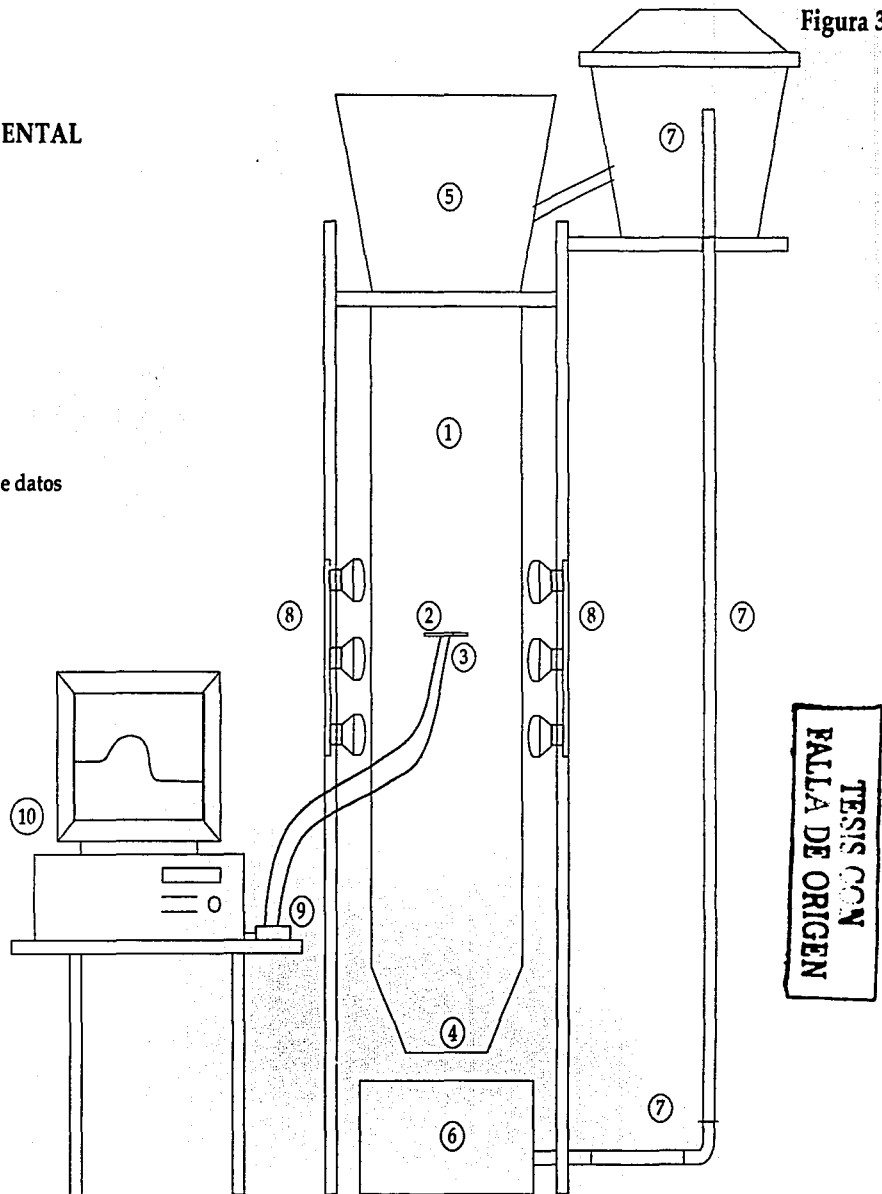


Figura 3

3.3. Sistema de medición

La medición de las fuerzas se realizó por medio de la colocación de 2 galgas extensométricas colocadas directamente al perno de la placa, y apoyadas en la estructura metálica. Las galgas son alimentadas por medio de una fuente de poder con un voltaje de 10 V.

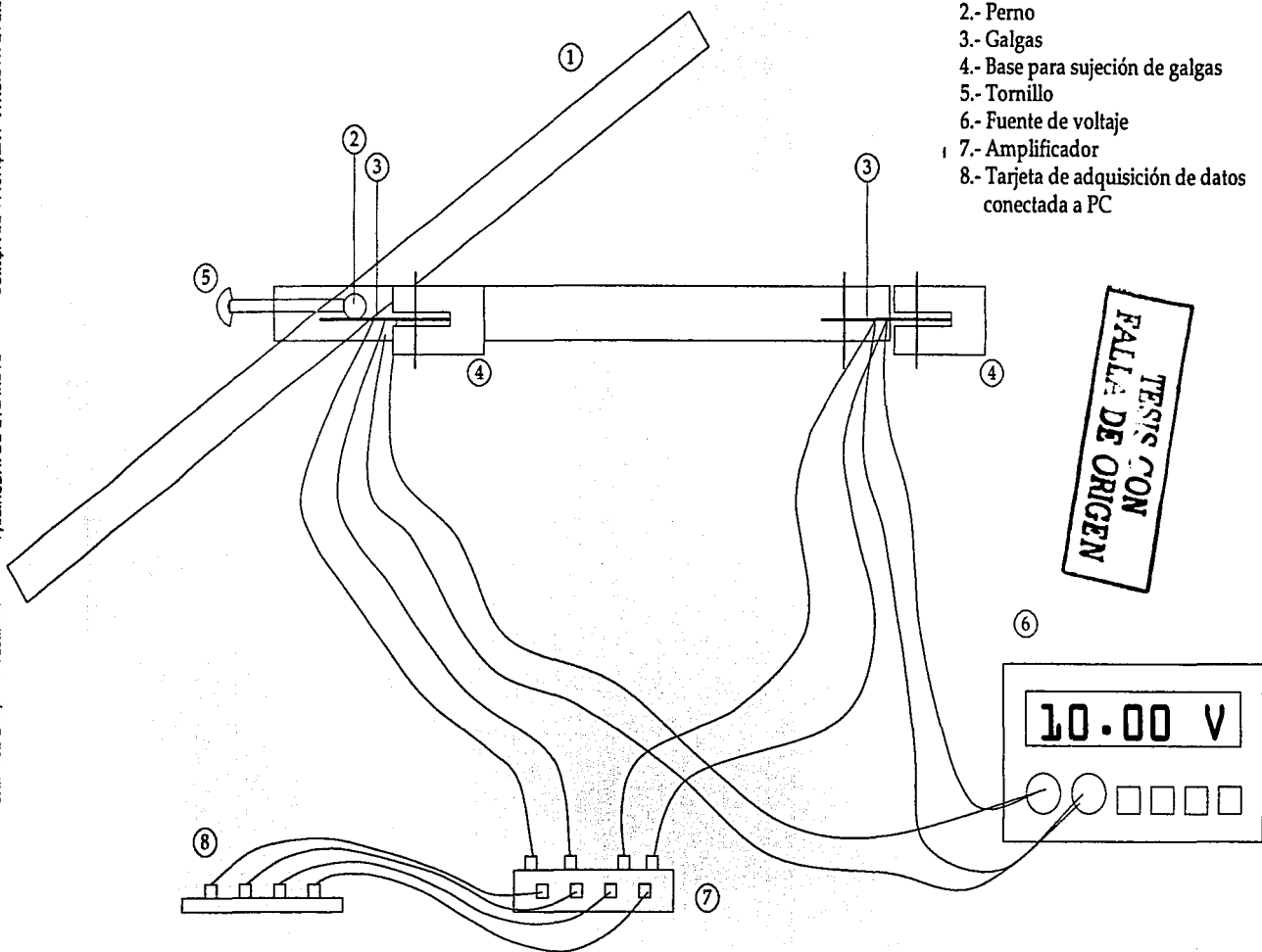
Las galgas cuando están en equilibrio no registran voltaje entre sus terminales de medición. Cuando una galga es deformada se genera un cambio en su resistencia que provoca un diferencia de potencial que puede ser registrada por medio de un multímetro.

Para la medición de la fuerza de arrastre se colocó una galga directamente bajo el perno de la placa. Al correr el flujo, las partículas empujan la placa, así, el perno deforma la galga registrando la señal de diferencial de voltaje; pero también las partículas tratan de hacer rotar a la placa. La fuerza de sustentación se obtenida de manera analítica a partir del cálculo de la fuerza de arrastre. Para medir el momento alrededor del centro de la placa fue colocada la segunda galga mediante un brazo de palanca de 11.5 cm, al correr el flujo y al tratar de rotar el perno, la palanca en un extremo se eleva deformando el lado contrario donde se encuentra sujeta la galga (figura 4).

La señal de voltaje generada fue amplificada y recabada en computadora mediante una tarjeta de adquisición de datos. Estos fueron recolectados con un programa de cómputo en Lab-View. Este fue programado específicamente para recoger mediciones de voltaje y que en este caso permite obtener muestras a 1000

Figura 4

DISPOSITIVO PARA LA MEDICIÓN DE FUERZAS



- 1.- Placa
- 2.- Perno
- 3.- Galgas
- 4.- Base para sujeción de galgas
- 5.- Tornillo
- 6.- Fuente de voltaje
- 7.- Amplificador
- 8.- Tarjeta de adquisición de datos conectada a PC

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FLUJO ALREDEDOR DE UNA PLACA INMERSA EN UNA CORRIENTE GRANULAR

mediciones por segundo, graficarlas y almacenarlas en un archivo de texto para su posterior procesamiento.

3.4. Captura de imágenes

La toma de fotografías se llevo a cabo a una distancia fija con una cámara digital Finepix S1pro, con una resolución de 6.13 millones de píxeles, con la técnica de obturador abierto. Para lograr imágenes claras y rastrear la trayectoria, o estancamiento de las partículas durante su interacción con la placa, se variaron las condiciones de iluminación.

3.5. Variables del experimento

Mediante la apertura de la compuerta en la parte final del canal se controló la velocidad del flujo. Las aberturas de la compuerta fueron 2, 3, 5, 7, 9, 11 y 13 cm. Para todas las velocidades generadas, la placa fue colocada con los siguientes ángulos: 0°, 20°, 45°, 70° y 90°

Las mediciones de fuerzas de arrastre y sustentación se realizaron con todas las combinaciones velocidades-ángulo para una placa de 10 mm.

La captura de imágenes fotográficas se realizó con todas las combinaciones velocidades-ángulo y placas metálicas de 3, 5 y 10 mm.

3.6. Proceso experimental

3.6.1. Obtención de la velocidad del flujo

La medición de la velocidad del flujo se obtuvo por medio del cálculo del gasto de flujo granular. Para ello, se utilizó un cronómetro y una báscula.

Se colocó la placa en el interior del canal, se verificó la verticalidad del mismo; en la parte superior e inferior del canal y apoyados en la estructura metálica se ubicaron los contenedores que guardaban el material granular antes y después del flujo; posteriormente se llenó el canal completamente, incluyendo el material albergado en la tolva superior.

Realizado lo anterior se procedió a abrir la compuerta 1 cm, a la vez que se activó el cronómetro. Cuando el material termina de descargar y el flujo termino se midió el tiempo. Se pesó el material depositado en el contenedor inferior con ayuda de una báscula.

Dicha operación se efectuó para aperturas de compuertas de 1 a 14 cm, cada centímetro, obteniendo para cada apertura el tiempo de descarga y el peso.

Una vez obtenidos los datos anteriores se utilizaron las ecuaciones siguientes:

$$m = m_p / t \quad (3.1)$$

donde:

m = Gasto másico del material (kg/s)

m_p = Masa total de las partículas utilizadas (kg)

t = tiempo de descarga (s)

$$Q = m / \rho_b \quad (3.2)$$

donde:

Q = Gasto volumétrico del material (m^3/s)

m = Gasto másico del material (kg/s)

ρ_b = Densidad del material granular (kg/m^3)

$$\rho_b = \rho_s (1-\varepsilon) + \rho_g \varepsilon \quad (3.3)$$

donde:

ρ_g = densidad el material intersticial

ρ_s = densidad de las partículas = 2500 kg/m^3

Se considera el valor empírico de $1-\varepsilon = 0.64$

Considerando a $\rho_s \gg \rho_g$,

$$\rho_b = \rho_s (1-\varepsilon) \quad (3.4)$$

Finalmente

$$V = Q/A \quad (3.5)$$

donde:

V = Velocidad media del flujo (m/s)

A = Área transversal del flujo (m²) = a x e

a = Ancho del canal = 0.3 m

e = Espesor del canal = 0.04 m

3.6.2. Captura de imágenes

Para la toma de fotografías el procedimiento a realizar fue el siguiente:

De la misma manera se ubicó la placa a estudiar en el interior del canal, se corroboró la verticalidad del mismo; en la parte superior e inferior del canal se ubicaron los contenedores, se llenaron el canal y la tolva superior.

Se colocó a la cámara fotográfica a una distancia en la que se pudiera abarcar tanto vertical como horizontalmente la mayor área de flujo posible, teniendo como centro el perno de la placa, se encendieron los reflectores con los cuales se evitó el reflejo que producía el vidrio en las imágenes.

Se efectuaron pruebas preliminares para conocer la iluminación, la velocidad del obturador y la apertura del diafragma adecuadas para cada velocidad de flujo.

Se abrieron las compuertas para un tamaño de placa, un ángulo de colocación y una velocidad de flujo específica. Se tomó el mayor número de fotografías

posibles con la cámara digital durante una corrida y posteriormente se almacenaron en una computadora.

Se revisaron las imágenes corroborando su calidad tanto como de iluminación, como en el rastreo de las partículas. Se repitió el experimento cuando las imágenes obtenidas no eran muy claras.

Lo anterior se efectuó con las 3 placas, todas con sus 5 ángulos de colocación y para cada ángulo, sus 7 velocidades de flujo.

3.6.3. Medición de fuerza de arrastre y momento

Como los anteriores experimentos, se colocó la placa en el interior del canal en la parte superior e inferior del canal se colocaron los contenedores; se llenaron el canal y la tolva superior.

Se colocaron las galgas conforme a lo explicado en el modelo experimental, se verificó la correcta posición de las mismas antes de la apertura de las compuertas.

Se conectaron las galgas a la fuente de poder dándoles un voltaje de 10 V, se verificaron las conexiones entre las galgas y el amplificador, el amplificador y la tarjeta de adquisición de datos, y la tarjeta con la PC. Se generó un nuevo archivo Lab-view antes de cada uno de los experimentos, este archivo es el que almacenó los diferenciales de potencial enviados por las galgas al momento de ser deformadas por el flujo del material.

Verificado lo anterior se encendió la fuente de poder, se arrancó el programa de cómputo en la recolección de datos e inmediatamente se abrió la compuerta; al finalizar el flujo y terminar la captura de datos en la PC, se guardó el archivo y se apagó la fuente.

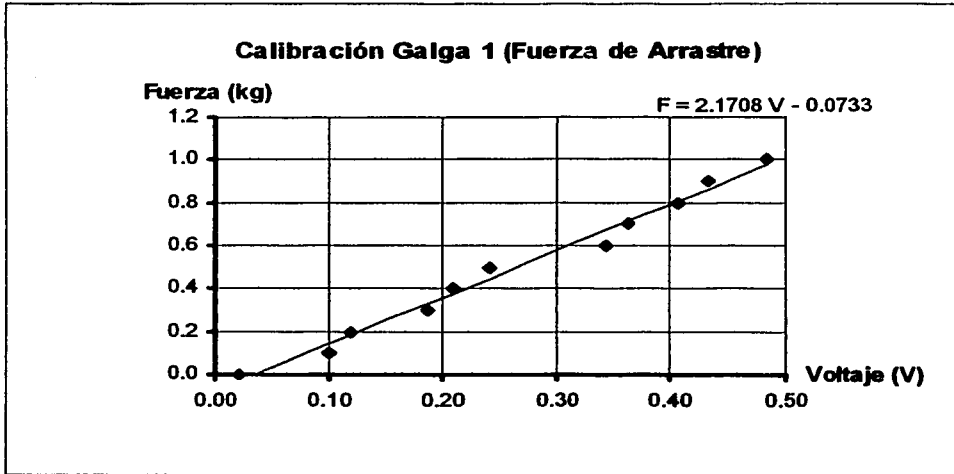
Se repitió el procedimiento para todos los ángulos de colocación y velocidades de flujo con la placa de 10 cm.

3.6.4. Calibración de la galga

Para interpretar los resultados del voltaje como fuerzas se obtuvo una calibración empírica. Se colocó una placa, se instaló y encendió el sistema de medición conectado a la fuente de poder y a la computadora. En el perno de la placa se colocaron pesos conocidos y la computadora registró el voltaje producido por cada uno de ellos.

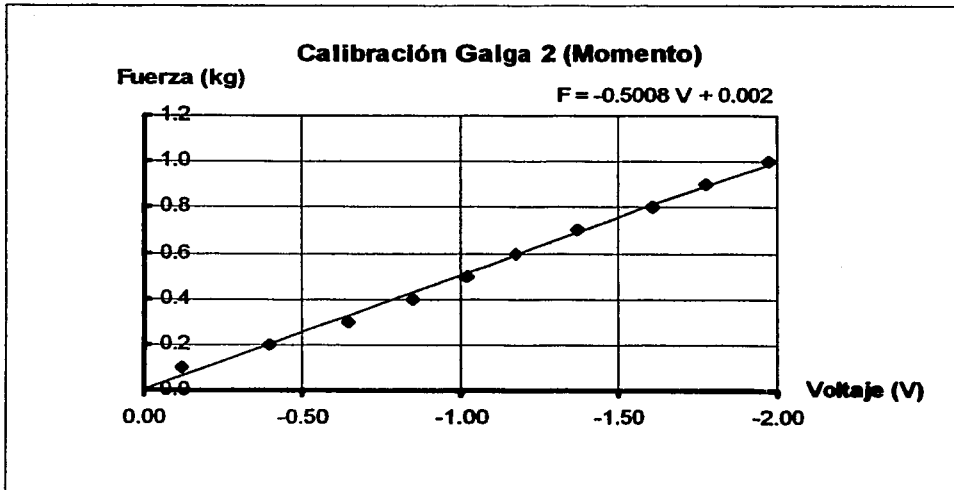
De lo anterior, los datos obtenidos se muestran en las gráficas 1 y 2 para las ambas galgas extensométricas.

Gráfica 1



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Gráfica 2



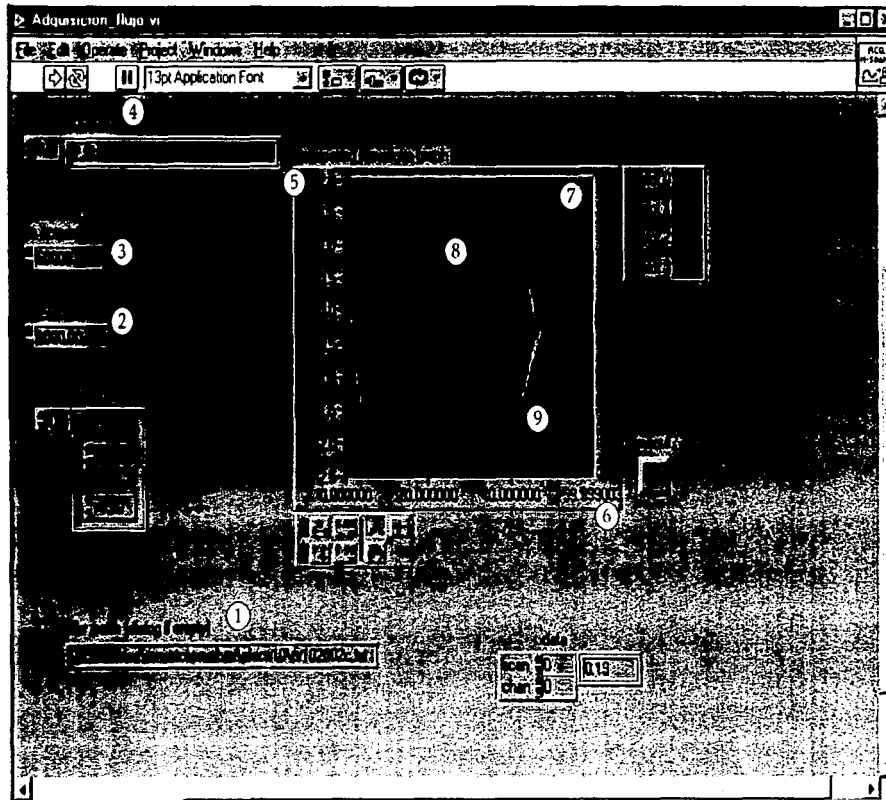
3.6.5. Registro de resultados

Después de terminar cada uno de los experimentos y de recabarlos en la computadora, se presenta una pantalla en Lab-view como la mostrada en la figura 5.

De la misma forma se genera un archivo de texto que contiene los datos de voltaje generados por las dos galgas durante cada milisegundo. Con el archivo obtenido y las ecuaciones obtenidas en la calibración de la galga se logra transformar, mediante un análisis posterior, las mediciones de voltaje en mediciones de fuerza.

Figura 5

PANTALLA TÍPICA EN LAB-VIEW CON EL RESULTADO DEL EXPERIMENTO

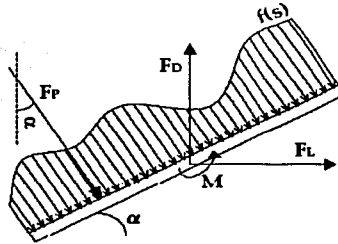


- 1.- Nombre del archivo
- 2.- No. de escaneos por segundo
- 3.- No. de escaneos toteles
- 4.- Canales utilizados en la tarjeta de adquisición de datos
- 5.- Eje de voltaje
- 6.- Eje de tiempo
- 7.- Gráficas Voltaje - Tiempo
- 8.- Gráfica Fuerza de Arrastre
- 9.- Gráfica Momento

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.6.6. Cálculo de la fuerza de sustentación

Estableciendo ecuaciones de equilibrio al centro de la placa del siguiente diagrama de cuerpo libre y conociendo el valor experimental de la fuerza de arrastre se obtuvo el valor de la fuerza de sustentación.



F_D = Fuerza de Arrastre

F_L = Fuerza de sustentación

F_P = Fuerza resultante del empuje del material sobre la placa

$f(s)$ = Distribución de fuerzas sobre la placa

$$F_P = \frac{1}{L} \int_{L/2}^{L/2} f(s) ds$$

$$F_D = F_P \cos \alpha$$

$$F_L = F_P \sen \alpha$$

$$F_P = \frac{F_D}{\cos \alpha}$$

$$F_L = \frac{F_D \sen \alpha}{\cos \alpha}$$

$$F_L = F_D \tan \alpha \quad (3.6)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Velocidad del flujo

La tabla 1 muestra la abertura de la compuerta y los datos obtenidos para el tiempo de descarga del material. La gráfica 3 muestra la relación entre dichos valores.

Apertura de compuerta	Tiempo de Descarga
	t
(m)	(s)
0.01	161.35
0.02	51.00
0.03	24.70
0.04	16.05
0.05	11.35
0.06	8.70
0.07	7.25
0.08	6.02
0.09	5.15
0.10	4.30
0.11	3.65
0.12	3.12
0.13	2.73
0.14	2.50

TABLA 1

En la tabla 2 están contenidos los datos obtenidos después de utilizar las ecuaciones 3.1 a 3.5 planteadas en el capítulo anterior para obtener de la velocidad del flujo.

Las constantes utilizadas para dicho cálculo son:

Masa total de las partículas utilizadas (mp) = 24.95 kg

Densidad del sólido (ρ_s)= 2500 kg/m³

$1 - \varepsilon = 0.64$ (Válida para un material granular sin dispersión de tamaño)

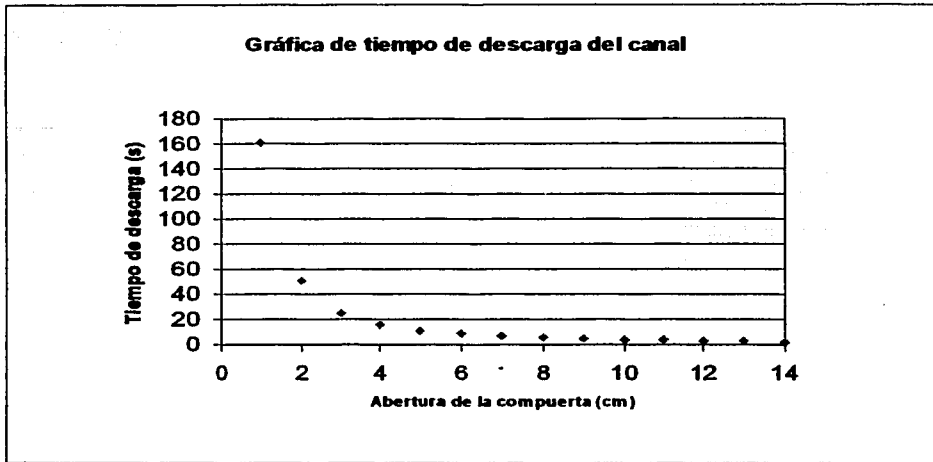
Área transversal = 0.012 m²

Apertura de compuerta	Tiempo de Descarga	Densidad del Material Granular	Área Transversal	Gasto Másico	Gasto Volumétrico	Velocidad Media	Velocidad Media
	t	ρ_b	A	m	Q	V	V
(m)	(s)	(kg/m ³)	(m ²)	(kg/s)	(m ³ /s)	(m/s)	(mm/s)
0.01	161.35	1600	0.012	0.155	0.00010	0.008	8.047
0.02	51.00	1600	0.012	0.489	0.00031	0.025	25.460
0.03	24.70	1600	0.012	1.009	0.00063	0.053	52.568
0.04	16.05	1600	0.012	1.553	0.00097	0.081	80.900
0.05	11.35	1600	0.012	2.196	0.00137	0.114	114.400
0.06	8.70	1600	0.012	2.866	0.00179	0.149	149.246
0.07	7.25	1600	0.012	3.439	0.00215	0.179	179.095
0.08	6.02	1600	0.012	4.141	0.00259	0.216	215.687
0.09	5.15	1600	0.012	4.841	0.00303	0.252	252.124
0.10	4.30	1600	0.012	5.798	0.00362	0.302	301.962
0.11	3.65	1600	0.012	6.830	0.00427	0.356	355.736
0.12	3.12	1600	0.012	7.990	0.00499	0.416	416.166
0.13	2.73	1600	0.012	9.132	0.00571	0.476	475.618
0.14	2.50	1600	0.012	9.972	0.00623	0.519	519.375

TABLA 2

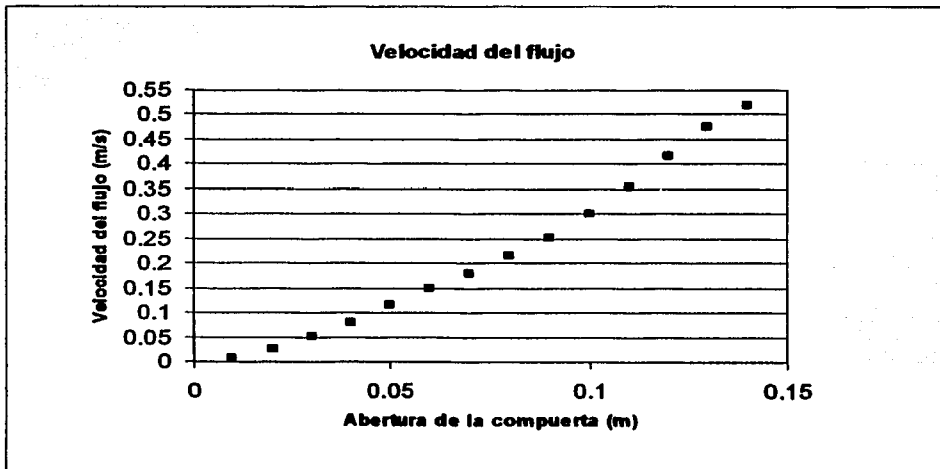
La gráfica 4 muestra la relación entre la apertura de las compuertas y la velocidad del flujo generada.

Gráfica 3



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Gráfica 4



4.2. Fuerza de Arrastre, Fuerza de Empuje y Momento

4.2.1 Gráfica típica de variación de la fuerza

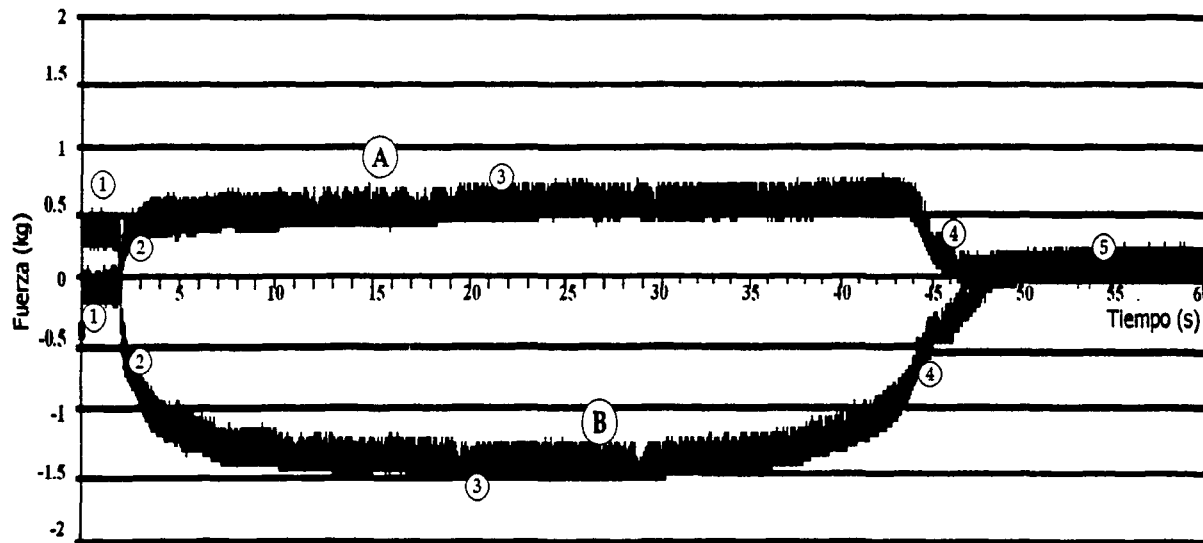
La gráfica 5 muestra los voltajes obtenidos en un experimento típico. Se muestran los voltajes como función del tiempo.

En todas las gráficas la obtenidas para la fuerza de arrastre como para la fuerza obtenida para el cálculo del momento, se pueden identificar claramente 5 regiones. En la primera región la fuerza mostrada depende de las condiciones particulares de acomodo de las partículas durante el llenado del canal, es por eso que esta fuerza varía para cada uno de los experimentos realizados. La segunda región representa un periodo transitorio, es aquí donde se está acelerando el flujo.

En la tercera región se llega a un estado de fuerza permanente. Es esta fuerza la que se considera como valor de fuerza de arrastre. Terminado este período encontramos nuevamente otra etapa transitoria donde el flujo está apunto de concluir para llegar finalmente a la quinta región, una región horizontal donde el canal se encuentra vacío.

Nótese que en todas las regiones se puede observar una fluctuación característica, resultado de la interacción discreta de las partículas con la placa.

GRÁFICA TÍPICA DE FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN COMO FUNCIÓN DEL TIEMPO



- 1.- Fuerza de Arrastre
- 2.- Fuerza de Sustentación

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

- 1.- Configuración inicial antes de la descarga
- 2.- Régimen transitorio
- 3.- Fuerza constante
- 4.- Régimen transitorio
- 5.- Canal vacío

4.2.2. Fuerza como función de la velocidad

La gráfica 6 muestra el resumen de los resultados obtenidos de las mediciones de la fuerza de arrastre, variando el ángulo de colocación de la placa y la velocidad de flujo

La gráfica 7 muestra los datos calculados de fuerza de sustentación utilizando la ecuación 3.6 del capítulo anterior.

En la gráfica de fuerza de arrastre se aprecia que para cualquier ángulo de colocación, la magnitud de la fuerza es independiente de la velocidad del flujo, de la misma manera observamos que para el primer ángulo de colocación de la placa 0° se tiene el valor máximo de fuerza de arrastre y conforme aumenta el ángulo de la placa el valor va decreciendo. Este es un resultado esperado porque la placa en posición horizontal (0°) soporta un volumen de material granular mayor que la placa con cualquier otro ángulo de colocación

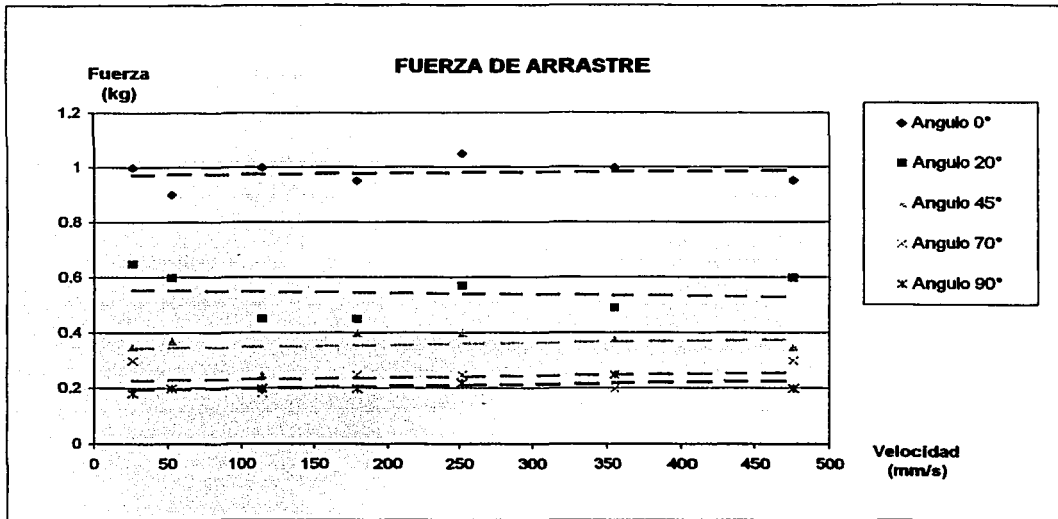
De acuerdo a los cálculos realizados para la obtención de las fuerzas de sustentación a partir de los resultados de fuerza de arrastre, en la gráfica 7 se aprecia que para la placa colocada horizontalmente el valor es cero y conforme aumenta el valor del ángulo de colocación el valor de la fuerza aumenta. Es decir, conforme el ángulo tiende a la verticalidad se alcanzan valores de empuje más altos.

En la gráfica 8 se aprecia que el momento respecto al centro de la placa decrece conforme aumenta la velocidad del flujo, se observa también la diferencia

existente entre los resultados obtenidos entre las fuerzas obtenidas de un ángulo de colocación a otro.

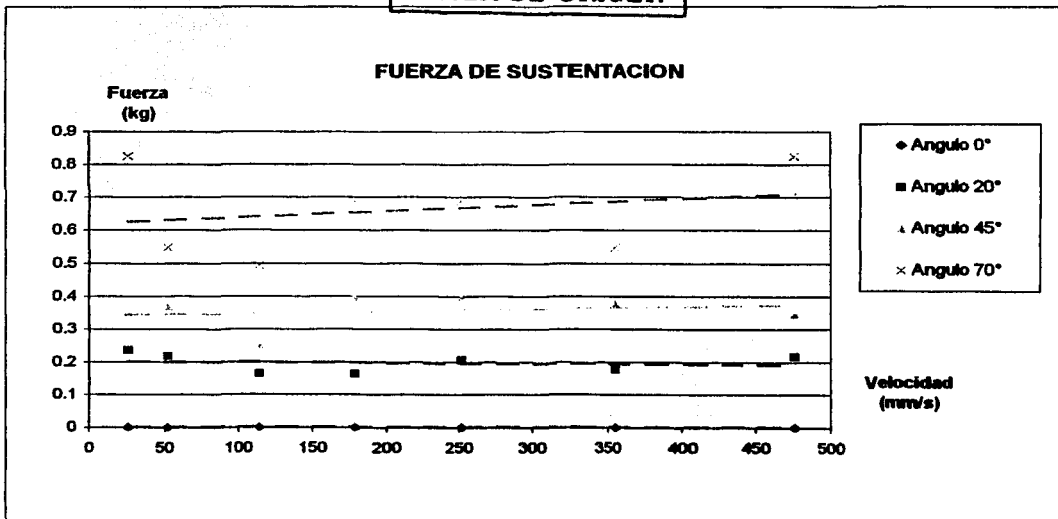
Estos resultados muestran que los momentos mayores se dan para un ángulo de colocación de 45° , para ángulos de 20° y 45° el valor de la fuerza es menor. Para la placa colocada horizontalmente el valor de fuerza esta alrededor de cero, debido a que en esta posición la placa solo está sometida a la fuerza de arrastre.

GRAFICA 6

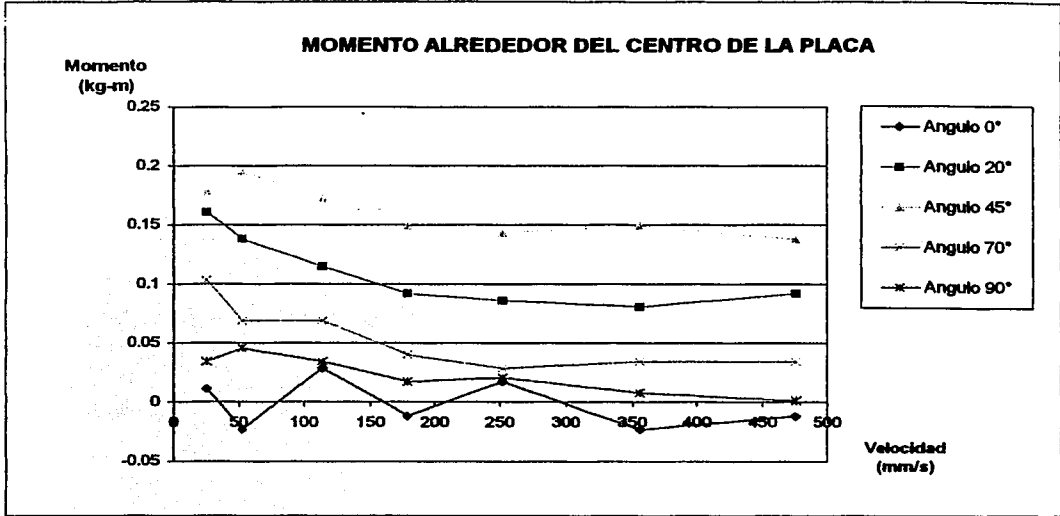


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

GRAFICA 7



GRAFICA 8



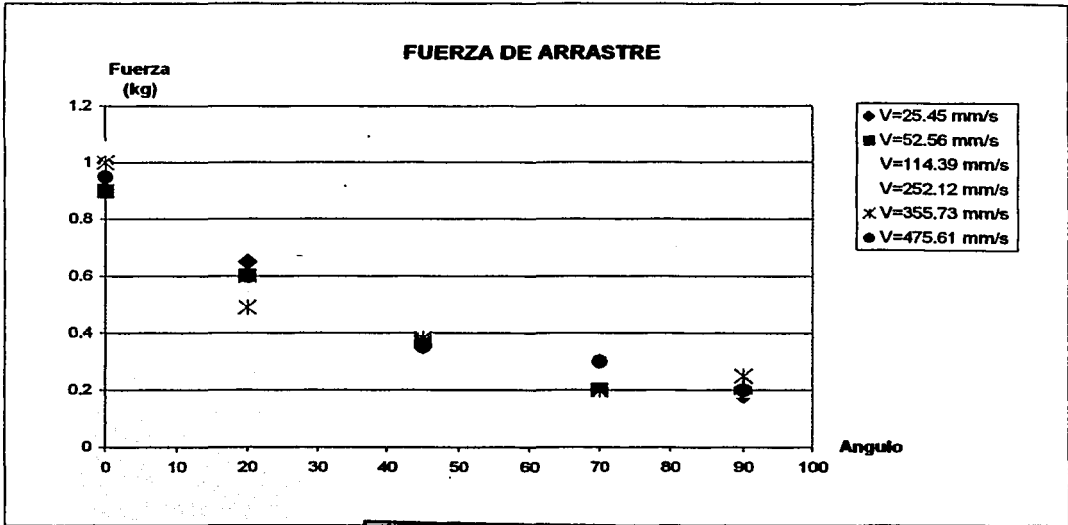
TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

4.2.3. Dependencia de la fuerza con el ángulo de colocación

En la gráfica 9 se aprecia la relación entre la fuerza de arrastre como función del ángulo de colocación de la placa. Como ya se había comentado, se aprecia que dicha fuerza disminuye conforme aumenta el ángulo. Caso contrario para la fuerza de empuje (gráfica 10), donde se observa que la fuerza aumenta a medida que la placa se coloca a mayores ángulos.

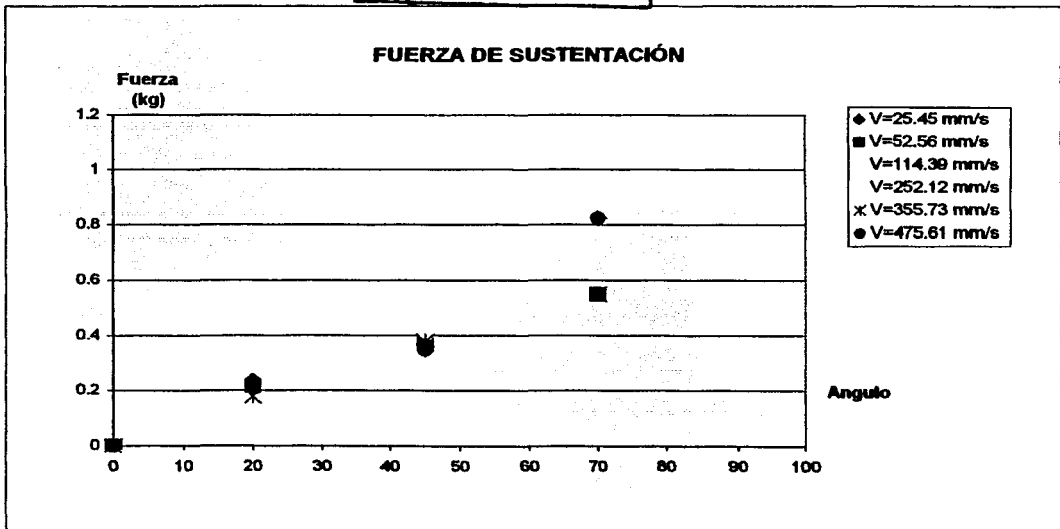
La gráfica 11 nos muestra que el momento comienza con un valor nulo y alcanza su valor máximo en los 45° donde comienza a decrecer para hasta regresar al valor cero para un ángulo de 90°

GRÁFICA 9

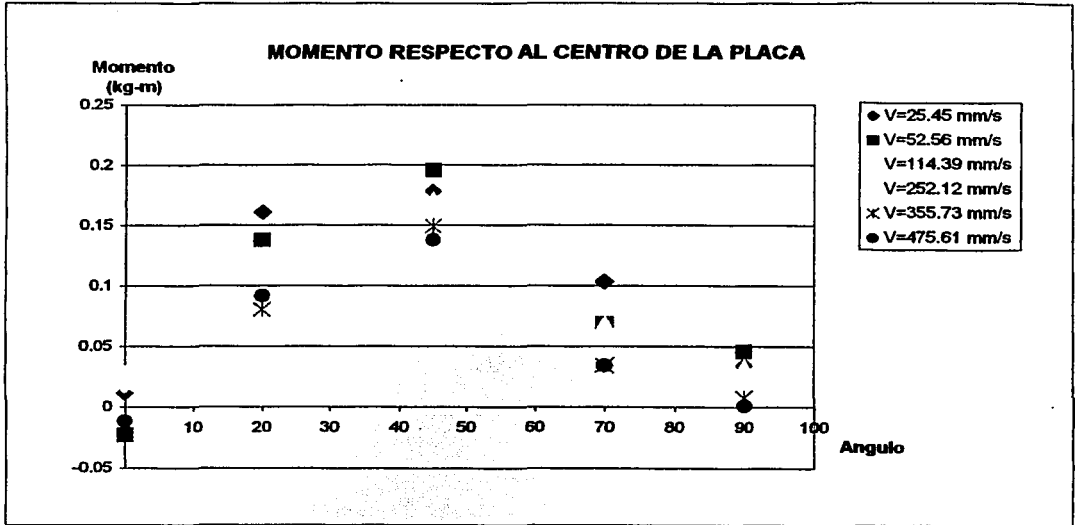


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

GRÁFICA 10



GRÁFICA 11



TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

4.2.4. Coeficientes de arrastre y sustentación

Las gráficas 12, 13 y 14 nos presentan los valores de fuerzas de arrastre, fuerza de sustentación y momento de manera adimensional en escala logarítmica, para ello se definieron el Coeficiente de Arrastre (C_D) y el coeficiente de sustentación (C_L) como:

$$C_L, C_D = \hat{F}_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho_b V^2 A_p}$$

el Coeficiente de Momento como:

$$M_D = \hat{M}_P = \frac{M_P}{\frac{1}{2} \rho_b V^2 A_p L}$$

y el Número de Froude como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Donde:

F_D = Fuerza

M_P = Momento

ρ_b = densidad efectiva

V = Velocidad del flujo

A_p = Área proyectada por la placa

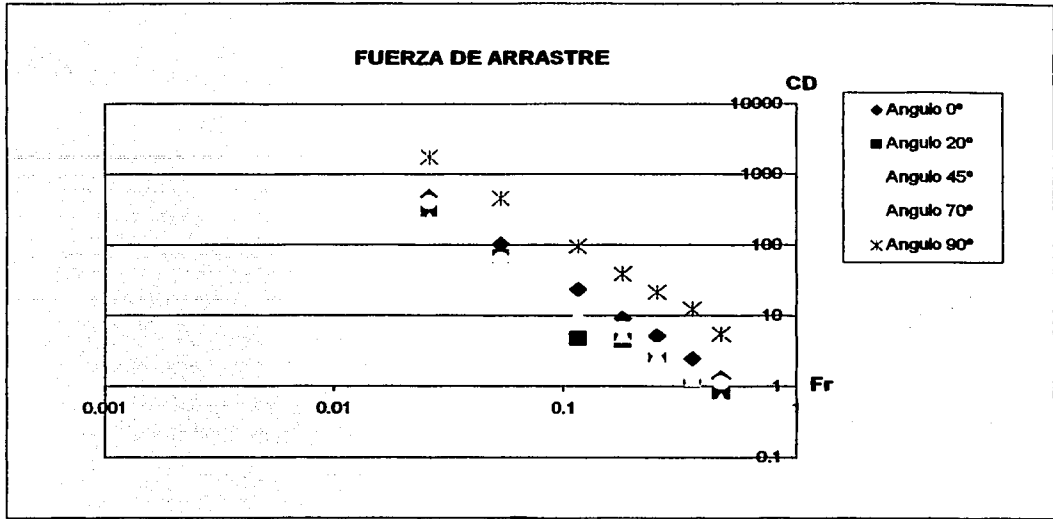
$$A_p = L \cos \alpha \text{ (e)}$$

L = Longitud de la placa

e = Espesor de la placa

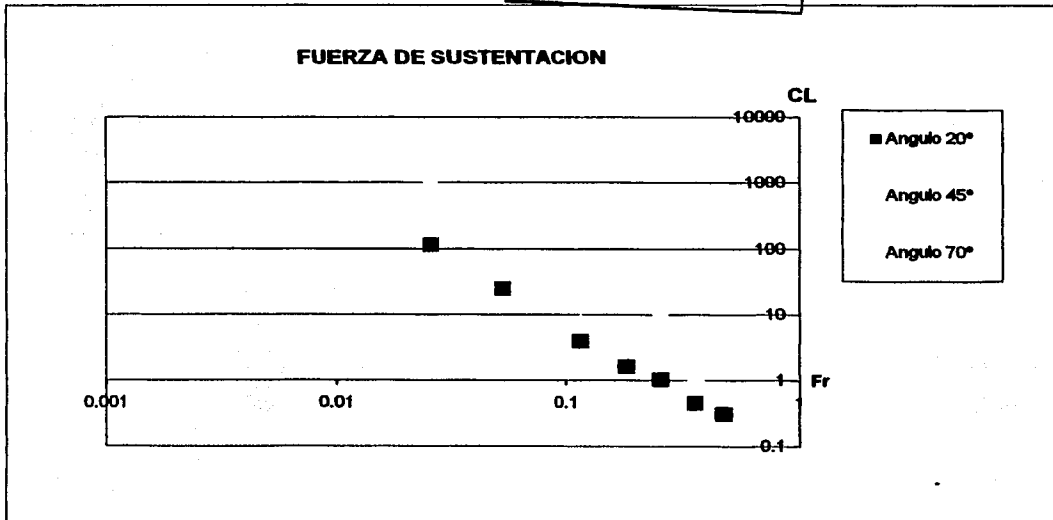
El número de Froude es el número adimensional que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y de gravedad, y para este caso nos proporciona un valor de velocidad adimensionalizada.

GRAFICA 12

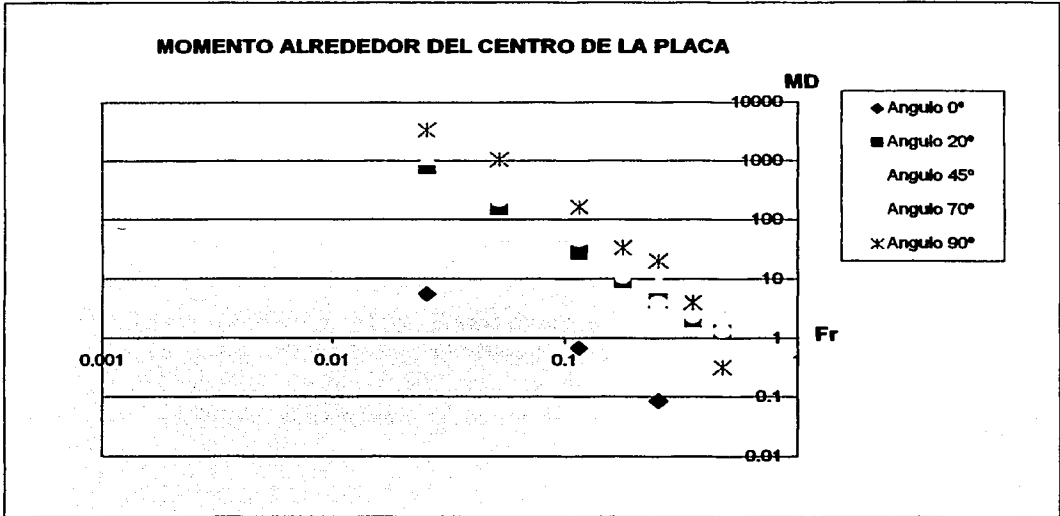


TESIS CON FALLA DE ORIGEN

GRAFICA 13



GRAFICA 14



4.3. Visualización del flujo

4.3.1. Imagen típica del flujo alrededor de la placa

La figura 5 nos muestra el comportamiento del material alrededor de la placa de 10 cm. colocada horizontalmente y con una velocidad de flujo de 252 mm/s.

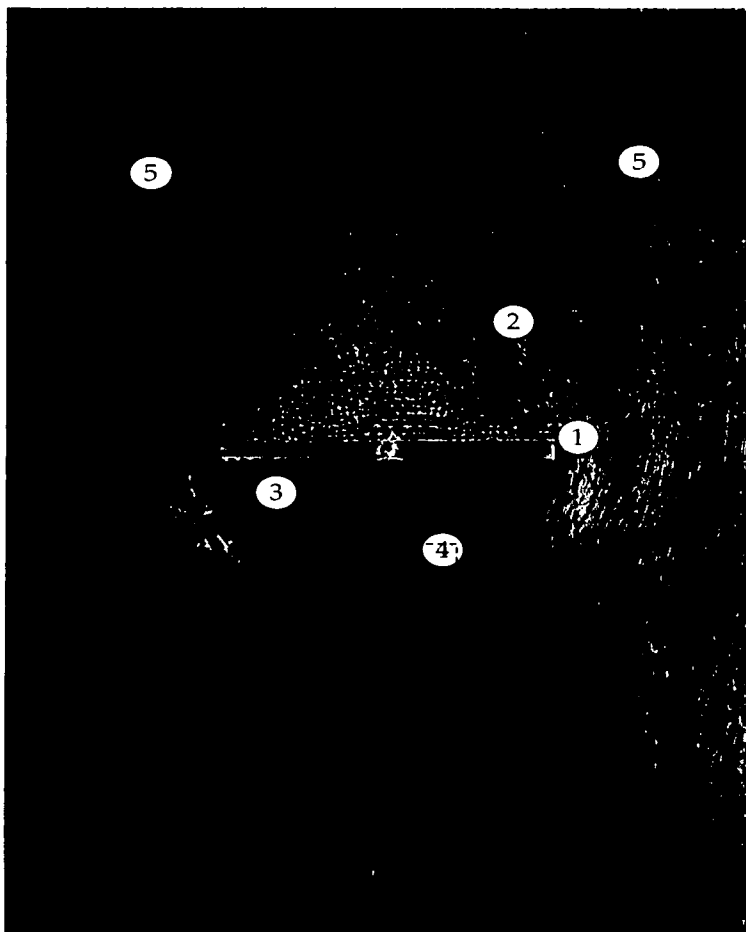
En la imagen capturada se aprecian 5 elementos característicos de la mayoría de las imágenes logradas. Al centro de la fotografía se aprecia la placa metálica sostenida por el perno en su parte central. Aguas arriba de la placa se aprecia una zona de estancamiento del material cuyo tamaño depende del ángulo de colocación de la placa; aguas abajo del material se presenta una estela hueca cuya configuración y tamaño esta de igual forma relacionada por el ángulo de la placa y la velocidad del flujo.

Alrededor de la placa, la zona de estancamiento y la estela, la imagen nos permite apreciar la trayectoria que siguen las partículas durante el flujo, durante dicho rastreo y a partir de cierta velocidad, se presenta una zona de choque en la parte baja de la estela que es más notoria para velocidades altas.

En las fotografías de cada uno de los experimentos realizados, los elementos mencionados pueden aparecer o no, debido a al ángulo de colocación de la placa y la velocidad del flujo. Lo anterior nos lleva a conclusiones importantes de la configuración de este flujo granular alrededor de la placa en función de las variables experimentales.

FIGURA 6

IMAGEN TÍPICA DEL COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL ALREDEDOR DE LA PLACA



- 1.- PLACA
- 2.- ZONA DE ESTANCAMIENTO
- 3.- ESTELA
- 4.- ZONA DE CHOQUE
- 5.- TRAYECTORIA DEL MATERIAL

TIPO DE FALLA CON
FALLA DE ORIGEN

4.3.2. Series fotográficas

A continuación se presentan las imágenes realizadas agrupadas de la siguiente manera:

4.3.2.1 Serie 1. Variación respecto al tamaño de la placa.

Se muestran tres series fotográficas con mismas condiciones de ángulo de colocación y velocidad de flujo para placas de longitudes 3, 5 y 10 cm.

En las series 2.1, 2.2 y 2.3 se logra apreciar que las configuraciones que adquiere el flujo alrededor de la placa, tanto en la zona de estancamiento aguas arriba del flujo como en la estela hueca formada aguas abajo de la placa tienen las mismas características y son sensiblemente proporcionales respecto al tamaño de la placa.

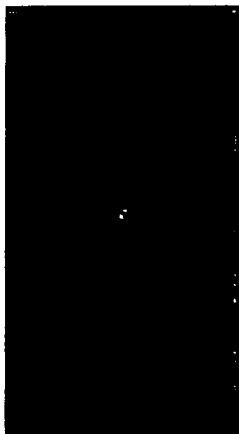
Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto a la longitud de la placa

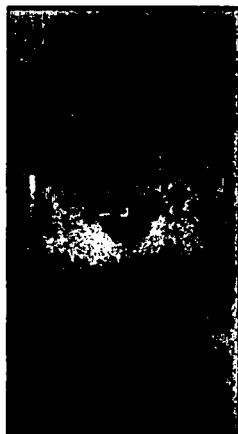
Serie 1.1

Velocidad del flujo: 179.09 mm/s

Ángulo de colocación de la placa: 0°



Longitud de la placa: 3 cm



Longitud de la placa: 5 cm



Longitud de la placa: 10 cm

TESIS CON
FALLA DE
ORIGEN

Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto a la longitud de la placa

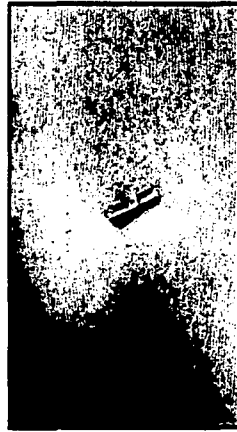
Serie 1.2

Velocidad del flujo: 52.54 mm/s

Ángulo de colocación de la placa: 20°



Longitud de la placa: 3 cm



Longitud de la placa: 5 cm



Longitud de la placa: 10 cm

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto a la longitud de la placa

Serie 1.3

Velocidad del flujo: 252.12 mm/s

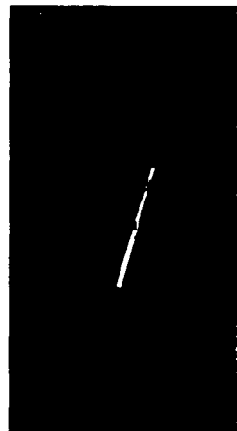
Ángulo de colocación de la placa: 70°



Longitud de la placa: 3 cm



Longitud de la placa: 5 cm



Longitud de la placa: 10 cm

4.3.2.2 Serie 2. Variación respecto a la velocidad del flujo.

Se presentan cuatro series de siete fotografías, utilizando la placa de 10 cm colocada en cada uno de sus ángulos estudiados, en ellas se observan las configuraciones obtenidas al cambiar la velocidad del flujo.

De las fotografías mostradas para los ángulos de 0° y 20° (Series 2.1 y 2.2) se puede apreciar a velocidades bajas la configuración de la estela es triangular. A medida que la velocidad aumenta esta configuración va tomando una forma semicircular con una zona de choque en la parte baja de la estela. A velocidades altas la estela tiene una forma elíptica donde la zona de choque de partículas es muy visible. La zona de estancamiento no presenta cambios aparentes a pesar del aumento de velocidad

Sin embargo, en la placa colocada a 45° (Serie 2.3) la configuración triangular de la estela no aparece a bajas velocidades y la zona de choque solo es visible para las más altas velocidades estudiadas. La zona de estancamiento se presenta en la esquina superior de la placa y solo no perceptible a velocidades bajas.

Para el ángulo de 70° (Serie 2.4) la placa aparentemente no representa un obstáculo para el desarrollo del flujo no importando la velocidad del mismo. No se presenta zona de estancamiento de material y la estela hueca solo es perceptible en las últimas velocidades estudiadas.

Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto de la velocidad de flujo

Serie 2.1

Características de la placa

Ángulo de colocación: 0°

Longitud: 10 cm



Velocidad del flujo:
25.46 mm/s



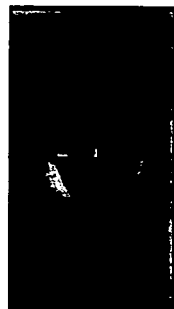
Velocidad del flujo:
52.56 mm/s



Velocidad del flujo:
114.40 mm/s



Velocidad del flujo:
179.09 mm/s



Velocidad del flujo:
252.12 mm/s



Velocidad del flujo:
355.73 mm/s



Velocidad del flujo:
465.61 mm/s



TESIS
CIVIL
UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE
COLOMBIA
INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES
EN MATERIALES

Instituto de Investigaciones en Materiales

Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto de la velocidad de flujo

Serie 2.2

Características de la placa

Ángulo de colocación: 20°

Longitud: 10 cm



Velocidad del flujo:
25.46 mm/s



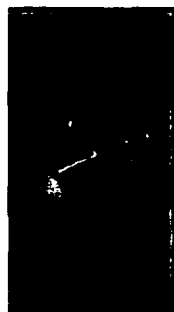
Velocidad del flujo:
52.56 mm/s



Velocidad del flujo:
114.40 mm/s



Velocidad del flujo:
179.09 mm/s



Velocidad del flujo:
252.12 mm/s



Velocidad del flujo:
355.73 mm/s



Velocidad del flujo:
465.61 mm/s



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

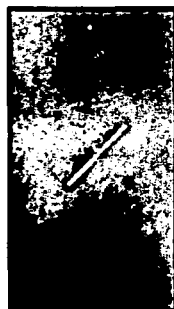
Variación respecto de la velocidad de flujo

Serie 2.3

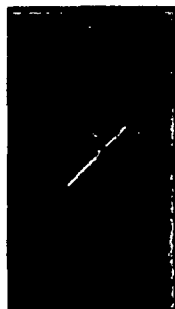
Características de la placa

Ángulo de colocación: 45°

Longitud: 10 cm



Velocidad del flujo:
25.46 mm/s



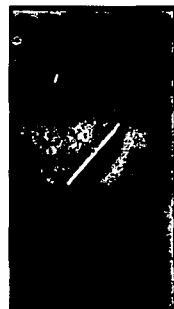
Velocidad del flujo:
52.56 mm/s



Velocidad del flujo:
114.40 mm/s



Velocidad del flujo:
179.09 mm/s



Velocidad del flujo:
252.12 mm/s



Velocidad del flujo:
355.73 mm/s



Velocidad del flujo:
465.61 mm/s



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto de la velocidad de flujo

Serie 2.4

Características de la placa

Ángulo de colocación: 70°

Longitud: 10 cm



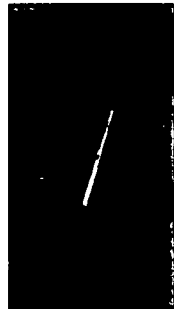
Velocidad del flujo:
25.46 mm/s



Velocidad del flujo:
52.56 mm/s



Velocidad del flujo:
114.40 mm/s



Velocidad del flujo:
179.09 mm/s



Velocidad del flujo:
252.12 mm/s



Velocidad del flujo:
355.73 mm/s



Velocidad del flujo:
465.61 mm/s



PREPARADO POR
FALLA DE ORIGEN

4.3.2.3. Serie 3. Variación respecto al ángulo de colocación de la placa

Se muestran siete series de cinco imágenes, utilizando la placa de 10 cm donde a una velocidad constante, se presenta el cambio en la configuración a partir del cambio del ángulo de colocación.

En las imágenes de la serie 3.1 con el flujo a la velocidad más baja, se observa que la zona de estancamiento solo aparece a con los ángulos de 0° y 20° y con una configuración triangular. En la serie 3.2 la configuración de igual forma la aparece a los mismos ángulos pero comienza a tomar formas redondeadas.

La serie 3.3 muestra las estelas tendiendo a la formación de semicírculos y a esta velocidad aparece una pequeña estela en la placa a 45° . Para la siguiente velocidad estudiada (serie 3.4) las estelas en los tres primeros ángulos (0° , 20° y 45°) son semicírculos bien definidos y se aprecia una leve zona de choque. En los ángulos 70° y 90° no se ha apreciado hasta ahora ninguna zona característica.

En las fotografías de la serie 3.5 las estelas formadas en la placa colocada a 0° , 20° y 45° la estela semicircular hueca comienza a aumentar de tamaño y la zona de choque de material de los 2 primeros ángulos es más notoria. La serie 3.6 nos muestra un nuevo aumento de la estela y la aparición de esta en la placa colocada a 70° . También la zona de choque del material es mayor y aparece por primera vez en la placa a 45° .

La última velocidad estudiada (Serie 3.7) nos ilustra tanto el mayor tamaño de la estela para los 0° , 20° , 45° y 70° como el de la zona de choque para 0° , 20° y 45° .

Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto al ángulo de colocación de la placa

Serie 3.1

Velocidad del flujo: 25.46 mm/s

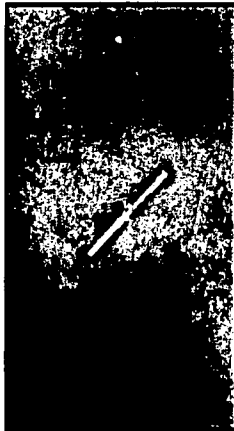
Longitud de la placa: 10 cm



Ángulo: 0°



Ángulo: 30°



Ángulo: 45°



Ángulo: 70°



Ángulo: 90°



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto al ángulo de colocación de la placa

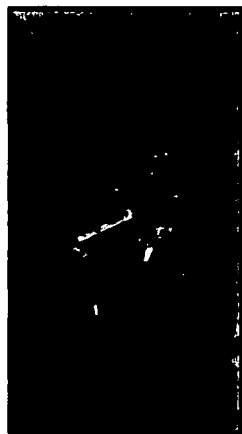
Serie 3.2

Velocidad del flujo: 52.56 mm/s

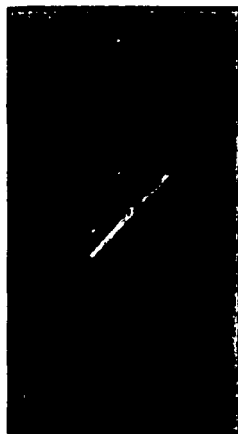
Longitud de la placa: 10 cm



Ángulo: 0°



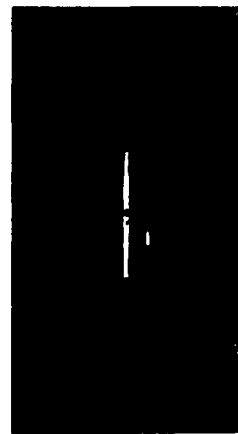
Ángulo: 20°



Ángulo: 45°



Ángulo: 70°



Ángulo: 90°

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

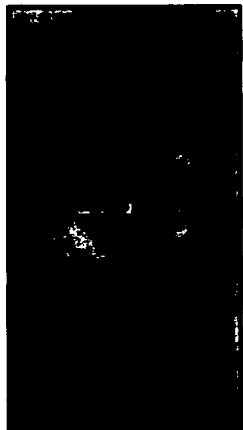
Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto al ángulo de colocación de la placa

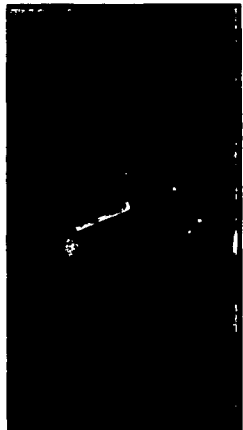
Serie 3.3

Velocidad del flujo: 114.40 mm/s

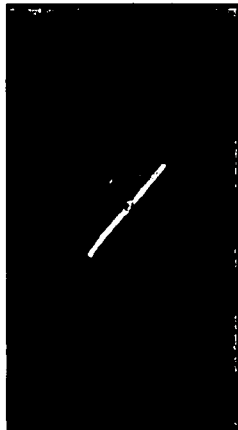
Longitud de la placa: 10 cm



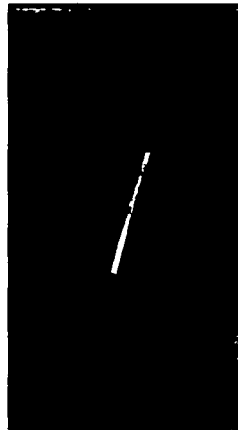
Ángulo: 0°



Ángulo: 20°



Ángulo: 45°



Ángulo: 70°



Ángulo: 90°



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

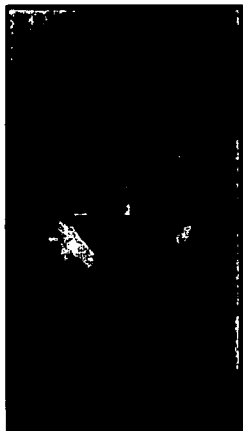
Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto al ángulo de colocación de la placa

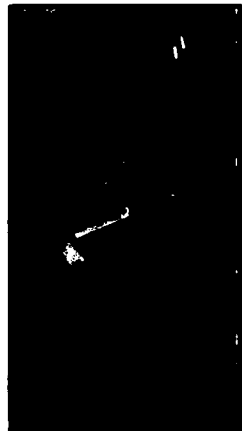
Serie 3.4

Velocidad del flujo: 179.09 mm/s

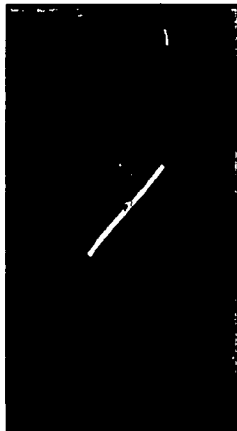
Longitud de la placa: 10 cm



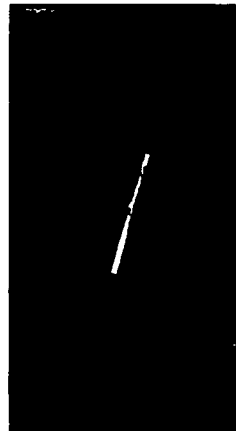
Ángulo: 0°



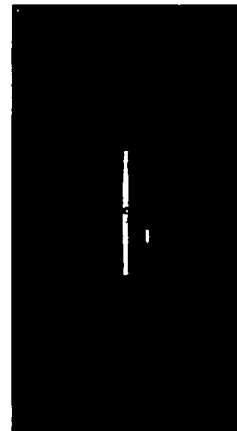
Ángulo: 20°



Ángulo: 45°



Ángulo: 70°



Ángulo: 90°



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

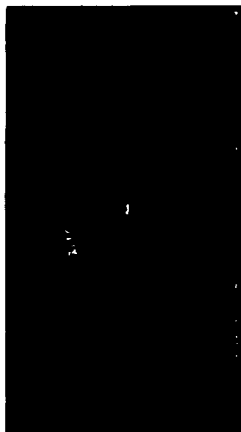
Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto al ángulo de colocación de la placa

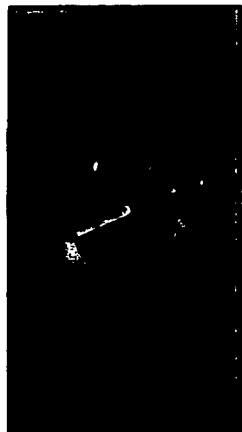
Serie 3.5

Velocidad del flujo: 252.12 mm/s

Longitud de la placa: 10 cm



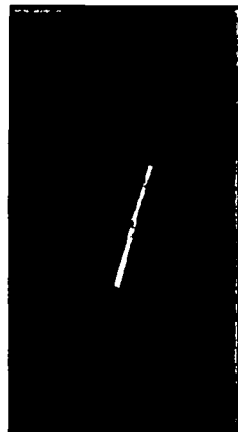
Ángulo: 0°



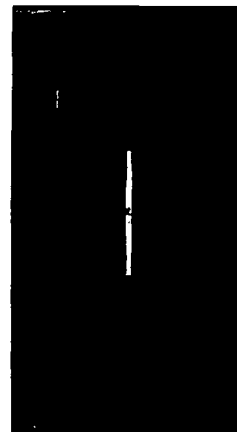
Ángulo: 20°



Ángulo: 45°



Ángulo: 70°



Ángulo: 90°

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

tt

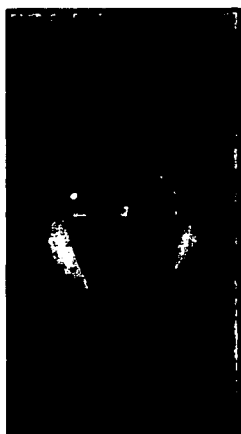
Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto al ángulo de colocación de la placa

Serie 3.6

Velocidad del flujo: 355.73 mm/s

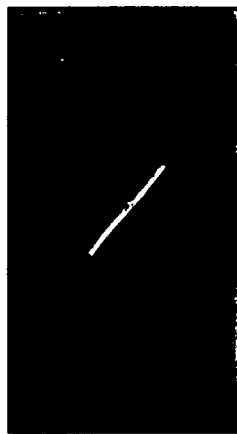
Longitud de la placa: 10 cm



Ángulo: 0°



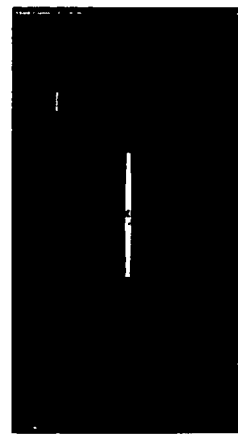
Ángulo: 20°



Ángulo: 45°



Ángulo: 70°



Ángulo: 90°



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Visualización de un flujo granular denso alrededor de una placa

Variación respecto al ángulo de colocación de la placa

Serie 3.7

Velocidad del flujo: 465.61 mm/s

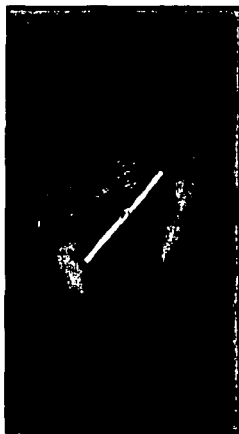
Longitud de la placa: 10 cm



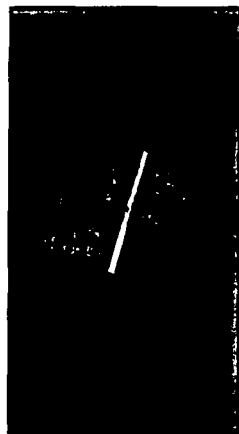
Ángulo: 0°



Ángulo: 20°



Ángulo: 45°



Ángulo: 70°



Ángulo: 90°

RESISTENCIA
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIONES

Para este estudio se construyó un canal rectangular de paredes de vidrio que permitió la generación de un flujo cuasi-bidimensional. Se colocó en el centro del canal una placa inmersa a diferentes ángulos dentro del flujo de material granular denso conformado por partículas de vidrio de 3 mm de espesor. Se experimentó con diferentes velocidades de la corriente granular.

Se obtuvieron mediciones de fuerzas de arrastre y momento y se calculó la fuerza de empuje. Se tomaron fotografías que describen la configuración del flujo alrededor de la placa.

De lo realizado se puede deducir lo siguiente:

La fuerza ejercida por un material granular sobre una placa no depende de la velocidad del flujo. La fuerza de arrastre de material sobre la placa disminuye conforme el ángulo de colocación pasa de 0° (horizontal) a 90° . Por lo contrario, la fuerza de empuje aumenta a medida que también aumente el ángulo. Respecto al momento, este toma su máximo valor cuando la placa está colocada a 45°

La configuración geométrica de la estela bajo la placa depende del ángulo de colocación de la misma y de la velocidad del flujo. La zona de estancamiento no cambia a pesar de un aumento de la velocidad de flujo.

A la misma velocidad de flujo y con la placa colocada al mismo ángulo, las configuraciones de la estela son proporcionales entre placas de distinta longitud.

Para velocidades de flujo bajas, la estela sólo se forma si la placa tiene un ángulo de colocación menor al ángulo de reposo del material.

Para placas colocadas con ángulos menores al del reposo, a velocidades bajas los límites de la estela son sensiblemente rectos y toman una forma parabólica conforme aumenta la velocidad del flujo. Para placas colocadas con ángulos mayores al del reposo, la estela solo se forma a velocidades altas.

Estos resultados solo son válidos para las condiciones de flujo denso, como trabajo a futuro se podría experimentar con flujos diluidos, con otro tamaño de material o con un flujo granular conformado por partículas de diversos diámetros.

Este trabajo fue realizado con condiciones muy particulares que difícilmente se presentarían en situaciones reales. Sin embargo, en este caso particular no se pretende llegar a ecuaciones que definan el comportamiento de los materiales granulares, sino visualizarlo, estudiarlo y entenderlo. Posteriormente con investigaciones complementarias y un trabajo matemático más complejo se podrá acercar esta línea de investigación a resultados reales que conjunten lo observado en todos los problemas estudiados particularmente. Así en un futuro se llegará a resultados que serán aplicables a cualquier problema donde se presenten objetos inmersos en corrientes de materiales granulares.

BIBLIOGRAFÍA

Atkinson T. D., Butcher J.C., Izard M.J., Neederman R.M., *The forces on obstacles suspended in flowing granular materials*. Chem. Eng. Sci. 1983.

Chehata, D., Zenit, R., *Dense granular flow around an immersed cylinder*. Physics of fluids, Vol. 15, No. 6, 2003.

Fox, R., McDonald, A. *Introducción a la mecánica de fluidos*. México: Nueva editorial interamericana, 1988.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. *Fundamentos de Física*. Ed. John Wiley & Sons. U.S.A. 1993.

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 Rheol. 2000.

Juárez Badillo, Eulalio. *Fundamentos de Mecánica de Suelos, Tomo I*. Ed. LIMUSA, México 1980.

Meli Piralla, Roberto. *Diseño Estructural*. Ed. LIMUSA Noriega Editores, México 1985.

Manual del Ingeniero Civil. Mc Graw Hill. México 1999.

Nedderman, R.M., Davies, S.T., Horton, D. J. *The flow of granular materials round obstacles*. Powder Technology. 1980.

Pouliquen, O., Gutfraind R., *Stress fluctuations and shear zones in quasistatic granular chute flows*. Phys. Rev. E. 53.1996.

Tüzün, U., Nedderman, R.M. *Gravity flow of granular materials round obstacles II*. Chemical engineering science, Vol.40, No. 3, 1985.

Wassgren, C. R., Zenit, R., Karion, A. *Flow around a cylinder immersed in a collisional granular flow*. Physics of fluids, 2002.

Weighardt, K. *Forces in a granular flow*. Mech. Res. Comm. Vol. 1. pp. 3-7. 1974.

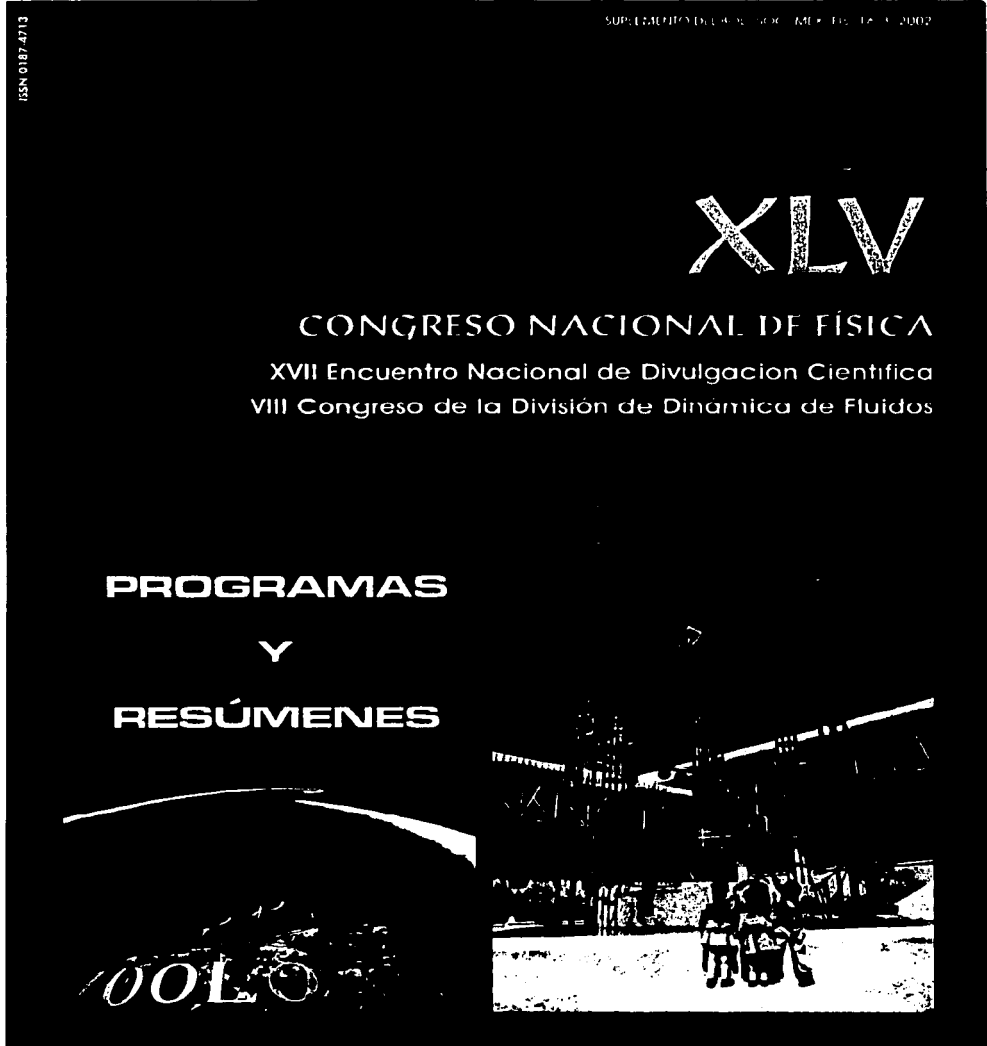
White, F. *Mecánica de fluidos*. México: Mc Graw Hill, 1998.

Zdravkovich, M.M. *Flow around circular cilinders, vol1: fundamentals*. New York: Oxford University Press, 1997.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

APÉNDICE 1

PRESENTACIÓN VIII CONGRESO DE LA DIVISIÓN DE MECÁNICA DE
FLUIDOS; LEÓN, GTO. OCTUBRE 2002



- 11:30-12:15 SESIÓN PLENARIA 4 (Sala 2, 2do. Piso)
"Semiconductor Lasers: from Homostructures to Quantum Dots"
Dr. P.G. Elisee, University of New Mexico
 Moderadora: *Dra. Tetyana Torchyuska, ESFM-IPN*
- 12:15-13:30 SESIÓN PLENARIA 5 (Sala 2, 2do. Piso)
"Aplicaciones de la Radiación Sincrotrón en Física"
Dr. Pedro Montano, U.S. Department of Energy Materials Sciences and Engineering
 Moderadora: *Dra. Carmen Cisneros Gudiño, CCF-UNAM*
- 14:00-16:00 Comida
- 16:00-18:00 Registro (2do. Piso)
- 16:00-18:30 Sesión simultánea II. (SII). Flujo Granular y Multifásico
 Moderadora: *Catalina Stern*
- S II.1. Visualización del flujo sobre una placa inmersa en una corriente granular. *E. Ramírez Cornejo, R. Zenit*
- S II.2. Fracturas, densidad de partículas y campo de velocidades en el movimiento de un sistema de balines. *G. Ruiz Chavarria, J. Mendoza Aleman*
- S II.3. Fuerza para desplazar una columna granular confinada en un cilindro. *D. Arroyo Cetto, G. Pulos, R. Zenit*
- S II.4. Mezclas de medios granulados con diferencia de masas. *R. Chicharro Serra, R. Peralta Fabi, R.M. Velasco Belmont*
- S II.5. Arqueo ¿fenómeno hiperbólico, elíptico o parabólico? *R. Peralta Fabi, G. Caballero-Robledo, R. Rechtman*
- S II.6. Modelo teórico y numérico para la línea de contacto en los fluidos de Cahn y Hillard. *J.J. Tapia, G. López.*
- S II.7. Aplicación de los modelos Euleriano-Lagrangeano para el estudio del transporte de partículas suspendidas en cauces naturales. *I. Hernández, R. Morales, H. Ramírez.*
- S II.8. Velocidad de ascenso de la fase dispersa en líquidos burbujeantes. *J. Martínez Mercado, R. Zenit.*
- 18:30-18:45 Café (2do. Piso)
- 18:45-19:30 SESIÓN PLENARIA 6 (Sala 2, 2do. Piso)
"Development of photovoltaic thin film solar cell devices"
Dr. Osvaldo Vigil Galán, Universidad de La Habana
 Moderador: *Dr. Arturo Morales Acosta, CINVESTAV-IPN*

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

SI.6

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL FLUJO ALREDEDOR DE MODELOS AUTOMOTORES Ricardo Cerezo Universidad del Sol, Manuel J. Palacios Gallegos DEPT.CIE-UNAM y Jorge Rojas CIE-UNAM. Se propuso una metodología para medir el coeficiente de arrastre aerodinámico en modelos automotores a escala. Los experimentos fueron realizados en un canal de agua del Laboratorio de Transferencia de Energía y Masa del CIE-UNAM. Se visualizó el flujo usando tintes y se midieron velocidades con la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV). Se realizaron modificaciones en la geometría de uno de los modelos para comparar el comportamiento de la eficiencia aerodinámica y del coeficiente de arrastre. El trabajo termina con un estudio de impacto económico del funcionamiento de los modelos con las modificaciones realizadas.

Agradecimientos a CONACYT 09044E por el apoyo económico y al Ing. Guillermo Hernández en la parte técnica.

SI.7

PATRONES DE FLUJO PRODUCIDOS POR UN CILINDRO EN ROTACIÓN INMERSO EN UN FLUJO UNIFORME. C. Alvarez Macías (FC-UNAM/IMP) y G. Ruiz Chavarría, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM, 04510 México, D.F. Mediante velocimetría por imágenes de partículas, visualización y anemometría de hilo caliente se hace un estudio exhaustivo del campo de velocidades aguas abajo producido por la presencia de un cilindro que gira con velocidad angular constante en un flujo uniforme. En el número de Reynolds se deja fijo y se modifica la velocidad angular se observan patrones como la calle de Von Kármán, la generación de vórtices de 2 tornados distintos, la alineación de estos, la disminución del ancho de la estela, la desaparición de la estela y eventualmente la formación de un vórtice que permanece en la vecindad del cilindro.

Trabajo apoyado por CONACYT, proyecto 32731-E y DGAPA-UNAM, proyecto IN-107501.

SI.8

ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DEL FLUJO ATRAS DE UNA FORMA DE FONDO TIPO EN UN CANAL. PABLO J. MANUEL J. PALACIOS Gallegos DEPT.CIE-UNAM, Jorge Rojas CIE-UNAM. La parte I de este trabajo se presentaron los resultados del flujo en un canal de 1.0 m de largo y 0.1 m de ancho. Estos resultados fueron importantes porque nos permitieron desarrollar la metodología experimental y numérica para el análisis del flujo en canales con formas de fondo tipo. Sin embargo, las pequeñas dimensiones del canal limitaron la validez del análisis bidimensional del modelo numérico. En este trabajo se reportan los resultados experimentales obtenidos en un canal de 0.6 m de largo y 0.3 m de ancho con una altura de agua de 0.05 m. Se hicieron mediciones detalladas de velocidades medias y de intensidades de turbulencia con el sistema de Anemometría Láser (LDV) en un cuadrado campo de velocidad con el sistema de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). En el estudio numérico (CFD) en 3D se usó el método de elementos finitos para resolver la ecuación de la parte superior. Se encuentran considerablemente la concordancia entre los resultados numéricos y los experimentales.

Con apoyo de CONACYT 22296-A y 09044E. Agradecimientos al apoyo técnico del Ing. Guillermo Hernández.

SI.9

Capa delgada de fluido que recubre una superficie sólida en rotación.

P. G. López, Ma. J. Manny, CICEFEN, Km. 107 Carr. Tijuana-Ensenada, 22860, Ensenada, B. C. y J. J. Tapia, CITEFI, Av. del Parque 1310, Mesa de Otay, 22510, Tijuana, B.C.

Se presenta un modelo para una capa delgada de fluido que recubre una superficie sólida en rotación. La línea de contacto LC que se forma en la intersección entre el fluido, el sólido y el gas que lo rodea, es modelada por una relación que expresa su evolución como función del ángulo de contacto. La singularidad en los esfuerzos que aparece en la LC es removida, usando la condición de deslizamiento de Navier. Adicionalmente, examinamos resultados de estabilidad lineal para dicho sistema. Numéricamente, la relación concursa a la LC se resuelve usando un método semi-espectral colocando sobre los puntos de Chebyshev

SESIÓN 2: Flujo Granular y Multifásico.

Martes 29, 16:00-18:30

Moderadora: Catalina Stern Forgach, FC-UNAM

SI.1

Visualización del flujo sobre una placa inmersa en una corriente granular

Ernesto Ramírez Cornejo y Roberto Zambrano, Instituto de Investigaciones en Matemáticas, Universidad Nacional Autónoma de México, P.O. Box 70-362 Ciudad Universitaria, Ciudad de México D.F. 04510 México

Presentamos resultados experimentales del flujo granular denso sobre una placa plana

Para determinar las fuerzas y los campos de velocidades sobre la placa, construimos un canal para generar un flujo granular denso cubico-dimencional de 543x1020 cm². En su parte media se colocaron las placas de diferentes tamaños y inclinaciones. Las placas se "rotaron" para poder medir directamente las fuerzas de arrastre y empuje a través de un sistema de galgas strain-gauges. Además al flujo se le introdujo una cámara de alta velocidad. Las imágenes así obtenidas se procesaron digitalmente para obtener los campos de velocidad alrededor de la placa.

Observamos la formación de una zona de estancamiento y de una estela huaca en las zonas aguas arriba y debajo de la placa, respectivamente. El tamaño de esta última regiones se modifica considerablemente al variar el ángulo de ataque de la placa con respecto al flujo libre. Las fuerzas de arrastre y empuje son sorprendentemente independientes de la velocidad media del flujo.

SI.2

FRACTURAS, DENSIDAD DE PARTICULAS Y CAMPO DE VELOCIDADES EN EL MOVIMIENTO DE UN SISTEMA BIDIMENSIONAL DE BALINES. G. Ruiz Chavarría y J. Mendoza Alemán, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM, 04510 México D.F. La dinámica de un medio granular es un problema que permanece abierto. En este trabajo presentamos algunos resultados sobre el movimiento de un sistema de balines confinados en una caja inclinada y en cuyo extremo inferior se ha puesto una compuerta para permitir la salida de las partículas. Las variables relevantes en el movimiento son la inclinación de la caja y la longitud de la compuerta. Usando como cámara de alta velocidad se han tomado imágenes para el posterior cálculo de velocidades y aceleración. Además se ha estudiado la formación de líneas de fractura, que para su formación requieren de una disminución en la densidad de las partículas y que al momento de aparecer conllevan a un incremento súbito en la magnitud de la velocidad de los balines. Al analizar la zona de aparición de fracturas se detecta que esta se desplaza en dirección contraria a la compuerta y que este desplazamiento se da a saltos para ciertos ángulos de inclinación de la caja.

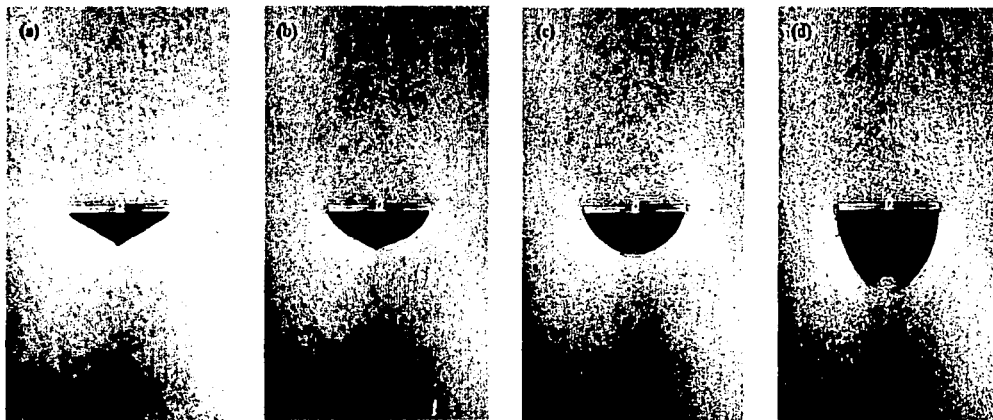
Trabajo apoyado por DGAPA UNAM, proyecto IN-107501

174

FLUJO GRANULAR DENSO ALREDEDOR DE UNA PLACA HORIZONTAL

E. Ramírez-Cornejo, R. Zenit
Instituto de Investigaciones en Materiales Universidad Nacional
Autónoma de México

C.R. Wassgren
School of Mechanical Engineering
Purdue University



Resumen

Las fotografías muestran la interacción de un flujo granular denso, formado por partículas de vidrio de 3mm con una placa horizontal estacionaria. La placa es de 95 mm de largo por 5 mm de espesor. La secuencia muestra el cambio del flujo conforme aumenta la velocidad del flujo. Se puede observar claramente como se forma una zona de estancamiento en el lado anterior de la placa y como se forma una zona abierta, similar a una estela, en la parte posterior de la placa. Mientras que la región de estancamiento parece no cambiar significativamente, la estela hueca cambia de forma y de tamaño conforme aumenta la velocidad del flujo.

El flujo se generó en un canal vertical de sección rectangular (30x5cm²). La velocidad media del flujo se controla variando la apertura de una tobera en la parte inferior del canal, aguas abajo de la placa. Las fotografías se tomaron con una cámara digital Finepix S1pro con una resolución de 6.13 millones de píxeles (CCD) 3000*2600 pix). Se utilizó una técnica de obturador abierto para rastrear las trayectorias de las partículas durante su interacción con la placa.

Fotografías: (a) U=1 mm/s; (b) U=5 mm/s; (c) U=10 mm/s; (d) U=30 mm/s.

APÉNDICE 2
CARTEL GANADOR DEL VIII CONGRESO DE LA DIVISION DE MECÁNICA DE
FLUIDOS; LEÓN, GTO, OCTUBRE 2002.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FLUJO ALREDEDOR DE UNA PLACA INMERSA EN UNA CORRIENTE GRANULAR

APÉNDICE 3

CARTEL PRESENTADO EN EL CONGRESO INTERNACIONAL DE MECÁNICA DE FLUIDOS, DALLAS, TEXAS, NOVIEMBRE 2002.

American Physical Society
Division of Fluid Dynamics

55th Annual Meeting

November 24-26, 2002

Wyndam Anatole Hotel
Dallas, Texas

Hosted by



SMU

in collaboration with

THE UNIVERSITY OF
TEXAS
AT AUSTIN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Gallery of Fluid Motion Posters and Videos

POSTER ENTRIES

33. *The Four Drops-Droplet Impact Patterns on Horizontal and Inclined Planes*
Peter J. Thomas and Graham H. Canham
Fluid Dynamics Research Centre, University of Warwick
34. *Beyond Primary Granular Banding: Triplet Bands In Two-Phase Rimming Flow*
Peter J. Thomas, Gareth D. Riddell, and Gregory P. King
Fluid Dynamics Research Centre, University of Warwick
35. *Reaction Visualization In A Liquid Mixing Layer Using PIV/PLIF*
Kuochen Tsai, Mike Cloeter, Chuck Lipp, Paul Gillis, and Hua Bai
The Dow Chemical Company
36. *Holes in Travelling Convection Waves*
Willem van de Water
Eindhoven University of Technology
37. *Coherent Structures in a Transitional Flow Around a Backward-Facing Step*
Tino Weinkauf, Hans-Christian Hege, Bernd R. Noack, Michael Schlegel, and Andreas Dillmann
Konrad-Zuse-Zentrum fuer Informationstechnik (ZIB),
Technische Universitat Berlin
38. *Poking Jammed Colloidal Suspensions*
Piotr Habdas, David Schaar, Andrew C. Levitt, and Eric R. Weeks
Emory University
39. *All Quiet Below: PIV in Polymer Drag Reduced Boundary Layer Flow*
Christopher M. White, V. S. R. Somandepalli, and M. G. Mungal
Stanford University
40. *Weight Induced Creeping Vortices*
Andreas Wilkens and David Auerbach
Institut fuer Stromungswissenschaften, Karl-Franzens-University Graz
41. *Thermal Inertia and Buoyancy in Porous Media*
Andrew W. Woods
BP Institute, University Of Cambridge
42. *Turbulent Flow Past a Sphere at $Re = 3700$ and 10000*
Giwoong Yun, Haecheon Choi, and Dongjoo Kim
Seoul National University, KISTI
43. *Granular Flow Around a Plate*
Roberto Zanit Ernesto Ramirez
National University of Mexico
44. *To Reduce Drag, Be Flexible*
Jun Zhang, Michael Shelley, and Silas Alben
New York University
45. *An Oscillating Continent over Thermal Convection*
Jun Zhang and Albert Libchaber
New York University, Rockefeller University
46. *Effect of Multivalent Ions on Electroosmotic Flow in Micro- and Nano-channels*
Z. Zheng, Kelly Evers, and A. T. Conlek
The Ohio State University

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

VISUALIZATION OF A GRANULAR FLOW AROUND A FLAT PLATE

E. Ramírez-Cornejo and R. Zenit
 Instituto de Investigaciones en Materiales
 Universidad Nacional Autónoma de México

C.R. Wassgren
 School of Mechanical Engineering
 Purdue University

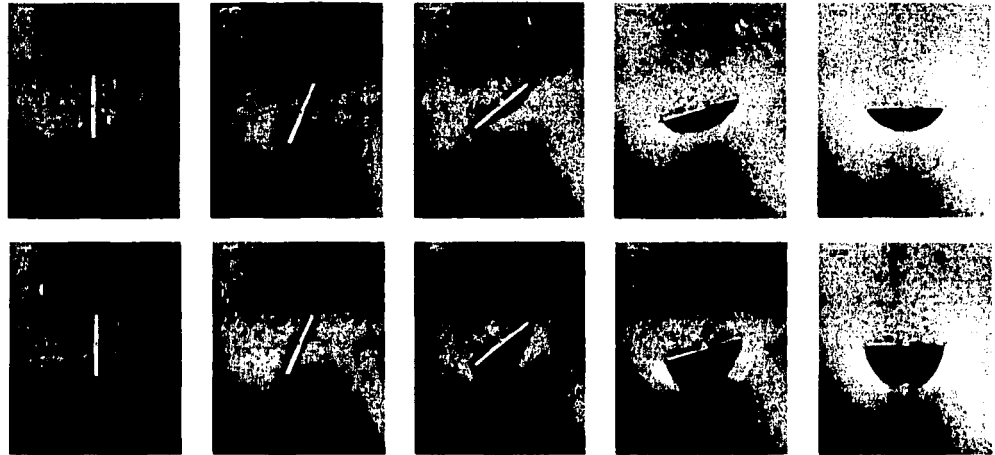
Increasing
 particle velocity

Abstract

The photographs show the interaction between a dense granular flow, formed using 2 mm glass spheres, and a stationary plate. The plate is 45 mm long and 5 mm thick. The flow direction is from top to bottom. The sequences show the change in the flow pattern for increasing particle velocity. At low initial velocity, a low angle wake can be observed; a stagnation zone forms on the upstream side of the plate and on the downstream side, an eddy wake appears. The size of the stagnation region changes only as a function of the angle of attack. The size and shape of the wake change with both particle velocity and angle of attack. For large angles and high velocity, the wake flow velocity, recirculation of the wake can be observed.

The flow was generated using a vertical chute with a rectangular cross section (10x4 cm²). The flow velocity was controlled by changing the extension of an exit baffle located at the bottom of the channel. The photographs were taken with a Phase-210 digital camera (CCD resolution 800x600 pix). An open imagegrab hardware was used to store the particle images during their interaction with the plate.

Photography
 0.4 or 0.8 m^s (0.8 or 2.0 ft/s)
 0.1 or 0.2 m^s (0.3 or 0.6 ft/s)



Increasing angle of attack

APÉNDICE 4
REPORTAJE "GACETA UNAM". SEPTIEMBRE 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Ciudad Universitaria
17 de septiembre de 2002
Número 3,573
ISSN 0182-5138
<http://www.unam.mx/gaceta>
dirección electrónica (e-mail):
dginfo@condor.dgace.unam.mx

Gaceta



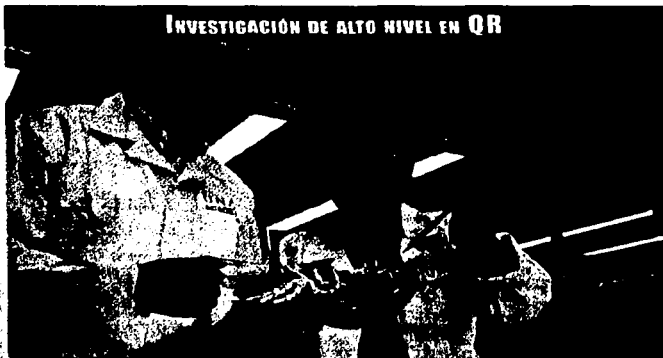
UNAM
ORGANO INFORMATIVO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

► Flujo granular alrededor de objetos, nombre de la investigación de Roberto Zenit, del IIM

Respalda la NASA un proyecto universitario

► Sus resultados podrían utilizarse para diseñar equipo de extracción y procesamiento de minerales en campos lunares y marcianos

10



Recorrido por la Unidad Académica Puerto Morelos del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Foto: Marco Mijares.

16-17 y 27

COMUNIDAD

Reinician
clases
250 mil
alumnos

3

VOCES ACADÉMICAS

Roberto Zenit
Los pecos afortunados

11

CULTURA

Arranca la
temporada de
la OFUNAM

18

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Roberto Zenit. Fotos: Ignacio Romo.

Estudian UNAM-NASA la mecánica de materiales granulares

El trabajo de Roberto Zenit, del Instituto de Investigaciones en Materiales, comenzó hace seis meses

Laura Romero

Los granos de azúcar o la arena de una playa son, pese a su aparente sencillez, materiales complejos y forman parte de un estado singular de la materia: no son un sólido, ni un líquido, ni un gas, sino una colección de partículas individuales en contacto unas con otras, cuyo comportamiento depende de las fuerzas a las que son sometidas.

A pesar de estar presentes en la vida cotidiana, no se conoce cabalmente la física fundamental que describe a los materiales granulares y que permita entender su comportamiento, por lo cual, hasta ahora han sido manejados bajo principios empíricos o de flujos ordinarios.

Jose Roberto Zenit Camacho del Instituto de Investigaciones en Materiales, apoyado por la NASA, intenta contribuir a su conocimiento, del cual, a su vez, se derivarán diseños de ingeniería que permitan mejorar, por ejemplo, el transporte de minerales, no sólo en la Tierra, sino eventualmente, en la Luna o Marte.

La colaboración entre científicos mexicanos y extranjeros, opinó el universitario, resulta productiva. "Nos ayuda a investigar la mecánica de los materiales granulares en un sentido amplio; para ello se necesita contar con la ciencia básica, que permita diseñar aparatos que funcionen en cualquier ambiente. Así, el beneficio es también para el desarrollo tecnológico futuro".

Acroca de los materiales granulares se sabe poco: son complejos y su comportamiento cambia en relación con las condiciones a las que se hallan sujetos, por eso son difíciles de estudiar.

Por ejemplo, en compactación, cuando están apretados, pueden portarse como un sólido; cuando están en flujo, se conducen de manera similar a un líquido, precisó Zenit Camacho.

Tal es el caso del suelo que, compactado, se comporta como un sólido y que ante un terremoto, donde el material del subsuelo puede comenzar a fluir, se produce el fenómeno de licuefacción, el cual puede dañar a las edificaciones.

El comportamiento de materiales granulares

también depende de factores como tamaño, forma, aspereza y elasticidad de las partículas, así como la cohesión entre los granos y de la humedad en que se encuentran.

Propuesta

Para entenderlos, el joven científico propuso a la NASA un proyecto mediante el cual pretende conocerse qué tipo de fuerzas se ejercen sobre un objeto que está inmerso en una corriente de flujo granular como sucede cuando interactúan una pala mecánica y montones de tierra, arena o minerales.

Pero dicho conocimiento también podría tener aplicaciones si se quiere colocar estructuras sólidas en una corriente de ese tipo y se necesita saber qué tan robustas deben ser para que no fallen.

Con ello, podría mejorarse el transporte de los materiales granulares y evitar que los diseños de ingeniería tengan factores de seguridad exagerados,

lo cual se presenta cuando no se conoce la naturaleza de los fenómenos y quiere evitarse errores o fallas. De ese modo, además, se ahorrarían muchos recursos.

La NASA, explicó, tiene un programa de apoyo a proyectos de investigación en mecánica de fluidos, en especial a aquellos donde la acción de la gravedad afecta el resultado del experimento, como sucede con el comportamiento de los flujos granulares.

Roberto Zenit recordó que la acción de la gravedad actúa en todo lado. "Aunque no nos demos cuenta, estamos acostumbrados a que la gravedad afecta el resultado del experimento, como sucede cuando se compacta en la parte de abajo."

Por eso, para estudiar la mecánica fundamental de esos materiales es necesario eliminar a la gravedad, es decir, que la acción de su fuerza no contamine los datos.

La NASA ha ofrecido al científico universitario a su colega Carl Wassgren, de la Universidad de Purdue, en Indiana, Estados Unidos, colocar

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

experimentos en diferentes instalaciones donde se genera gravedad reducida o cero.

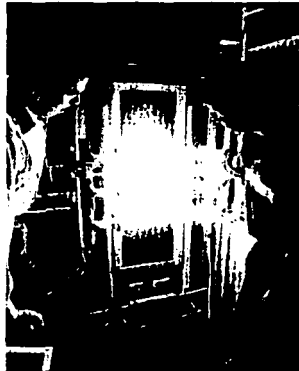
El sería el caso de un avión de trayectorias parabólicas, el cual cae a una aceleración que anula la gravedad y origina que lo que hay en cabina comience a flotar, proceso que dura 20 segundos, un transbordador especial o la estación espacial internacional que está en construcción.

El material granular se comporta de forma distinta en el ambiente extraterrestre; donde la fuerza de gravedad es menor o no existe. Es probable que en unos años haya minas de metales y otros materiales en otros planetas, donde resultaría más fácil su extracción. Pero es necesario desarrollar la tecnología que haga posible eso, con un fundamento científico fuerte, por lo que conviene invertir en ello desde ahora.

En los ambientes con cero gravedad, la idea es hacer trampa. Queremos quitar esa fuerza que apachura el material todo el tiempo para entenderlo mejor, precisa Roberto Zenit.

La colaboración con la NASA comenzó hace seis meses, luego de la evaluación de expertos del proyecto Flujo Granular Alrededor de Objetos, el cual recibió buenos comentarios, les gustó y lo aceptaron; determinaron que es financiable, afirmó.

El investigador y su colega recibirán ayuda económica durante los próximos tres años. "Eso no es lo más importante; lo fundamental es que nos prestarán sus instalaciones de microgra-



Midiendo la fuerza que siente un objeto cuando el material granular fluye a su alrededor.

avedad, lo cual es una oportunidad extraordinaria".

Por el momento, en el Laboratorio de Reología del Instituto de Investigaciones en Materiales se efectúan experimentos en tierra, donde se mide la fuerza que siente un objeto cuando el material granular fluye a su alrededor. En las instalaciones de la agencia espacial estadounidense, el objetivo es colocar un experimento similar y comparar lo que pasa en ausencia de gravedad.

Asimismo, en el instituto se miden actualmente los campos de velocidad o qué tan rápido se mueven los granos (en este caso, partículas o bolitas de vidrio, todas del mismo tamaño y con rugosidad conocida) alrededor del objeto y cómo se concentran.

Zenit Camacho, quien reconoce que la participación de un mexicano en un proyecto de la NASA es excepcional, espera, en ese lapso de tres años, que podría ampliarse, entender el fenómeno de la fuerza de arrastre en un material granular, desde su parte compacta, estudiada en tierra, hasta la más diluida, en ambiente de gravedad cero.

Asimismo, pretende desarrollarse técnicas experimentales novedosas para medir esas fuerzas y producir flujos cuando no hay gravedad que permitan diseñar, en el futuro, maquinaria para transportar el material granular.

Los alumnos de la UNAM (en las áreas de física e ingeniería) que trabajan con José Roberto Zenit también serán beneficiados ya que podrán asistir a los laboratorios, aprender y volar en microgravedad.

Al respecto, señaló que un objetivo alterno de este proyecto es la divulgación científica. "Queremos que se sepa que nuestro trabajo en Investigaciones en Materiales y en la UNAM es importante; que la carrera académica es una buena opción de vida".

ROBERTO ZENIT

Los pocos afortunados

Para la mayoría de los integrantes de nuestra comunidad la vida en la Universidad es temporal, pasajera; sólo dura unos cuantos años.

Como estudiantes, acudimos a las escuelas o facultades, cursamos los estudios, conocemos gente, convivimos, sufrimos con los conflictos internos y nos desvivimos cuando juegan los Pumas; en fin, vivimos la vida universitaria.

Aunque después de graduados, seguimos apegados a nuestra Alma Mater; pero como es natural, nuestras vidas continúan y dejamos de vivir en y para la Universidad.

Para algunos otros, pocos y afortunados, como este quien escribe, el ser universitario se

convierte en una forma de vida.

Ser investigador en la UNAM no se limita a trabajo de investigación como tal. Ciertamente, es estimulante poder participar en el desarrollo de la ciencia y contribuir con un granito de arena para comprender mejor los fenómenos que rigen el comportamiento del mundo y el universo.

Además, contamos con la maravillosa oportunidad de convivir con los alumnos, con otros colegas investigadores y profesores; conocemos a más gente que es extraordinaria y brillante. Con ellos compartimos inquietudes, colaboramos, nos quejamos de los problemas cotidianos, intercambiamos anécdotas y formamos amistades.

Al impartir clases y dirigir tesis

tenemos la fortuna de trabajar con alumnos. Con ellos hacemos el trabajo de base, la guerra en trincheras. A través del diario interactuar buscamos que los jóvenes, y a veces no tan jóvenes, expandan su base de conocimiento, aclaren dudas y que sus horizontes se abran. Porque colaborar en la formación de profesionales, es uno de los aspectos más gratificantes del trabajo como catedrático de la Universidad Nacional.

Gozamos del respeto y el apoyo del personal administrativo y técnico. Aunque a veces nos sentimos aturdidos por la burocracia —natural en una institución de este tamaño—, siempre encontramos en algún trabajador la buena disposición para auxiliarnos en la realización de nuestra labor.

Roberto Zenit, primer investigador mexicano con proyecto en la NASA

JORGE ALEJANDRO MEDELLÍN

Roberto Zenit sonríe mientras revisa su computadora y las evaluaciones finales de sus alumnos en la Facultad de Ciencias.

Es renuente a aceptarlo, pero reconoce que no es como los demás, que pertenece a esa élite de egresados de la UNAM con una trayectoria más que brillante, cuyos logros le serán recompensados de manera apenas imaginable...fuera de este planeta.

A sus 33 años es doctor en ingeniería mecánica, especializado en fluidos; licenciado en la máxima casa de estudios y, posgraduado en el California Technology Institute (Caltech) en 1997 es, desde hace unos meses, el primer investigador mexicano al que la NASA le admitió un proyecto que podría ser aplicado en trabajos de transporte de material granular en la Luna y en el planeta Marte.

Doctó en ingeniería mecánica y especialista en fluidos, el trabajo de Roberto podría ser aplicado en trabajos de transporte de material granular en la Luna y Marte

Es un personaje exitoso, "uno entré mil aquí en México", acepta, "pero uno entre 10 mil allá, en Estados Unidos".

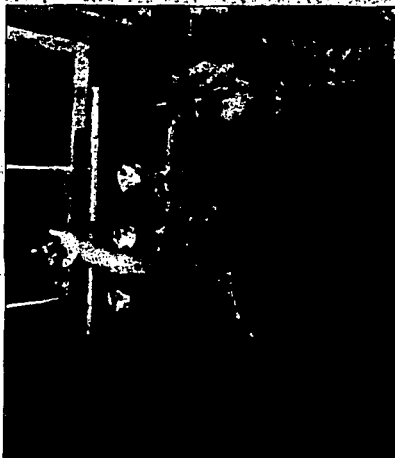
Más que su buena estrella, la calidad académica y el nivel de sus proyectos lo podrían llevar no sólo a la aprobación de su proyecto en transporte de fluidos granulares, sino también a realizar experimentos en el transbordador

espacial Discovery que encabezaría quizá a mediados del 2003.

Todo depende del éxito de las primeras etapas de investigación que se harán en uno de los seis aviones de vuelo parabólico (para crear condiciones de gravedad cero) que posee la NASA. Si todo sale bien, vendrá el entrenamiento para volar en el transbordador espacial. Y eso no es todo: la prueba de fuego de su proyecto de investigación, en una de las últimas etapas, podría ocurrir en la Estación Espacial Internacional.

También ahí podría estar presente Roberto Zenit como investigador de la UNAM.

Roberto estuvo a punto de convertirse en un "cerebro en fuga" ya que su calidad académica y los proyectos que desde su etapa de posgrado comenzaba a manejar hicieron que varios buscadores de talento de la NASA le hablaran al oído, lo invitaran a sumarse a su plantilla de investigadores con una inquietante y demotivadora pregunta: ¿a qué regresas allá?



VICENTE ARTEAGA | EL UNIVERSAL GRÁFICO
Roberto Zenit realiza experimentos en el transbordador Discovery, que encabezaría a mediados del 2003

Zenit obtuvo el doctorado en 1997. Luego hizo una estancia posdoctoral de dos años en la Universidad de Cornell. A finales de 1999 fue repatriado a México a través del programa especial para rescatar talentos creado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt).

Después del primer año de estancia en la UNAM comenzó a escribir sus primeros proyectos de investigación, entre ellos el de la mecánica de fluidos granulares que hizo del cobocimiento de la NASA luego de casi ocho meses de elaboración junto con un compañero de doctorado.

Pero los posibles beneficios del proyecto de Roberto Zenit también tienen boleto de regreso a la Tierra, ya que al determinar el comportamiento de los fluidos granulares se podrán establecer nuevas formas de almacenamiento de granos básicos en silos (contenedores verticales) diseñados para que éstos no se echen a perder tan pronto.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

APÉNDICE 6
 REPORTAJE PERIODICO "LA JORNADA". SEPTIEMBRE 2002.

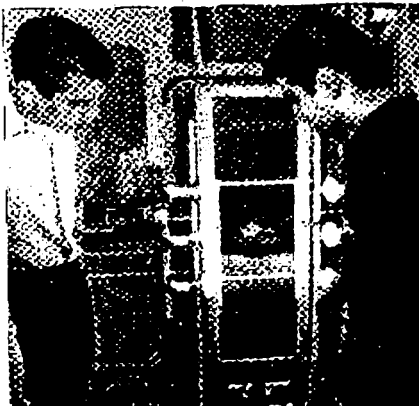
Suplemento especial de la **Alfombra EDUCACION SUPERIOR**

25 DE SEPTIEMBRE DE 2002 III

Estudian UNAM y NASA la mecánica de materiales granulares

- Trabajo de Roberto Zentú, del Instituto de Investigaciones en Materiales, comenzó hace seis meses
- "Lo fundamental es que nos permitan sus instalaciones de microgravedad", dice el investigador

Los granos de arena, al ser sometidos a una fuerza externa, como la gravedad, se comportan de una manera muy peculiar. Este comportamiento es el que se estudia en el trabajo de Roberto Zentú, del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la UNAM, quien comenzó hace seis meses su investigación sobre la mecánica de materiales granulares. Zentú, quien es doctor en Física por la UNAM, se dedica a estudiar el comportamiento de los granos de arena en condiciones de microgravedad. Su trabajo es financiado por el programa de cooperación científica entre México y Estados Unidos, específicamente por la NASA. Zentú explica que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra. Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra. Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra.



Roberto Zentú, investigador en materia de mecánica de materiales granulares, en su laboratorio.

Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra. Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra. Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra. Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra.

El trabajo de Zentú, del Instituto de Investigaciones en Materiales, comenzó hace seis meses. Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra. Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra.

Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra. Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra. Zentú menciona que el estudio de los granos de arena en condiciones de microgravedad es importante porque permite entender mejor el comportamiento de los granos de arena en el espacio exterior, así como en la Tierra.



El equipo de trabajo en el laboratorio de microgravedad del IIM de la UNAM.