



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“PATRONES DE FLUJO EN MEDIOS  
GRANULARES VIBRATORIOS”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**PRESENTA:  
MARÍA FERNANDA LUGO BOLAÑOS.**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. BALTASAR MENA INIESTA.**



**México, D.F.**

**Agosto 2011**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## Jurado asignado:

PRESIDENTE	Ing. Jaime Erik Castañeda de Isla Puga
VOCAL	Dr. Baltasar Mena Iniesta
SECRETARIO	Dr. Federico Mendez Lavielle
1ER SUPLENTE	Dr. Leopoldo Adrián González González
2DO SUPLENTE	Dr. Fernando Velázquez Villegas

## Lugar donde se realizo el trabajo:

Los experimentos para este trabajo se realizaron en las instalaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Baltasar Mena Iniesta

SUSTENTANTE

María Fernanda Lugo Bolaños

AGOSTO 2011

*Sometimes it is necessary to go a long distance out of the  
way in order to come back a short distance correctly.*

*Edward Albee*

El presente trabajo es parte de una investigación realizada en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, titulada "Propagación de ondas acústicas en medios granulares sometidos a vibración". Esta investigación es financiada por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, PAPIIT, mediante los proyectos IN110610 y IN110610-2 Al cual se le da un sincero agradecimiento, ya que sin su apoyo este trabajo no sería posible.

# Agradecimientos

A veces retrocedo en el tiempo y me miro hace algunos años, como una niña, una adolescente y ahora como una joven adulta. Es difícil imaginar que hubiera pasado si no hubiera encontrado a varias personas, que de alguna u otra forma han colaborado a formar la persona que soy,

Primero a mi madre, ella, para mí, es sinónimo de fortaleza, me ha enseñado a ser honesta, noble, generosa y compasiva. Ha sacrificado su vida por el bien mío y de mis hermanos. Mis hermanos, Grisel, que se ha vuelto mi mejor amiga, mi mejor apoyo, mi pilar en muchas decisiones. Ricardo, que da alegría a la casa y es rerichingon. Guillermo, que aunque se enoja continuamente lo quiero mucho. Mi tía, que es parte fundamental de la familia, aunque ella no lo piense así.

Mochis, Maytl, Memo, Sandra, Slack, Yahir, Potter, Hugo, Marko, por todos aquellos momentos que hemos vivido juntos.

Daniel, es muy difícil imaginarme sin ti, eres parte fundamental de lo que soy y me encanta que siempre encuentras las palabras correctas para animarme.

Antonio, ni que decir, mi mano derecha siempre, sé que nuestra amistad estará siempre presente y que haremos muchos proyectos juntos.

Mis niñas, Imelda, Bere, Bianka, Rachel, Liz, Johanna, America, Nayansy, Melissa, que momentos tan divertidos hemos pasado, se han convertido en mis hermanitas, realmente las amo.

Hay personas que te caen literalmente del cielo, el Dr. Baltasar Mena es una de ellas para mí, él me quito mis lentes viejos y con poca visión y me puso unos más amplios y con mayor alcance. Me mostró el panorama, me dijo hasta donde podía llegar, pero no sólo

eso, si no que me guió, ayudo, acompaño y literalmente me empujo hacia una maestría en el extranjero. Debo decir, que yo no se lo puse fácil, fui una terca, desorganizada, irresponsable, miedosa y aun así, él nunca se dio por vencido siempre me apoyo con una paciencia infinita. Gracias a eso, ahora estoy a punto de hacer algo que nunca, ni en sueños, imagine que pudiera lograr. Muchas gracias Baltasar, siempre te estaré agradecida y te aseguro que no te defraudaré.

Gracias Fernando por traer vida al laboratorio, apoyarme y ser paciente, sin ti, difícilmente hubiera terminado este trabajo.

Finalmente, gracias a la Universidad y a la Facultad de Ingeniería, por todo lo que me ha dado y las oportunidades que me ha ofrecido.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción de los medios granulares. . . . .	2
1.2. Vibración de materiales granulares. . . . .	3
1.2.1. Apilamiento ( <i>Heaping</i> ). . . . .	4
1.2.2. Ondas superficiales de pequeña amplitud ( <i>Small amplitude surface waves</i> ). . . . .	6
1.2.3. Arqueo ( <i>Arching</i> ). . . . .	8
1.2.4. Ondas superficiales de gran amplitud ( <i>Large amplitude surface waves</i> ). . . . .	11
1.2.5. Rollos convectivos ( <i>Convective rolls</i> ) . . . . .	13
1.3. Propagación del Sonido en medios granulares. . . . .	15
1.3.1. Cadena de fuerzas. . . . .	15
1.3.2. Efecto del fluido intersticial entre los granos. . . . .	16
1.3.3. Modos de propagación de la onda . . . . .	16
1.3.4. Velocidad de la onda . . . . .	17
1.3.5. Disipación . . . . .	18
<b>2. Diseño y Construcción de una máquina vibratoria.</b>	<b>19</b>
2.1. Metodología de diseño . . . . .	20
2.2. Diseño Conceptual y de configuración . . . . .	21
2.2.1. Definición del problema . . . . .	21
2.2.2. Especificaciones de diseño de la máquina . . . . .	22

2.3.	Diseño Conceptual . . . . .	23
2.3.1.	Funciones . . . . .	23
2.3.2.	Descripción de funciones . . . . .	24
2.3.3.	Generación y evaluación de conceptos . . . . .	25
2.4.	Diseño de Detalle . . . . .	26
2.4.1.	Sistema mecánico . . . . .	26
2.4.2.	Sistema eléctrico-electrónico . . . . .	29
2.5.	Proceso de manufactura y ensamble . . . . .	30
<b>3.</b>	<b>Desarrollo experimental</b>	<b>32</b>
3.1.	Dispositivo Experimental . . . . .	33
3.1.1.	Contenedores y material granular . . . . .	33
3.1.2.	Máquina vibratoria . . . . .	34
3.1.3.	Sistema de visualización . . . . .	35
3.1.4.	Sistema de emisión y recepción de señales acústicas . . . . .	36
3.2.	Metodología . . . . .	37
3.2.1.	Método de visualización del flujo granular . . . . .	37
3.2.2.	Método de transmisión y grabación de la señal acústica . . . . .	38
3.3.	Descripción Experimental . . . . .	39
3.3.1.	Experimento 1. Caracterización de patrones de flujo granular vibratorio. . . . .	40
3.3.2.	Experimento 2. Propagación de una onda acústica en un medio granular sometido a vibración. . . . .	41
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>42</b>
4.1.	Experimento 1. Caracterización de patrones de flujo granular vibratorio. . . . .	43
4.1.1.	Apilamiento . . . . .	43
4.1.2.	Ondas superficiales de pequeña amplitud . . . . .	46
4.1.3.	Arqueo . . . . .	48
4.1.4.	Ondas superficiales de gran amplitud . . . . .	50
4.1.5.	Rollos convectivos . . . . .	52

4.2. Experimento 2. Resultados preliminares . . . . .	54
<b>5. Conclusiones</b>	<b>55</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	56
<b>I. Presentaciones.</b>	<b>57</b>
I.a. 82nd Annual Meeting of the Society of Rheology, 2010 . . . . .	58
<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>

# Índice de figuras

1.1. Fotografía típica del fenómeno de apilamiento . . . . .	5
1.2. Ciclo convectivo en el fenómeno de apilamiento . . . . .	5
1.3. Fotografía del fenómeno Ondas superficiales de pequeña amplitud [tomada por Brennen[referencia]] $\Gamma = 3,3$ , $f = 20Hz$ , $d = 1,28mm$ y $N = 17,5$ . . . . .	6
1.4. Vista esquemática del movimiento de partículas para ondas de superficie pequeñas durante dos ciclos de oscilación. . . . .	7
1.5. Fenómeno de Arqueo, (Fotografía tomada por Brennen <sup>1</sup> ). Arqueo de 3 nodos, $\Gamma = 8,5$ , $f = 30Hz$ , $d = 1,28mm$ y $N = 17,5$ . . . . .	8
1.6. Gráfica del tiempo de vuelo adimensional de una partícula inelástica sometida a una vibración sinusoidal $\Delta\phi = \omega\Delta t$ contra el número de aceleración adimensional $\Gamma = a\omega^2/g$ . . . . .	9
1.7. Vista esquemática del movimiento de partículas en el fenómeno Arching con 3 nodos. Las flechas de la primera imagen muestran donde se encuentran los nodos. . . . .	9
1.8. Movimiento convectivo circular de las partículas en arqueo con 3 nodos. Las flechas verticales indican la localización de los nodos. Mientras que las flechas en los círculos indican la orientación de los patrones convectivos. . . . .	10
1.9. Fotografía del fenómeno de Ondas superficiales de gran amplitud. La foto de la izquierda muestra ondas superpuestas con arqueo de cero nodos, mientras que la fotografía de la derecha muestra ondas superpuestas con arqueo de un nodo, para $\Gamma = 6,2$ , $f = 20Hz$ , $d = 1,28mm$ , $N = 17,5$ . . . . .	11

1.10. Vista esquemática del movimiento de ondas y partículas en el fenómeno de Ondas superficiales de gran amplitud y arqueado de cero nodos. . . . .	12
1.11. Por convención se toman como referencia las paredes a la hora de dar un nombre a cada uno de los tipos de convección. Así dominará convección hacia abajo (inciso a)) cuando las partículas descieran por las paredes y asciendan por el centro, y convección hacia arriba (inciso b)) cuando las partículas asciendan por las paredes y descieran por el centro. . . . .	14
1.12. Aceleración crítica $\Gamma$ para esferas de vidrio ( $d=0.78\text{mm}$ ) en función de la altura inicial de la capa granular para la aparición de rollos cuando se incrementa $\Gamma$ (figura de la izquierda) y cuando disminuye $\Gamma$ (figura de la derecha) a una frecuencia de oscilación de 50 Hz. $D$ y $U$ se refieren al movimiento de convección "hacia abajo" "hacia arriba" respectivamente. El número de rollos que aparecen se ha escrito tras la $U$ . Figura obtenida de [Aoki <sup>2</sup> ]. . . . .	14
1.13. Cadena de fuerzas en una cama granular. . . . .	15
1.14. Investigaciones previas de velocidad de onda en un medio granular. . . .	18
2.1. Gráfica de especificaciones de diseño . . . . .	20
2.2. Mecanismo experimental diseñado por Alejandro Pérez y Joshua Cardiel <sup>3</sup>	21
2.3. Sistema del prototipo diagrama de caja negra. . . . .	23
2.4. Propuesta de diseño. . . . .	25
2.5. Riel y carro lineal marca INA modelo RWU 25. DFE.G2.V3. . . . .	27
2.6. Mecanismo Biela-manivela. Para detalles de su construcción referirse a Alejandro Perez y Joshua Cardiel <sup>3</sup> . . . . .	27
2.7. Sistema mecánico . . . . .	28
2.8. Motor Perm-motor PMG080. . . . .	29
2.9. Fuente de alimentación Agilent technologies modelo N5764A . . . . .	29
2.10. Dispositivo final. En las imágenes superiores se encuentra el dispositivo de costado, donde se puede observar la placa móvil en diferentes ángulos. Mientras que las imágenes inferiores muestran la parte frontal del dispositivo, donde se pueden observar los elementos antes descritos. . . . .	30

3.1.	Dispositivo mecánico. . . . .	34
3.2.	Cámara de video HVR-A1U/A1N. . . . .	35
3.3.	a) Generador de señales de la marca Tectronix modelo 5781-XE, b) Con- sola de grabación marca TASCAM modelo SX-1. . . . .	36
3.4.	Dispositivo experimental usado para obtener los patrones convectivos (me- dios granulares sometidos solamente a vibración vertical). . . . .	40
3.5.	Arreglo experimental para la transmisión de ondas acústicas. El arreglo es similar al del experimento en el que sólo se buscan los patrones convectivos. Se le integra el transmisor y los receptores, así como los instrumentos necesarios para la transmisión y adquisición de datos correspondientes. . .	41
4.1.	Formación del fenómeno de apilamiento de esferas de vidrio de $d = 1\text{ mm}$ en un contenedor de acrílico de $200\text{ mm}$ de largo, $30\text{ mm}$ de ancho y $200\text{ mm}$ de alto y una cama inicial de $H = 37\text{ mm}$ . Las imágenes de la izquierda están sometidas a una frecuencia de $8\text{ Hz}$ y $\Gamma = 1,29$ , a) 0 segundos, b) 20 segundos. Mientras que las imágenes de la derecha se encuentran sometidas a una frecuencia de $10\text{ Hz}$ y $\Gamma = 2$ , c) 0 segundos, b) 30 segundos. . . . .	44
4.2.	Según la frecuencia de oscilación, el apilamiento ocurre con colina a la derecha (inciso a) o colina a la izquierda (inciso b), en nuestro caso, con amplitud de $5\text{ mm}$ . el cambio de transición ocurrió a los $9\text{ Hz}$ . . . . .	45
4.3.	Propuesta de disposición de los micrófonos en el fenómeno de apilamiento. Se propone colocar tres receptores (puntos rojos) en nuestro caso, micrófo- nos. Uno a la entrada de la señal acústica para medir la señal de entrada, otro en el centro del ciclo convectivo y el último micrófono a la salida del ciclo. . . . .	45
4.4.	Fenómeno de ondas superficiales de pequeña amplitud, crestas redondeadas.	47
4.5.	Fenómeno de ondas superficiales de pequeña amplitud, en esta fotografía se puede observar las crestas más puntiagudas, debido a un incremento de la frecuencia. . . . .	47
4.6.	Fenómeno de arqueado de un nodo. . . . .	49
4.7.	Ciclo completo de oscilación del fenómeno de arqueado de cuatro nodos. . .	49

4.8. Onda superficial de gran amplitud superpuesta al fenómeno de arqueo . .	51
4.9. Ondas superficiales de gran amplitud . . . . .	51
4.10. Rollo convectivo . . . . .	53
4.11. Disposición de los micrófonos en un par de rollos convectivos . . . . .	53
I.1. Portada del boletín y resumen de la presentación. . . . .	58

# Resumen

Un dispositivo experimental fue diseñado y construido para examinar el comportamiento de los medios granulares sometidos a vibraciones horizontales, verticales y combinaciones de ambas. Se utilizaron contenedores rectangulares tridimensionales y bidimensionales, con esferas de vidrio como medios granulados. Las frecuencias de oscilación cubrieron el intervalo entre 0 y 50 Hz y las amplitudes variaron entre 0 y 5 mm. Cámaras de video de alta definición junto con un estroboscopio permitieron analizar los patrones de flujo. Cinco distintos fenómenos fueron observados: apilamiento, ondas superficiales de pequeña amplitud, arqueado, ondas superficiales de gran amplitud y rollos convectivos. La aparición de dichos fenómenos depende básicamente de dos parámetros adimensionales, el primero involucra la amplitud, la frecuencia de oscilación y la aceleración gravitacional, mientras que el segundo es representativo de la cantidad de material granular en el contenedor experimental.

Para trabajo futuro se desea enviar una onda acústica en el medio granular vibratorio cuando forma los patrones antes mencionados. Es por ello, que en el presente trabajo se ubican las posibles zonas muertas o de resonancia.

# Objetivos

1. Diseñar y construir un dispositivo experimental para el estudio de propagación de ondas en medios granulares sometidos a vibración. El dispositivo proporcionará movimiento vibratorio, horizontal, vertical y una combinación de ambos.
2. Visualizar y caracterizar los fenómenos convectivos de apilamiento, ondas superficiales de pequeña y gran amplitud, arqueos y rollos convectivos.

# 1

## Introducción

---

<b>1.1. Descripción de los medios granulares. . . . .</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Vibración de materiales granulares. . . . .</b>	<b>3</b>
1.2.1. Apilamiento ( <i>Heaping</i> ). . . . .	4
1.2.2. Ondas superficiales de pequeña amplitud ( <i>Small amplitude surface waves</i> ). . . . .	6
1.2.3. Arqueo ( <i>Arching</i> ). . . . .	8
1.2.4. Ondas superficiales de gran amplitud ( <i>Large amplitude surface waves</i> ). . . . .	11
1.2.5. Rollos convectivos ( <i>Convective rolls</i> ) . . . . .	13
<b>1.3. Propagación del Sonido en medios granulares. . . . .</b>	<b>15</b>
1.3.1. Cadena de fuerzas. . . . .	15
1.3.2. Efecto del fluido intersticial entre los granos. . . . .	16
1.3.3. Modos de propagación de la onda . . . . .	16
1.3.4. Velocidad de la onda . . . . .	17
1.3.5. Disipación . . . . .	18

---

## 1.1. Descripción de los medios granulares.

Un material granular es aquel que está formado por partículas sólidas macroscópicas individuales dispersas en un fluido o en el vacío<sup>4</sup>. Es considerado por varios autores otro estado de la materia<sup>5</sup> ya que dependiendo de las condiciones en las que se encuentre tiene comportamientos con propiedades de un sólido, un líquido o un gas. Sin embargo, existen importantes diferencias con cada una de estas fases que hacen que el comportamiento de este material sea más inusual e interesante.

El comportamiento de sólido está limitado a fuerzas de compresión. Cuando el medio granular se somete a fuerzas de tensión las partículas se apartan.<sup>1</sup> Sin embargo, al aplicarle una fuerza de compresión la transmisión de la carga es normalmente anisotrópica, debido a que la fuerza se transmite por medio de los contactos entre las partículas, las cuales, entre sí, forman cadenas de contactos llamadas cadenas de fuerza<sup>6</sup>.

El material granular puede comportarse como un líquido si se somete a un esfuerzo cortante, como en el caso de una avalancha o de granos cayendo a través del orificio de un reloj de arena. Por otro lado, puede observarse también que la superficie libre de un material granular puede permanecer en reposo en un ángulo no horizontal, como una duna en el desierto o una pila de ciruelas en el mercado. En otras palabras, el material es capaz de soportar pequeños esfuerzos cortantes antes de comenzar a fluir<sup>4</sup>.

El estado gaseoso granular es preferido para sistemas altamente agitados, donde los contactos entre partículas son escasos y de poca duración. Una diferencia importante entre los gases y líquidos convencionales y el medio granular es que la interacción entre las partículas es inherentemente inelástica por lo cual en cada colisión se pierde algo de energía. Es por eso que, todo estudio basado puramente en interacciones elásticas o de conservación de energía, como la teoría de los gases, no se puede trasladar para el estudio de medios granulares. Es importante mencionar que cualquier comportamiento de un medio granular con características de fluido es puramente un fenómeno dinámico<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup>Estructuras de partículas cohesivas pueden resistir una fuerza de tensión limitada. Sin embargo, por simplicidad, la presente definición se refiere a partículas no cohesivas.

## 1.2. Vibración de materiales granulares.

Al someter un medio granular a vibración se induce un movimiento colectivo de las partículas que lo conforman. Estas actúan en conjunto formando una especie de masa continua que fluye formando diferentes patrones de convección tales como apilamiento, ondas superficiales de pequeña y gran amplitud, arqueo y rollos convectivos, de los cuales se hablará más adelante.

Diversos autores han estudiado ampliamente estos fenómenos, por mencionar algunos: Faraday, 1831<sup>7</sup>, Evesque and Rajchenbach, 1989<sup>8</sup>, Fauve, 1989<sup>9</sup>, Pak and Behringer, 1993<sup>10</sup>, Aoki, 1996<sup>2</sup>, Brennen 1996<sup>1</sup>, Mena<sup>11</sup>. Sin embargo, el origen y dinámica de estos comportamientos aún no es del todo comprendido.

El experimento estándar consiste en someter un contenedor lleno de material granular a oscilaciones sinusoidales verticales, horizontales o una combinación de ambas. Las variables que se tienen son: la gravedad  $g$ , la altura de la cama granular  $h$ , el tamaño de grano  $d$ , la frecuencia  $f$  y la amplitud  $a$  de oscilación, las cuales se han usado para generar dos números adimensionales: el número adimensional de capas  $N$ , que puede interpretarse como el número de capas de partículas de la cama granular, definido como  $N = h_0/d$  y la aceleración adimensional  $\Gamma$  definida como  $\Gamma = a\omega^2/g$ . Ambos de suma importancia, ya que en base a ellos se ha logrado caracterizar adecuadamente los fenómenos convectivos.

Para camas granulares poco profundas (shallow particle beds), donde  $N < 4$ , Thomas B.<sup>12</sup> encontró que para un rango de aceleración adimensional entre  $\Gamma = 2.5$  y  $\Gamma = 6$  la cama granular presenta tres estados que dependen de  $N(h_0/d)$ . El primer estado es "Newtonian-I" (por ejemplo  $N = 0.17$ ) en el cual las partículas rebotan al azar por lo cual hay poca variación en el perfil de concentración vertical de más de un ciclo de oscilación. El segundo estado es "Newtonian-II" (por ejemplo  $N = 0.273$ ) donde una densa capa de partículas se acumula en la superficie una vez en cada ciclo de vibración mientras que el resto de las partículas rebotan al azar. El tercer estado es conocido como "Coherente-Expandido" (por ejemplo  $N = 1.7$ ) donde las partículas oscilan como una masa cohesiva. Sin embargo, las partículas en conjunto se expanden y contraen considerablemente en cada ciclo.

Para valores de  $N$  mayores a 4 el comportamiento de la cama granular es conocido como "Coherente-Condensado" o camas granulares profundas (deep beds). En este estado las partículas se mueven como una masa cohesiva y se mantienen compactadas durante todo el ciclo de vibración. Bechmann<sup>13</sup> encontró que la transición del estado "coherente-expandido" al "coherente-condensado" ocurre cuando  $N \approx 6$ .

La presente investigación se centra en el régimen "Coherente-Condensado" debido a que en este estado es donde ocurren los fenómenos de nuestro interés: apilamiento, ondas superficiales de pequeña y grande amplitud, arqueo y rollos convectivos, los cuales serán descritos a lo largo de esta sección.

### 1.2.1. Apilamiento (*Heaping*).

El fenómeno de apilamiento (Heaping), véase figura 1.1, fue primeramente reportado por Faraday<sup>7</sup>. Él observó que cuando la arena es colocada en una membrana sometida a vibración, se forman pequeños montículos y aparece una convección lenta de las partículas. Este comportamiento ha sido observado también en un contenedor con material granular sometido a vibraciones sinusoidales verticales. La superficie libre del material granular comienza a formar un apilamiento, o una pequeña colina, en un lado preferencial del recipiente o en el centro de éste (Fauve, 1989). Evesque and Rajchenbach<sup>8</sup>, Brennen<sup>1</sup> y Mena<sup>11</sup> encontraron que este fenómeno se presenta para valores mayores de  $\Gamma_H = 1.2$ .

En dicho apilamiento un lado de la cama siempre se vuelve más delgado mientras que en el otro lado se vuelve más angosto. Puede observarse claramente un patrón de movimiento convectivo de las partículas, de modo que las partículas que se encuentran en la superficie libre se deslizan hacia abajo (como en una avalancha) hasta llegar a la parte baja de la colina y se adentran en la masa de partículas para recircular internamente y moverse hacia la parte alta de la colina, como se puede apreciar en la figura 1.2.

La convección de las partículas en el fenómeno de apilamiento tampoco se ha explicado. Sin embargo, Laroche propone que el causante de ello es el flujo de aire a través de las partículas que forman un medio poroso. Evesque<sup>8</sup>, en discrepancia con Laroche, propone que el flujo de aire es la consecuencia de la convección y no la causa

de la última.

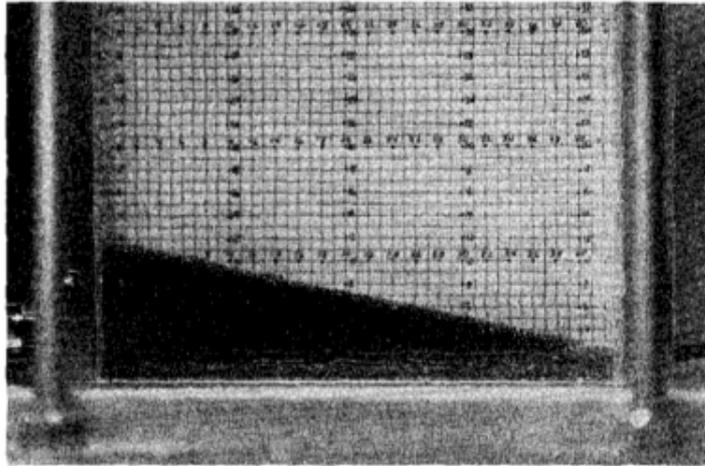


Fig. 3 A photograph of a heap for  $\Gamma = 1.8$ ,  $f = 30$  Hz,  $d = 1.28$  mm, and  $h_0/d = 17.5$

Figura 1.1: Fotografía típica del fenómeno de apilamiento

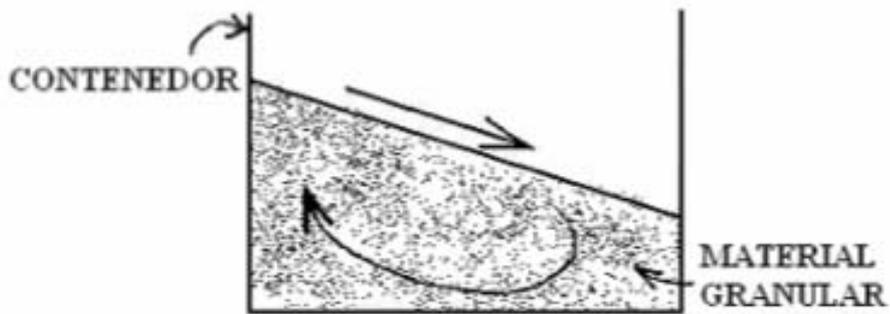


Figura 1.2: Ciclo convectivo en el fenómeno de apilamiento

### 1.2.2. Ondas superficiales de pequeña amplitud (*Small amplitude surface waves*).

Pak and Behringer<sup>10</sup> observaron ondas solitarias que viajaban en la superficie de la cama granular durante el fenómeno de apilamiento. Las ondas viajan desde el punto más bajo de la pirámide por la ladera hasta la cima, sin interferir con el patrón convectivo que caracteriza al fenómeno de heaping. Las ondas aumentan en longitud y disminuyen en la altura a medida que viajan por la colina para finalmente desaparecer en el pico.

Brennen<sup>1</sup> encontró que si se incrementa el valor de  $\Gamma$  hasta un valor aproximado de  $\Gamma_S = 1.2$  desaparece el fenómeno de apilamiento y aparece un nuevo fenómeno conocido como ondas de superficie de pequeña amplitud (small amplitude surface waves) el cual se caracteriza por la formación de ondas de poca amplitud en la superficie libre del volumen de partículas. Una foto característica de este fenómeno se muestra en la siguiente figura,

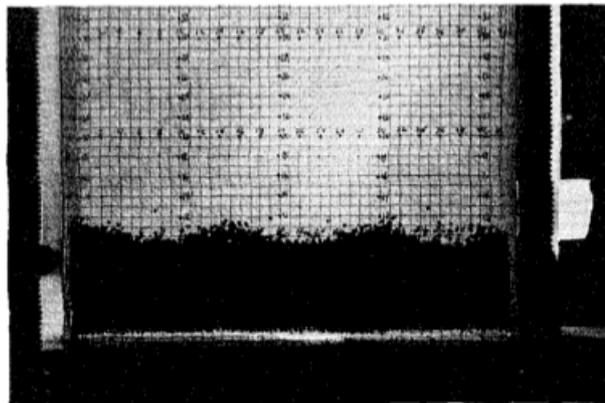


Figura 1.3: Fotografía del fenómeno Ondas superficiales de pequeña amplitud [tomada por Brennen[referencia]]  $\Gamma = 3.3$ ,  $f = 20Hz$ ,  $d = 1.28mm$  y  $N = 17.5$

Las ondas superficiales de pequeña amplitud aparecen usualmente como ondas bidimensionales con sus crestas paralelas al lado angosto del recipiente que contiene el material granular. Sin embargo, también se han presentado casos en los que, simultáneamente, se presentan ondas con crestas paralelas al lado largo del recipiente.

Cuando las ondas son paralelas al lado angosto del recipiente, el número de ondas varía entre  $n$  y  $n + 1/2$ , donde  $n$  es un número entero mayor a cero. Las paredes del recipiente siempre coinciden con antinodos y la formación de las ondas se repite cada dos ciclos de vibración. Como puede observarse en la siguiente figura,

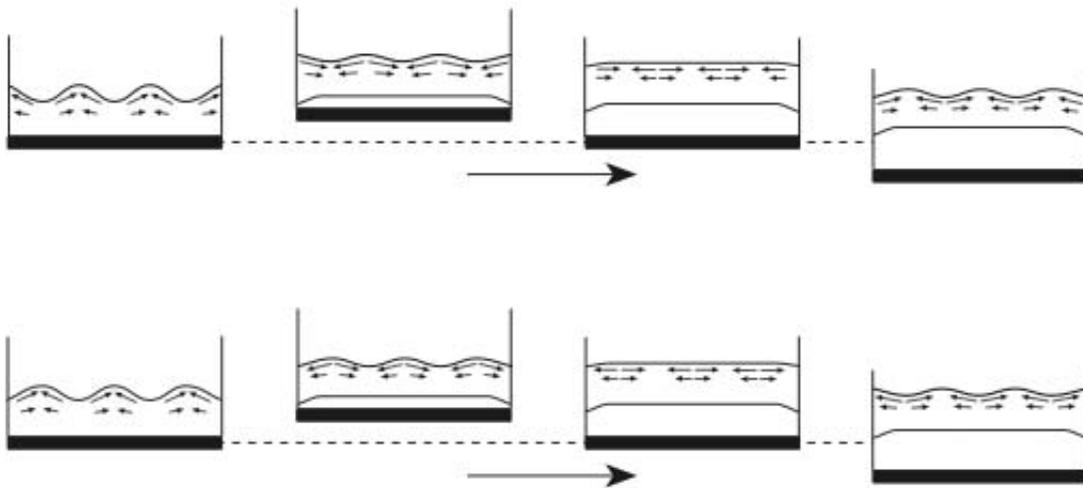


Figura 1.4: Vista esquemática del movimiento de partículas para ondas de superficie pequeñas durante dos ciclos de oscilación.

Este fenómeno no sólo depende de  $\Gamma$ , como lo hace el fenómeno de apilamiento, si no también del número adimensional  $N$  y el tipo de partícula. Brennen<sup>1</sup> encontró que a medida de que  $\Gamma$  aumenta, la amplitud de las ondas y la movilidad de las partículas de la superficie libre también aumentan. También encontró que la amplitud y la longitud de las ondas aumenta a medida que se aumenta  $N$ . Sin embargo los valores permanecen constantes a partir de  $N = 7$ .

### 1.2.3. Arqueo (*Arching*).

El tercer fenómeno identificable dentro del estado coherente-condensado es el conocido como arqueo. Este fenómeno consiste en secciones de partículas, que conforman la cama granular, oscilando fuera de fase una con respecto a otra. Una imagen típica de este fenómeno puede observarse en la figura 1.5.

Como se muestra en la gráfica (figura 1.6) realizada por Brennen<sup>1</sup>, figura 1.2.3, este fenómeno cuenta con tres valores críticos de  $\Gamma$ . El primero es conocido como primera doble bifurcación que ocurre en  $\Gamma_{B1} \approx 3.7$ , el segundo es el retorno de vuelo único que se presenta en  $\Gamma_{*B1} \approx 4.6$  y el tercero es un segundo periodo de doble bifurcación que se manifiesta en  $\Gamma_{B2} \approx 6.6$ .

El fenómeno de arqueo se presenta entre los valores críticos de  $\Gamma_{B1} \approx 3.7$  y  $\Gamma_{*B1} \approx 4.6$ . Básicamente, lo que ocurre una vez que se sobrepasa  $\Gamma_{B1}$ , es que las partículas oscilan desfasadamente respecto a la frecuencia de vibración, generando de este modo una serie de arcos con características particulares (véase figura 1.7). En vez de repetir el mismo movimiento cada ciclo de oscilación, el movimiento se repite cada dos ciclos. Los límites entre secciones se les conoce como nodos y oscilan con la más pequeña amplitud durante el movimiento de la masa granular. El termino anti-nodo es usado para la región entre nodos, la cual tiene mayores amplitudes.

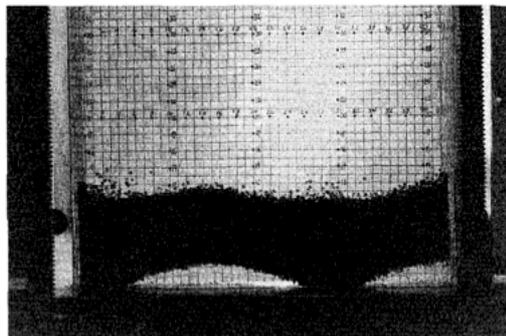


Figura 1.5: Fenómeno de Arqueo, (Fotografía tomada por Brennen<sup>1</sup>). Arqueo de 3 nodos,  $\Gamma = 8.5$ ,  $f = 30Hz$ ,  $d = 1.28mm$  y  $N = 17.5$ .

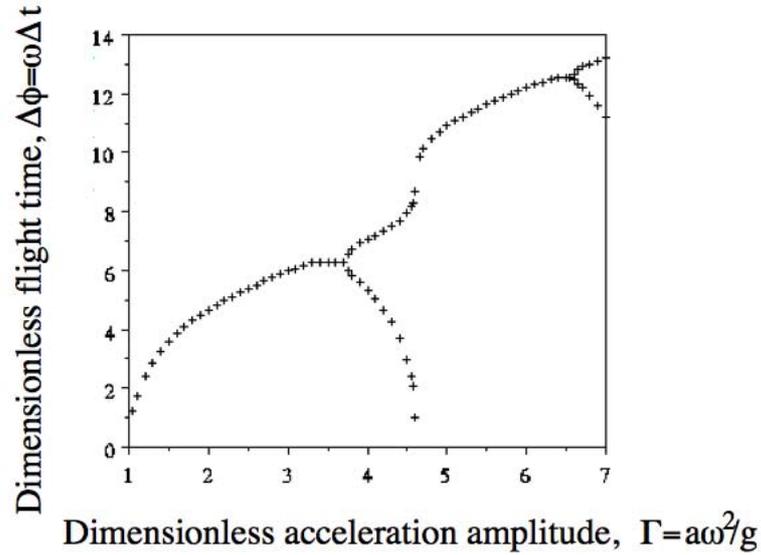


Figura 1.6: Gráfica del tiempo de vuelo adimensional de una partícula inelástica sometida a una vibración sinusoidal  $\Delta\phi = \omega\Delta t$  contra el número de aceleración adimensional  $\Gamma = a\omega^2/g$ .

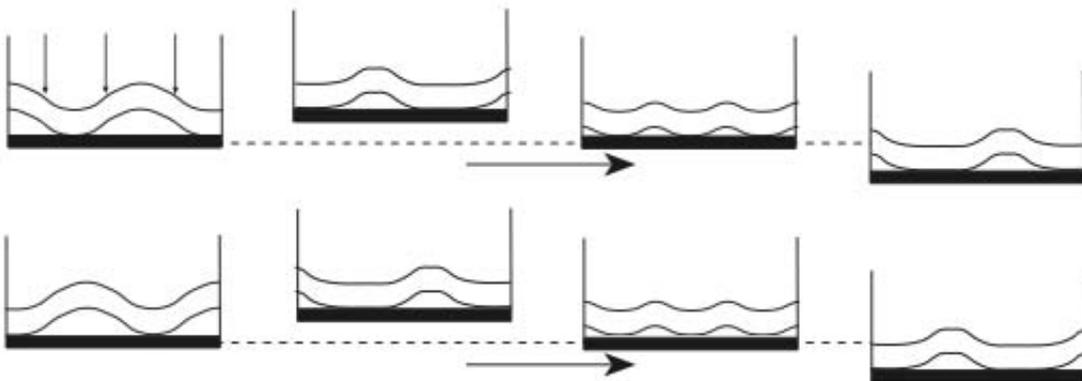


Figura 1.7: Vista esquemática del movimiento de partículas en el fenómeno Arching con 3 nodos. Las flechas de la primera imagen muestran donde se encuentran los nodos.

Brennen<sup>1</sup> observó que a medida de que aumenta  $N$ , los valores críticos  $\Gamma_{B1}$  y  $\Gamma_{*B1}$  disminuyen independientemente del tipo de partículas. Sin embargo, la diferencia  $\Gamma_{*B1} - \Gamma_{B1}$  siempre resulta cercana a valores cercanos a 1.6.

Dentro de los valores críticos, pueden generarse dos, uno o cero nodos. Se encontró que al aumentar  $\Gamma$ , la diferencia de fases, la amplitud de los arcos y la movilidad de las partículas también aumentan.

Finalmente, se encontró que las partículas se mueven formando círculos; hacia arriba en los antinodos y hacia abajo en los nodos, como se aprecia en la figura 1.8. El número de ciclos convectivos es el doble del número de nodos. En el caso del arqueado con cero nodos, puede apreciarse un movimiento convectivo único muy parecido al que se observa en el apilamiento.

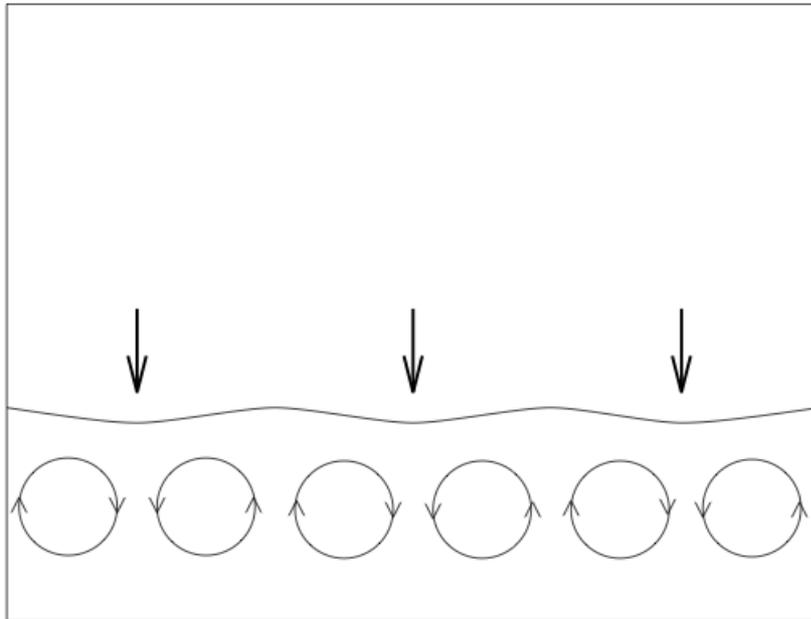


Figura 1.8: Movimiento convectivo circular de las partículas en arqueado con 3 nodos. Las flechas verticales indican la localización de los nodos. Mientras que las flechas en los círculos indican la orientación de los patrones convectivos.

### 1.2.4. Ondas superficiales de gran amplitud (*Large amplitude surface waves*).

Las ondas superficiales de gran amplitud (*Large amplitude surface waves*) aparecen superponiendo el fenómeno de arqueado. Una imagen de este fenómeno se muestra en la figura 1.9. Este comportamiento ocurre cuando  $\Gamma$  se incrementa por encima de otro valor crítico  $\Gamma_L \approx 5.3$ , el cual ocurre muy cercano al valor  $\Gamma_{*B1}$ . A medida que  $N$  aumenta,  $\Gamma_L$  disminuye, alcanzando eventualmente un valor constante cerca de  $N \approx 30$ .

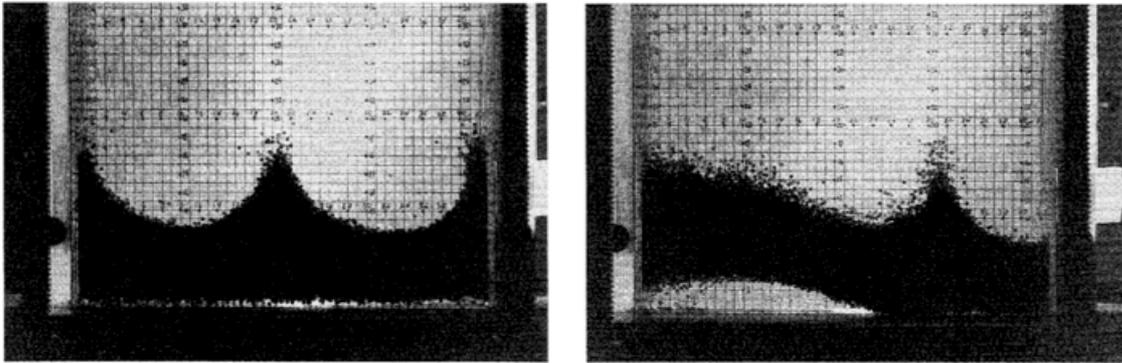


Figura 1.9: Fotografía del fenómeno de Ondas superficiales de gran amplitud. La foto de la izquierda muestra ondas superpuestas con arqueado de cero nodos, mientras que la fotografía de la derecha muestra ondas superpuestas con arqueado de un nodo, para  $\Gamma = 6.2$ ,  $f = 20Hz$ ,  $d = 1.28mm$ ,  $N = 17.5$ .

Las ondas superficiales de gran amplitud sólo se forman en regiones de la cama de partículas donde la parte alta de la superficie es esencialmente plana. Por lo tanto, este fenómeno solamente es observado en arqueado con cero, un nodo y dos nodos. El comportamiento del fenómeno de Ondas superficiales de gran amplitud es muy similar al fenómeno de Ondas superficiales de pequeña amplitud. Sin embargo, existen algunas diferencias. Primero, Los picos de las Ondas superficiales de gran amplitud son más afilados que los picos redondeados de las Ondas superficiales de pequeña amplitud. Además, las Ondas superficiales de gran amplitud siempre se forman como ondas con

crestas paralelas a la dimensión angosta del contenedor y son lo suficientemente grandes que las partículas fueron expulsadas siempre desde la cima de la onda aterrizando en los valles vecinos. Por otra parte, las ondas superficiales de gran amplitud, en lugar de repetir el mismo movimiento de las ondas cada dos ciclos de oscilación, el movimiento se repite cada cuatro ciclos. El número de ondas esta dado por  $n/2$  donde  $n$  es un número entero mayor que cero. Las paredes laterales del recipiente siempre coinciden con antinodos. En la figura 1.10 se muestra un esquema del movimiento de la onda con un arqueo de cero nodos.

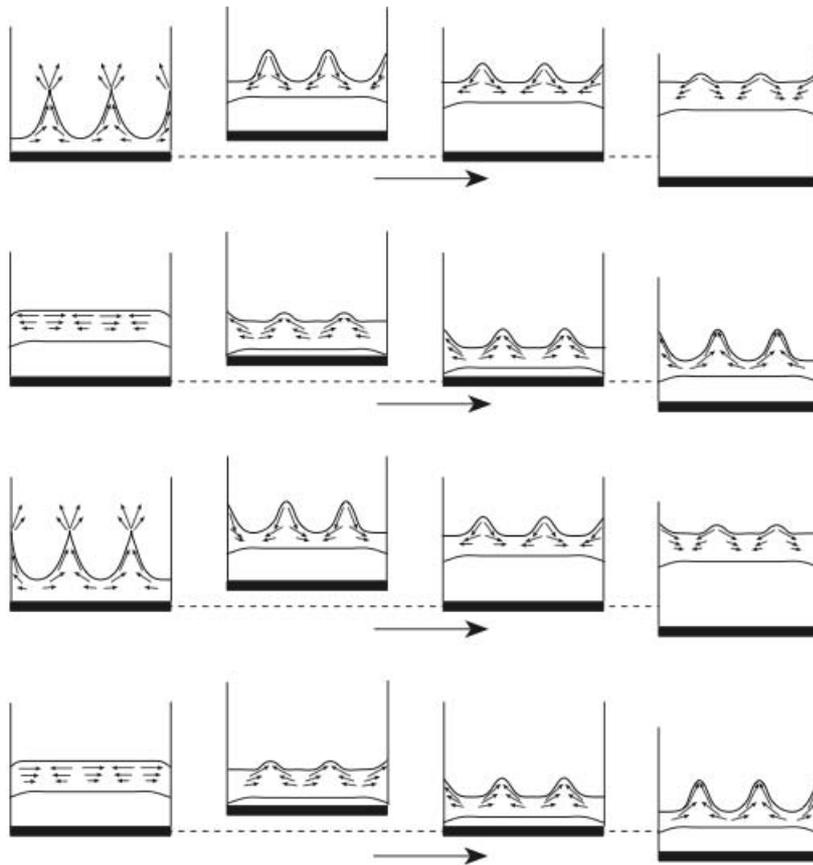


Figura 1.10: Vista esquemática del movimiento de ondas y partículas en el fenómeno de Ondas superficiales de gran amplitud y arqueo de cero nodos.

### 1.2.5. Rollos convectivos (*Convective rolls*)

Si la capa de granos es de mayor altura, por lo general, las partículas comienzan a descender por las paredes de la celda y a ascender por el centro, dando lugar a la aparición de un par de rollos convectivos, varios autores defienden que la convección tiene su origen en el efecto de las paredes verticales del recipiente en el que se halla el medio granular. [Clement<sup>14</sup>] [Ehrich<sup>15</sup>] [Knight<sup>16</sup>], otros mencionan que es debido a la existencia de un gradiente de "temperatura granular"<sup>2</sup>, análogamente como ocurre en los fluidos. Mientras que otros autores mencionan que es debido a la presencia de un fluido (generalmente el aire). [Laroche<sup>17</sup>.]

Aoki<sup>2</sup>, en sus experimentos se observó que aunque para valores bajos de la aceleración se daba la convección "hacia abajo", si ésta se aumentaba se producía una transición a flujo convectivo "hacia arriba". (Véase figura 1.11) Además se encontró que, al ser el modo convectivo "hacia arriba" más estable que el "hacia abajo" se podían formar varios rollos de convección. En la figura 1.12, donde se muestran los modos estables para diferentes valores de aceleración  $\Gamma$  y altura  $H$ , se puede apreciar que el paso de un número de rollos a otro es histérico, mientras que el cambio de régimen convectivo apenas lo es. El número de ciclos convectivos es fuertemente dependiente de la aceleración de la vibración, el tamaño de grano y en menor medida a la frecuencia (los rollos convectivos solo aparecen en un rango de frecuencia), dada la altura y el ancho de la cama granular.

En este mismo experimento, cuando se usaban esferas de vidrio de tamaño mayor a 0.78 mm se observó que la transición entre el modo de convección "hacia abajo" y "hacia arriba" no se daba directamente, si no que aparecía un estado caótico entre uno y el otro. Este estado caótico, que luego se ha visto en otros experimentos similares, se caracteriza por una gran cantidad de esferas de vidrio saltando en la superficie y por el ruido que emite la capa granular vibrando. Este ruido, que es significativamente mayor en el estado caótico que en otros estados, sugiere que una buena porción de la energía suministrada por vibración es disipada a través de movimientos aleatorios de las partículas.

---

<sup>2</sup>Esta temperatura se define a partir de la velocidad de las partículas, ver Wildman, 2001

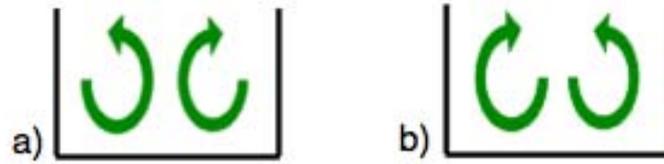


Figura 1.11: Por convención se toman como referencia las paredes a la hora de dar un nombre a cada uno de los tipos de convección. Así dominará convección hacia abajo (inciso a)) cuando las partículas desciendan por las paredes y asciendan por el centro, y convección hacia arriba (inciso b)) cuando las partículas asciendan por las paredes y desciendan por el centro.

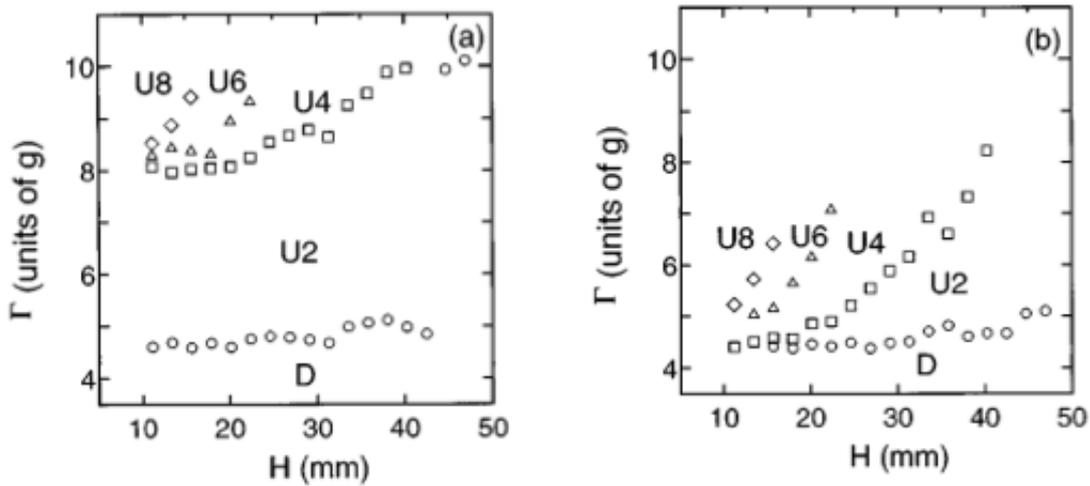


Figura 1.12: Aceleración crítica  $\Gamma$  para esferas de vidrio ( $d=0.78\text{mm}$ ) en función de la altura inicial de la capa granular para la aparición de rollos cuando se incrementa  $\Gamma$  (figura de la izquierda) y cuando disminuye  $\Gamma$  (figura de la derecha) a una frecuencia de oscilación de 50 Hz. Dy U se refieren al movimiento de convección "hacia abajo" y "hacia arriba" respectivamente. El número de rollos que aparecen se ha escrito tras la U. Figura obtenida de [Aoki<sup>2</sup>].

### 1.3. Propagación del Sonido en medios granulares.

Las ondas acústicas, referidas como elásticas, son transmitidas a través de los contactos de las partículas que conforman el medio granular. Juegan un papel importante la profundidad de la cama granular, las cadenas de fuerza que forma, el fluido intersticial y la longitud de onda de la señal enviada.

#### 1.3.1. Cadena de fuerzas.

En un apilamiento granular desordenado es posible encontrar dos regiones muy destacadas. En una de ellas se observa una red de fuertes tensiones a lo largo de algunos granos, llamadas cadenas de fuerza y que son las que soportan la mayor parte de la carga aplicada. La otra región es en donde casi no existen tensiones, donde los contactos entre granos son muy débiles. En la figura 1.13 se muestra un apilamiento granular desordenado.

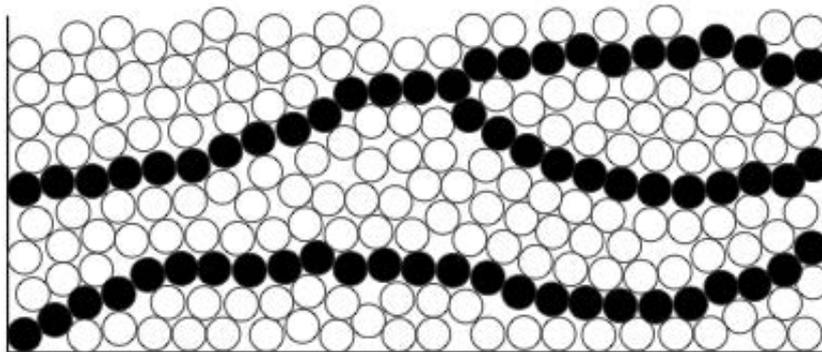


Figura 1.13: Cadena de fuerzas en una cama granular.

Las cadenas de la fuerza son responsables de la distribución anisotrópica de esfuerzos en una pila granular. Dado que la propagación de ondas en materiales granulares es esencialmente la propagación de esfuerzo, estas cadenas también son responsables de la propagación de las ondas de presión de una manera similar, heterogéneas. Estas cadenas son intrínsecamente frágiles y susceptibles a la reorganización.

Por lo tanto, la repetición es a menudo una preocupación para los experimentos en materiales granulares. La distribución irregular de las cadenas de la fuerza también significa que los materiales granulares exhiben dependencia de configuración fuerte. Los resultados de los experimentos a menudo son fuertemente influenciados por el procedimiento utilizado en la preparación del lecho granular.

### 1.3.2. Efecto del fluido intersticial entre los granos.

El apilado granular además de estar compuesto de granos también tiene fluido, el cual puede ser gas o líquido. En condiciones ambientales el medio granular está saturado de aire. La presencia de fluido en los intersticios del medio se traduce a un amortiguamiento debido a la viscosidad del fluido, así pues, una parte de la energía se debe a frotamientos viscosos. Una forma de cuantificar la importancia de estas fuerzas viscosas, en relación a la energía cinética o potencial para una partícula, es mediante un número de Reynolds efectivo

$$Re \approx \frac{\rho}{n} Rv$$

con  $\rho$  la densidad de las partículas de radio  $R$  y  $v$  la velocidad en el fluido de viscosidad  $n$ . Este número de Reynolds representa la relación entre la energía cinética de una partícula sobre el trabajo de la fuerza viscosa para una longitud característica equivalente al radio de una esfera.

### 1.3.3. Modos de propagación de la onda

Según la relación que tenga la longitud de onda con el tamaño de grano que caracteriza al medio granular se pueden observar diferentes fenómenos de propagación:

A bajas frecuencias, donde la longitud de onda es demasiado grande comparada con el tamaño de grano o el espacio entre ellos,  $\lambda > 10d$ , el medio granular es un medio homogéneo y continuo para la propagación de la onda. Los trabajos de J. Duffy y Mindlin<sup>18</sup> establecen una fuerte dependencia de la interacción del contacto de partículas con la propagación de ondas en un material granular. Una onda de baja frecuencia a

través de un medio granular es conocida como onda E, la cual, es reproducible de un experimento a otro, es decir, no es sensible a un cambio de configuración.

A altas frecuencias, donde la longitud de onda es relativamente similar al tamaño del grano,  $\lambda \approx d$ , los efectos de dispersión causados por las fluctuaciones espaciales de la red de cadena de fuerza se vuelven muy significativos, por lo tanto ya no puede aplicarse el enfoque continuo. La energía de la onda se se propaga en varias direcciones y ocurre un fuerte efecto de interferencia entre las ondas dispersas que han viajado a través de diferentes caminos del medio, lo cual da como resultado una mancha acústica análoga a una mancha óptica. En este régimen, las ondas acústicas dispersas (las cuales denotaremos ondas tipo S, de Scattering) tienen una configuración específica, es decir, son huellas de la estructura del canal de fuerza por el que han pasado. Entonces, un movimiento o evolución de la red de contactos de granos, puede generar un cambio en las rutas o canales de sonido.

#### 1.3.4. Velocidad de la onda

Anteriores experimentos de propagación de ondas en medios granulares han explorado numerosas condiciones experimentales y han usado una gran variedad de técnicas para determinar la velocidad de la onda. Por lo cual no es sorprendente que exista una amplia variedad de velocidades de onda reportadas.

Una de las más importantes variables en los experimentos es la presión (o profundidad) con que la velocidad de la onda es medida. Se ha encontrado que la velocidad del sonido se incrementa conforme la profundidad aumenta. Si denotamos  $c$  como la velocidad de la onda (sonido) y  $z$  como la profundidad vertical del medio granular, para pequeñas perturbaciones se ha encontrado que  $c$  es proporcional a  $z^\alpha$ , donde  $\alpha$  es típicamente un número entre  $1/6$  y  $1/4$ . (Surajit Sen<sup>19</sup>)

Para entender lo anterior, notemos que en camas poco profundas (shallow beds) la disposición de los granos es disperso y desordenado. Sin embargo, al incrementar la profundidad el medio se volverá más compacto y ordenado. Por lo cual debería ser más fácil para la onda viajar por el material granular a medida que aumenta la profundidad debido a que existe un mayor contacto entre partículas.

En la figura 1.14 se muestra una tabla con las velocidades de ondas obtenidas de algunas investigaciones anteriores.

Author	Material	Pressure (kPa)	Wave type	Speed ( $\frac{m}{s}$ )
Duffy and Mindlin (1957)	3.2 mm Steel	7 - 103	Compressional	274-549
Hardin and Richart (1963)	0.6-0.85 mm Ottawa sand	23 - 383	Compressional	213-488
Liu and Nagel (1992)	5 mm glass	1.5	Group velocity Time-of-flight	50-90 280 $\pm$ 30
Ben-Dor <i>et al.</i> (1997)	3.3 mm PVC 1.7 mm Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1 mm Iron 0.45 mm Iron 0.45 mm Potash		Transmitted Wave	287 276 226 143 144
Jia <i>et al.</i> (1999)	0.4-0.8 mm glass	35-2500	Coherent (E)	500-1350

Figura 1.14: Investigaciones previas de velocidad de onda en un medio granular.

### 1.3.5. Disipación

En los medios granulares, existen numerosos mecanismos en los cuales la energía es disipada. Debido a que los contactos entre partículas son inelásticos y están sometidos a fricción, se pierde energía durante la interacción de las partículas. Los efectos de fricción convierten parte de la energía de la onda en calor. La deformación plástica puede absorber parte de la energía de la onda. Un segundo mecanismo en el cual se puede perder energía está relacionado con los desplazamientos y re-arreglos de las partículas que puedan existir dentro del medio granular. Parte de la energía puede transformarse en energía cinética de una partícula cuando esta pierde contacto con sus partículas vecinas. Un tercer mecanismo, al menos aparentemente, es la dispersión de la energía de onda a través de la cadena de contactos de las partículas. Parte de la energía de las ondas puede dispersarse lejos del punto en el que las mediciones se hacen dando la apariencia de que la energía se ha perdido. En realidad, la energía no se pierde sino que simplemente cambia de dirección.

## 2

# Diseño y Construcción de una máquina vibratoria.

---

<b>2.1. Metodología de diseño</b>	<b>20</b>
<b>2.2. Diseño Conceptual y de configuración</b>	<b>21</b>
2.2.1. Definición del problema	21
2.2.2. Especificaciones de diseño de la máquina	22
<b>2.3. Diseño Conceptual</b>	<b>23</b>
2.3.1. Funciones	23
2.3.2. Descripción de funciones	24
2.3.3. Generación y evaluación de conceptos	25
<b>2.4. Diseño de Detalle</b>	<b>26</b>
2.4.1. Sistema mecánico	26
2.4.2. Sistema eléctrico-electrónico	29
<b>2.5. Proceso de manufactura y ensamble</b>	<b>30</b>

---

## 2.1. Metodología de diseño

Para llevar a cabo el diseño de nuestro dispositivo nos hemos basado en la metodología propuesta por Pugh Stuart en su libro "Total Design", la cual establece las siguientes etapas:

1. **Planteamiento del problema:** Se identifica la necesidad a cubrir por el diseño.
2. **Formulación de especificaciones:** En esta fase se establecen las especificaciones del diseño del producto con ayuda de una gráfica de pastel propuesta por Pugh (véase figura 2.1).
3. **Diseño Conceptual:** En esta fase se generan las opciones posibles para resolver el problema. Se elige la mejor según los recursos con los que se cuenta.
4. **Diseño a detalle:** En esta etapa se detalla el dispositivo, se elige el tamaño, el material, método de construcción y se generan planos a detalle.
5. **Proceso de manufactura y ensamble:** En esta etapa se lleva el prototipo a un estado físico, se construyen las piezas que lo conforman con el material y procesos de manufactura elegidos y se ensambla.

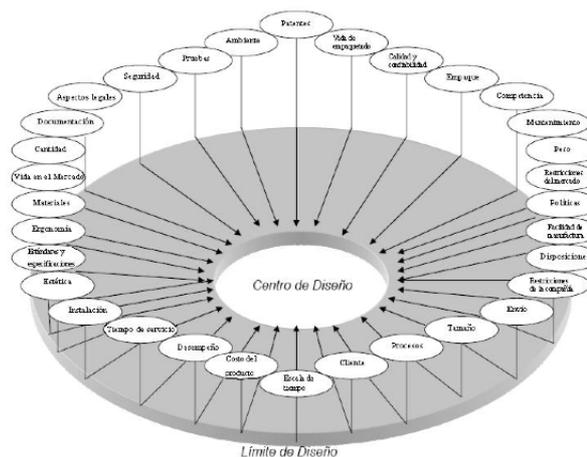


Figura 2.1: Gráfica de especificaciones de diseño

## 2.2. Diseño Conceptual y de configuración

### 2.2.1. Definición del problema

Para realizar el experimento se contaba con un dispositivo mecánico diseñado y construido por Alejandro Pérez y Joshua Cardiel<sup>3</sup>, el cual se muestra en la figura 2.2. Este mecanismo estaba diseñado para realizar movimientos horizontales, verticales y una combinación de ambos teniendo el control independiente de cada uno. Sin embargo, resulto ser demasiado masivo, difícil de controlar y con tendencia a desalinearse constantemente. Por lo cual, no se podían obtener movimientos verticales u horizontales con una precisión adecuada para cumplir nuestro objetivo.

Debido a lo anterior, se tuvo que realizar un proceso de re-diseño, tratando de usar en mayor medida las investigaciones previas y el equipo disponible.

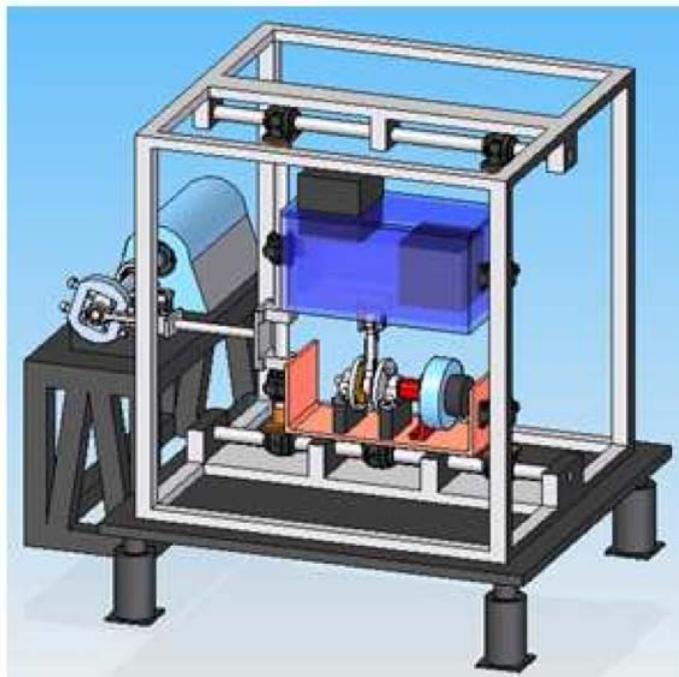


Figura 2.2: Mecanismo experimental diseñado por Alejandro Pérez y Joshua Cardiel<sup>3</sup>

### 2.2.2. Especificaciones de diseño de la máquina

Para elegir las especificaciones de diseño de la máquina, nos basamos en la gráfica de pastel de Pugh Stuart.(véase figura 2.1).

**Ambiente.** La máquina vibratoria se va instalar en un laboratorio, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, él cual se encuentra en condiciones de temperatura ambiente (un rango de 5 a 30 °C), presión atmosférica de 97 800 kPa y nivel de humedad de 12% a 90%. El dispositivo no estará expuesto a ningún líquido, salvo en el caso de ser aceitado en algunas partes móviles.

**Tamaño y peso.** El dispositivo debe poder instalarse en un área de un metro cuadrado y debe ser lo más ligero posible para evitar efectos de inercia cuando se encuentre en movimiento.

**Costo del producto.** Es importante mencionar, que en la mayoría de la literatura, este mecanismo esta conformado por un agitador electromagnético, él cual fue descartado, en nuestro caso, debido a su alto costo. Para la construcción de este dispositivo se cuenta con alrededor de \$50,000 pesos mexicanos. Sin embargo, se espera que se gaste máximo alrededor de \$30,000 pesos mexicanos.

**Materiales.** Los materiales deben ser resistentes, ya que parte del equipo estará sometido a altas aceleraciones y tendrá que soportar el peso dinámico del sistema, ligeros y con acabados que prevengan situaciones no deseadas como la corrosión y el desgaste.

**Instalación.** La instalación debe ser sencilla. Así, si el dispositivo llegara a requerir mantenimiento, seria fácil de transportar.

**Tiempo de servicio.** El dispositivo debe tener una vida útil de 2 años. Ya que será utilizado para una serie de investigaciones.

**Facilidad de Manufactura y mantenimiento.** La manufactura se debe poder hacer con equipo convencional (torno, fresa, cepillo) y el mantenimiento debe resultar sencillo.

## 2.3. Diseño Conceptual

### 2.3.1. Funciones

La principal función de la máquina vibratoria es proporcionar al contenedor con material granular movimiento vertical, horizontal y biaxial oscilatorios. Para su funcionamiento el dispositivo se puede dividir en dos sistemas principales: un sistema mecánico y un sistema eléctrico-electrónico. El sistema mecánico se puede dividir a su vez en un sistema de movimiento, uno de soporte y uno de transmisión. Por otro lado, el sistema eléctrico-electrónico se divide en un sistema de potencia y uno de control. Como se muestra en la figura siguiente,

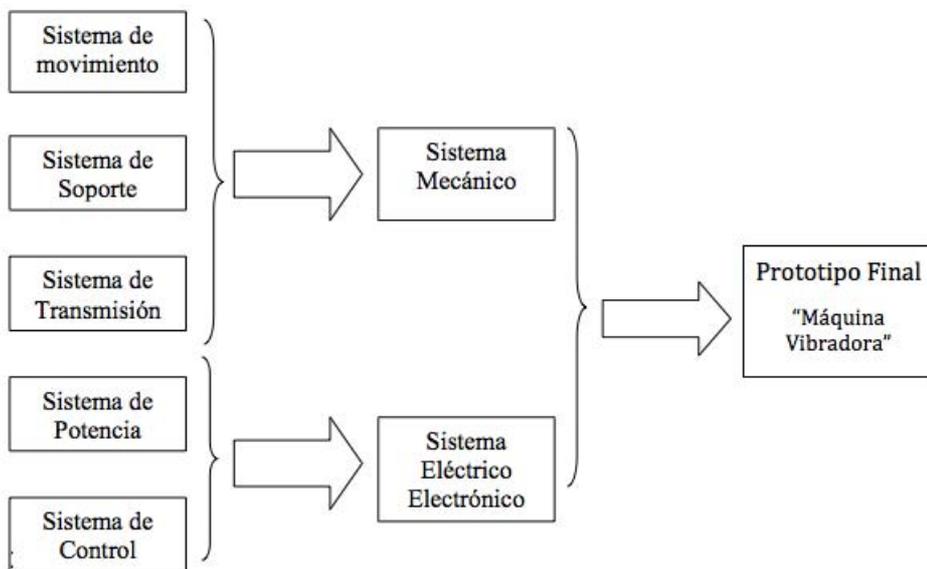


Figura 2.3: Sistema del prototipo diagrama de caja negra.

### 2.3.2. Descripción de funciones

#### Sistema mecánico

##### Sistema de movimiento y transmisión

Este sistema va a proporcionar el movimiento al contenedor. El equipo experimental con el que contabamos estaba diseñado para proporcionar estos movimientos oscilatorios verticales y horizontales de forma independiente. Revisando la literatura, observamos que la mayoría de los experimentos son realizados en una sola dirección, debido a su complejidad. Por lo cual se decidió, sacrificar la independencia de movimientos.

Se requiere de un sistema que transmita el movimiento rotatorio de un motor a un movimiento lineal para oscilar el contenedor. Este sistema debe tener la posibilidad de cambiar la amplitud de la oscilación del contenedor de 0 a 5 *mm*.

##### Sistema de soporte

El sistema de soporte se divide en 3 subsistemas: la base para sostener al contenedor, la base para sostener los miembros que conformen la máquina vibratoria y la base para sostener la mesa vibratoria.

#### Sistema eléctrico-electrónico

##### Sistema de potencia

El sistema de potencia, será un motor de corriente directa, él cual será alimentado por una fuente de poder.

##### Sistema de control

El sistema de control tiene como función poner en marcha al sistema, pero al mismo tiempo debe regular y coordinar las operaciones de la máquina vibratoria.

### 2.3.3. Generación y evaluación de conceptos

Para el diseño del dispositivo mecánico se estudiaron ampliamente las opciones presentadas por Jaimes Mojica<sup>20</sup> y Alejandro Perez y Joshua Cardiel<sup>3</sup>, en sus trabajos de tesis respectivos, debido a que ambos construyeron una máquina similar a la que deseamos. Entre sus opciones coinciden en una que nos parece muy adecuada: el sistema consiste en el uso de un motor y un mecanismo biela-manivela, dicho mecanismo esta sujeto a una placa con la característica de poder ser inclinada y realizar movimientos totalmente horizontales o verticales, así como combinados. Sin embargo, estos últimos son dependientes entre si. (Figura 2.4)

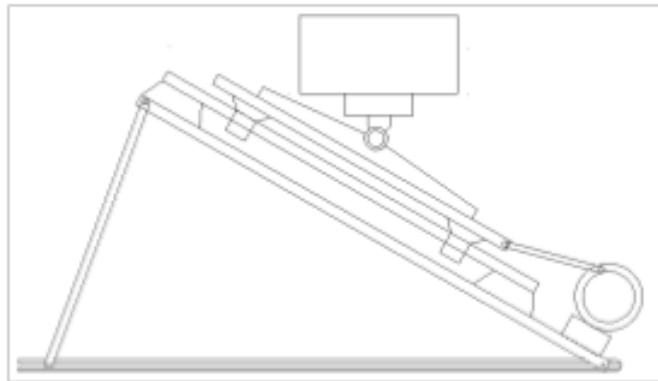


Figura 2.4: Propuesta de diseño.

Este diseño muestra varias ventajas, por el cual lo hemos elegido. Su construcción y ensamble es relativamente sencillo y económico comparándolo con las demás posibles opciones. Aunque no se pueden generar movimientos biaxiales donde la amplitud y frecuencia del movimiento vertical y horizontal sean independientes, se puede generar movimientos biaxiales donde un movimiento depende del otro.

## 2.4. Diseño de Detalle

En esta sección se describirán a grandes rasgos los elementos que conforman la máquina vibratoria a diseñar.

### 2.4.1. Sistema mecánico

El sistema mecánico esta subdividido en dos subsistemas : Sistema de movimiento y transmisión y Sistema de Soporte.

#### Sistema de movimiento y transmisión

El sistema de movimiento y transmisión esta conformado por un riel y carro, y un sistema biela-manivela.

**Riel y carro.** El riel y el carro constituyen la guía del movimiento. En el carro ira el soporte para el contenedor. Se eligió de la marca INA modelo RWU 25. DFE.G2.V3 debido a su pequeño tamaño, bajo peso y precisión. La precisión del movimiento lineal de este conjunto reduce las vibraciones externas de las que genera el sistema biela-manivela (figura 2.5).

**Biela y manivela.** El sistema de biela y manivela tiene como función transmitir el movimiento rotatorio del motor a lineal para oscilar verticalmente al contenedor. Además, es el encargado de la variación de amplitud del sistema. Las amplitudes utilizadas en anteriores experimentos oscilan entre  $1\text{ mm} < a < 15\text{ mm}$ , por lo cual este sistema requiere de una construcción cuidadosa, ya que la precisión en la amplitud es de suma importancia. Se usó el diseño hecho por Alejandro Perez y Joshua Cardiel<sup>3</sup>, pero se adecuó al tamaño que cubriera nuestras necesidades. El sistema fue construido en el taller del Instituto de Ingeniera de la UNAM y un diagrama se muestra en la figura 2.6.

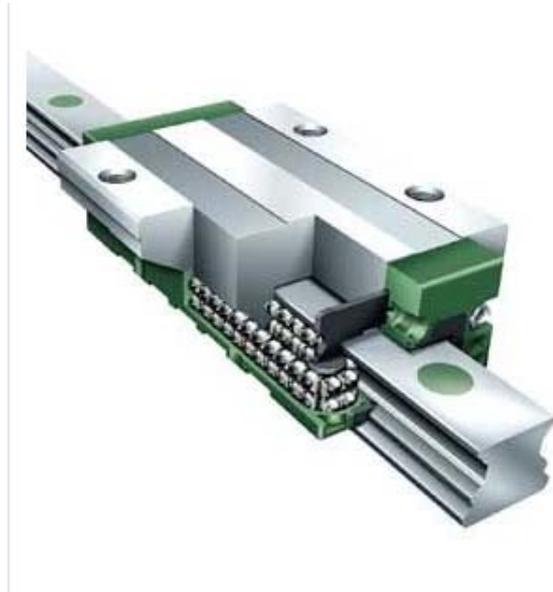


Figura 2.5: Riel y carro lineal marca INA modelo RWU 25. DFE.G2.V3.

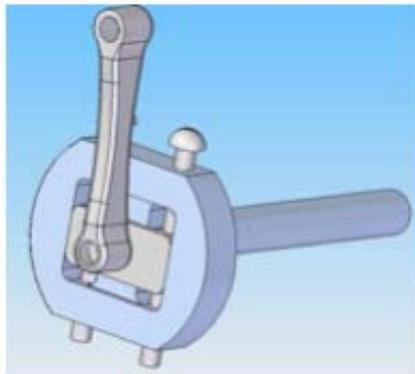


Figura 2.6: Mecanismo Biela-manivela. Para detalles de su construcción referirse a Alejandro Perez y Joshua Cardiel<sup>3</sup>

## Sistema de Soporte

El sistema de soporte esta conformado con un soporte para el contenedor, una placa móvil para sostener los elementos de la máquina y una mesa antivibratoria para sostener la máquina (figura 2.7).

**Soporte del contenedor.** El soporte del contenedor es el elemento de unión entre la base del mismo y el carro móvil. En la parte superior de dicho carro esta montado el buje sobre el que giran las abrazaderas para permitir lo movimientos. Se construyeron dos soportes, uno destinado para el movimiento vertical y uno para el horizontal.

**Placa móvil.** Sobre ésta se colocan todas las partes anteriormente descritas. Se le acopló un sistema lateral de placas en las cuales se soporta para facilitar su giro en un rango de cero a noventa grados con respecto al plano horizontal.

**Mesa antivibratoria.** Se cuenta con una mesa de alta masa para colocar la máquina vibratoria y así amortiguar las posibles transmisiones de vibración. Esta mesa está hecha de acero cold roll y cuenta con una superficie de un metro cuadrado.

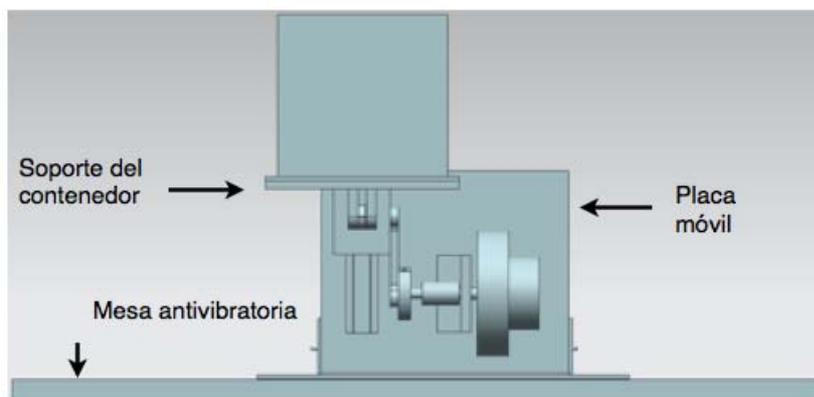


Figura 2.7: Sistema mecánico

### 2.4.2. Sistema eléctrico-electrónico

El sistema eléctrico-electrónico que necesitamos es relativamente sencillo, ya que sólo se requiere controlar y alimentar a un motor de corriente directa.

#### Sistema de potencia y control

**Motor** El motor debe ser de dimensiones pequeñas, bajo peso y buena potencia. Por lo cual se eligió un un motor de corriente directa de la marca Perm-motor modelo PMG080, sus características se muestran en la siguiente figura,

Corriente	78 A
Voltaje	12 V
Potencia	0.75 KW
Torque	2.4 N-m
Peso	3.4 kg



Figura 2.8: Motor Perm-motor PMG080.

**Fuente de alimentación del motor.** Para regular el motor de corriente directa se utiliza una fuente de alimentación modelo N5764A de la marca Agilent technologies. Se utiliza esta fuente debido a que el motor requiere una alimentación de alta corriente, además de la exactitud de la fuente, sus características se muestran en la siguiente figura,



Corriente	Voltaje	Potencia
76A	20 V	1520 W

Figura 2.9: Fuente de alimentación Agilent technologies modelo N5764A

## 2.5. Proceso de manufactura y ensamble

En la figura 2.10 se muestra una fotografía de la máquina vibratoria ya construida e instalada.

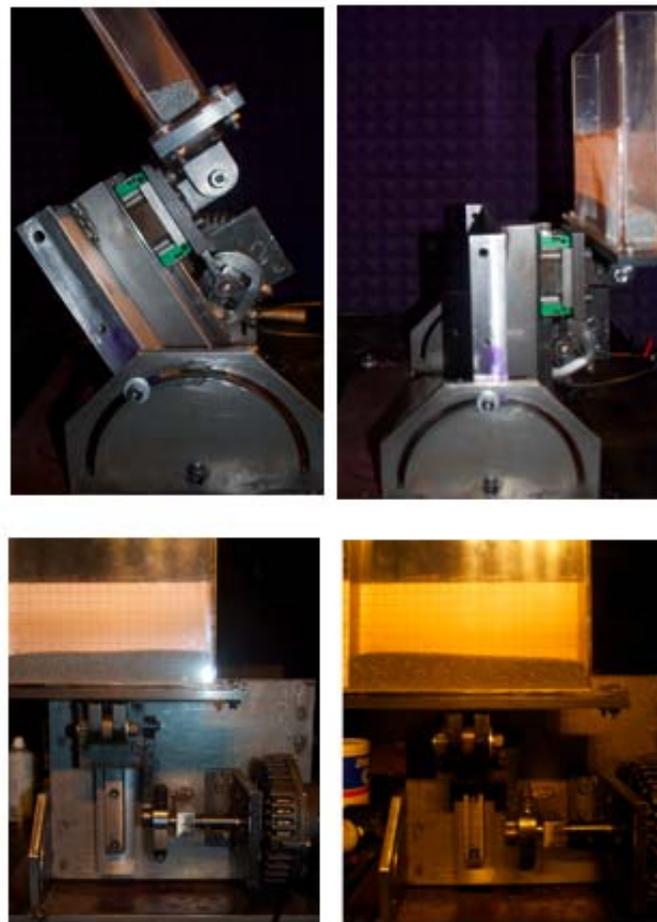


Figura 2.10: Dispositivo final. En las imágenes superiores se encuentra el dispositivo de costado, donde se puede observar la placa móvil en diferentes ángulos. Mientras que las imágenes inferiores muestran la parte frontal del dispositivo, donde se pueden observar los elementos antes descritos.

---

No se entrarán en detalles de su manufactura y ensamble, ya que no es el objetivo de la tesis. La máquina se construyó en el instituto de ingeniería de la UNAM, fue hecha con acero cold roll. Se usaron las siguientes máquinas para realizar diferentes operaciones:

1. **Torno**, refrentado, centrado, taladrado, roscado y machuelado de nuestros elementos.
2. **Fresadora**, refrentado a escuadra y taladrado de precisión.
3. **Máquina CNC**, refrentado, barrenado, debastado y creación de ranuras.

El ensamble se llevó a cabo por medio de tornillos y soldadura.

# 3

## Desarrollo experimental

---

<b>3.1. Dispositivo Experimental . . . . .</b>	<b>33</b>
3.1.1. Contenedores y material granular . . . . .	33
3.1.2. Máquina vibratoria . . . . .	34
3.1.3. Sistema de visualización . . . . .	35
3.1.4. Sistema de emisión y recepción de señales acústicas . . . . .	36
<b>3.2. Metodología . . . . .</b>	<b>37</b>
3.2.1. Método de visualización del flujo granular . . . . .	37
3.2.2. Método de transmisión y grabación de la señal acústica . . . . .	38
<b>3.3. Descripción Experimental . . . . .</b>	<b>39</b>
3.3.1. Experimento 1. Caracterización de patrones de flujo granular vibratorio. . . . .	40
3.3.2. Experimento 2. Propagación de una onda acústica en un medio granular sometido a vibración. . . . .	41

---

## 3.1. Dispositivo Experimental

Se diseñó y construyó un sistema capaz de generar las condiciones experimentales que se requieren para el estudio de materiales granulares sometidos a vibración y para la propagación de ondas acústicas en los mismos. Basándonos en diversos artículos [Brennen<sup>1</sup>, Mena<sup>11</sup>, Aoki<sup>2</sup>, Wassgren<sup>6</sup>], se llegó a un modelo que cumple con las condiciones necesarias. Éste sistema está conformado por cuatro subsistemas: el contenedor y material granular, el sistema que proporciona el movimiento oscilatorio (la máquina vibratoria), el sistema de visualización y el sistema de emisión y recepción de señales acústicas.

### 3.1.1. Contenedores y material granular

Se construyeron dos contenedores rectangulares de acrílico transparente de 3 mm de espesor con dimensiones de 30 mm x 100 mm x 200 mm y 30 mm x 200 mm x 200 mm respectivamente. Se construyen de esas dimensiones basados en los resultados de Aoki<sup>2</sup>. En su manufactura se cuidó que las paredes quedaran perfectamente escuadradas, sin filos ni rebabas que pudiesen obstruir el movimiento de las partículas (figura 3.1).

El medio granular utilizado consiste en esferas de vidrio de  $1 \pm 0.1$  mm de diámetro promedio con densidad  $\rho = 2500$  kg/m<sup>3</sup>. Se escogió vidrio debido a que su coeficiente de restitución (0.95) es lo suficientemente elevado como para que no se disipe mucha energía en los choques y se produzca el movimiento de convección.

Las partículas son lo suficientemente grandes para despreciar los efectos electrostáticos. Sin embargo, con el fin de evitar estos efectos se rocía el recipiente con un material antiestático, y cuando las esferas ya han sido utilizadas durante varios ciclos, se cambian por otras nuevas.

Posteriormente, viendo que el acrílico de las paredes del recipiente se cargaba electrostáticamente en poco tiempo debido al rozamiento con las esferas de vidrio, se optó por un recipiente de las mismas dimensiones que el anterior pero hecho del mismo material que las esferas. Sin embargo, con ambos tipos de recipiente los resultados obtenidos fueron iguales. Debido a la configuración de la altura del recipiente y el

diámetro de la esfera, el rango del número adimensional de capas fue  $0 < N < 100$ , aunque nunca se llenó el recipiente completamente.

### 3.1.2. Máquina vibratoria

El recipiente con el material granular en su interior se sujeta por la base a un dispositivo mecánico diseñado y construido para producir las vibraciones deseadas. Este dispositivo mecánico tiene la posibilidad de generar oscilaciones verticales, horizontales y biaxiales. Sin embargo en la configuración biaxial, los movimientos son mutuamente dependientes. En este trabajo solamente nos enfocaremos en los movimientos verticales, los demás serán objeto de otras investigaciones.

El dispositivo cuenta con una base rígida de acero para colocar el recipiente, la cual esta sujeta a un riel de alta precisión de la marca INA modelo RWU 25. DFE.G2. V3. El riel y el recipiente se mueven por medio de un mecanismo biela-manivela que esta acoplado a un motor de corriente directa de la marca Perm motor modelo PMG080, él cual esta conectado a una fuente de alimentación de la marca Agilent technologies modelo N5764A. Un diagrama de dicho dispositivo puede observarse en la figura 3.1, los detalles de su diseño y construcción se estudiaron en el Capítulo 2.

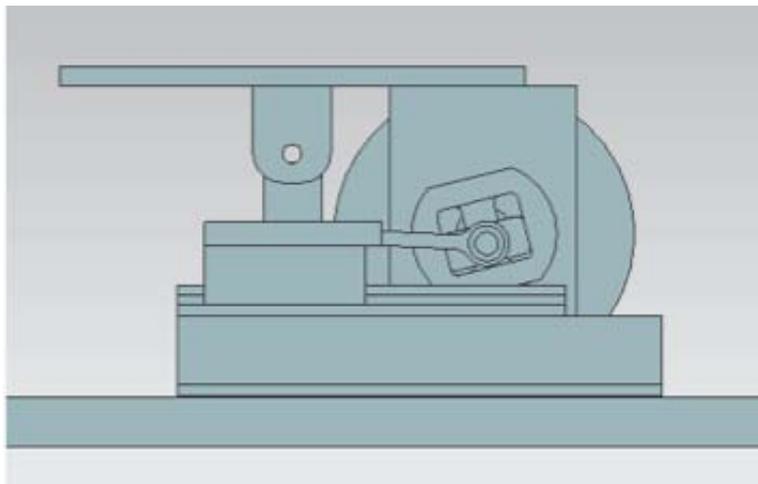


Figura 3.1: Dispositivo mecánico.

Este aparato es capaz de suministrar una vibración del recipiente con una distorsión menor del 1% y una aceleración transversal residual de menos del 0.5 g. Mediante la fuente de alimentación se le da energía al motor y se controla su velocidad. Los parámetros que se pueden medir directamente son la frecuencia, la amplitud y por lo tanto la aceleración adimensional  $\Gamma$ . En la mayoría de los experimentos la amplitud es fija y la frecuencia es variable. La variación es de 1 a 5 mm en amplitud y una frecuencia de oscilación de 0 a 50 Hz, ambas controladas independientemente, por lo que la aceleración adimensional se sitúa entre  $0 < \Gamma < 50$ .

### 3.1.3. Sistema de visualización

Se requiere de un sistema para la visualización de los patrones convectivos, el cuál esta conformado por trazadores de partículas, que son esferas de vidrio pintadas de negro que nos permiten seguir la dinámica de los movimientos de convección. Además de una cámara de video de alta definición de la marca Sony modelo HVR-A1U (figura 3.2) con la que grabaremos la dinámica del flujo de partículas y una lámpara estroboscópica de la marca — modelo ..... que tendrá como función congelar el movimiento de las partículas haciendo más sencilla la observación de los patrones de flujo.



Figura 3.2: Cámara de video HVR-A1U/A1N.

### 3.1.4. Sistema de emisión y recepción de señales acústicas

Para realizar la segunda parte del experimento, en la cual se manda una señal acústica en el medio granular sometido a vibración, se requiere un sistema de emisión que mande la señal y un sistema receptor que la reciba.

#### Sistema de emisión

Para transmitir la onda acústica del diseño anterior, se cuenta con unas bocinas de la marca Behringer modelo MS16. A las cuales se les manda la señal por medio de un generador de señales de la marca Tectronix modelo 5781-XE (figura 3.3). Este generador cuenta con un rango de frecuencia de 20 Hz a 1200 kHz, además de poder controlar la forma de la onda transmitida: forma cuadrada, sinusoidal o triangular.

#### Sistema de recepción

Para la grabación de la señal acústica que reciben los micrófonos, de la marca SHURE modelo Serie T, se cuenta con una consola de grabación marca TASCAM modelo SX-1 (figura 3.3). Los micrófonos son inalámbricos, pequeños con un amplio rango de frecuencia y alta fidelidad. Por otro lado la consola cuenta con varios canales, lo que nos permitirá estudiar a cada micrófono de manera independiente.

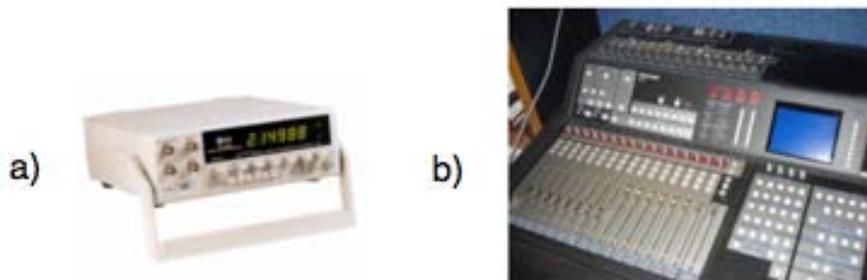


Figura 3.3: a) Generador de señales de la marca Tectronix modelo 5781-XE, b) Consola de grabación marca TASCAM modelo SX-1.

## 3.2. Metodología

### 3.2.1. Método de visualización del flujo granular

#### Trazadores

El sembrado de trazadores de flujo granular es un factor importante, ya que estos son los encargados de seguir la dinámica del flujo. Los trazadores consisten en partículas coloreadas, esferas de vidrio u otro material, que se colocan en la cama granular para poder visualizar las trayectorias.

El tipo y tamaño de partícula dependen del tipo de material granular que se requiera estudiar. Sin embargo, es importante que sea un material con la misma o similar densidad y diámetro que la partícula estudiada. Debido a que si los trazadores son partículas más grandes, podría ocurrir el efecto de segregación, el cual tiende a enviar a las partículas de mayor tamaño a la superficie de una cama granular sometida a vibración.

La concentración de trazadores en el medio granular es de gran importancia, ya que de esto depende el seguimiento de la trayectoria de las partículas que forman los rollos convectivos. Esta debe ser balanceada con la cantidad de esferas que se tengan.

#### Video y fotografía estroboscópica

Para visualizar los flujos granulares se ha optado utilizar la técnica de video y fotografía estroboscópica, la cual consiste en capturar imágenes en movimiento en fracciones infinitesimales de segundo. En el caso de la fotografía, se mantiene el obturador abierto por un periodo largo de tiempo mientras el estroboscopio parpadea, esto hace que la cámara capture diferentes lapsos de la trayectoria del movimiento del objeto de estudio, para finalmente tener una imagen que refleje la trayectoria del objeto en diferentes lapsos de tiempo. Lo cual nos permitirá estudiar la dinámica de los ciclos convectivos y estudiar su geometría.

Para este proceso de visualización se requieren algunas precauciones, la cámara debe colocarse en un tripie y la imagen debe ser tomada con un disparador de cable, esto para evitar cualquier movimiento indeseado que provoque que la imagen salga borrosa.

La fotografía y video se realiza en un cuarto oscuro, donde el objeto a fotografiar solamente esta iluminado con la lámpara estroboscópica. Se debe encontrar un enfoque máximo para que dos esferas que se están tocando no aparezcan en la imagen como un sólo punto brillante.

### **Procesamiento de imágenes**

Se colocó en la parte posterior del contenedor granular una hoja milimétrica, la cual nos permite cuantificar la geometría de los fenómenos que ocurren durante los experimentos.

Observando las imágenes y vídeos, podemos identificar los ciclos convectivos, los segmentos en que se forman y encontrar las zonas de mayor y menor concentración de partículas. Para así proponer las posibles zonas muertas y de resonancia, donde deben ser colocados los receptores que reciben la señal acústica.

### **3.2.2. Método de transmisión y grabación de la señal acústica**

Para la transmisión y grabación de la señal acústica, el generador de señales esta conectado al transmisor, este envía la señal por el medio granular, los micrófonos la reciben y la envían a la consola, la cual graba dicha señal, para después ser procesada en la computadora.

Las señales enviadas pueden variarse en amplitud, frecuencia y forma (cuadrada, sinusoidal y triangular). Se prueban diferentes combinaciones. Sin embargo, se tiene preferencia en las señales de alta frecuencia y pequeña amplitud. Debido a que las ondas de alta frecuencia, ondas S, son sensibles a un cambio de configuración en las cadenas de fuerzas del medio granular (véase capítulo 1).

Los micrófonos se colocan en lugares estratégicos a lo largo del contenedor, inmersos en el medio granular, en zonas de posible resonancia o aislamiento acústico. De esta manera, al recibir la señal en la consola y procesarla en la computadora, es posible medir si existen o no, fenómenos acústicos, tales como zonas muertas o de resonancia.

### 3.3. Descripción Experimental

Los experimentos procuran replicar algunos experimentos anteriores, los cuales han mostrado resultados satisfactorios (Aoki<sup>2</sup>, Brennen<sup>1</sup>, Mena<sup>11</sup>, Nagel<sup>21</sup>). Estos experimentos se han adecuados a nuestras necesidades, intereses y posibilidades. Se ha hecho lo anterior debido a que se desea aprovechar las contribuciones hechas por en sus investigaciones. Además, así, se cuenta con un patrón de referencia para comparar resultados.

El experimento, debido a su complejidad, se ha dividido en dos sub-experimentos: al primero se le llamará, Experimento 1, Caracterización de patrones de flujo granular vibratorios y al segundo, Experimento 2, Propagación de una onda acústica en un medio granular sometido a vibración. A continuación se describirán sus objetivos y alcances correspondientes.

**Experimento 1. Caracterización de patrones de flujo granular vibratorios.** Consiste en encontrar y caracterizar los fenómenos que se presentan en los medios granulares sometidos a vibración, mencionados en el capítulo 1; Apilamiento, ondas superficiales de pequeña amplitud, arqueos, ondas superficiales de gran amplitud y rollos convectivos. Mediante técnicas de visualización se encontrarán los lugares adecuados para colocar los receptores que recibirán la señal acústica.

**Experimento 2. Propagación de una onda acústica en un medio granular sometido a vibración.** Una vez que se tengan caracterizados los ciclos convectivos, objetivo del experimento 1, se llevará a cabo el experimento 2, el cual consiste en enviar una señal acústica a través del medio granular sometido a vibración, medir la velocidad de onda, cuantificar la atenuación, identificar las zonas muertas y de posible resonancia. Aunque en el presente trabajo se muestran resultados preliminares, los resultados finales serán objeto de otro trabajo de Tesis.

### 3.3.1. Experimento 1. Caracterización de patrones de flujo granular vibratorio.

El sistema consiste de un contenedor rectangular, el cual es llenado con material granular y montado en un dispositivo mecánico que proporciona el movimiento oscilatorio (descrito en el capítulo 2) , todo el conjunto se encuentra sobre una mesa antivibratoria de gran masa, de manera que cuando el sistema está correctamente alineado a la vertical, la aceleración residual que pueda existir en la dirección horizontal sea lo más baja posible. Se utiliza una cámara estroboscópica y de video para las imágenes. Un diagrama del sistema se muestra en la figura 3.4.

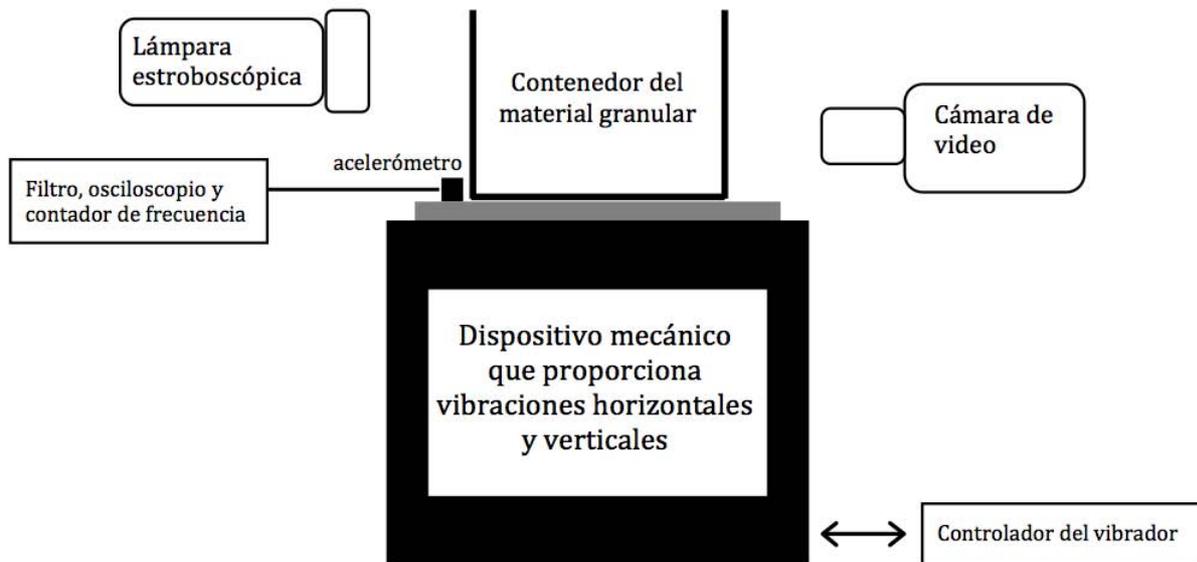


Figura 3.4: Dispositivo experimental usado para obtener los patrones convectivos (medios granulares sometidos solamente a vibración vertical).

Un experimento típico procede como sigue: A una amplitud dada  $a$  se varía la frecuencia  $f$  para obtener diferentes niveles de  $\Gamma = a\omega^2/g$ , entre cero y el máximo límite del dispositivo vibratorio. (alrededor de  $\Gamma = 50$ ). Usando la lámpara estroboscópica, el medio granular fue observado en varios ángulos de fase mientras que la cámara de video de alta definición

grababa. Cuando se identificaban los fenómenos convectivos descritos en el capítulo 1, se anotaban los valores de  $\Gamma$  a los que fueron apareciendo.

Se ha colocado una medición milimétrica en la pared posterior del contenedor, que nos permita analizar las imágenes y encontrar las zonas donde se forman los ciclos convectivos, donde hay mayor o menor concentración de partículas y las posibles zonas muertas o de resonancia.

### 3.3.2. Experimento 2. Propagación de una onda acústica en un medio granular sometido a vibración.

Para realizar el experimento 2, en el cual se superponen las ondas acústicas al flujo granular vibratorio, se ha adecuado un contenedor para integrarle un transmisor, en este caso un tweeter el cual es alimentado por un generador de señales marca Tectronic modelo 5781-XE. Se colocarán receptores (micrófonos) inmersos en el medio granular en las posibles zonas muertas o de resonancia. La caja debe quedar perfectamente aislada del ruido exterior, para que los datos que muestren los receptores sean lo más limpios posibles.

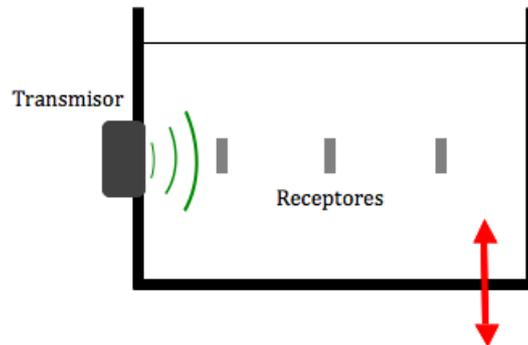


Figura 3.5: Arreglo experimental para la transmisión de ondas acústicas. El arreglo es similar al del experimento en el que sólo se buscan los patrones convectivos. Se le integra el transmisor y los receptores, así como los instrumentos necesarios para la transmisión y adquisición de datos correspondientes.

# 4

## Resultados

---

<b>4.1. Experimento 1. Caracterización de patrones de flujo granular vibratorio. . . . .</b>	<b>43</b>
4.1.1. Apilamiento . . . . .	43
4.1.2. Ondas superficiales de pequeña amplitud . . . . .	46
4.1.3. Arqueo . . . . .	48
4.1.4. Ondas superficiales de gran amplitud . . . . .	50
4.1.5. Rollos convectivos . . . . .	52
<b>4.2. Experimento 2. Resultados preliminares . . . . .</b>	<b>54</b>

---

## 4.1. Experimento 1. Caracterización de patrones de flujo granular vibratorio.

En esta sección se describirán los fenómenos convectivos observados, se harán algunas comparaciones con investigaciones anteriores y se propondrá una configuración para colocar los micrófonos dentro del contenedor para así, realizar el estudio de propagación de ondas en un medio granular sometido a vibración.

### 4.1.1. Apilamiento

El fenómeno de apilamiento se observó en todos los casos, con un valor de  $\Gamma$  de alrededor de  $\Gamma_H \approx 1.2$  y es independiente del valor de  $N$ , del tamaño del contenedor, del tipo de partícula. Estos resultados concuerdan con los presentados por Evesque and Rajchenbach<sup>8</sup> que encontraron que  $\Gamma_H = 1.2 \pm 0.1$  y Brennen<sup>1</sup> que encontró que el fenómeno ocurría en  $\Gamma_H = 1.2$ .

Con una amplitud de  $5\text{ mm}$  en la máquina vibratoria, se observó que para frecuencias por debajo de  $9\text{ Hz}$ , la parte alta de la colina se formaba del lado derecho del recipiente. Sin embargo, al aumentar la frecuencia por arriba de los  $9\text{ Hz}$ , el medio granular regresaba a una superficie plana horizontal para después comenzar a formar nuevamente el apilamiento pero en esta ocasión con la colina del lado derecho del recipiente, como puede observarse en la figura 4.1. Durante nuestros experimentos, no se observó el fenómeno descrito por Laroche<sup>17</sup>, en cuyos experimentos describe que la parte alta de la colina ocurre en el centro del recipiente.

El fenómeno de apilamiento ocurre cuando las partículas que se encuentran en la cima de la colina comienzan a descender por la superficie libre hasta la parte baja de la colina, donde las partículas se integran a la masa granular y comienzan a moverse hacia la parte alta de la colina para continuar con el ciclo. (figura 4.2). No se midieron las velocidades de las partículas que actúan en el ciclo convectivo. Sin embargo, se observó que la velocidad del movimiento se incrementaba cuando  $\Gamma$  se incrementa.

Para el estudio de la propagación de onda en el medio granular, se propone la configuración de los receptores en el medio granular como se muestra en la figura 4.3, un

micrófono inmediato en la salida de la señal acústica, en el inicio del ciclo convectivo, otro inmerso en el centro del ciclo convectivo, y un tercero en la salida del ciclo convectivo, muy cerca de la pendiente.

Es probable que en este fenómeno no encontremos los resultados que buscamos, de resonancia y aislamiento acústico, debido a que la velocidad del ciclo convectivo es lento y se cuenta sólo con un rollo convectivo. Sin embargo, este fenómeno ofrece la ventaja de que es muy fácil de controlar, y podría darnos una idea más precisa, de como se comporta una onda acústica en un medio granular que sigue un patrón de movimiento.

Para generar el apilamiento, se agita al contenedor a una frecuencia entre 7 y 8 Hz, para obtener el apilamiento con colina a la derecha, mientras que para obtener el apilamiento con colina a la izquierda, se agita el contenedor entre 9 y 10 Hz, todo esto con un amplitud del equipo de  $5\text{ mm}$ ,  $N = 30$  y  $d = 1\text{ mm}$ . Conforme transcurre el tiempo la superficie de la cama granular pasa de un estado plano horizontal, a un estado plano inclinado y después de unos veinte segundos el apilamiento y su ciclo convectivo se comportan de manera estable. Es en el estado estacionario, cuando se envía la señal acústica.

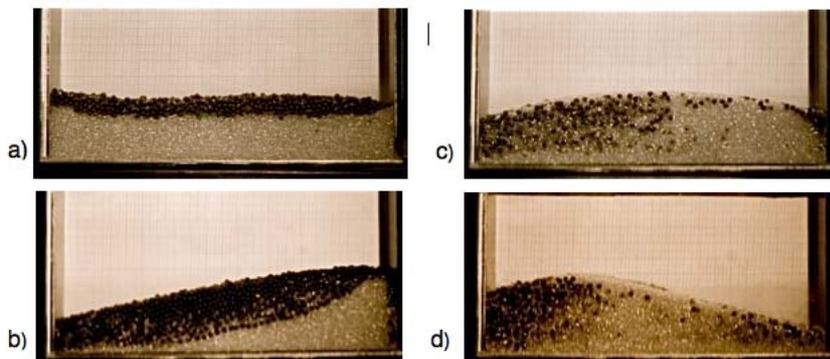


Figura 4.1: Formación del fenómeno de apilamiento de esferas de vidrio de  $d = 1\text{ mm}$  en un contenedor de acrílico de  $200\text{ mm}$  de largo,  $30\text{ mm}$  de ancho y  $200\text{ mm}$  de alto y una cama inicial de  $H = 37\text{ mm}$ . Las imágenes de la izquierda están sometidas a una frecuencia de  $8\text{ Hz}$  y  $\Gamma = 1.29$ , a) 0 segundos, b) 20 segundos. Mientras que las imágenes de la derecha se encuentran sometidas a una frecuencia de  $10\text{ Hz}$  y  $\Gamma = 2$ , c) 0 segundos, b) 30 segundos.

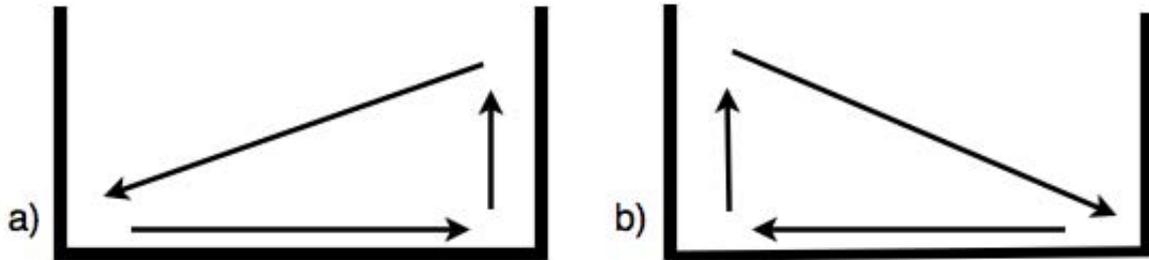


Figura 4.2: Según la frecuencia de oscilación, el apilamiento ocurre con colina a la derecha (inciso a) o colina a la izquierda (inciso b), en nuestro caso, con amplitud de  $5\text{ mm}$ . el cambio de transición ocurrió a los  $9\text{ Hz}$ .

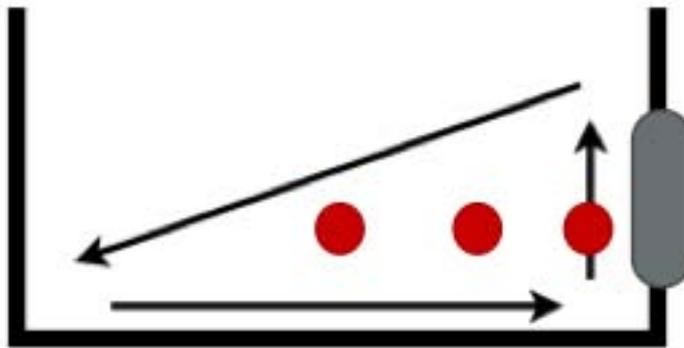


Figura 4.3: Propuesta de disposición de los micrófonos en el fenómeno de apilamiento. Se propone colocar tres receptores (puntos rojos) en nuestro caso, micrófonos. Uno a la entrada de la señal acústica para medir la señal de entrada, otro en el centro del ciclo convectivo y el último micrófono a la salida del ciclo.

### 4.1.2. Ondas superficiales de pequeña amplitud

El fenómeno de ondas superficiales de pequeña amplitud empieza a aparecer en la superficie libre del fenómeno de apilamiento cuando el valor de  $\Gamma$  se incrementa a otro valor crítico de  $\Gamma$  denotado por  $\Gamma_s$ , de  $\Gamma_s \approx 2.2$ , en concordancia con Brennen<sup>1</sup> se encontró que este fenómeno es dependiente de  $N$ . Cuando  $\Gamma$  es incrementada, el fenómeno de apilamiento y su fenómeno convectivo comienzan a desaparecer y las ondas superficiales de pequeña amplitud se vuelven más pronunciadas.

Ocasionalmente distintas partes de la superficie granular presentaban diferentes patrones de onda. Por ejemplo, en un extremo de la caja las crestas de la onda son paralelas al lado angosto de la misma, mientras que en el otro extremo las crestas de las ondas son paralelas al lado largo de la caja. Cuando las crestas eran paralelas al lado angosto de la caja, el número de ondas variaba de  $n$  a  $n + 1/2$  donde  $n$  es un entero. Las paredes del recipiente siempre coinciden con antinodos y el movimiento siempre aparece cada dos ciclos de oscilación. Estas características son similares a las encontradas por Faraday<sup>7</sup> y Brennen<sup>1</sup>

Para pequeñas amplitudes de oscilación las crestas de las ondas son redondeadas y los canales angostos, mientras que para mayores amplitudes, las crestas se presentan más agudas y los canales más amplios. Las partículas que se encuentran cerca de la superficie son las que permanecen en movimiento constante, mientras que las demás permanecen en contacto con sus partículas vecinas en un estado de empaquetamiento.

La elección de una zona para colocar los micrófonos en este caso resulta difícil, debido a que no existen fenómenos convectivos y la cama granular se despega de la superficie del contenedor durante el fenómeno, el cual ocurre cada dos ciclos de oscilación. Sin embargo, es relativamente fácil de obtener las ondas superficiales de pequeña amplitud con el dispositivo vibratorio que contamos.

Se propone que si se quiere hacer estudio de propagación de ondas acústicas en el fenómeno de ondas de pequeña amplitud se coloquen micrófonos en la zona donde la cama granular realiza un salto dejando un espacio entre la cama granular y la base del recipiente. Así, si la onda acústica viaja por el contacto de partículas, es posible que durante esos saltos, el micrófono capte alguna anomalía.



Figura 4.4: Fenómeno de ondas superficiales de pequeña amplitud, crestas redondeadas.

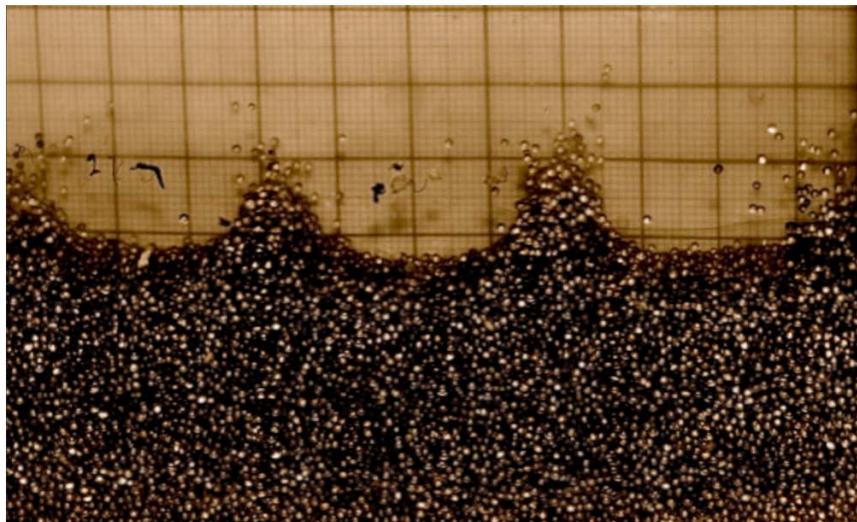


Figura 4.5: Fenómeno de ondas superficiales de pequeña amplitud, en esta fotografía se puede observar las crestas más puntiagudas, debido a un incremento de la frecuencia.

### 4.1.3. Arqueo

El fenómeno de arqueo ocurre cuando la aceleración llega a un valor particular  $\Gamma_{B1} \approx 3.6$ , el movimiento de la cama granular experimenta un periodo de doble bifurcación con respecto a la frecuencia de oscilación. Mientras que en  $\Gamma_{B2} \approx 4.6$ , experimenta un segundo periodo de doble bifurcación. En vez de repetirse el fenómeno cada ciclo de oscilación lo hace cada dos ciclos.

Se observó que los nodos estaban siempre situados simétricamente dentro del contenedor, cuando el fenómeno se presentaba con tres o más nodos, las paredes del recipiente siempre coincidían con anti-nodos. En el arqueo de uno o dos nodos, las ondas se mostraron en algunos casos, asimétricas. De hecho, usando una varilla para perturbar el fenómeno se logró cambiar la locación de los nodos dentro del contenedor.

Las partículas dentro de la masa granular se mueven creando ciclos convectivos, hacia abajo en los nodos, subiendo por los anti-nodos. El número de ciclos convectivos observados siempre fueron el doble que el número de nodos. La velocidad de las partículas aumenta conforme se aumentaba  $\Gamma$ .

El fenómeno de arqueo es uno de los fenómenos más estables, conforme se aumenta  $\Gamma$  aumenta el número de nodos. Para el caso del arqueo de cero nodos, se observó una gran convección granular, muy similar a la observada en el fenómeno de apilamiento.

El fenómeno de arqueo presenta el doble de ciclos convectivos que el número de nodos, por lo cual estudiar la propagación de una onda acústica a través de esos ciclos resulta atractivo. Sin embargo, a pesar de que el arqueo es un fenómeno estable presenta saltos que forman arcos con la base del recipiente, por lo que un estudio en cada ciclo sería complicado. Se propone realizar dos pruebas, una con arqueo de cero o de un nodo, donde hay pocos ciclos convectivos y ocurren de manera más lenta, así se podría estudiar la propagación de un ciclo convectivo a otro relativamente fácil. Mientras que la otra, se realice con arqueo de más de dos nodos y que se coloque un micrófono a la salida de la señal acústica, dentro del primer ciclo convectivo, y otro en el último ciclo convectivo, el que se encuentre al final del recipiente, para registrar si existe un aislamiento acústico.

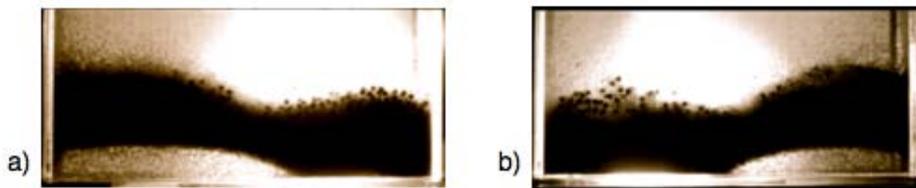


Figura 4.6: Fenómeno de arqueado de un nodo.

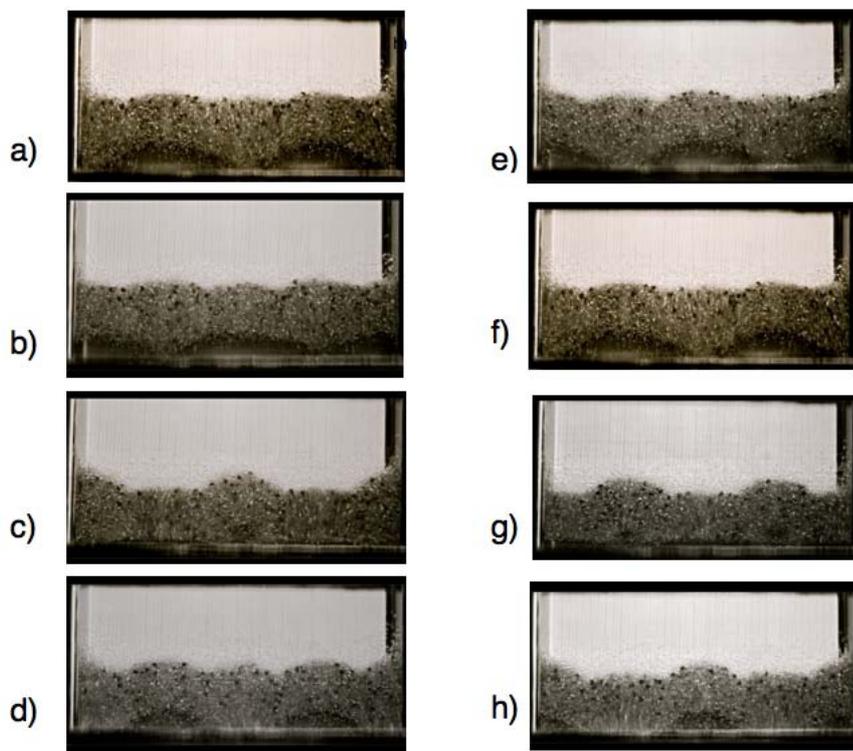


Figura 4.7: Ciclo completo de oscilación del fenómeno de arqueado de cuatro nodos.

#### 4.1.4. Ondas superficiales de gran amplitud

Cuando se incrementa el valor de  $\Gamma$  a un valor crítico de  $\Gamma_L$ , las ondas superficiales de gran amplitud aparecen superpuestas al fenómeno de arqueo (figura 4.8). Este fenómeno sólo se forma en regiones donde la superficie de la cama granular es plana. Por lo cual las ondas superficiales sólo fueron vistas durante el arqueo de cero, uno y dos nodos.

El fenómeno de ondas superficiales de gran amplitud es muy similar al de ondas superficiales de pequeña amplitud. Sin embargo, se observaron algunas diferencias, los picos de las ondas de gran amplitud son mucho más agudos que los redondeados picos de las ondas de pequeña amplitud. Además, en vez de repetir el mismo movimiento de ondas cada dos ciclos de oscilación, el movimiento ocurre cada 4 ciclos.

El movimiento de las partículas fue similar al observado en el fenómeno de ondas de pequeña amplitud. Las partículas de la superficie permanecían en constante movimiento mientras que las inmersas en la masa permanecieron en un estado de empaquetamiento, moviéndose relativamente una con respecto a otra. El número de ondas presente fue dado por  $n/2$  y las paredes laterales del recipiente siempre coinciden con anti-nodos.

De forma similar al fenómeno de ondas superficiales de pequeña amplitud, la longitud y amplitud de la onda se incrementan conforme se incrementa  $N$ , hasta un nivel máximo de  $N \approx 30$ . Además, cuando  $\Gamma$  se incrementa, las ondas comienzan a formarse una a lado de otra dando la sensación de que comienzan a ladearse alternativamente de un lado a otro.

Debido a que el fenómeno de ondas superficiales de gran amplitud aparece superpuesto al arqueo, elegir una zona para colocar los micrófonos en este fenómeno resulta difícil, debido a que, como en las ondas de pequeña amplitud, no existen fenómenos convectivos y la cama granular se despega de la superficie del contenedor durante el fenómeno, el cual ocurre cada cuatro ciclos de oscilación. Además el fenómeno es difícil de percibir, ocurre muy rápido y a altas frecuencias de oscilación, por lo cual se propone que en este caso no se realicen pruebas acústicas, ya que el fenómeno no es lo suficientemente estable.

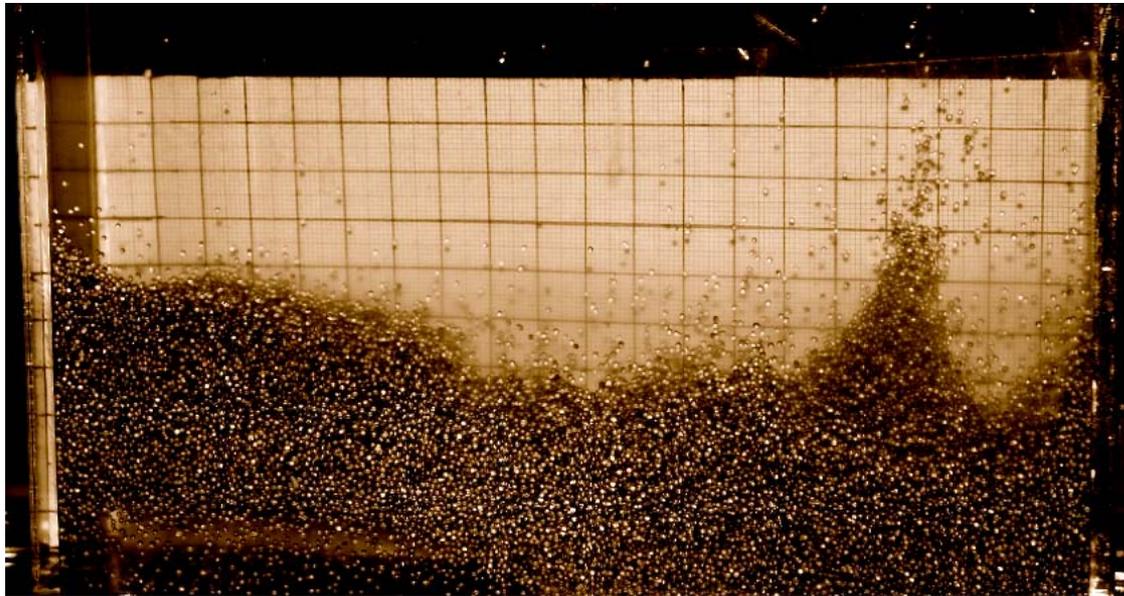


Figura 4.8: Onda superficial de gran amplitud superpuesta al fenómeno de arqueado

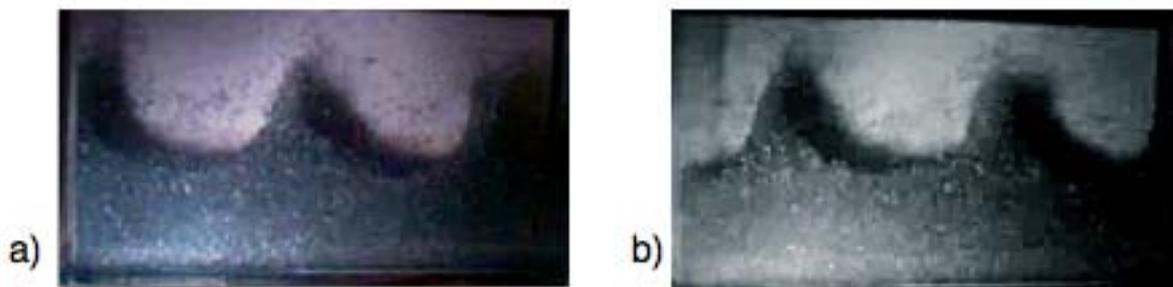


Figura 4.9: Ondas superficiales de gran amplitud

### 4.1.5. Rollos convectivos

Se lograron obtener los patrones de flujo convectivo "hacia abajo" y "hacia arriba". Sin embargo, el flujo convectivo "hacia arriba" se encontró en escasas ocasiones, debido a que según la literatura, Aoki<sup>2</sup>, el fenómeno convectivo "hacia arriba" se encuentran a frecuencias de alrededor de los 50 Hz, y la máquina vibratoria al llegar a esas frecuencias, sufría desalinamientos y provocaba altas vibraciones, por lo cual no proporcionaba un movimiento totalmente vertical.

A pesar de los inconvenientes mencionados, se logró observar que el movimiento convectivo "hacia arriba" es más rápido que el movimiento convectivo "hacia abajo", esto debido a que se presenta a mayores valores de  $\Gamma$ . Por otro lado se encontró que el rollo convectivo "hacia abajo", no es muy estable, ya que se rompe fácilmente con un incremento de  $\Gamma$  o con un cambio de inclinación de la cama granular. Además, no se pudieron obtener más de dos rollos convectivos como los obtenidos por Aoki, lo cual se atribuye a las limitaciones de la máquina.

Se observó que el valor crítico de  $\Gamma_c$  tiene cierta dependencia con la altura de la cama  $H$  y el tamaño de grano  $d$ , sin embargo no puede ser simplemente graficado en  $H/d$  por  $\Gamma_c$ , ya que no es una dependencia lineal.

Dentro de nuestra investigación de propagación de ondas acústicas en un medio granular sometido a vibración, los rollos convectivos son el fenómeno que nos parece más interesante. Debido a que tenemos la hipótesis de que si enviamos una señal acústica dentro de un rollo convectivo esta señal viajará junto con las partículas, por lo que la señal quedara re-circulando por el rollo convectivo, ya que la onda se propaga por medio de los contactos entre las partículas, provocando así, tal vez, efectos de resonancia dentro del rollo convectivo en el que viajan, mientras que el rollo conjunto no percibirá la señal, o existirá una significativa atenuación.

Por lo anterior, se propone que la disposición de los micrófonos sean como se muestran en la figura 4.1.5, Un micrófono a la entrada de la señal acústica, otro en el centro del primer rollo convectivo, otro en la zona donde termina el primer rollo convectivo y comienza el segundo rollo convectivo y finalmente otro en el centro del rollo convectivo conjunto.

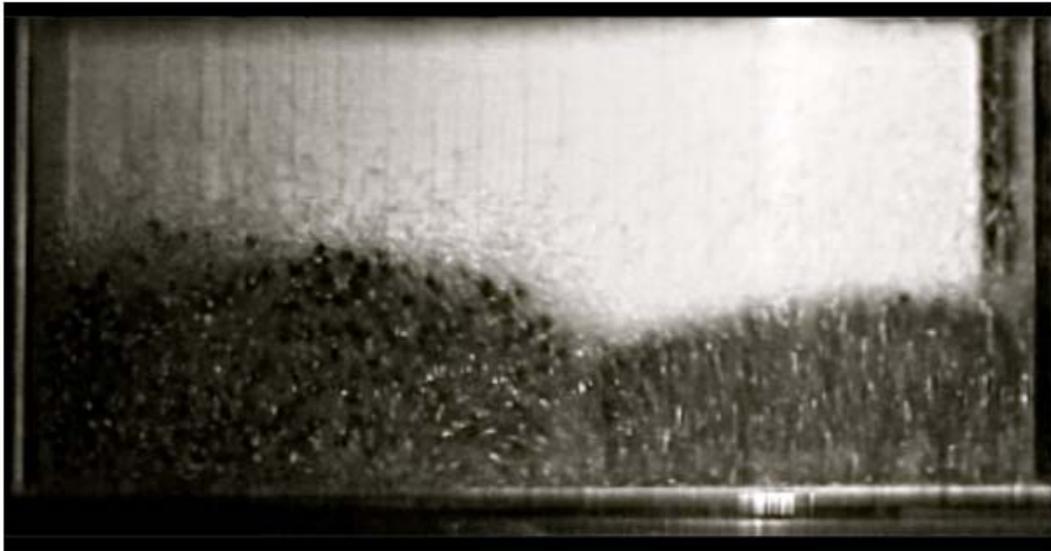


Figura 4.10: Rollo convectivo

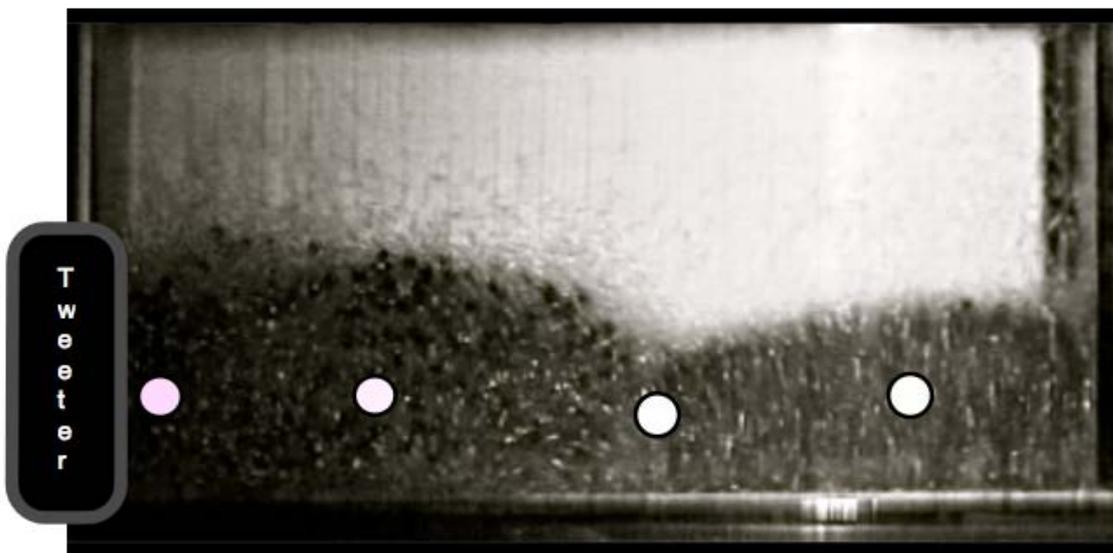


Figura 4.11: Disposición de los micrófonos en un par de rollos convectivos

## 4.2. Experimento 2. Propagación de una onda acústica en un medio granular sometido a vibración. (Resultados preliminares)

Al realizar pruebas para el Experimento 2, denotado "Propagación de una onda acústica en un medio granular sometido a vibración" se encontraron algunas dificultades, que se anuncian a continuación,

1. La máquina vibratoria, produce mucho ruido, debido a que tiene algunos problemas de alineación.
2. El golpeteo de los medios granulares con el contenedor produce ruidos indeseados.
3. El contenedor requiere de un mejor aislamiento acústico, además que existen rebotes de la onda acústica dentro de él.
4. Colocar los micrófonos en el medio granular resulta complicado, ya que el contenedor se mueve verticalmente y los micrófonos no permanecen en su posición.

Sin embargo, a pesar de las dificultades anteriores, se logró percibir que, efectivamente, existe una atenuación significativa en las señales recibidas por los micrófonos.

# 5

## Conclusiones

---

5.1. Conclusiones . . . . .	56
-----------------------------	----

---

## 5.1. Conclusiones

Se diseñó y construyó un dispositivo experimental capaz de proporcionar vibraciones en sentido vertical, horizontal y una combinación de ambos (biaxial). Tanto la placa móvil, como el contenedor pueden inclinarse a diferentes ángulos con respecto a la horizontal. La máquina presenta un rango de frecuencias de 0 a  $50\text{ Hz}$  y uno de amplitud de 0 a  $5\text{ mm}$ .

Se logró visualizar y caracterizar los patrones de flujo de apilamiento, ondas superficiales de pequeña y gran amplitud y arqueado, vistos también en otras investigaciones [Wassgren<sup>6</sup>, Mena<sup>11</sup>]. Sin embargo el fenómeno de rollos convectivos (visto por Aoki<sup>2</sup>), se logró visualizar escasas veces y no fue posible caracterizarlo. Lo anterior lo atribuimos a la capacidad de la máquina (máximo  $50\text{ Hz}$ ) y al tamaño de grano ( $d = 1\text{ mm}$ ). Debido a que, Aoki<sup>2</sup> realizó sus experimentos con frecuencias mayores a  $50\text{ Hz}$  y con tamaños de grano menores a  $1\text{ mm}$ , en cuyos resultados reporta que para granos de  $1.29\text{ mm}$  ya no se presentaron los rollos convectivos.

El fenómeno de apilamiento es el más sencillo de obtener y caracterizar, debido a que ocurre a bajas frecuencias (entre  $7$  y  $15\text{ Hz}$ ) y es independiente de  $N$  y el tipo de grano.

Las ondas de pequeña y gran amplitud resultaron ser similares, ambas se muestran en la superficie de la cama granular y superpuestas a otro fenómeno. Sin embargo, difieren en el tipo de cresta de la onda, las ondas de gran amplitud son mucho más agudas que las de pequeña amplitud, y en vez de repetir el movimiento cada dos ciclos de oscilación, lo hacen cada 4 ciclos.

El patrón de arqueado, se logró observar con diversos números de nodos, los cuales siempre están situados simétricamente dentro del contenedor. Este fenómeno es el más estable, pueden observarse claramente los ciclos convectivos.

Anexo I

Presentaciones.

# I.a. 82nd Annual Meeting of the Society of Rheology, 2010

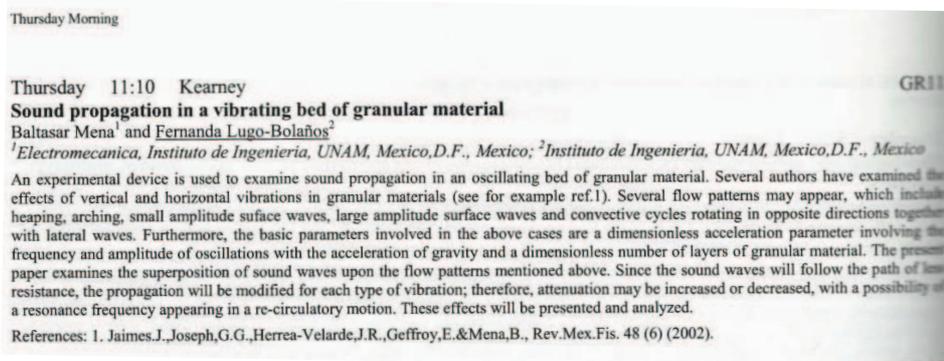
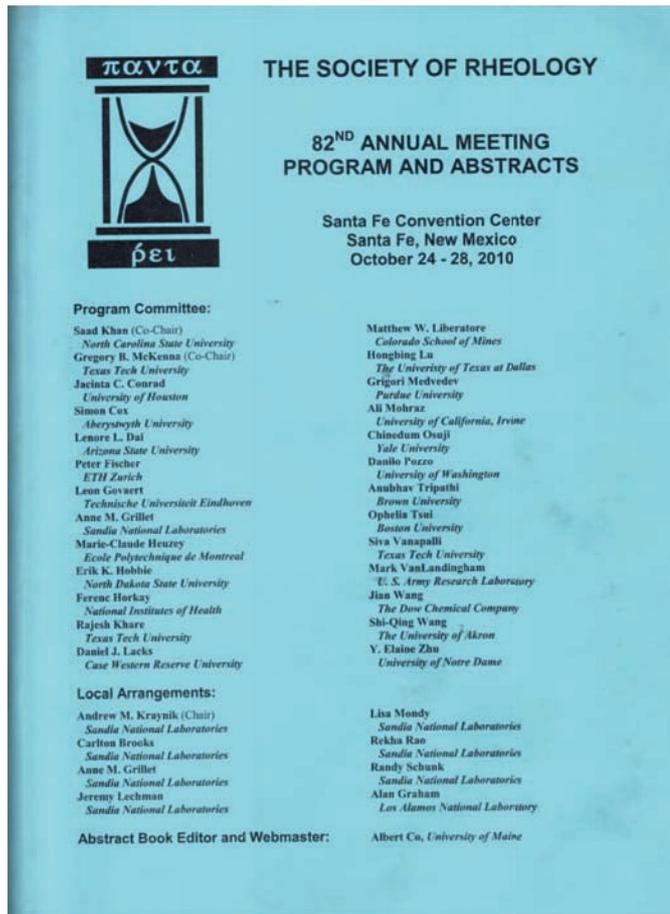


Figura I.1: Portada del boletín y resumen de la presentación.

# Bibliografía

- [1] C.E Brennen, M. H., C.R Wassgren VERTICAL VIBRATION OF DEEP BED OF GRANULAR MATERIAL IN A CONTAINER. *Transactions of the ASME* **1996**, *63*, 712–719.
- [2] Keiko M. Aoki, Y. M., Tetsuo Akiyama; Watanabe, T. CONVECTIVE ROLL PATTERNS IN VERTICALLY VIBRATED BEDS OF GRANULES. *Physical Review E* **1996**, *54*, 874–883.
- [3] Alvarado, A. P.; Rivera, J. J. C. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS EN MEDIOS GRANULADOS VIBRATORIOS; Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [4] G. Pulos and R. Zenit, MATERIALES GRANULARES: OTRO ESTADO DE LA MATERIA. *Materiales Avanzados Núm. 5* **2005**, 21–27.
- [5] Jeager, H. M.; Nagel, S. R.; Behringer, R. P. GRANULAR SOLIDS, LIQUIDS, AND GASES. *Review of Modern Physics* **1996**, *68(4)*, 1259–1272.
- [6] Wassgren, C. R. VIBRATION OF GRANULAR MATERIALS; California Institute of Technology, Pasadena California, 1997.
- [7] Faraday, M. ON A PECULIAR CLASS OF ACOUSTICAL FIGURES AND ON CERTAIN FORMS ASSUMED BY GROUPS OF PARTICLES UPON VIBRATING ELASTIC SURFACES. *Philosophical Transactions of the Royal Society (London)* **1831**, *121*, 299–318.

- 
- [8] Evesque, J., P. Rajchenbach INSTABILITY IN A SAND HEAP. *Phys. Rev. Lett* **1989**, *62-1*, 44–46.
- [9] Fauve, P. D. S.; Laroche, C. COLLECTIVE BEHAVIORS OF GRANULAR MASSES UNDER VERTICAL VIBRATION. *J. Phys. France* **1989**, *50-3*, 187–191.
- [10] Pak, H.; Behringer, R. IDENTIFYING STATES IN SHALLOW VIBRATED BEDS. *Phys. Rev. Lett.* **1993**, *71-12*, 1832–1835.
- [11] Jaimes, E. G. E., J. Joseph; Mena, B. PATTERN FORMATION IN OSCILLATORY GRANULAR FLOWS. *Revista Mexicana de Física* **2002**, *48-6*, 534–538.
- [12] Thomas, B.; Mason, M.; Liu, Y.; Squires, A. IDENTIFYING STATES IN SHALLOW VIBRATED BEDS. *Power Technology* **1989**, *57*, 267–280.
- [13] Bachmann, D. *Verfahrenstechnik Z.V.D.I Beiheft.* **1940**, *2*, 43.
- [14] Clément, E.; Durand, J.; Rajchenbach, J. EXPERIMENTAL STUDY OF HEAPING IN A TWO-DIMENSIONAL "SANDPILE". *Phys. Rev. Lett* **1989**, *69*, 1189.
- [15] Ehrich, E.; Jeager, H.; Karezmar, K. J., G.S. GRANULAR CONVECTION OBSERVED BY MAGNETIC RESONANCE IMAGING. *Science* **1989**, *267*, 1632.
- [16] Knight, J. EXTERNAL BOUNDARIES AND INTERNAL SHEAR BANDS IN GRANULAR CONVECTION. *Phys. Rev.* **1989**, *55*, 6016.
- [17] Laroche, C.; Douady, S.; Fauve, S. CONVECTIVE FLOW OF GRANULAR MASSES UNDER VERTICAL VIBRATION. *J. Phys. France* **1989**, *50*, 699.
- [18] Duffy, J.; R., M. STRESS-STRAIN RELATIONS AND VIBRATIONS OF A GRANULAR MEDIUM. *ASME Journal of Applied Mechanics* **1957**, *24*, 585–593.
- [19] Sen., S.; Robert, S. S.; Hurd, A. J. CONVECTIVE ROLL PATTERNS IN VERTICALLY VIBRATED BEDS OF GRANULES. *Granular Matter* **2001**, *3*, 33–39.

- [20] Jaimes Mojica, J. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA VIBRATORIA BIAXIAL PARA FLUJOS GRANULARES; Universidad Nacional Autónoma de México, 1997.
- [21] Nagel, R.; heng Liu., C. SOUND IN A GRANULAR MATERIAL. DISORDER AND NONLINEARITY. *Physical Review B* **1993**, 48-21, 646–650.