

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPAGACIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS A TRAVÉS
DE MEDIOS GRANULARES VIBRADOS**

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:
CARRIL NARANJO FERNANDO ADRIÁN

DIRECTOR: DR. BALTASAR MENA INIESTA

MÉXICO, D.F.,

2013

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 a través de medios granulares vibrados". 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

Al escribir estas líneas me doy cuenta que un sentimiento de alegría, sentimiento que dijeron uno debe tener en estas situaciones y que a veces ante la desesperación provocada por los fracasos y la incertidumbre se olvida, pero si estás leyendo esto es porque ya acabe la tesis y estoy a punto de titularme.

Vienen a mi mente todas aquellas personas que de alguna forma han permitido que yo esté aquí, listo para concluir un ciclo y empezar uno nuevo. En todos los sentidos las personas más importantes en la conclusión de este estadio son mi mamá y mi papá a quienes le debo la vida y muchas de las cosas más felices y hermosas que en ella puede haber.

Mamá, muchas gracias por el apoyo incondicional que me has dado durante toda mi vida, por siempre escucharme y mostrarme que las cosas nunca son tan graves, por consentirme, cuidarme y darme tanto amor.

Papá, Tu siempre has sido mi héroe, desde niño siempre he pensado que no puede existir mejor padre, siempre guiándome y dándome consejos en las situaciones más difíciles, mostrando que todo es posible y que no debo rendirme nunca si quiero lograr mis objetivos.

A mi hermanos Eduardo y Javier, Ustedes no me han mantenido ni me dieron la vida, pero me dieron la más sincera amistad, amor y apoyo en cada segundo, la mejor platica y compañía que una persona pudiera desear.

Liliana, a lo largo de la carrera has sido un gran apoyo para lograr todos mis objetivos, me has ayudado sin bacilar y has dejado de lado muchas cosas para estar conmigo, me has dado todo tu amor y cariño, me has soportado más que mi familia y has escuchado sin aburrirte mil y un discursos, contigo he pasado los momentos mas bellos de mi carrera, muchas gracias por estar en mi vida, te amo.

Dedico también una mención muy especial y cariñosa a todas las personas que participaron en el proyecto, ya que sin todos ustedes este triunfo personal no hubiera sido posible y créanme que no pudo existir mejor equipo de trabajo que ustedes.

Dr. Baltasar Mena Iniesta, te agradezco por todos por todos los consejos y conocimientos que compartiste conmigo durante nuestra convivencia, por tu confianza al dejar en mis manos uno de tus proyectos, por brindarme la oportunidad de trabajar contigo y ayudarme crecer profesionalmente.

Fernanda, tú me guiaste por buen camino todo el tiempo incluso cuando no estabas presente, por contestar todas mis preguntas y por darme ánimos en todo momento, por tu paciencia y por tu amistad, por ser mi primer y ultima maestra en la facultad de ingeniería.

Daniela por ser la sonrisa del equipo y una buena compañera de trabajo, Leonardo por tu eterna voluntad de ayudar y empatía, Hugo por resolver incontables problemas técnicos con un entusiasmo interminable, Gerardo por brindarme ánimos incluso en los momentos más difíciles.

Agradezco también a mis tíos Adolfo, Edgar, Enrique, Manuel, Roberto, Edgar y a mis tías Adriana y Tere por ser como mis padres ya que siempre que he necesitado de ustedes me han ayudado y apoyado.

A mis primos y primas por darme tantos momentos de diversión y ser los mejores compañeros de juegos en la infancia y confidentes en la vida adulta.

A mis sobrinos por ser tan divertidos y confiar en mí siempre que han tenido problemas y nuevas historias que contarme.

A mis grandes amigos de la universidad, prepa, secundaria y externos Liz, Isma, Inti, Issac, Rubí, Rebeca, Pedro, Sese, Marusia, Juan, Gisela, Melissa, Fabiola, Miguel, Ariadna, Mariana, Carmina, Jazmín, Mireya, Mitzue, Escamosa y si olvido a alguien espero sepa perdonar. Todos ustedes han marcado mi vida de forma importante, han sido compañeros de vida invaluable y espero contar con ustedes toda mi vida.

Resumen

En 1831 Faraday observó por primera vez fenómenos de apilamiento “El encontró que cuando la arena se coloca en una membrana vibratoria se crean pequeños montículos con un flujo convectivo.” A partir de este descubrimiento se ha estudiado este fenómeno encontrándose que se puede reproducir dentro de recipientes sometidos a oscilaciones senoidales verticales.

Diferentes investigadores han profundizado en este fenómeno estudiando desde porque sucede, hasta como se transfieren, a través de los medios granulares, ondas de presión, calor y sonido. El propósito de este trabajo es conocer el efecto provocado por una celda convectiva de un medio granular sobre una señal acústica; este tema se ha estudiado poco y los resultados han sido poco contundentes debido a lo complejo del tema.

Se diseñó y construyó un dispositivo experimental capaz de vibrar en un intervalo de frecuencias de 0 a 50 [Hz] con una amplitud de 0 a 10 [mm] con la finalidad de generar celdas convectivas en un medio granular; una vez logradas, se hizo pasar una onda sonora a través de estas y se registraron todos los cambios que se presentaron en la señal acústica, i.e. amplitud, frecuencia, tipo de onda, entre otros.

La hipótesis que se desea comprobar es la siguiente: Las ondas acústicas que viajan a través de una celda convectiva en un medio granular seguirán la trayectoria de los granos en dicha celda. Esto puede provocar amortiguamiento total de las ondas o, en caso contrario, fenómenos de resonancia

Objetivos

1. Identificar los patrones de flujo en celdas convectivas estables y estudiar la propagación de ondas acústicas a través de dichas celdas
2. Analizar los datos obtenidos para dar una descripción cualitativa de los fenómenos que se presenten.

Índice

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Antecedentes Teóricos | 1 |
| 1.1 Medios granulares | 2 |
| 1.2 Material en vibración | 2 |
| 1.2.1 Densidad de capas | 2 |
| 1.2.2 Aceleración adimensional | 3 |
| 1.3 Patrones de comportamiento en medios granulares | 4 |
| 1.3.1 Apilamiento | 4 |
| 1.3.2 Ondas superficiales de pequeña amplitud | 5 |
| 1.3.3 Arqueo | 6 |
| 1.3.4 Ondas superficiales de gran amplitud | 7 |
| 1.3.5 Rollos convectivos | 8 |
| 1.4 Sonido | 9 |
| 1.4.1 Intensidad | 9 |
| 1.4.2 Frecuencia o periodo | 10 |
| 1.4.3 Longitud de onda | 10 |
| 1.5 Propagación de sonido en medios granulares | 11 |
| 1.5.1 Cadenas de fuerza | 11 |
| 1.5.2 Velocidad del sonido en medios granulares | 12 |
| 1.5.3 Compactación de los medios granulares y su influencia en la velocidad del sonido | 12 |
| 1.5.4 Influencia de la longitud de onda en la velocidad del sonido en los medios granulares | 13 |
| 1.6 Medios de disipación de energía en medios granulares | 14 |
| 2. Arreglo experimental | 15 |
| 2.1 Maquina vibratoria | 16 |
| 2.2 Contenedor y material granular | 16 |
| 2.3 Sistema de visualización | 17 |
| 2.4 Sistema de emisión y recepción de señales acústicas | 17 |

| | | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.1 | Bocina | 18 |
| 2.4.2 | Sistema de recepción | 19 |
| 2.5 | Selección de patrones | 19 |
| 2.6 | Descripción experimental | 20 |
| 3. | Análisis de errores | 22 |
| 3.1 | Análisis de errores. | 23 |
| 3.2 | Margen de error de los micrófonos. | 23 |
| 3.3 | Distorsión del sonido debido a la bocina. | 23 |
| 3.4 | Error debido al movimiento de los micrófonos. | 24 |
| 3.5 | Error debido a movimientos laterales no deseados del contenedor. | 26 |
| 3.6 | Cambios presentados en el flujo de los granos debido a los micrófonos. | 27 |
| 4. | Resultados | 33 |
| 4.1 | Patrones observados | 34 |
| 4.2 | Pruebas con el contenedor vacío | 35 |
| 4.3 | Pruebas con N=40 | 36 |
| 4.4 | Contenedor con material granular apilado | 38 |
| 4.5 | Respuesta del sonido ante un medio granular vibrado | 39 |
| 4.5.1 | N=40 con frecuencia de vibración de 9 y 25 [Hz] | 39 |
| 4.6 | Comparación de la intensidad del sonido cuando el material se encuentra en estado estático y dinámico | 42 |
| 4.6.1 | Intensidad relativa vs frecuencia | 45 |
| 5. | Conclusiones | 47 |
| 5.1 | Conclusiones | 48 |
| | Bibliografía | 49 |

1

Antecedentes Teóricos

1.1 Medios granulares

Los medios granulares tienen propiedades muy distintas a las de los sólidos, gases y líquidos aunque bajo ciertas condiciones lleguen a presentar características propias de los estados de la materia antes mencionados.

Existen varias definiciones de los medios granulares, la mayoría de ellas coinciden en que son un agregado de sólidos divididos, cuyas partes están lo suficientemente próximas como para interactuar entre sí mediante fuerzas de contacto. Sin embargo esto incluye a los polvos, “los cuales son muy cohesivos, debido a que la fuerza electrostática es del mismo orden o mayor que el propio peso de los constituyentes individuales”¹

Como esta definición lo mismo abarca a los polvos como a rocas de gran tamaño o una pared hecha de ladrillos, otros autores como Geldart² utilizan otros criterios de clasificación diferenciándolos “en base a su fluidización bajo la acción de diferentes clases de esfuerzos externos”.

Para el presente se hará uso de aquellos medios granulares que atienden a la clasificación de Nedderman³, es decir, medios granulares “con tamaño de grano suficiente como para desprestigiar interacciones de origen electrostático o los efectos de la humedad del ambiente”.

1.2 Material en vibración

La mayoría de los artículos que tienen como tema central el estudio de medios granulares sujetos a vibraciones, coinciden en que existen algunos parámetros que son fundamentales para describir su comportamiento. Estos parámetros son la amplitud, la frecuencia de vibración, algunas propiedades de las partículas y la profundidad inicial de la cama. Todos estos factores se conjugan en dos números adimensionales que describen el comportamiento del material bajo diferentes condiciones.

1.2.1 Densidad de capas

Se ha encontrado que al someter un medio granular a vibraciones verticales senoidales, se generan diferentes patrones de comportamiento que dependen del número de capas formadas por granos cuando se inicia la excitación. El número de capas recibe el nombre de “densidad de capas” y relaciona la altura de la cama (h_0) con el diámetro de las partículas (d) que conforman el medio granular. El número de capas se define como:

$$N = \frac{h_0}{d}$$

Thomas B.⁴ describe cuatro estados discernibles de comportamiento dependiendo del valor que se obtenga de este número, los cuales se describen a continuación.

- El primer estado se denomina “Newtoniano-I” $N \leq 0.273$. En este estado, las partículas que se encuentran sometidas a vibraciones tienen un comportamiento aleatorio que no varía demasiado con la frecuencia de la oscilación. Cuando N es menor a uno estaremos hablando de camas que no se alcanzan a formar una sola capa en su totalidad.
- El segundo estado es el “Newtoniano-II” donde $0.273 < N < 1.7$; a diferencia del estado anterior, un pequeño grupo de partículas situado en la parte superior de la cama, genera patrones cuando el material es expuesto a una excitación vibratoria.
- El tercer estado es conocido como “coherente-expandido” donde $1.7 < N < 6$. El material se comporta de manera coherente, pero sufre expansiones y contracciones considerables durante sus ciclos.
- El cuarto estado es conocido como “coherente-condensado” y se presenta cuando $N > 6$. El medio granular muestra diversos patrones ordenados, complejos y dependientes en gran medida de la frecuencia de vibración a la que sean sometidos; “las partículas se mueven como una masa cohesiva y se mantienen compactadas durante todo el ciclo de vibración”. Este último es el estado que más se ha estudiado.

1.2.1 Aceleración adimensional

El segundo número adimensional que rige el comportamiento de los medios granulares sometidos a vibraciones, involucra la amplitud de la oscilación (a), la frecuencia (ω) y la aceleración debida a la gravedad (g). Estos tres parámetros se relacionan de la siguiente manera:

$$\Gamma = \frac{a\omega^2}{g}$$

A diferentes valores de este número, se presentan distintos patrones de comportamiento.

1.3 Patrones de comportamiento en medios granulares

Los patrones de comportamiento que se han observado hasta el momento para el estado “coherente condensado” son: apilamiento, ondas superficiales de pequeña amplitud, arqueo, ondas superficiales de gran amplitud y rollos convectivos. Cada uno de estos estados se presenta a distintos valores de Γ .

1.3.1 Apilamiento

En este patrón, los granos forman un montículo el que presenta un ciclo convectivo de gran dimensión donde las partículas viajan desde la parte alta hasta la baja, deslizándose en forma de avalancha; una vez en la parte baja, las partículas se internan en el material para recircular y finalmente salir por el punto más alto del apilamiento. En la figura [1] se muestra una imagen de este fenómeno.

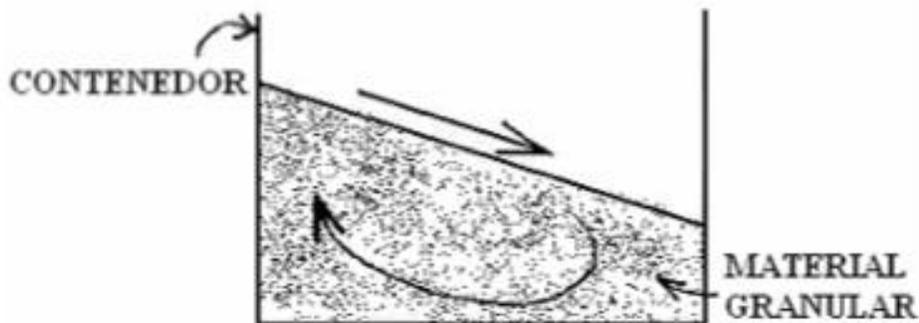


Figura 1 Representación del comportamiento del material granular

Este apilamiento se ha localizado la mayoría de las veces en alguna de las esquinas del contenedor; sin embargo, se ha reportado que es posible que se presente en el centro⁵. Varios autores se refieren a este punto como “lado preferencial”. Este fenómeno se atribuye a diversos factores como condiciones iniciales del sistema o pequeñas variaciones en la inclinación del contenedor.

Algunos aspectos que caracterizan a este estado son su gran estabilidad y la facilidad con la que se puede lograr.

1.3.2 Ondas superficiales de pequeña amplitud

El segundo patrón ocurre cuando se somete un medio granular a vibraciones verticales, es conocido como “ondas superficiales de pequeña amplitud”; se caracteriza por la formación de ondas de baja amplitud en la superficie libre de las partículas.

Varios autores coinciden en que las ondas de pequeña amplitud aparecen usualmente como ondas bidimensionales con sus crestas paralelas al lado angosto del recipiente que contiene al material granular, aunque en algunas ocasiones, aparecen de forma simultánea ondas con crestas paralelas al lado largo del recipiente.

Brennen describe que en este patrón, un ciclo entero sucede en dos oscilaciones completas y nos presenta un esquema donde muestra sus observaciones; explica que además de existir la presencia de las ondas, también se presentan saltos simultáneos de todos los granos.

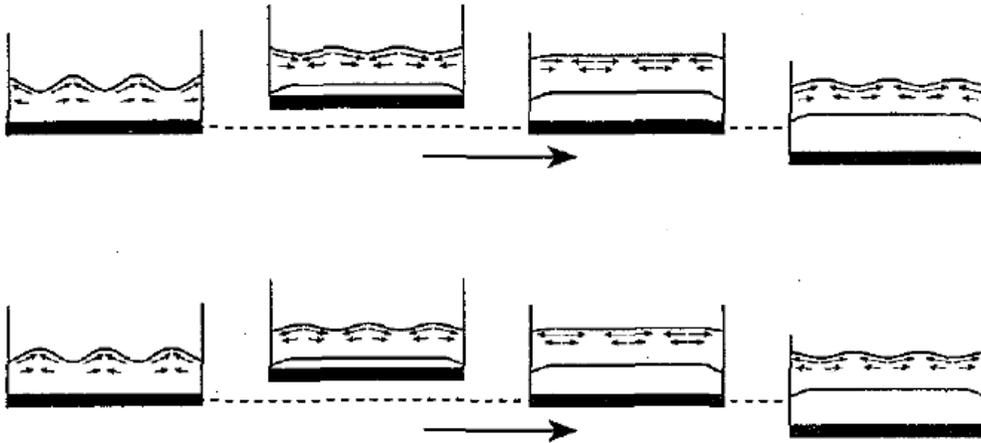


Figura 2. Flujo de granos propuesto por Brennen para el patrón de ondas superficiales de pequeña amplitud

Brennen explica que estas ondas aparecen cuando $\Gamma \approx 2.2$, y que “el número de ondas varia entre n y $n + \frac{1}{2}$ donde n es un entero”. Al espacio que se presenta entre onda y onda, se le conoce como antinodo y “las paredes siempre coinciden con un antinodo”. También encontró que a medida que Γ aumenta, la amplitud de las ondas también lo hace.

1.3.3 Arqueo

Cuando este valor es superado, las partículas oscilan fuera de fase respecto a la frecuencia de vibración, generando de este modo una serie de arcos con características particulares. Este tipo de comportamiento realiza un ciclo entero cada dos oscilaciones completas del contenedor. En la figura [3] se muestra el movimiento de los granos en diferentes etapas de la oscilación del contenedor.

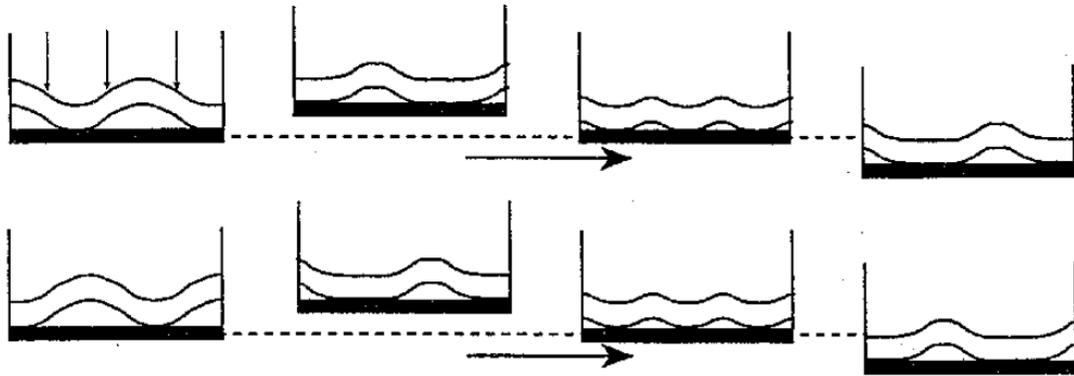


Figura 3. Flujo de granos propuesto por Brennen para el patrón de arqueo

Finalmente, se encontró que las partículas se mueven formando círculos que viajan hacia arriba en los antinodos y hacia abajo en los nodos, como se aprecia en la figura [4]. El número de ciclos convectivos es el doble del número de nodos.

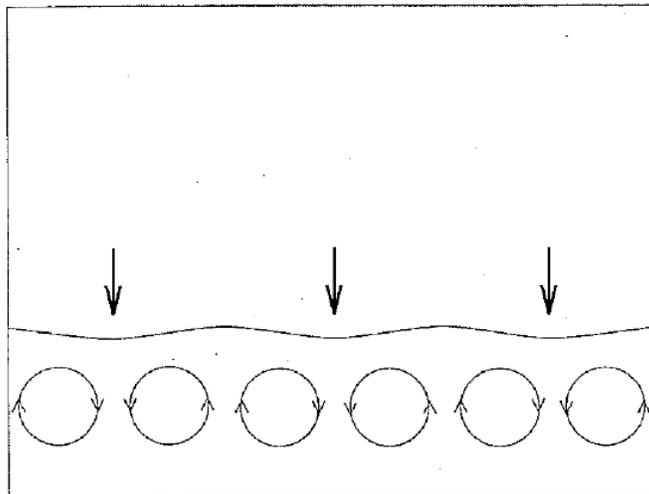


Figura 4. Ciclos convectivos presentados en el patrón de arqueo

1.3.4 Ondas superficiales de gran amplitud

Este comportamiento se presenta al alcanzar un valor crítico de $\Gamma \approx 8.3$ y consiste en la superposición de ondas en el fenómeno del arqueo. De manera similar a las ondas superficiales de pequeña amplitud, el fenómeno presenta picos en diferentes regiones del material. Es importante notar que estos picos son de mayor amplitud y mucho más afilados.

Otra diferencia importante entre las ondas de pequeña amplitud y las ondas de gran amplitud es que mientras en el primer estado se completa un ciclo en dos oscilaciones, el segundo completa un ciclo cada cuatro oscilaciones. El número de ondas está definido por $\frac{n}{2}$ donde n es un número entero mayor que cero.

La figura [5] explica el comportamiento del material en dicho estado.

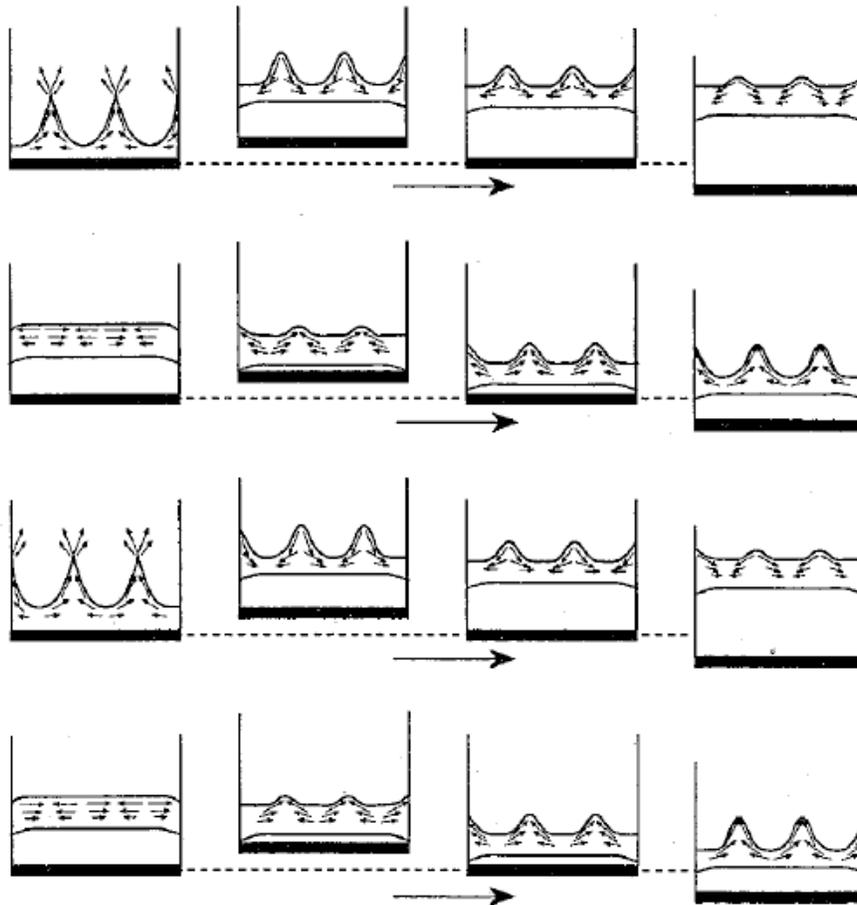


Figura 5. Flujo de granos para el patrón de ondas de gran amplitud

1.3.5 Rollos convectivos

En este estado 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 sostienen que la convección tiene su origen en el efecto de las paredes verticales del recipiente en el que se halla el medio granular. Otros autores mencionan que es debido a la existencia de un gradiente de "temperatura granular", como ocurre en los fluidos o bien que es debido a la presencia de un fluido intersticial en las partículas que conforman al material (generalmente aire).

Aoki observó que para valores bajos de aceleración se daba la convección "hacia abajo", si está aumentaba se producía una transición a flujo convectivo "hacia arriba". Además encontró que, al ser el modo convectivo "hacia arriba" más estable que el "hacia abajo" se podían formar varios rollos de convección.

El número de ciclos convectivos es fuertemente dependiente de la aceleración de la vibración, el tamaño de grano y en menor medida de la frecuencia, dada la altura y el ancho de la cama granular.

Por convención se toman como referencia las paredes para dar un nombre a cada uno de los tipos de convección. Así dominará convección hacia abajo cuando las partículas descendan por las paredes y asciendan por el centro, y convección hacia arriba cuando las partículas asciendan por las paredes y descendan por el centro.

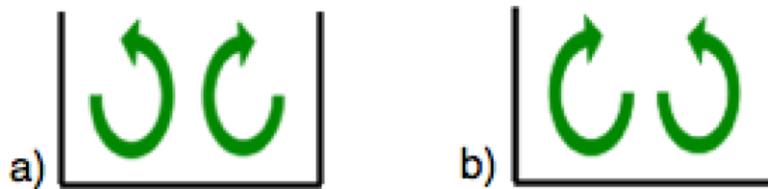


Figura 6. Ilustración de convección hacia abajo (inciso a) y convección hacia arriba (inciso b)

1.4 Sonido

El sonido es cualquier fenómeno generado por el movimiento vibratorio de un cuerpo, involucra la propagación en forma de ondas elásticas (sean audibles o no), a través de un fluido u otro medio elástico.

Al ser el sonido un movimiento ondulatorio, es posible caracterizarlo con las mismas magnitudes y unidades de medida que a cualquier onda de frecuencia bien definida que son:

- Intensidad
- Frecuencia o periodo
- Longitud de onda

1.4.1 Intensidad

La intensidad se define como el flujo de energía de la presión de oscilación de la onda a través de un área. En forma de ecuación esto es:

$$I = \frac{P}{A}$$

Donde P es potencia y A representa el área.

Este parámetro se identifica como volumen y suele medirse en una escala logarítmica cuya unidad es el decibel [dB] el cual equivale a la décima parte de un bel, unidad de referencia para medir la potencia de una señal o la intensidad de un sonido.

El decibel es una unidad relativa que no indica la diferencia de intensidad entre dos señales. Esta escala es logarítmica y muy usada en cuestiones de acústica porque el oído humano responde naturalmente a niveles de señal en una forma aproximadamente logarítmica. A continuación se presenta una tabla donde se ejemplifica el uso de esta escala.

| Fuente de sonido | B [dB] |
|-----------------------------------|--------|
| Avión a reacción cercano | 150 |
| Martillo neumático | 130 |
| Sirena, concierto de rock | 120 |
| Tren de metro. Podadora eléctrica | 100 |
| Tránsito intenso | 80 |
| Aspiradora | 70 |
| Conversación normal | 50 |
| Zumbido de mosquito | 40 |
| Susurro | 30 |
| Caída de hojas de árbol | 10 |
| Umbral de audibilidad | 0 |

Tabla 1. Comparación de la intensidad del sonido con ruido cotidiano

En el mundo del audio se utiliza otro tipo de escala, que va desde menos infinito hasta 10, esta escala también esta expresada en decibeles, pero a diferencia de la anterior, estos decibeles se expresan en números negativos y el valor de partida audible para el ser humano es -60[dB]. Este valor se obtiene por convención, donde se toma como valor de referencia el umbral del dolor humano.

Estas escalas son las más comunes para cuantificar el sonido, sin embargo existe una gran variedad de escalas y su uso depende básicamente de la aplicación.

1.4.2 Frecuencia o periodo

La frecuencia es el número de ciclos u ondas completas que se producen en una unidad de tiempo. En el caso del sonido, la unidad de tiempo es el segundo y la frecuencia se mide en hercios [Hz].

Las frecuencias bajas corresponden a sonidos “graves” y las altas a sonidos “agudos”. El espectro de frecuencias audible varía entre 20 [Hz] y 20,000 [Hz]. Por debajo de esta medida se encuentran los infrasonidos que son vibraciones de presión cuya frecuencia es inferior a la que el oído humano puede percibir. Por encima están los ultrasonidos, que son aquellas ondas cuya frecuencia es superior al margen de audición humana. La frecuencia es la cantidad de ciclos oscilatorios de un sonido en el lapso de un segundo.

$$f = \frac{1}{T}$$

1.4.3 Longitud de onda

La longitud de onda (λ) es la distancia entre dos máximos o compresiones consecutivos de la onda. En las ondas transversales la longitud de onda corresponde a la distancia entre dos montes o valles, en las ondas longitudinales a la distancia entre dos compresiones contiguas.

La longitud de onda está estrechamente relacionada con la frecuencia (f) y con la velocidad del sonido (v). La velocidad del sonido por su parte, depende del material a través del cual se propaga y la temperatura que este tenga.

La ecuación que describe la longitud de onda se muestra a continuación

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

En tabla [2] se muestra la velocidad del sonido en diferentes medios.

| Medio | $v(m/s)$ |
|--------------------|----------|
| Gases | |
| Aire | 331 |
| Aire | 386 |
| Hidrógeno | 1290 |
| Oxígeno | 317 |
| Helio | 972 |
| Líquidos | |
| Agua | 1490 |
| Alcohol metílico | 1140 |
| Agua de mar | 1530 |
| Sólidos | |
| Aluminio | 5100 |
| Cobre | 3560 |
| Hierro | 5130 |
| Plomo | 1320 |
| Caucho vulcanizado | 54 |

Tabla 2. Velocidad del sonido en diferentes medios

1.5 Propagación del sonido en medios granulares

Se sabe que las ondas de sonido que viajan a través de un medio granular, “cambian de forma fácilmente, presentan un comportamiento no lineal y tienden a viajar por cadenas de contacto.”⁶.

Otros aspectos que determinan la forma en que las ondas de sonido viajan a través de un material granular son, “la profundidad en la que se encuentran dentro del material, la compresión de las partículas (propiedad que está ligada a la profundidad), su frecuencia, su intensidad y el módulo de Young de las partículas que conforman al material entre otras”⁷.

El flujo de las ondas sonoras a través de un medio granular es afectado por diversos factores propios del material y de la onda. Estos factores han sido identificados en diferentes investigaciones; sin embargo, debido a la no linealidad y anisotropía propia de los medios granulares, ha sido imposible escribir ecuaciones que los relacionen de manera exacta.

1.5.1 Cadenas de fuerza

Otra característica de los medios granulares es su alta anisotropía cuando se les somete a diferentes tipos de esfuerzos. “En el caso de la pila granular resultante luego de finalizadas las avalanchas, el peso de los granos no se transmite uniformemente hacia abajo, sino que aparecen cadenas de granos que están en contacto entre sí, denominadas cadenas de fuerza”⁸.

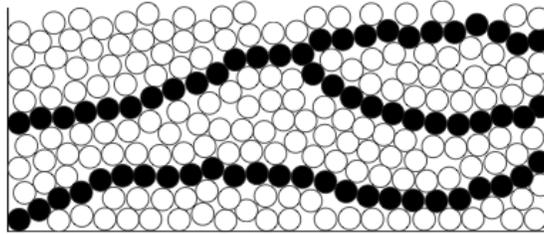


Figura 7. Representación de las cadenas de fuerza

Las fuerzas viajan con mayor facilidad a través de las cadenas de fuerza debido a que “llevan en ellas cantidades desproporcionadas de la carga a causa de efectos de origen geométrico”⁹ y son las responsables de la anisotropía en la distribución de las fuerzas. También se les atribuye la gran dispersión de datos en diversas investigaciones, ya que estas cadenas son frágiles y susceptibles a reorganizaciones.

1.5.2 Velocidad del sonido en medios granulares

Se han hecho diversos experimentos con la finalidad de determinar la velocidad del sonido a través de los medios granulares, encontrándose que las mediciones realizadas tienen un amplio margen de error del orden de cinco. Se piensa que este error se debe a cambios en las cadenas de fuerza dentro del material.

A pesar de las complicaciones que se han presentado para medir de forma clara la velocidad del sonido en medios granulares, se han encontrado factores que determinan, al menos de forma cualitativa este fenómeno, relacionando parámetros como la compactación de material, su grado de restitución, modulo de Young entre otros.

1.5.3 Compactación de los medios granulares y su influencia en la velocidad del sonido

Dependiendo del grado de compactación del medio granular, la velocidad del sonido varia. Por ejemplo en una cama de arena los granos de la superficie se encuentran más desordenados que los que están en el fondo; esto es, a mayor profundidad, mayor grado de compactación de los granos, por tanto, mayor facilidad de propagación y mayor velocidad del sonido

En base a estas observaciones y a diversas mediciones se ha llegado a la conclusión de que “si c representa la velocidad del sonido y z la profundidad a la cual viaja la onda, se encuentra que $c \sim z^\alpha$, donde α es típicamente un número entre $\frac{1}{6}$ y $\frac{1}{4}$ ”.

Algunas propiedades del material, como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, también afectan la velocidad del sonido. Se ha observado que la velocidad del sonido en medios granulares, es muy similar a la velocidad del sonido en el material del que se compone el mismo, por lo que al ser un sonido una vibración elástica del material, los parámetros antes mencionados, tienen una gran influencia en la velocidad del sonido en los medios granulares.

1.5.4 Influencia de la longitud de onda en la velocidad del sonido en los medios granulares

Nagel descubrió que la velocidad del sonido en un medio granular, tiene una fuerte dependencia con la longitud de onda del mismo. Se dio cuenta que existía un punto en el que las señales acústicas parecían no ser afectadas de forma tan severa por cambios en las cadenas de fuerza dentro del material y que pasado este punto, el sonido alteraba su comportamiento debido a cambios en las cadenas de fuerza.

Para Nagel el medio granular puede ser considerado como dos elementos distintos dependiendo de la longitud de onda como un material homogéneo o un medio granular conformado por diversas partículas.

Para poder entender mejor las características propias de estos estados, Nagel clasificó al sonido como de “alta frecuencia” y de “baja frecuencia”. Los sonidos de alta frecuencia son aquellos cuya longitud de onda es comparable con el tamaño de las partículas que conforman al material granular, por otro lado, los sonidos de baja frecuencia son aquellos cuya longitud de onda es mucho más grande que el espacio de los defectos localizados dentro del material.

Se determinó que los sonidos de baja frecuencia, son capaces de viajar a través de un medio granular con facilidad; sin embargo, se cree que la dispersión de mediciones realizadas es debida a la sensibilidad que presenta el sonido y al cambio del arreglo de las partículas del material.

No se ha podido tener mediciones de la velocidad de los sonidos de alta frecuencia en arreglos 3D, debido a la disipación de energía producida por las cadenas de fuerza. Surajit encontró que el sonido viaja como una onda solitaria a través de cadenas 1D en los granos. No se sabe aún si la energía se pierde durante su trayecto o simplemente se dispersa a través de diferentes cadenas de fuerza, haciendo su medición imposible.

1.6 Medios de disipación de energía en medios granulares

En los medios granulares, existen numerosos mecanismos por 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. Para efectos de mi investigación a continuación número los siguientes.

En primer lugar, 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 existen 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, es la dispersión de la energía de onda a través de las cadenas de contacto 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

Arreglo Experimental

2.1 Máquina vibratoria

Para hacer vibrar el material granular se diseñó y construyó una máquina vibratoria que consiste en una base rígida de acero acoplada a un riel de alta precisión de marca INA modelo RWU 25. DFE.G2. V3. el cual se mueve mediante un mecanismo de biela-manivela, que esta acoplado a un motor de corriente directa de marca Perm, modelo PMG080 que es alimentado mediante una fuente de poder de la marca Agilent Technologies modelo N5764A.

La máquina vibratoria es capaz de generar oscilaciones senoidales verticales, horizontales y biaxiales de amplitud variable. Sin embargo en la configuración biaxial los movimientos son mutuamente dependientes.

Para tener control sobre la frecuencia de oscilación de la máquina se incorporó un micro controlador a la fuente de poder. Con ayuda de este sistema de control fue posible medir la velocidad a la cual gira el motor y por tanto, la frecuencia a la cual se mueve todo el sistema.

2.2 Contenedor y material granular

Se construyeron contenedores rectangulares iguales a los utilizados en las pruebas realizadas por Aoki¹¹; estos son cajas de acrílico transparentes con medidas interiores de 30 x 200 x 200 [mm]. Se ensamblaron de tal forma que las uniones quedaran perfectamente encuadradas sin filos ni rebabas que alteraran el comportamiento de los granos.

El medio granular elegido para realizar las pruebas esta compuesto por esferas de vidrio de 1 [mm] de diámetro, por tener forma homogénea además de contar con un tamaño que nos permitió tener $N > 20$ sin derramar material o chocar con la parte superior del contenedor al ser sometido a vibración. En el caso del material elegido, el grado de restitución es de 0.95.

Los valores de N que se pusieron a prueba cubrieron el intervalo $20 \leq N \leq 60$ y los resultados fueron los siguientes:

$N=20$.- Resulta muy complicado conseguir los patrones, este problema se agrava una vez introducidos los micrófonos al material.

$N=30$.- Los patrones se presentan con normalidad; sin embargo, cuando se introducen los micrófonos, los patrones se ven afectados presentando inestabilidad y alteraciones serias sobre el flujo de los granos.

$N=40$.-Esta configuración respondió de forma adecuada al momento de aplicar la excitación vibratoria; por otro lado, al introducir los micrófonos en el material, los patrones no se veían afectados de forma significativa.

N=50.- Se obtuvieron resultados muy similares a los obtenidos con N=40.

N=60.- Resultó complicado obtener los patrones, los cuales perdieron estabilidad, fenómeno que se acentuó cuando se introdujeron los micrófonos.

Los comportamientos presentados por el medio con N=50 y N=40 fueron los mas satisfactorios, pero se optó por N=40 para contar con condiciones parecidas a las de Aoki y porque notamos que los micrófonos se movían menos cuando se lleva a cabo el experimento.

2.3 Sistema de visualización

Para tener un registro visual de los experimentos realizados, se utilizó una cámara de video marca SONY modelo HVR-A1U, con la cual se realizaron grabaciones en alta definición. El video obtenido fue analizado para confirmar la existencia de celdas convectivas.



Figura 8. Cámara de video marca SONY modelo HVR-A1U

Estas grabaciones además de ser útiles para confirmar la existencia de celdas convectivas, nos permitieron saber cual era el comportamiento de los micrófonos dentro del contenedor.

2.4 Sistemas de emisión y recepción de señales acústicas

En el experimento se utilizó un sistema de recepción de alta calidad capaz de grabar al menos cuatro canales distintos al mismo tiempo y en un formato sin pérdidas; se necesitó además, de un sistema de generación de señales de amplitud y frecuencia variables.

Para obtener la onda acústica se utilizó un generador de funciones marca Tektronix modelo 5781-XE. Este generador es capaz de crear diferentes tipos de señales como cuadradas, triangulares, sinusoidales, entre otras. También nos permite variar la amplitud de la señal mediante el aumento del voltaje, el cual cubre el intervalo de 0 a 10 volts.



Figura 9. Generado de señales Tektronix

La señal que se obtiene del generador no tiene la potencia requerida para el experimento, por lo que fue necesario un amplificador de señales capaz de aumentar al triple el voltaje de la señal del generador.

2.4.1 Bocina

La bocina que se usó fue expuesta a condiciones muy exigentes. La bocina se expuso a un voltaje elevado y a vibraciones fuertes de alta frecuencia, condiciones para las cuales no suelen estar diseñadas.

La fidelidad (capacidad para minimizar la distorsión de un sonido) de la bocina es otro factor importante, ya que si genera un sonido distorsionado resulta imposible determinar si ésta distorsión es debida a los granos, o a la baja calidad sonora de la bocina. La bocina debe ser pequeña y de bajo peso para evitar cualquier afectación en el movimiento de la caja.

Para este estudio las características que debe cumplir la bocina son:

- Alta resistencia física
- Resistencia a temperaturas superiores a 60 grados centígrados
- Distorsión armónica total < 5%
- Tamaño menor a 8 [cm] de diámetro y bajo peso
- Potencia mínima de 40 [w]

La bocina utilizada fue de la marca Xtrem modelo SPT-1602 la cual se comparó y probó contra otras bocinas y fue la única que cumplió de forma satisfactoria todas las características presentadas anteriormente.

2.4.2 Sistema de recepción

Para la captura y grabación de las señales acústicas se utilizaron micrófonos de la marca SHURE modelo Serie T. Estos pequeños micrófonos son inalámbricos y capaces de captar un amplio rango de frecuencias.



Figuras 10 y 11. Micrófonos marca SHURE y consola de grabación marca TASCAM respectivamente

La señal captada por los micrófonos fue transmitida a la consola de grabación marca TASCAM modelo SX-1, la cual es una consola de gran especialización en el manejo y grabación de audio; permite generar grabaciones sin pérdidas además de contar con dieciséis canales de grabación y una amplia gama de opciones que permiten obtener grabaciones de alta calidad.

2.5 Selección de patrones

Los patrones utilizados en este trabajo fueron aquellos que cumplen con dos características principales.

1. Deben presentar celdas convectivas a través de las cuales podamos mandar las señales acústicas.
2. Deben contar con gran estabilidad. Como se explicó en el capítulo anterior, existen algunos patrones que pueden cambiar su comportamiento en cualquier momento si existe un pequeño cambio en T .

En base a nuestras observaciones y a diferentes artículos relacionados con el tema tomamos la decisión de usar únicamente dos patrones, apilamiento y arqueado.

El patrón de apilamiento es en sí una gran celda convectiva del tamaño del contenedor, en el cual los granos caen por la pendiente formada por el material. Una vez que se encuentran en la parte más baja de la celda, los granos son arrastrados al fondo del recipiente.

Por otro lado, el arqueo presenta seis celdas convectivas en su comportamiento, lo que nos permitió ubicar micrófonos en el interior y exterior de dichas celdas, para conocer el comportamiento de la señal acústica en estos dos puntos de una celda convectiva.

2.6 Descripción experimental

El arreglo final del dispositivo experimental fue el siguiente: El contenedor de acrílico se acopló a la base rígida de acero de la máquina vibratoria

La bocina se fijó a uno de los extremos cortos del contenedor, ubicando su centro justo a la mitad y a dos centímetros de altura tomando como referencia la base del mismo.

Dentro del contenedor, se colocaron cuatro micrófonos a una distancia de 5, 10, 15 y 18 [cm] con respecto a la bocina, estas distancias fueron determinadas por dos motivos:

1. El lugar donde se encuentran las celdas convectivas dentro del recipiente para poder colocar los micrófonos dentro y fuera de ellas.
2. La cercanía de los micrófonos a la bocina, ya que si estos quedan muy cerca, el ruido provocado por la bocina satura las grabaciones generando distorsiones que afectan los resultados volviéndolos inutilizables.

Los micrófonos se fijaron de forma cenital mediante el huso de varillas de metal, las cuales estaban fijas al contenedor, impidiendo de esta forma que los micrófonos cambiaran de posición respecto al contenedor. En la figura [] se muestra la posición que ocuparon los micrófonos durante las pruebas.

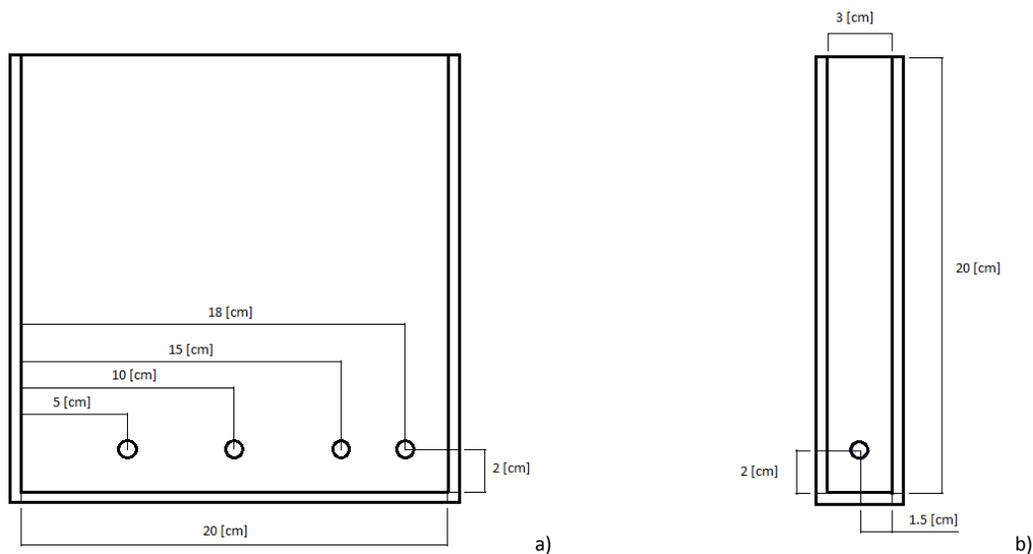


Figura . La distancia de los micrófonos es respecto a la posición de la bocina. a) vista lateral de los micrófonos dentro del contenedor b) vista frontal de los micrófonos dentro del contenedor

Los micrófonos cuentan con un transmisor que envía una señal a la consola de grabación; ésta señal se graba sin ningún tipo de alteración y después se analiza con ayuda de un software especializado en audio.

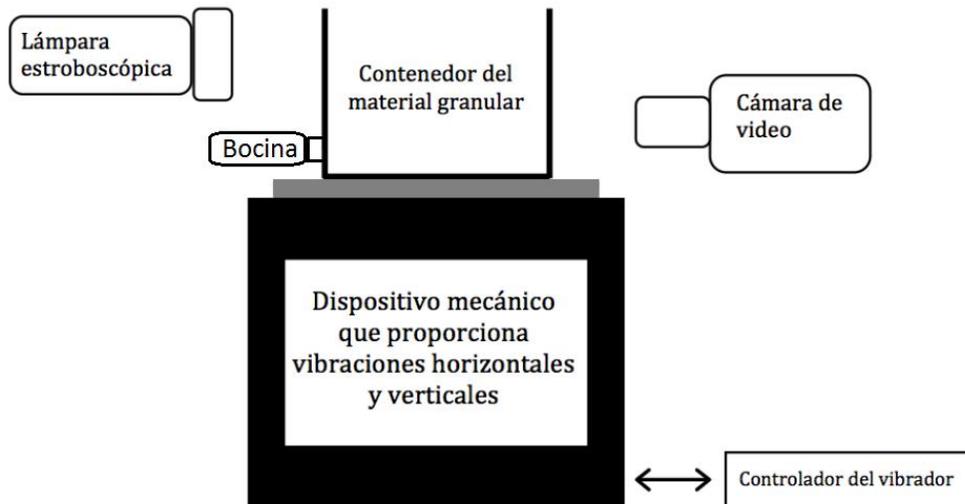


Figura 12. Diagrama general del dispositivo. Nota: La lámpara estroboscopia se colocó de forma cenital a metro y medio de distancia y con una inclinación de 45 grados respecto la vertical del contenedor

Se colocó la cámara de video a un metro de distancia del arreglo y se enfocó exclusivamente el interior de la caja, con la finalidad de comparar las grabaciones de audio con las de video.

3

Análisis de Errores

3.1 Análisis de errores

Los errores que se encontraron en la realización de las pruebas fueron los siguientes:

- Margen de error de los micrófonos
- Distorsión del sonido debido a la bocina
- El movimiento presentado por los micrófonos al ser sometidos a vibración
- Movimientos laterales no deseados en el recipiente
- Cambios presentados en el flujo de los granos debido a los micrófonos

3.2 Margen de error de los micrófonos

Los micrófonos utilizados cuentan con una gran calidad de recepción y son capaces de captar sonidos con frecuencias de 20 hasta 17 000 [Hz], es decir, abarcan prácticamente todo el rango audible. Las frecuencias utilizadas para el presente trabajo fueron 1 000, 5 000 y 10 000 [Hz].

Los sonidos utilizados en estos experimentos fueron elegidos tomando en cuenta la longitud de onda de cada una de las frecuencias antes mencionadas. Se buscó que su longitud de onda tuviera diferencias de tamaño considerable entre ellas y que además abarcaran en la medida de lo posible el rango audible.

Basados en la tabla de especificaciones de los micrófonos, proporcionada por el fabricante, fue posible determinar el grado de distorsión armónica que presentan. La distorsión armónica se produce cuando la señal de salida de un sistema no equivale a la señal que entró en él. Esta falta de linealidad afecta la forma de la onda porque el equipo introduce armónicos que no estaban en la señal de entrada. Puesto que son armónicos, es decir múltiplos de la señal de entrada; para el caso de los audífonos, la distorsión armónica total típica es de 0.3%.

3.3 Distorsión del sonido debido a la bocina

De manera semejante a los micrófonos, la bocina también presenta un grado de distorsión armónica. La bocina utilizada presenta una distorsión armónica del 3.5% (dato obtenido en tabla de especificaciones que provee el fabricante),

Se emitió una señal pura desde el generador de funciones, sin embargo las mediciones realizadas en este trabajo sufrieron alteraciones, debido a la distorsión armónica, que como expliqué anteriormente (23) se produce en la señal al pasar por los micrófonos y la bocina. Una vez que llega a la consola de grabación la señal ha perdido su pureza inicial.

3.4 Error debido al movimiento de los micrófonos

El movimiento de los micrófonos dentro de la caja se contempló desde el principio del proyecto, es por eso que los micrófonos fueron fijados mediante varillas de acero para evitar en la medida de lo posible este movimiento. A pesar de esto, los micrófonos presentaron movimientos laterales no deseados que fue imposible evitar.

La medición del desplazamiento de los micrófonos se hizo con ayuda de grabaciones de video. Se tomaron muestras a diferentes valores de oscilación del recipiente a fin de determinar una tendencia y poder saber que tanto se mueven los micrófonos a diferentes frecuencias de oscilación.

| Desplazamiento [mm] | Micrófono 1 | Micrófono 2 | Micrófono 3 | Micrófono 4 |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Frecuencia de oscilación [Hz] | | | | |
| 5 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 10 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 |
| 15 | 0.5 | 0.4 | 0.6 | 0.7 |
| 20 | 0.5 | 0.4 | 1.0 | 0.5 |
| 25 | 0.5 | 0.4 | 1.2 | 0.9 |

Tabla 3. Los valores presentados son el promedio de 10 mediciones

El movimiento de los micrófonos es pequeño, pero es necesario saber que tanto afecta este movimiento al resultado final de las pruebas. Es evidente que si el micrófono cambia de posición los resultados se verán alterados, este aspecto se debe tratar con mayor atención a altas frecuencias de oscilación, ya que como se muestra en la tabla [3], a mayor frecuencia de oscilación también existe un mayor desplazamiento de los micrófonos.

El movimiento de los micrófonos es pequeño, siendo evidente que si el micrófono cambia de posición los resultados se verán alterados, por lo que es necesario saber que tanto afecta este movimiento al resultado final de las pruebas, poniendo mayor atención a altas frecuencias de oscilación, ya que como se muestra en la tabla [3], a mayor frecuencia de oscilación también existe un mayor desplazamiento de los micrófonos.

Para saber que tanto afecta el desplazamiento de los micrófonos en los resultados finales, estos fueron puestos dentro del contenedor en la posición que ocuparon durante todas las pruebas y se tomaron mediciones de la intensidad de sonido que recibían. Una vez hecha esta medición, los micrófonos se movieron hacia adelante y hacia atrás hasta encontrar una variación en la intensidad de $0.001 \left[\frac{w}{m^2} \right]$.

A continuación se muestra una tabla donde se presentan los resultados de estas mediciones entre su posición ideal y la alcanzada con el movimiento.

| Desplazamiento [mm] | Micrófono 1 | Micrófono 2 | Micrófono 3 | Micrófono 4 |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Frecuencia de la onda de sonido [Hz] | | | | |
| 500 | 11.27 | 11.15 | 11.55 | 10.55 |
| 1 000 | 9.91 | 9.64 | 9.45 | 9.55 |
| 5 000 | 8.82 | 8.36 | 8.09 | 8.91 |
| 10 000 | 3.18 | 3.09 | 3.36 | 3.09 |

Tabla 4. Los valores presentados son el promedio de 10 mediciones

Tomando como referencia las tablas [3] y [4] se considera que la frecuencia de oscilación del recipiente, no afecta de manera importante las mediciones, y a mayor frecuencia del sonido, la intensidad es más sensible al movimiento de los micrófonos.

Para determinar esta tendencia se utilizó el método de “Least-square fit to a straight line” presentado por Bevington¹². Este método nos permite analizar la relación entre dos variables y nos proporciona un ajuste a una línea recta.

Lo primero que se hace (por recomendación del autor) es poner todos los datos a utilizar en una tabla, la cual se muestra a continuación.

| prueba | Frecuencia del sonido [Hz] x_i | Desplazamiento del micrófono [mm] T_i | x_i^2 | $x_i T_i$ | T_i^2 | Δ_i^2 |
|----------|----------------------------------|-----------------------------------------|-----------|-----------|----------|--------------|
| 1 | 500 | 11.27273 | 250000 | 5636.365 | 127.0744 | 0.021799 |
| 2 | 1 000 | 9.909091 | 1000000 | 9909.091 | 98.19008 | 0.681784 |
| 3 | 5 000 | 8.818182 | 25000000 | 44090.91 | 77.76033 | 1.453812 |
| 4 | 10 000 | 3.181818 | 100000000 | 31818.18 | 10.12397 | 0.278449 |
| Σ | 16500 | 33.18182 | 126120000 | 91454.55 | 313.1488 | 2.435843 |

Tabla 5. Los valores presentados son el promedio de 10 mediciones

Una vez hecho esto, se calculan diversos valores que nos ayudaran a encontrar los parámetros que definirán nuestra línea de ajuste. El primer valor a calcular es Δ .

$$\Delta = N \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2 = 4(126120000) - (16500)^2 = 232750000$$

Con ayuda de delta y de los datos calculados en la tabla [5] es posible calcular la pendiente y el valor de la ordenada al origen, las cuales se representa como b y a respectivamente.

$$a = \frac{\Sigma x_i^2 \Sigma T_i - \Sigma x_i \Sigma x_i T_i}{\Delta} = \frac{126120000(33.18182) - 16500(91454.55)}{232750000} = 11.52$$

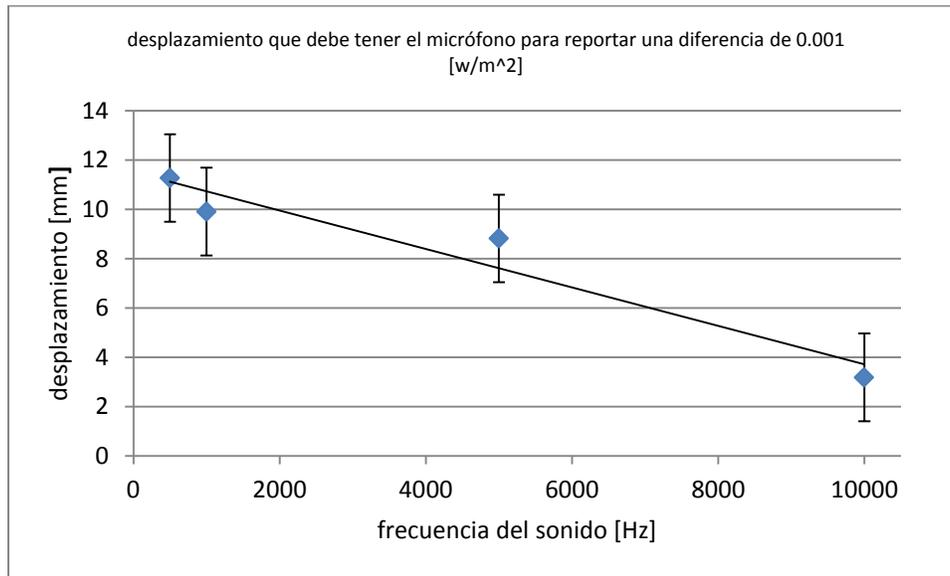
$$b = \frac{\sum x_i T_i - \sum x_i \sum T_i}{\Delta} = \frac{4(91454.55) - 16500(33.18182)}{232750000} = -0.00078$$

Para poder identificar el margen de error, calculamos la varianza (S).

$$s^2 = \frac{1}{N-2} \sum (T_i - a - bx_i)^2 = \frac{1}{N-2} \sum (\Delta_i)^2 = \frac{1}{2} (2.44) = 1.22$$

Una vez calculada la varianza, podemos calcular la desviación estándar (σ). Tanto la línea de ajuste a recta como la desviación estándar se presentan en la gráfica [1]

$$\sigma \approx \sqrt{s^2} = 1.1$$



Gráfica 1. Las graficas obtenidas para los otros 3 micrófonos presentan un comportamiento similar al mostrado en esta gráfica

3.5 Error debido a movimientos laterales no deseados del contenedor

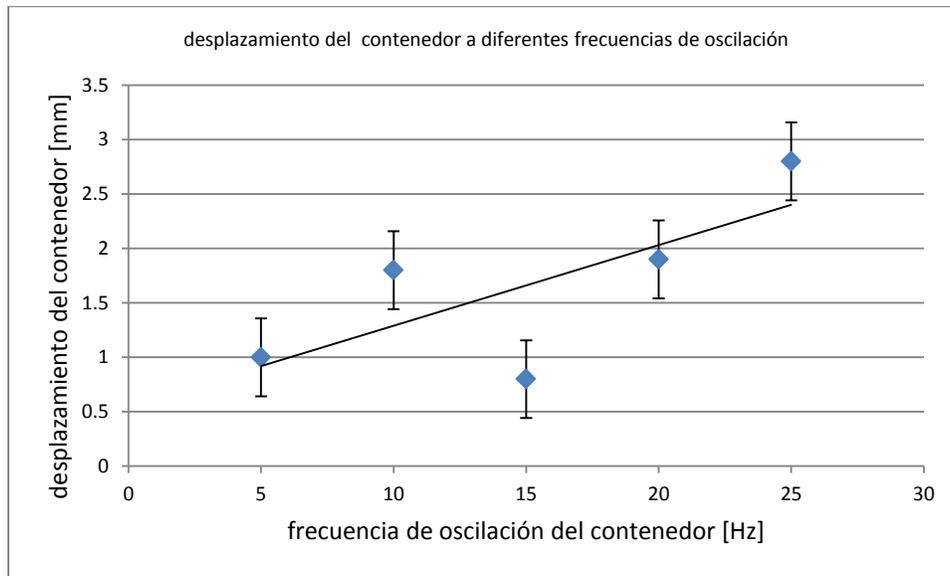
Se realizaron mediciones del desplazamiento perpendicular con respecto a la vertical del contenedor, se hicieron diez mediciones a diferentes frecuencias de oscilación.

A continuación se presenta una tabla donde se muestran los datos obtenidos.

| | | | | | |
|-------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|
| Frecuencia de oscilación [Hz] | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Desplazamiento [mm] | 1 | 1.8 | 0.8 | 1.9 | 2.8 |

Tabla 6. Los valores presentados son el promedio de 10 mediciones

Los datos mostrados en la tabla [6], son el promedio de las mediciones hechas para cada una de las frecuencias de oscilación del contenedor, en la gráfica [2] se muestra la línea de ajuste y el porcentaje de error.



Grafica 2. Gráfica donde se muestra la relación entre el desplazamiento del contenedor a diferentes valores de oscilación del mismo además de una línea de ajuste.

Mientras mayor es la frecuencia de oscilación del contenedor, los movimientos laterales aumentan; sin embargo, en las frecuencias utilizadas, el desplazamiento es mínimo.

El desplazamiento de los micrófonos más el movimiento del recipiente nos permiten ver que en las pruebas donde el sonido tiene una frecuencia de diez mil hercios, la intensidad puede sufrir un cambio de aproximadamente $0.001 \left[\frac{w}{m^2} \right]$, mientras que las otras frecuencias prácticamente no sufren alteración alguna debida a este movimiento, ya que el desplazamiento requerido para presentar una variación notable de intensidad debe ser mayor.

3.6 Cambios presentados en el flujo de los granos debido a los micrófonos

En el capítulo dos se mencionó que la introducción de los micrófonos dentro del material granular genera cambios en el flujo de los granos, esto se debe principalmente a dos causas; la primera de ellas es el tamaño de los micrófonos, los cuales presentan un tamaño de aproximadamente cincuenta veces mayor al de una partícula del material.

La segunda causa por la que los granos cambian su flujo, es el movimiento de los micrófonos, ya que estos empujan el material hacia arriba o hacia abajo dependiendo del movimiento del contenedor. Por lo anterior los granos llegan a tener un movimiento fuera de fase respecto al movimiento del contenedor.

Las imágenes siguientes muestran el comportamiento del material con los micrófonos en él.

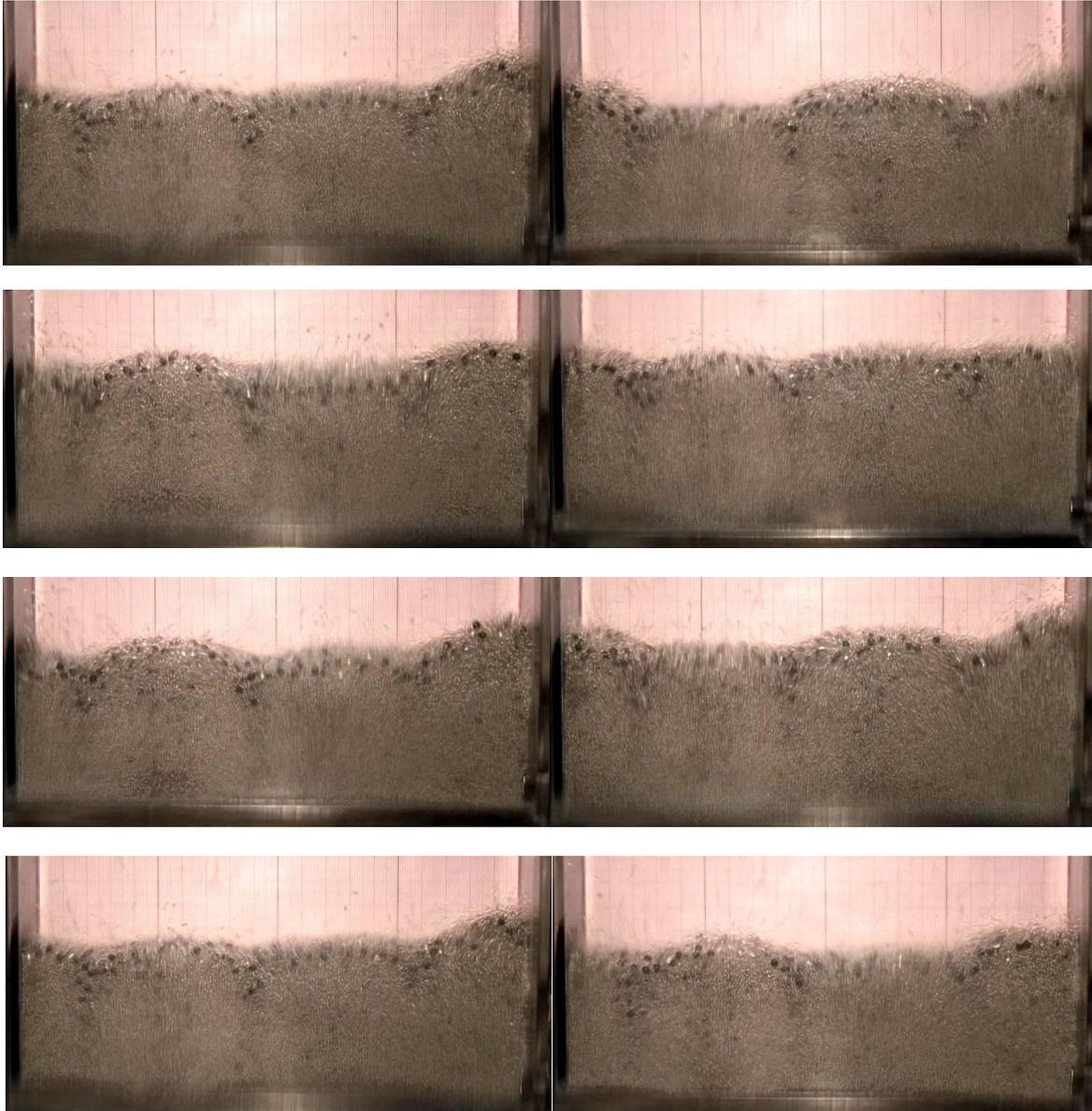


Figura 13. Serie de imágenes que ejemplifican el movimientos de los material con $\omega=25$ [Hz] y $\Gamma=7.4$ sin micrófono

Las imágenes siguientes muestran el comportamiento del material al introducir los micrófonos.

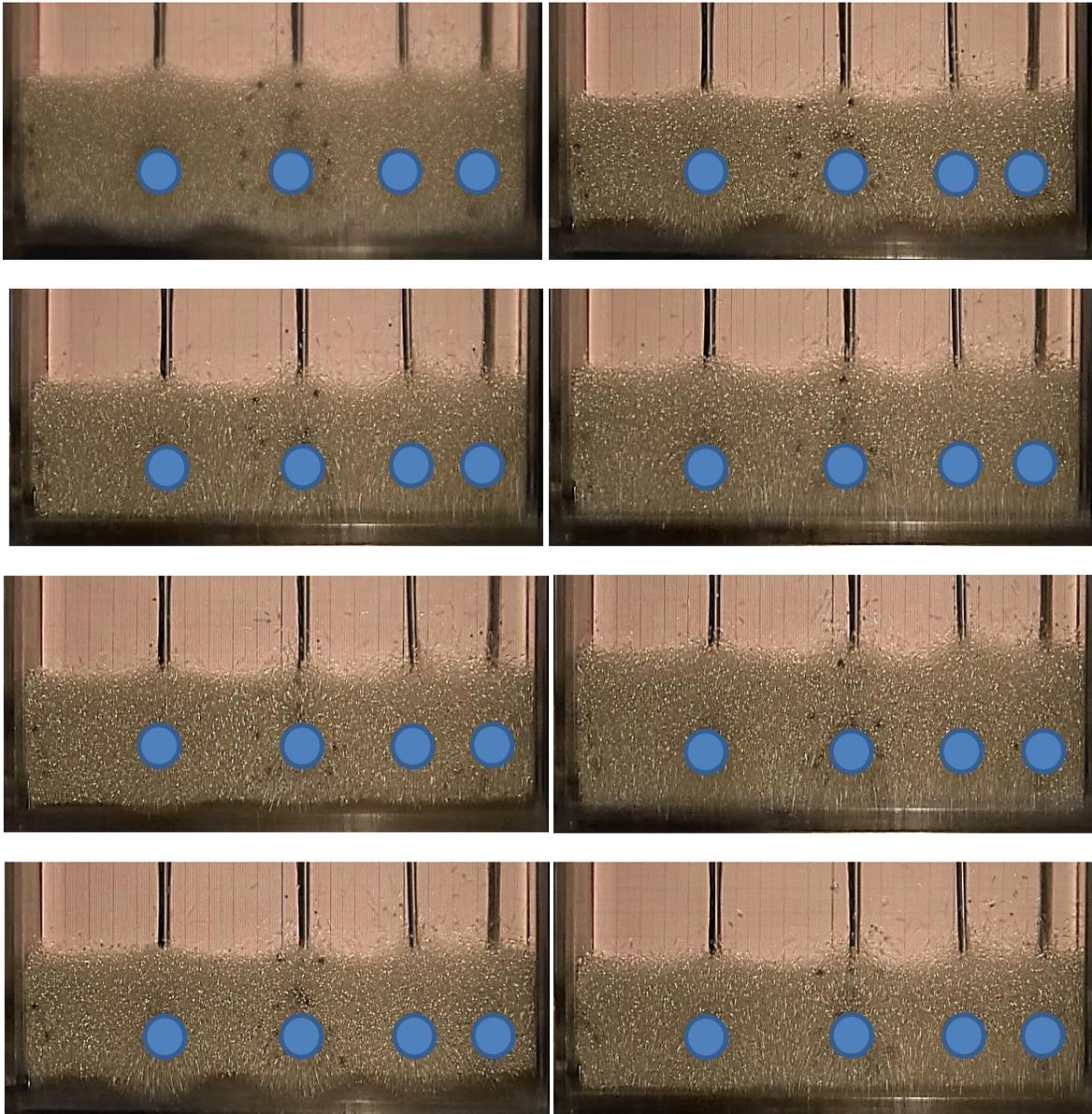


Figura 14. Serie de imágenes que ejemplifican el movimientos de los material con $\omega=25$ [Hz] y $\Gamma=7.4$ con micrófonos.

Nota: Los círculos azules indican la posición de los micrófonos en cada imagen.

Existen principalmente dos diferencias entre las series de imágenes, en la primera serie las celdas convectivas concuerdan mucho con lo presentado por Aoki y Brennen. Las celdas que se forman abarcan la profundidad del material por completo, además son grandes y de forma ovalada.

Las celdas observadas en la segunda serie de imágenes muestran una mayor cantidad de celdas, las cuales se localizan a los costados de los micrófonos. Las celdas se vuelven más angostas y se observa que algunas con más grandes que otras.

A continuación se muestra un esquema donde se describe el flujo que sigue el material cuando los micrófonos se encuentran dentro y fuera del material.

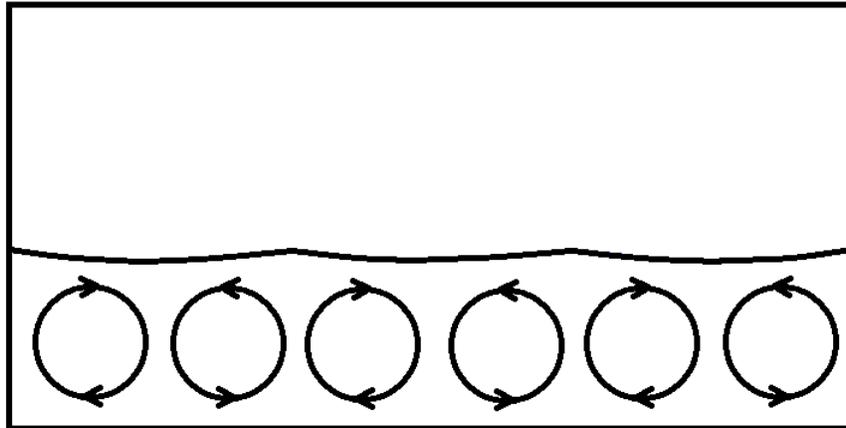


Figura 15. Flujo observado durante los experimento sin micrófonos cuando el contenedor con $\omega=25$ [Hz] y $\Gamma=7.4$. Estos resultados coinciden con los reportados por Brennen, Aoki, Surajit, entre otros.

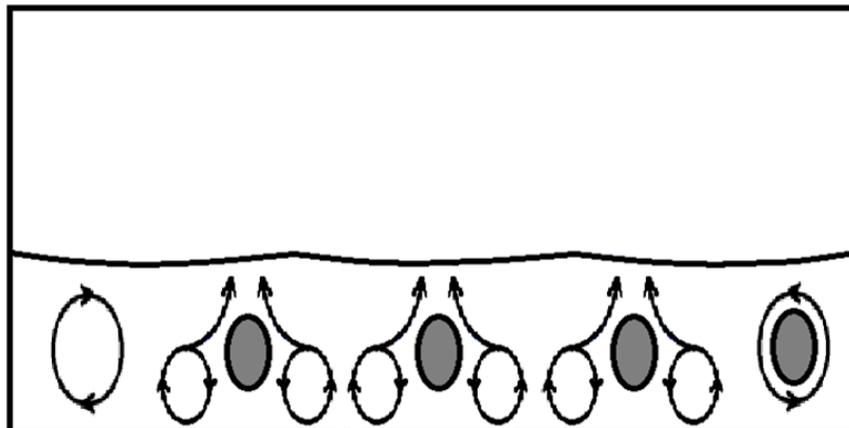


Figura 16. Flujo observado durante los experimento al introducir los micrófonos (indicados en el diagrama como óvalos de color gris) al material granular cuando el contenedor oscila con $\omega=25$ [Hz] y $\Gamma=7.4$.

Además de este cambio en el flujo de los granos, también se observa que los arcos no presentan la misma amplitud de los que se forman en el material granular sin micrófonos. Por desgracia estos errores son imposibles de cuantificar y de corregir, por lo que para ser tomados en cuenta para los resultados finales se consideró que este es el flujo de las partículas que conforman al material.

Una vez tomado en cuenta el porcentaje de cada uno de los errores, se sumaron y se agregaron a los resultados finales. Se sabe que estos errores varían dependiendo de la vibración del contenedor y de la frecuencia del sonido que viaja a través del material, es por ello que se tomaron diferentes porcentajes de error para las pruebas.

Para los resultados se utilizó el método de Bevington y al error calculado por este método se le sumó el error del micrófono, la bocina, el desplazamiento de los micrófonos debido al movimiento del contenedor y se considerará que el flujo que siguen los granos es el mostrado en la figura [15]

Para obtener resultados más fidedignos se calculó el error con el método de Bevington y se le sumaron los errores del micrófono, la bocina y el desplazamiento de los micrófonos. Se consideró que el flujo que siguen los granos es el mostrado en la figura [15]

El porcentaje de error se compuso de la siguiente manera:

$$E_P = E_m + E_b + E_d$$

Donde E_p es el error parcial, E_m es el error debido a los micrófonos. E_b es el error debido a la bocina y E_d es el error debido al desplazamiento de los micrófonos dentro del contenedor.

El error debido al desplazamiento de los micrófonos solo se tomó en cuenta para aquellas pruebas en las que la frecuencia del sonido es diez mil hercios.

$$E_{P1} = 0.3\% + 3.5\% + 0.001 \left[\frac{w}{m^2} \right] = 3.8\% + 0.001 \left[\frac{w}{m^2} \right]$$

El porcentaje de error se multiplicó con la varianza obtenida con el método de Bevington, a este resultados se le sumo la varianza y por último al valor obtenido se le suma $0.001 \left[\frac{w}{m^2} \right]$.

$$E_T = 0.038\sigma + \sigma + 0.001 \left[\frac{w}{m^2} \right]$$

Para las pruebas donde la frecuencia del sonido es menor a diez mil hercios el último término ya no se agrega, esto debido a que el desplazamiento de los micrófonos no es suficiente para causar alteraciones en el resultado final:

$$E_{P2} = 0.3\% + 3.5\% = 3.8\%$$

Una vez obtenido este resultado, se multiplica la varianza por el porcentaje de error y al resultado de esta operación se le suma la varianza:

$$E_T = 0.038\sigma + \sigma$$

El resultado de este proceso se muestra en cada una de las gráficas presentadas en el siguiente capítulo.

4

Resultados

4.1 Patrones observados

La primera etapa de este proyecto consistió en reproducir los patrones formados en los medios granulares reportados en diferentes investigaciones y aunque no se logró reproducir todos los descritos en los antecedentes teóricos, se pudieron reproducir de manera satisfactoria la gran mayoría, siendo estos: apilamiento, ondas de pequeña amplitud, ondas de gran amplitud y arqueado.

A continuación se muestran algunas imágenes obtenidas.



Figura 17. Apilamiento



Figura 18. Ondas de pequeña amplitud

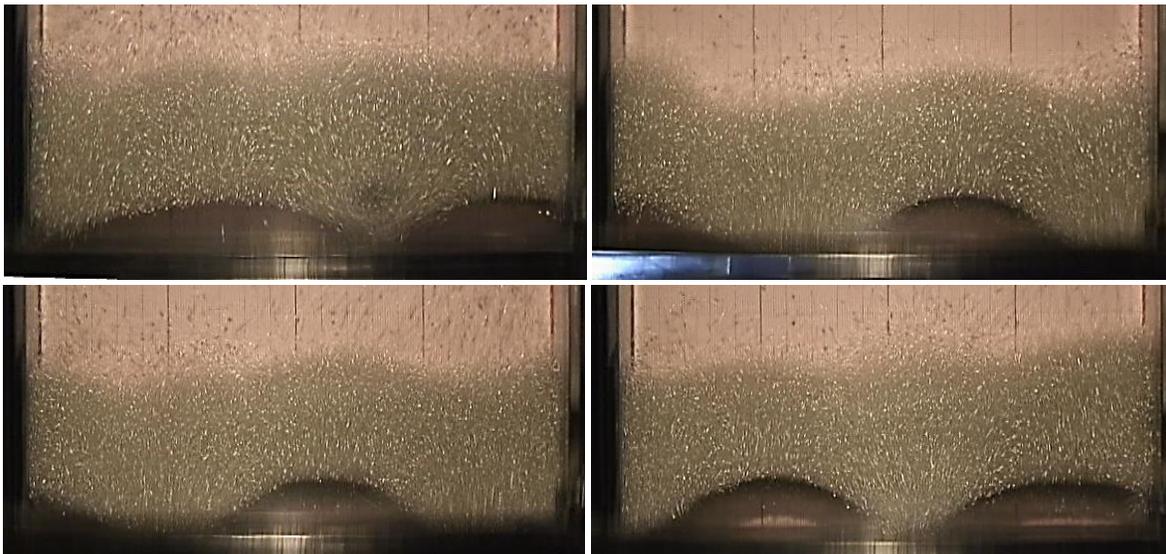


Figura 19. Serie de imágenes del arqueado

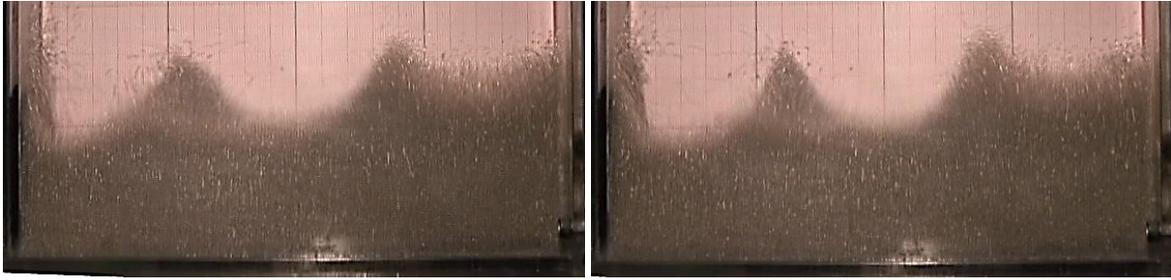
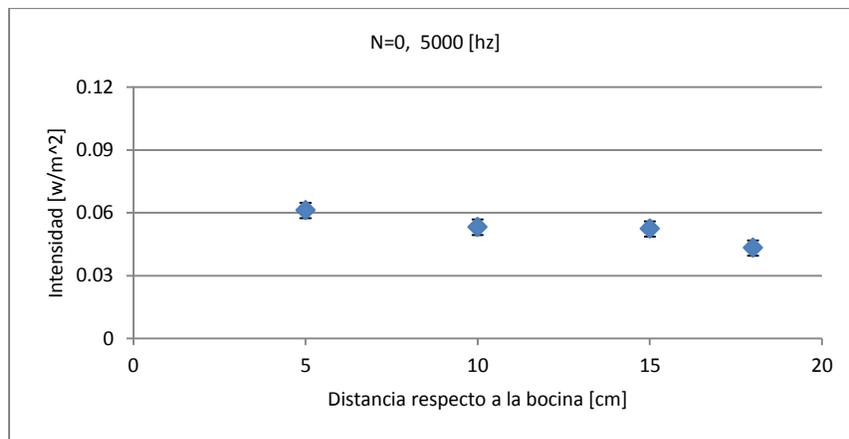
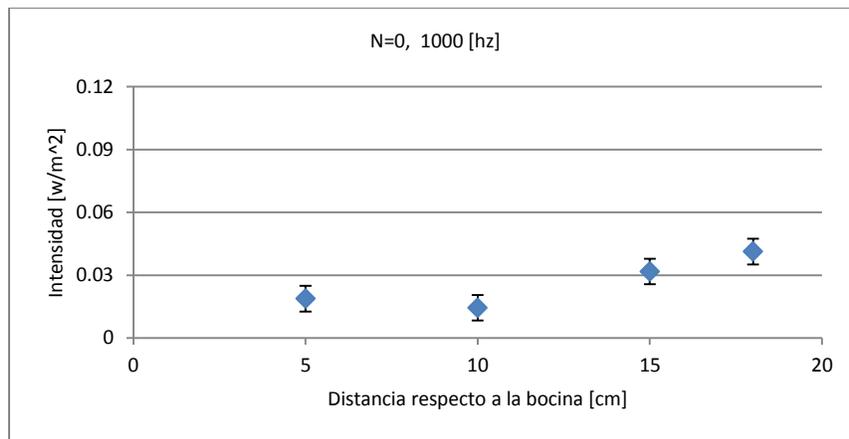


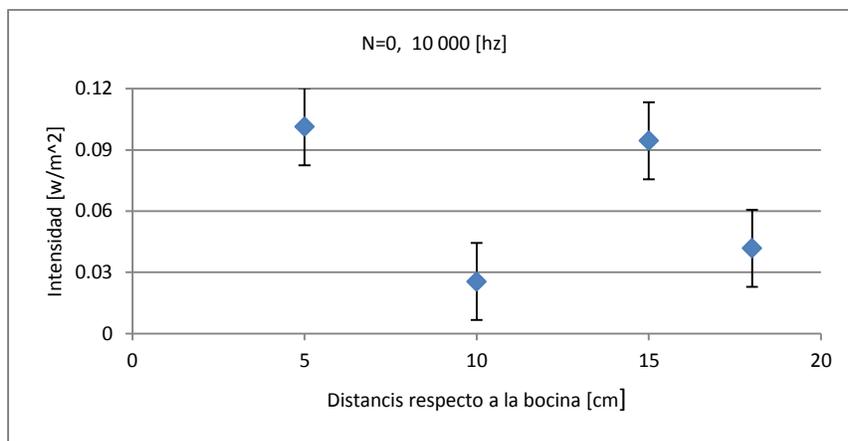
Figura 20. Serie de imágenes ondas de gran amplitud

4.2 Pruebas con el contenedor vacío

Con la finalidad de determinar el comportamiento del sonido dentro del recipiente, fueron enviados sonidos de diferentes frecuencias a través del contenedor vacío. Se encontró que la respuesta del sonido presentaba una gran reverberancia (el rebote de la onda de sonido en las paredes del contenedor).

Los resultados se muestran en las siguientes figuras.





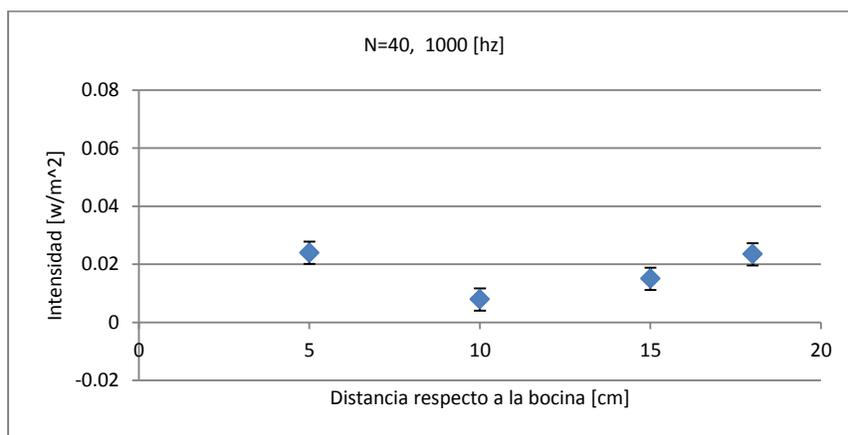
Grupo de gráficas 3, 4, 5. En las gráficas se presenta el comportamiento del sonido con diferentes frecuencias con $N=0$, en cada una de ellas se muestra una línea de ajuste y el porcentaje de error.

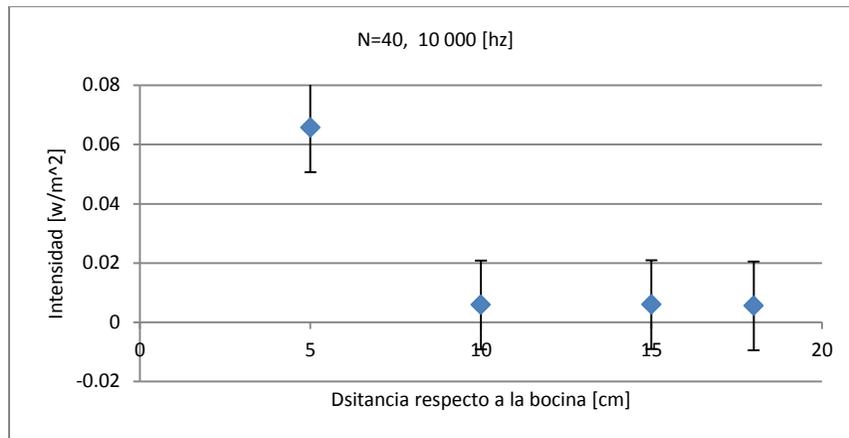
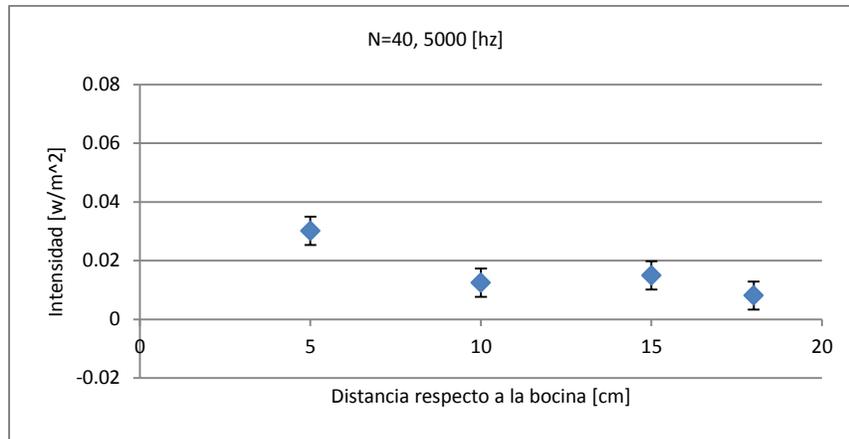
La respuesta del sonido varía dependiendo de su frecuencia debido a los efectos de la reverberancia del mismo dentro del contenedor, esta es la razón por lo que las gráficas parecen tener un comportamiento irregular y no presentan tendencia ante el cambio de frecuencia.

Al igual que en las otras pruebas, el margen de error se obtuvo conforme a lo propuesto por Bevington.

4.3 Pruebas con $N=40$

Se realizaron pruebas con sonidos de 1000, 5000 y 10000 [Hz] y $N=40$, los resultados obtenidos de estas pruebas se muestran en el siguiente conjunto de gráficas.





Grupo de gráficas 6,7,8. En las gráficas se presenta el comportamiento del sonido con diferentes frecuencias a través de un medio granular con N=40 y estático, en cada una de ellas se muestra una línea de ajuste y el porcentaje de error.

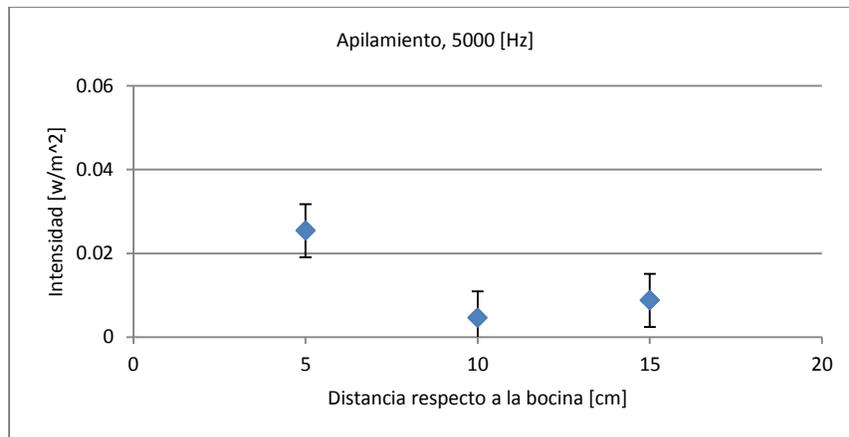
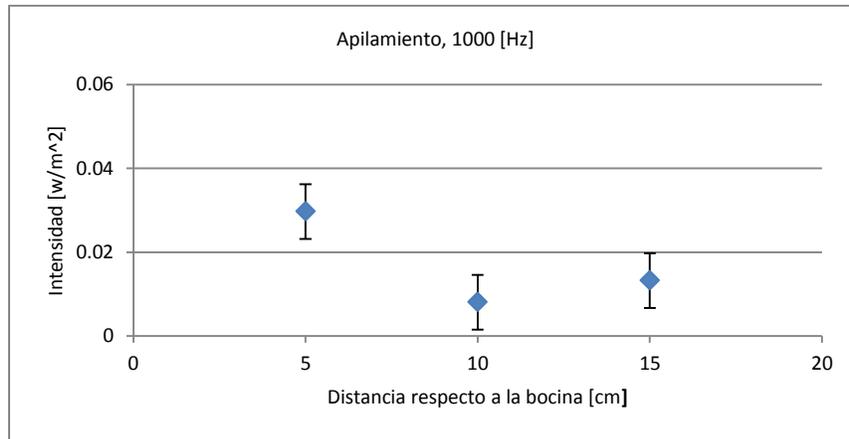
Las gráficas muestran que el efecto de reverberancia se abate conforme la frecuencia del sonido aumenta, esto se debe a la presencia del material dentro del contenedor, el cual está compuesto por partículas capaces de disipar la energía del sonido.

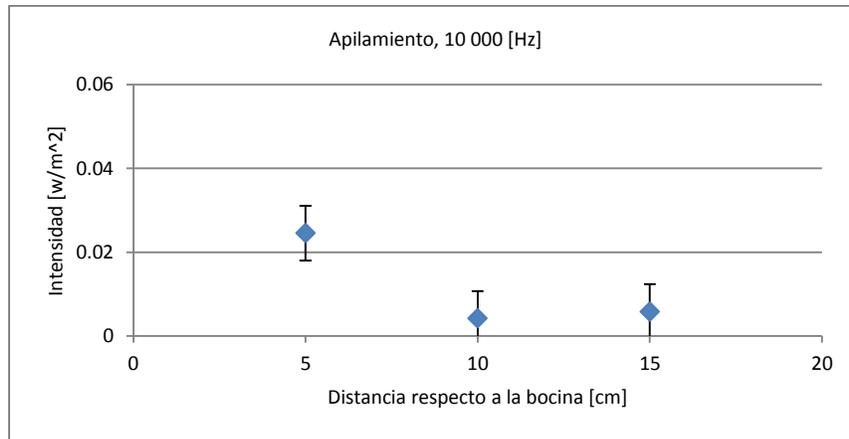
La disipación de energía dentro del material conforme la frecuencia del sonido aumenta se debe a que la longitud de onda de este es cada vez más parecida al diámetro de las partículas que componen el material.

4.4 Contenedor con material granular apilado

Con el propósito de analizar cómo afecta a una señal acústica el movimiento de un material granular cuando este presenta celdas convectivas, se hicieron pruebas apilando los granos dentro del contenedor, emulando la geometría que se presenta cuando el recipiente oscila a 9 [Hz].

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas.





Grupo de gráficas 9, 10, 11. En las gráficas se presenta el comportamiento del sonido con diferentes frecuencias a través de un medio granular apilado y estático, en cada una de ellas se muestra una línea de ajuste y el porcentaje de error.

Para este tipo de pruebas no se tomó en cuenta el micrófono cuatro ya que cuando se forma el apilamiento, este micrófono queda completamente fuera del material.

El material dentro del contenedor reduce de forma importante el efecto de reverberancia. De manera similar a las pruebas donde $N=40$ la reverberancia disminuye conforme la frecuencia del sonido aumenta

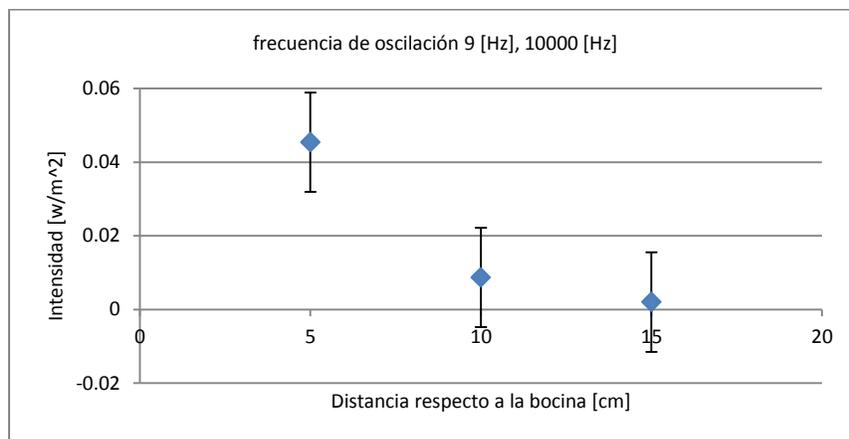
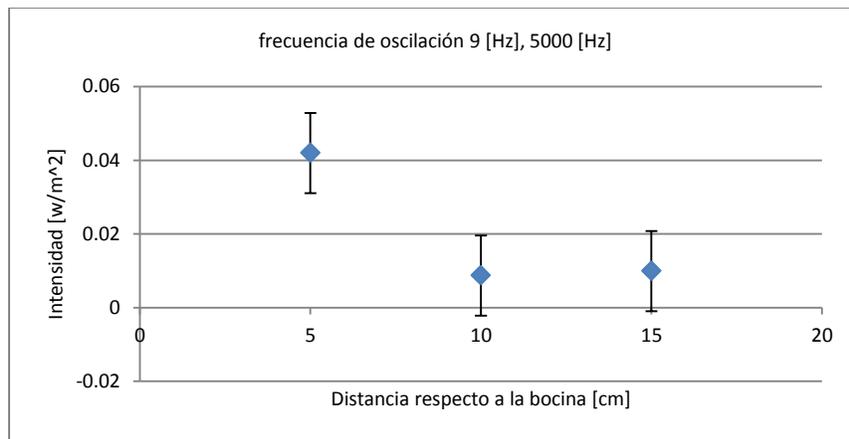
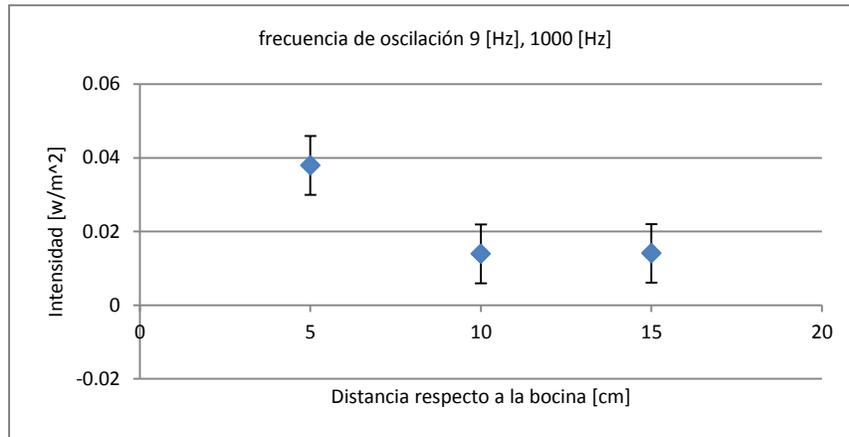
4.5 Respuesta del sonido ante un medio granular vibrado

Las pruebas realizadas consistieron en introducir granos en el contenedor con $N=40$ y hacerlo vibrar verticalmente hasta llegar a la frecuencia deseada (se utilizaron dos frecuencias de vibración distintas, 9 y 25 [Hz]), posteriormente se mandaron diferentes señales acústicas a través del material.

4.5.1 $N=40$ con frecuencia de vibración de 9 y 25 [Hz]

Los resultados mostrados son el promedio de cien datos obtenidos en diez pruebas para cada una de las frecuencias del sonido y de oscilación del contenedor. En cada prueba se realizaron diez mediciones para obtener un margen de error. Éste se obtuvo por medio del método propuesto por Bevington descrito en el capítulo anterior.

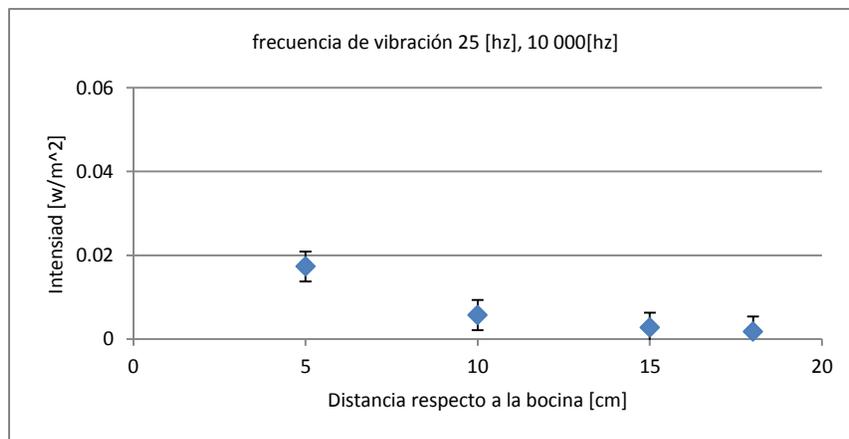
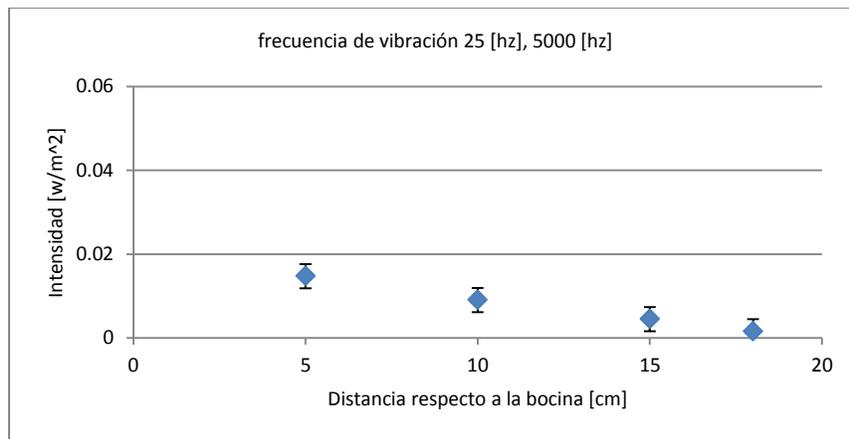
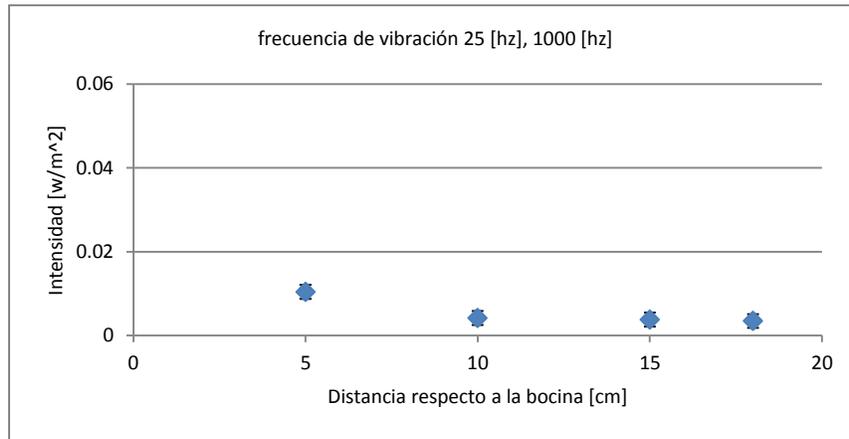
Los resultados obtenidos cuando la frecuencia de oscilación del recipiente fue de 9 [Hz] se presentan en las siguientes gráficas.



Grupo de gráficas 12, 13, 14. En las gráficas se presenta el comportamiento del sonido con diferentes frecuencias a través de un medio granular con $N=40$ y vibrado a 9 [Hz], en cada una de ellas se muestra una línea de ajuste y el porcentaje de error.

De forma similar a las gráficas presentadas cuando el material está estático y apilado, la intensidad del sonido disminuye conforme se aleja de su fuente y conforme la frecuencia del sonido aumenta, los efectos de la reverberancia disminuyen.

Los resultados obtenidos cuando la frecuencia de oscilación del contenedor fue de 25 [Hz] se presentan en las siguientes gráficas.



Grupo de gráficas 15, 16, 17. En las gráficas se presenta el comportamiento del sonido con diferentes frecuencias a través de un medio granular con $N=40$ y vibrado a 25 [Hz] con $\Gamma=7.4$, en cada una de ellas se muestra una línea de ajuste y el porcentaje de error.

El sonido pierde intensidad conforme se aleja de la bocina, este se considera un comportamiento “normal” del sonido (a mayor distancia de la fuente de origen, la disipación del sonido es mayor).

Las gráficas presentan un comportamiento muy similar, tanto en forma como en intensidad a diferentes frecuencias del sonido.

4.6 Comparación de la intensidad del sonido cuando el material se encuentra en estado estático y dinámico

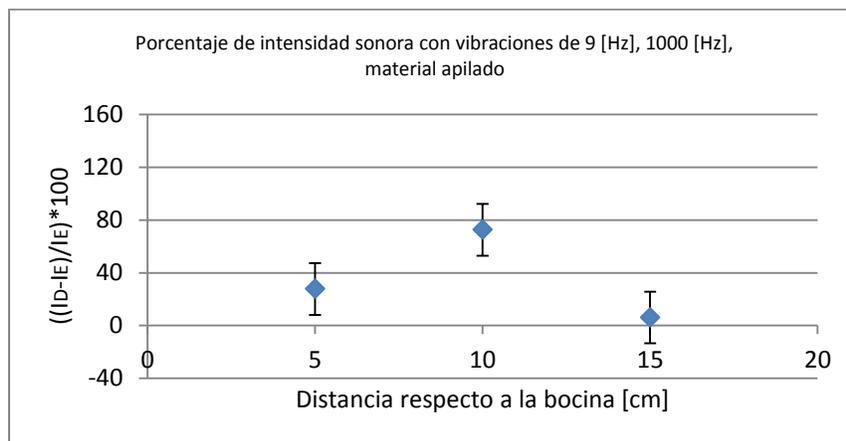
Con la finalidad de conocer cómo afecta el movimiento del material a las ondas de sonido, se comparó su intensidad cuando el material está estático y cuando se encuentra en estado dinámico.

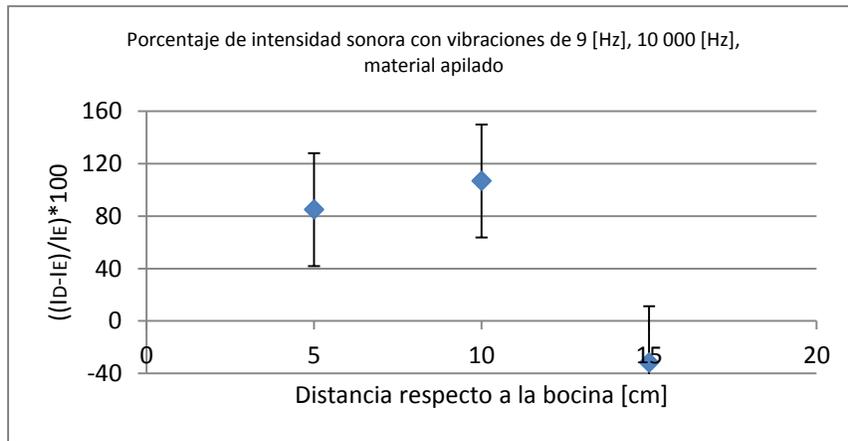
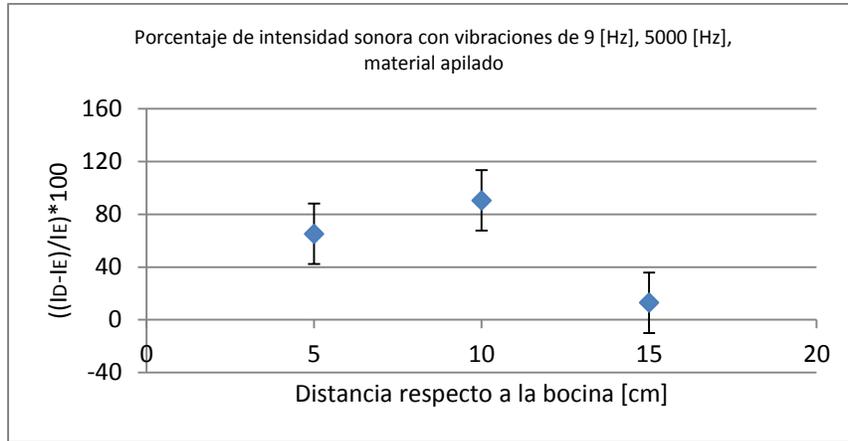
La comparación se hizo tomando como referencia el valor de la intensidad del sonido cuando el contenedor se encuentra estático, utilizando la siguiente ecuación:

$$I_R = \left(\frac{I_D - I_E}{I_E} \right) * 100$$

donde I_D es la intensidad del sonido cuando el contenedor esta en movimiento, I_E es la intensidad del sonido cuando el contenedor se encuentra estático e I_R es la intensidad relativa.

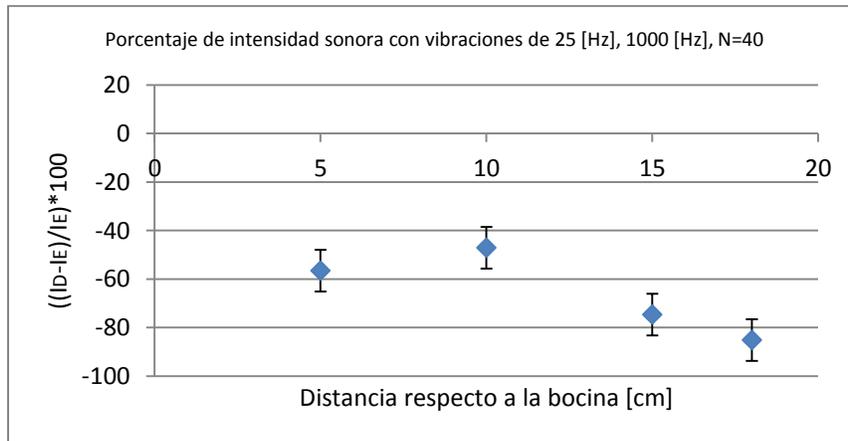
Los resultados de esta comparación se presentan en las siguientes graficas.

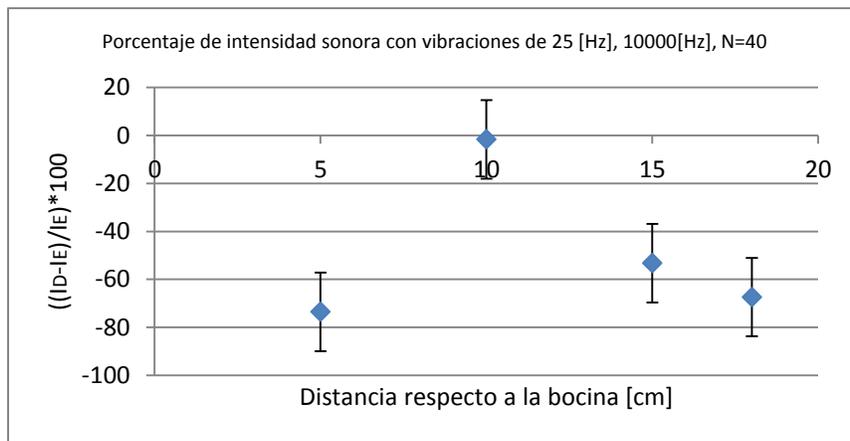
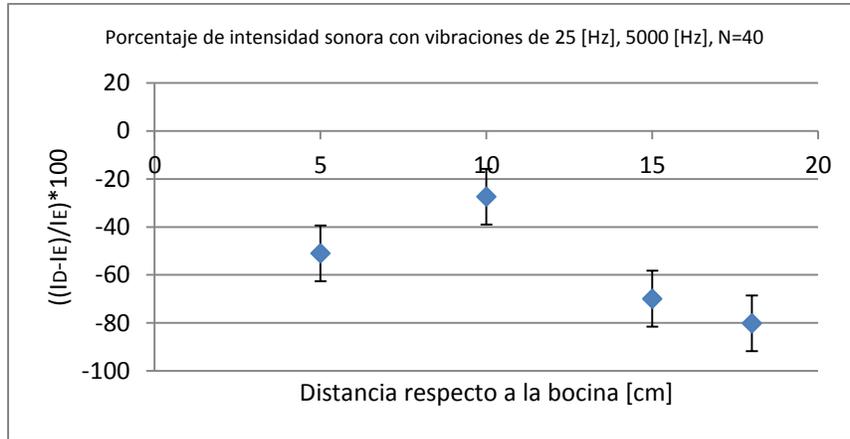




Grupo de gráficas 18, 19, 20. En las gráficas se presenta una comparación entre la intensidad del sonido cuando se encuentra estático y apilado a la intensidad del sonido cuando se encuentra vibrado a 9 [Hz] y Γ , en cada una de ellas se muestra el porcentaje de error.

En las gráficas se observa que todos los puntos aparecen por encima de cero, es decir, la intensidad del sonido es mayor en estado dinámico a la intensidad del sonido en estado estático. Conforme la frecuencia del sonido aumenta, también lo hace la intensidad relativa con excepción del micrófono tres que presenta el comportamiento contrario.



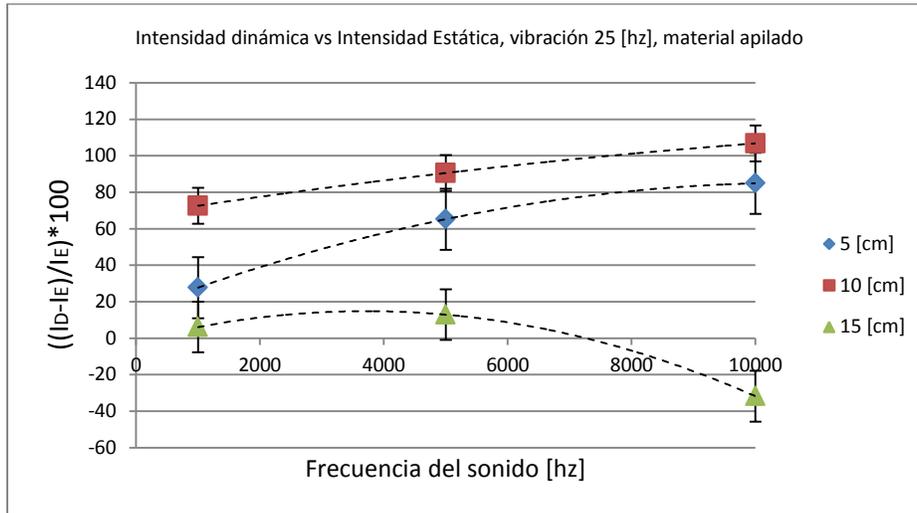


Grupo de gráficas 21, 22, 23. En las gráficas se presenta una comparación entre la intensidad del sonido cuando se encuentra estático con N=40 con intensidad del sonido cuando se encuentra vibrado a 25 [Hz] y $\Gamma=7.4$, en cada una de ellas se muestra el porcentaje de error.

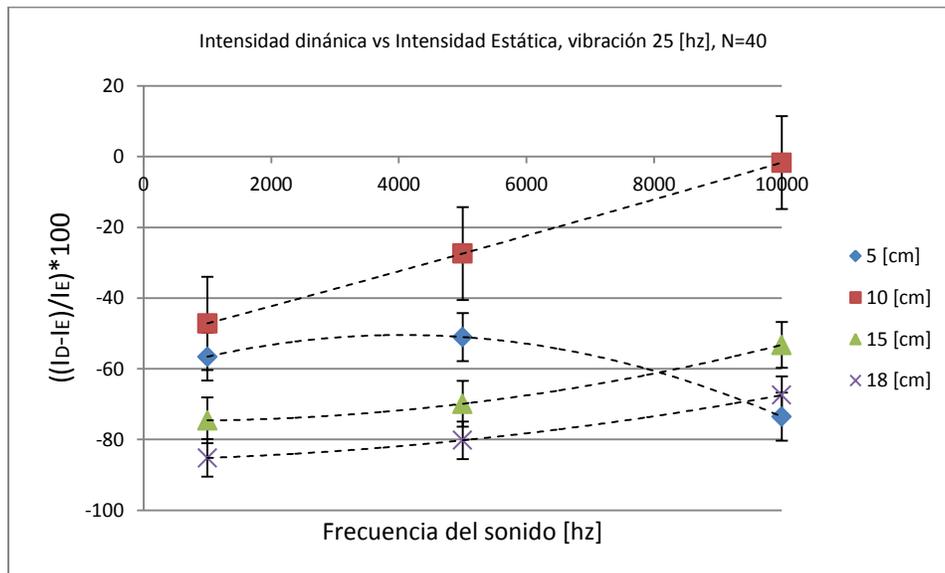
En las gráficas se observa que la intensidad del sonido es menor en estado dinámico que en estado estático a diferencia de las gráficas [18], [19] y [20]. Tanto el conjunto de gráficas [18], [19] y [20] como el conjunto [21], [22] y [23] presentan un micrófono que tiene un aumento notable en la intensidad relativa, por otro lado, ambos grupos de gráficas presentan un micrófono que tiene un comportamiento contrario al resto (conforme la frecuencia del sonido aumenta, la intensidad relativa disminuye).

4.6.1 Intensidad relativa en función de la frecuencia del sonido

El análisis individual de los micrófonos consistió en comparar su respuesta a diferentes vibraciones y frecuencia del sonido, los resultados obtenidos se muestran en las siguientes gráficas



Gráfica 24. En esta gráfica se muestra la relación que existe entre la frecuencia y la comparación entre la intensidad del sonido cuando el material está apilado y estático contra la intensidad del sonido cuando el material se encuentra vibrado a 9 [Hz]



Gráfica 25. En esta gráfica se muestra la relación que existe entre la frecuencia y la comparación entre la intensidad del sonido con N=40 y estático contra la intensidad del sonido cuando el material se encuentra vibrado a 25 [Hz] y $\Gamma=7.4$

En general todos los micrófonos presentan una tendencia a la alza; en otras palabras, conforme la frecuencia del sonido aumenta, la intensidad relativa del mismo también lo hace. En ambas gráficas existe un micrófono que presenta un comportamiento contrario (conforme aumenta la frecuencia, la intensidad relativa disminuye).

En las gráficas [6], [7] y [8] se encontró que la intensidad del sonido en el micrófono uno es mayor a la intensidad presentada por los micrófonos circundantes. Este mismo fenómeno se presenta en el micrófono tres en las gráficas [9], [10] y [11], lo cual nos hace pensar que en estas zonas, la energía del sonido queda “atrapada”.

Por otro lado, en las gráficas [12], [13] y [14] el valor de la intensidad en el micrófono tres es muy similar o incluso menor a la intensidad reportada por los micrófonos circundantes. Esto mismo ocurre en el micrófono uno en las gráficas [15], [16] y [17]. Por lo que creemos que el movimiento del material granular permite que el sonido se transporte con mayor facilidad.

El hecho de que el sonido pueda viajar con mayor facilidad a través del material cuando este se encuentra en movimiento, provoca que en aquellas zonas donde el sonido llegaba con dificultad, ahora llegue facilidad provocando una tendencia a la baja en aquellas zonas donde la energía solía quedar “atrapada”.

5

Conclusiones

5.1 Conclusiones

Al igual que Surajit Sen⁷ creemos que existe una relación entre la longitud de onda del sonido y el tamaño de las partículas que conforman el medio granular y que el grado de compactación del material influye de manera importante en el flujo del sonido.

El movimiento del medio granular influye en la forma en la que el sonido se comporta en este. Si bien es difícil de cuantificar este fenómeno, se observa claramente en las gráficas [18], [19] y [20] que la intensidad del sonido es mayor cuando el material esta en movimiento con respecto al material en reposo a diferencia de las gráficas [21], [22] y [23] en las cuales se presenta el fenómeno contrario.

A pesar de la diferencia de comportamientos en los conjuntos de gráficas antes mencionados, ambos presentan un alza en la intensidad relativa conforme la frecuencia del sonido aumenta, mostrando una relación entre la longitud de onda y el tamaño de las partículas del material, y que esta relación rige la forma en como el sonido se comporta en este medio.

Las gráficas [24] y [25] indican que el sonido parece quedar atrapado en las zonas estáticas del contenedor, mientras que aumenta considerablemente su intensidad en las zonas de movimiento recirculante.

Se lograron obtener algunas imágenes interesantes, las cuales confirman lo presentado por diversos autores como Aoki¹⁰, Brennen¹⁶, Fauve⁵, Mena¹³ entre otros en cuanto al comportamiento de los medios granulares sometidos a oscilaciones verticales. Dichas imágenes son de gran interés, ya que a pesar del gran número de trabajos presentados, existen pocas imágenes que muestren los patrones descritos con claridad.

Finalmente es importante comentar que durante el desarrollo del proyecto se presentaron problemas y se encontraron errores en la realización de la pruebas y fue en base a planeación, investigación, prueba y error, que se lograron resolver de forma satisfactoria y en aquellos que no fue posible solucionar, se hizo un ajuste en la medida de lo posible para tratar de tomarlos en cuenta y de esta forma poder dar conclusiones más acertadas.

Bibliografía

- [1] M. Pastor, *Convección en Medios Granulares Vibrados*, Tesis de doctorado, Universidad de Navarra, 2010
- [2] D. Geldart, *Types of gas fluidization*, *Powder Technology*, Thesis, 7, (1973)
- [3] R. M. Nedderman. *Statics and Kinematics of Granular Materials*. Cambridge University, 1992
- [4] B. Thomas, M.O. Mason, Y.A. Liu, A.M. Squires, *Identifying states in shallow vibrated beds*, *Powder Technology*, 57:267–280, 1989.
- [5] C. Laroche, S. Douady, S. Fauve, *Convective flow of granular masses under vertical vibration*, *J. Phys. France*, 50:699, 1989.
- [6] Chu-Heng Liu, Sidney R. Nagel. *Sound and vibration in granular materials*. The James Franck Institute and the Department of Physics, The University of Chicago. 1993
- [7] Surajit Sen, Marian Manciu, Robert S. Sinkovits, Alan J. Hurd, *Nonlinear acoustics in granular assemblies*, *Granular Matter* 3, 33-39, Springer-Verlag, 2001
- [8] Pastor Gutiérrez J, *Convección en Medios Granulares Vibrados*, Tesis, Universidad de Navarra. 2010
- [9] Stephen R. Hostler, Christopher E. Brennen, *Wave Propagation in Granular Materials*, Thesis. California Institute of Technology, 2005
- [10] Yoji Maki Keiko M. Aoki, Tetsuo Akiyama and Tatsuyuki Watanabe, *Convective roll patterns in vertically vibrated beds of granules*, *Physical Review E*, 54(1):874–883, September 1996.
- [11] Philip R. Bevington. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. Case Western Reserve University, Third Edition, 1960.
- [12] Alejandro Pérez Alvarado, Joshua Jeremy Cardiel Rivera, *Diseño Experimental para el estudio de propagación de ondas en medios granulados vibratorios*, Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [13] J. Jaimes, G. G. Josehp, E. Geffroy, B. Mena, *Patter formation in oscillatory granular flows*, *Revista Mexicana de física* 48, Instituto Tecnológico de Zacatepec, 2002.
- [14] R. Nagel and Chu heng Liu. *Sound in a granular material. disorder and nonlinearity*. *Physical Review B*, 48-21:646–650, 1993.
- [15] J. Duffy and Mindlin R. *Stress-strain relations and vibrations of a granular medium*. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1957.

[16] M.L Hunt C.E Brennen, C.R Wassgren. Vertical vibration of deep bed of granular material in a container. Transactions of the ASME, 63:712–719, September 1996.

[17] Serway Raymond A, Física para ciencias e ingeniería, McGraw Hill 1992.

[18] Tippens Paul E. Física conceptos y aplicaciones. McGraw Hill 2001.

