

Estudio sobre atenuación de vibraciones mediante un amortiguador granular con obstáculos

Gómez Paccapelo, Julián María

**Tesina presentada para obtener el grado académico de
Licenciado en Física**

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad Nacional de La Pampa

Santa Rosa (La Pampa)

Argentina

2023

Prólogo

Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Licenciado en Física de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica. Se llevó a cabo en el laboratorio del Grupo de Física de Sistemas Granulares dependiente del Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNLPam, durante el período comprendido entre el año 2021 y 2023, bajo la dirección de Pugnaroni, Luis A., la codirección de Ferreyra, María Victoria y el asesoramiento técnico de Bustos, Horacio D.

29/09/2023



Julián M. Gómez Paccapelo

DNI: 37.372.926

Agradecimientos

Todo mi agradecimiento a mi director de tesis Luis A. Pugnaroni y Co-directora María Victoria. Ferreyra, por su inestimable ayuda y guía durante estos años, sin ellos no hubiera sido posible.

A Daniel H. Bustos por su valiosa ayuda en el aspecto técnico y a mi compañero de universidad y de investigación Ramiro E. Suarez, por su implicación e intercambio de conocimientos.

Agradezco a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN) de la UNLPam por proporcionarme un entorno propicio y recursos para llevar a cabo las investigaciones que han culminado en esta tesis. La colaboración y el respaldo de esta institución han sido fundamentales para el éxito de mi trabajo. Asimismo, quiero expresar mi agradecimiento a los proyectos PICT 2016 y 2021 por su financiamiento. Sin su apoyo financiero, llevar a cabo esta investigación habría sido mucho más desafiante.

A los y las docentes que han sido parte de mi formación académica. Sus enseñanzas y orientación han sido invaluable para mi crecimiento personal y profesional. Gracias por compartir su conocimiento y guiar mi camino educativo.

Por su puesto a mi familia y a la familia Rolhaiser, que siempre me han apoyado y animado a lo largo de este recorrido.

Y por último, no por ello menos importante, a Jessica, Pajarito, Kevin, Daiana y Belén por las risas, los mates, la nieve, las montañas, los vinos y la improvisación.



29/09/2023

Julián M. Gómez Paccapelo

DNI: 37.372.926

RESUMEN

Los amortiguadores granulares (AG) son recintos huecos con material granular en su interior que se acoplan a una estructura vibrante para atenuar la amplitud de vibración. Los AG son dispositivos pasivos que utilizan las propiedades disipativas de los materiales granulares (colisiones inelásticas y de fricción) para reducir la amplitud de vibración de diferentes sistemas mecánicos. Si bien los amortiguadores viscosos convencionales cumplen la misma función, los AG presentan grandes ventajas a la hora de ser utilizados en condiciones hostiles, tales como temperaturas y presiones extremas, sin perder su capacidad de amortiguación como sucede en los amortiguadores convencionales. Además, los AG son de fácil construcción, de bajo costo y mantenimiento, produciendo así un gran interés de parte de la industria para su implementación en diferentes aplicaciones. Sin embargo, su comportamiento es mucho más complejo que el de un amortiguador convencional (incluyendo respuestas no-lineales, incluso caóticas, a excitaciones armónicas) y esto limita sus aplicaciones actuales.

En esta investigación experimental se propone el diseño y caracterización de distintos AG a los cuales se le insertan en su interior un obstáculo cilíndrico de diferentes diámetros (de 1.3 mm hasta 9.0 mm), con el fin de estudiar cómo estos afectan al factor de amortiguación.

Se encontró que insertar un obstáculo con un diámetro mayor a 5 mm en el recinto del AG produce que el factor de amortiguación sea menos cambiante para un rango más amplio de amplitudes de aceleración. En particular, desaparece el fenómeno de *collect-and-collide* que aparece en los AG convencionales. Este fenómeno produce saltos bruscos en el factor de amortiguación al variar muy poco la amplitud de aceleración.

Palabras claves: Amortiguador granular, Atenuación de vibraciones, Materiales granulares.

ABSTRACT

The granular dampers (GD) are hollow enclosures with granular material inside that are coupled to a vibrating structure to attenuate the amplitude of vibration. GDs are passive devices that use the dissipative properties of granular materials (inelastic collisions and friction) to reduce the vibration amplitude of different mechanical systems. Although conventional viscous dampers serve to the same goal, GDs present significant advantages when used in harsh conditions, such as extreme temperatures and pressures, without losing their damping capacity as is the case with conventional dampers. In addition, GDs are easy to build and have a low cost and low maintenance, thus generating great industrial interest for their implementation in different applications. However, the GDs behavior is much more complex than that of a conventional damper (including non-linear, even chaotic, responses to harmonic perturbations) and this limits their current applications.

This experimental research considers the design and characterization of different GDs into which cylindrical obstacles of varying diameters (from 1.3 mm to 9.0 mm) are inserted, in order to study how these obstacles affect the damping factor.

It was found that inserting an obstacle with diameter larger than 5 mm in the GD enclosure causes the damping factor to be less variable for a wider range of acceleration amplitudes. In particular, the obstacle prevents the *collect-and-collide* phenomenon that appears in conventional GD. This phenomenon is responsible for an abrupt change in the damping factor for a minute change in acceleration amplitude.

Keywords: Granular damper, Vibration attenuation, Granular materials.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Amortiguación de vibraciones mecánicas	1
1.2. Los materiales granulares	2
1.3. Los amortiguadores granulares	3
1.4. Objetivos de este trabajo	12
2. MATERIALES Y MÉTODOS	14
2.1. Equipo experimental	14
2.2. Amortiguadores granulares	15
2.2.1. Amortiguador granular estándar	16
2.2.2. Amortiguador granular con obstáculo	16
2.3. Metodología de las mediciones	17
2.3.1. Armado y llenado del amortiguador granular	17
2.3.2. Protocolo de medición	18
2.4. Adquisición y análisis de datos	19
2.5. Caracterización de la respuesta del amortiguador	20
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES	24
3.1. Amortiguador granular sin obstáculo	24
3.2. Amortiguador granular con obstáculo	27
3.3. Masa efectiva	32
3.4. Patrón de colisiones	33
4. CONCLUSIONES	39

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se dará una breve descripción sobre los materiales granulares y los mecanismos de atenuación de vibraciones convencionales. Se presentará, además, un resumen del estado del arte sobre atenuación de vibraciones mediante amortiguadores granulares.

1.1. Amortiguación de vibraciones mecánicas

En muchos procesos productivos y de la ingeniería civil es usual encontrar fenómenos vibratorios como consecuencia de los sistemas dinámicos empleados en dichos procesos, los cuales pueden ser no deseados, o justamente la razón misma del diseño del sistema. En la mayoría de los casos se utilizan materiales visco-elásticos o fluidos viscosos para lograr atenuar dichas vibraciones en aquellos lugares donde no son deseadas [1]. Entendemos por amortiguamiento al mecanismo por el cual se disipa la energía mecánica de un sistema dinámico, generalmente convirtiéndola en energía térmica. El amortiguamiento es muy útil en muchos sistemas para evitar oscilaciones excesivas o daños a la estructura, para el control de las emisiones de ruido de las superficies vibrantes. Si bien existen diferentes mecanismos de amortiguamiento, se destacan, en el estudio de los sistemas dinámicos, la amortiguación interna (producida por las características propias del material), el amortiguamiento estructural (en juntas e interfaces) y la amortiguación por fluidos (a través de interacciones fluido-estructura).

El amortiguamiento interno está relacionado con la disipación de energía mecánica debida a la deformación y absorción de energía por parte del material que conforma la estructura. Su origen es tanto microscópico como macroscópico y depende del componente de la estructura. Por ejemplo, mecanismos construidos con metales o aleaciones suelen presentar menos amortiguamiento interno que aquellos fabricados con cauchos, plásticos o combinaciones de estos.

La amortiguación estructural ocurre principalmente en juntas e interfaces. Es una consecuencia de la disipación de energía mecánica debido a movimientos relativos entre los componentes de una estructura que tienen puntos de contacto común (juntas), donde aparecen fuerzas de fricción o impactos en las juntas. Usualmente, son efectos no deseados que se intentan evitar en el diseño del sistema dinámico.

Por último, existen dispositivos de atenuación de vibraciones de uso extendido que basan su funcionamiento en el amortiguamiento por fluidos viscosos. La disipación de la energía mecánica, en este tipo de dispositivos, es producida por las fuerzas de arrastre cuando una

parte del sistema es forzada a moverse en un fluido viscoso [1]. El ejemplo más representativo de estos dispositivos es el de los amortiguadores presentes en automóviles, motocicletas, sistemas de freno de puertas, entre otros, donde un vástago se mueve dentro de un aceite contenido en un cilindro o pistón.

En el mundo de la atenuación de vibraciones se pueden destacar dos tipos generales de sistemas de control, externos a un sistema mecánico, para mejorar su características de disipación de energía: los amortiguadores pasivos y los activos [2, 3].

Los amortiguadores pasivos son dispositivos que disipan energía a través de algún tipo de movimiento relativo de sus partes. Consisten en un sistema secundario (normalmente una combinación masa-resorte-amortiguador) que se añade al dispositivo primario para protegerlo de las vibraciones o de golpes externos al atenuar la amplitud del movimiento. Cuando un sistema pasivo se deteriora, sus parámetros estructurales pueden desfasarse de los nominales de diseño, produciendo que la amortiguación de las vibraciones se convierta en ineficaz para la frecuencia que fue diseñada. Ejemplos de este tipo de amortiguadores son los viscosos ya mencionados utilizados en vehículos y los amortiguadores viscoelásticos que absorben vibraciones sísmicas en edificios [4]. En ambos casos, el mecanismo de disipación de energía (la viscosidad del material) es fuertemente dependiente de la temperatura.

Por el contrario, los amortiguadores activos tienen actuadores que reaccionan frente a estímulos externos, controlando activamente el movimiento del sistema que necesita amortiguación sólo cuando es necesario. Los sistemas activos requieren de algoritmos complejos de control que limitan su aplicación en diseños industriales. Además, el mantenimiento de los mismos requiere de mayor esfuerzo que en el caso de los controles pasivos, ya que se trata, en general, de sistemas de mayor complejidad. Ejemplos de atenuación activa pueden encontrarse en estructuras de edificios y puentes, helicópteros, etc [4, 5].

1.2. Los materiales granulares

En la vida diaria estamos constantemente en contacto con el complejo comportamiento de los materiales granulares o aplicaciones que los involucran. Los materiales granulares son aquellos que están compuestos de partículas macroscópicas sólidas, llamadas granos, que pueden tener forma y tamaño variado. Algunos ejemplos son las rocas, la arena, la grava, la tierra, el arroz, el café, entre otros (ver figura 1). Todos los procesos relacionados con la industria de la construcción y alimenticia involucran, de un modo u otro, material granular en alguna etapa de su actividad.



Figura 1: Ejemplos de materiales granulares que están presentes en muchas actividades humanas.

En los medios granulares, las partículas interactúan entre ellas principalmente por fricción. Se consideran macroscópicas debido a que las fluctuaciones térmicas son irrelevantes para la escala de un grano. Por lo tanto, la disipación de energía a través de la fricción y/o colisiones inelásticas entre las partículas tiene una mayor preponderancia en el comportamiento y dinámica de los medios granulares.

Los materiales granulares, lejos de ser materiales bien comportados con propiedades simples, exhiben una variedad de comportamientos (como puede ser dilatancia, segregación por tamaño, formación de dunas, etc.) que los hacen inclasificables entre los tres estados usuales de la materia (sólido, líquido y gaseoso) [6]. Esto hace difícil su descripción en términos teóricos y, por tanto, predecir su comportamiento [7]. Por ejemplo, el desarrollo de una teoría general para describir el empaquetamiento (relacionado con el comportamiento estático de granos) y el flujo (entre otras características de la física de granos en movimiento) de materiales granulares se ha convertido en el tema de interés de un número cada vez mayor de grupos de investigación alrededor del mundo. El creciente interés se debe, entre otras cosas, a la ya mencionada amplia utilización de granulares en los procesos industriales y la resolución de problemas que se relacionan con su almacenamiento, transporte y mezcla, entre otros.

1.3. Los amortiguadores granulares

Como ya se ha mencionado, la atenuación de vibraciones es de vital importancia en campos como la industria aeroespacial, la fabricación de maquinarias y de la ingeniería civil, por nombrar algunos. Actualmente, la atenuación de vibraciones indeseadas se lleva a cabo

a través de los diferentes dispositivos que se mencionaron en la sección 1.1. Los dispositivos más utilizados son los amortiguadores viscosos, dado que presentan una respuesta simple y lineal, lo que facilita la predicción de su comportamiento. Estos amortiguadores, que son muy eficaces a temperatura ambiente o temperaturas moderadas, no lo son a muy bajas o altas temperaturas: el mecanismo de disipación está directamente relacionado con la viscosidad del líquido involucrado, siendo esta propiedad muy sensible a la temperatura [8]. Por otro lado, con el paso del tiempo estos dispositivos se deterioran y pierden su efectividad.

Ante estos problemas, surge una alternativa para atenuar las vibraciones en los sistemas mecánicos: los amortiguadores granulares (AG). Los AG son dispositivos pasivos que utilizan la propiedad disipativa de los materiales granulares cuando se acoplan a una estructura vibrante primaria [9].

Los primeros amortiguadores granulares estudiados fueron los de impacto (ver figura 2). Éstos están diseñados para funcionar mediante el uso de un solo cuerpo encerrado en un recinto consiguiendo la amortiguación a través de las colisiones inelásticas entre el cuerpo y las paredes del recinto.

Debido a su bajo costo, diseño y mantenimiento sencillo, funcionamiento en ambientes hostiles y prestaciones de amortiguación eficiente en una amplia gama de frecuencia y aceleración, los amortiguadores de impacto son preferidos, en muchas aplicaciones, sobre los tradicionales dispositivos de control pasivo. Es por esta razón que varios autores se han centrado en estudiar el comportamiento de estos tipos de amortiguadores [9, 10, 11, 12]. Diferentes estudios muestran que existen ciertas características importantes a tener en cuenta cuando se utilizan los amortiguadores de impacto. Una de ellas es que existe un gap óptimo, es decir, el espacio que hay entre el techo y el cuerpo dentro del recinto en reposo [13]. Otros trabajos encuentran que la mejor eficiencia de amortiguación se produce cuando el cuerpo llega a tocar el techo mientras el sistema se encuentra en resonancia y en condiciones de gravedad cero [14].

A pesar de su sencillo diseño, estos amortiguadores pueden mostrar dinámicas muy complejas debido a la no linealidad introducida por los impactos. Dependiendo de las propiedades geométricas del cuerpo, del material que está compuesto, de los parámetros de excitación y de la forma y dimensiones del recinto de contención, el sistema puede tener un comportamiento regular o caótico [10, 15]. Otros problemas reportados incluyen altos niveles de ruido y desgaste de las superficies de contacto debido, principalmente, a las grandes fuerzas de colisión. El desgaste de las superficies de contacto puede causar cambios en los parámetros de

funcionamiento que pueden reducir drásticamente la eficiencia del amortiguador de impacto.

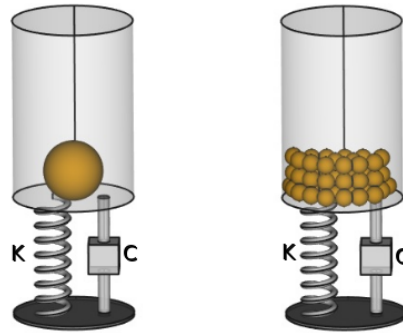


Figura 2: A la izquierda, esquema de un amortiguador de impacto. Consta de una única partícula encerrada, que disipa energía a partir de las colisiones inelásticas con las paredes del contenedor. A la derecha, esquema de un amortiguador granular. Consiste en un recinto hueco parcialmente lleno con partículas.

Una forma de reducir estos problemas es cambiar la partícula única por material granular en su interior (ver figura 2), dando lugar a lo que se conoce como amortiguador granular. El diseño más simple de un AG consiste en un recinto hueco con partículas sólidas en su interior, que está adherido o incrustado en una estructura vibratoria con el objetivo de atenuar vibraciones.

Cuando la estructura se somete a vibraciones, se transfiere energía cinética a las partículas dentro del recinto. Estas partículas experimentan múltiples colisiones inelásticas entre sí y con las paredes del compartimento. Como resultado, la energía transferida se disipa rápidamente a través de la fricción y los choques, lo que atenúa considerablemente las vibraciones o incluso las elimina por completo. Un AG, al igual que un amortiguador de impacto, es eficiente en un rango de frecuencias amplio, es de bajo costo, larga vida útil, fácil mantenimiento e insensible a la temperatura, lo que lo hace atractivo para su uso en ambientes hostiles [16, 9, 17].

La eficiencia de amortiguación o rendimiento de los AG ha sido objeto de estudio por varios grupos de investigación. Éstos buscan comprender cómo funcionan los AG en diferentes situaciones y condiciones operativas, y evaluar su capacidad para disipar energía y reducir las vibraciones. Se sabe que, para un AG que se mueven en dirección vertical (afectado por la aceleración de la gravedad), la disipación es prácticamente nula cuando la amplitud de la aceleración del movimiento se encuentra por debajo de g . La disipación aumenta hasta un máximo cuando la aceleración se encuentra alrededor de $2,5 g$ y disminuye para aceleraciones

mayores [18] siempre que las partículas no alcancen el techo.

Se conoce que los AG presentan un comportamiento universal [19], esto es, la disipación no depende del material granular, siempre que haya un mínimo de partículas, incluso si las partículas en el interior se fragmentan (debido a un intenso funcionamiento del AG). Sin embargo, la soldadura de las partículas, causado por las altas temperaturas, puede afectar esta respuesta universal disminuyendo la atenuación del AG. Existe, además, un tamaño de recinto óptimo que maximiza la disipación. En este punto el rendimiento es independiente de las propiedades materiales de las partículas [20].

Desafortunadamente, los AG presentan una respuesta mecánica no lineal, causada por las múltiples colisiones entre las partículas y las paredes del recinto, así como entre las propias partículas, lo que conlleva comportamientos complejos y difíciles de predecir [21, 22].

Esta característica representa un desafío significativo en el diseño del AG, ya que pequeñas variaciones en las condiciones de funcionamiento pueden ocasionar desviaciones importantes en la respuesta esperada. Por ejemplo, en el trabajo de Sanchez *et al.* [23], la dinámica del movimiento de un AG montado sobre un sistema con un grado de libertad (masa-resorte) presenta respuestas periódicas, cuasi-periódicas y caóticas dependiendo de la frecuencia de excitación (ver figura 3).

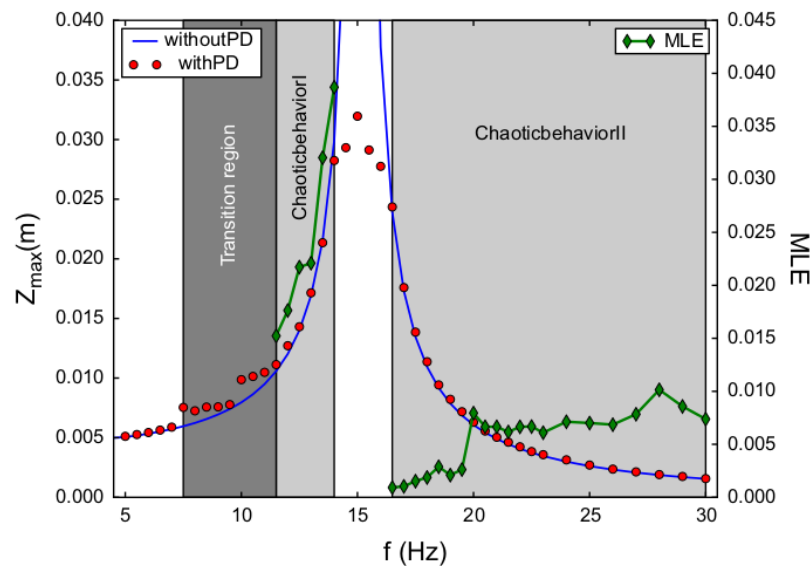


Figura 3: Respuesta en función de la frecuencia de un sistema masa-resorte-amortiguador viscoso al que se le agrega un amortiguador granular. Se observan zonas donde el sistema presenta una respuesta lineal (pintadas de blanco), otra donde existe una transición al comportamiento caótico (zonas gris oscuro) y movimiento caótico (zonas gris claro). Figura extraída de [23].

Con el fin de caracterizar de manera general el comportamiento de un AG, Wong *et al.* [24] llevaron a cabo simulaciones numéricas para estudiar la dinámica de un AG con cavidades de formas diversas (ver figura 4), demostrando que efectivamente la respuesta puede variar al cambiar la forma del recinto. Sin embargo, formas de recintos geoméricamente simples, como cuboides o cilindros, así como su orientación parecen ser de menor importancia.

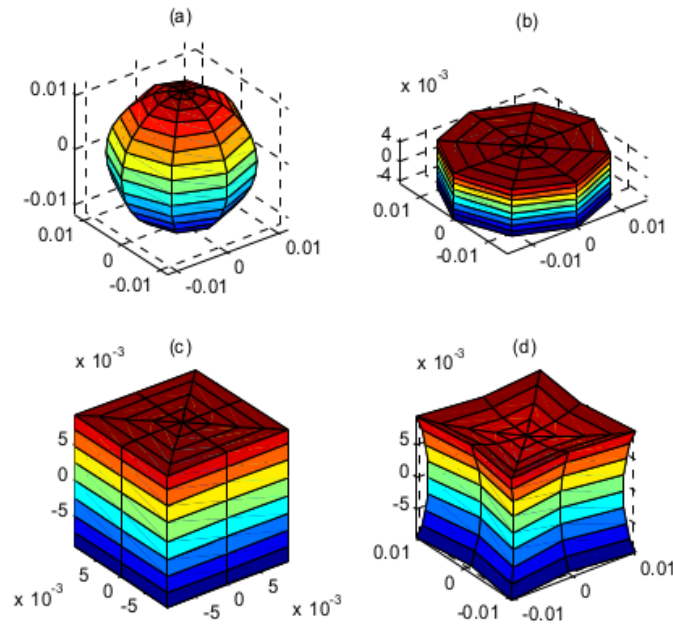


Figura 4: Diferentes geometrías utilizadas como recintos de un amortiguador granular. Figura extraída de [24].

Otra de las características que afecta el rendimiento de los AG es el estado del medio granular que se encuentra dentro del recinto, como es señalado en diferentes investigaciones [25, 26, 27], sobre las propiedades disipativas de los materiales granulares sometidos a vibraciones. En particular, [26] y [27], caracterizan dichos estados en el material granular dentro de un AG excitado de manera vertical. Confeccionan un diagrama de fase entre la intensidad de excitación y la frecuencia (ver figura 5), donde se observan siete estados diferentes que presentan comportamientos muy disímiles entre sí. El estado *solid-like*, que se da cuando la aceleración de excitación es menor que 1.2 g, se caracteriza por el casi nulo movimiento relativo entre las partículas y las partículas con las paredes. Todo el sistema granular parece una masa estática añadida (cuadrados negros en la figura 5). Cuando la aceleración de excitación supera 1,2 g, se produce una transición de fase de los materiales granulares de estado *solid-like* a uno de fluidización local. Las partículas que están más cerca de la superficie superior

del lecho granular se fluidizan (empiezan a moverse como si fuesen un líquido), mientras que las partículas en la capa granular inferior todavía están relativamente inmóviles. A este estado se lo llama fluidización local y está representado por rombos rojos en la figura 5. Si la intensidad de excitación aumenta, se fluidiza todo el sistema granular y los movimientos relativos entre partículas ocurren en todas las capas, alcanzando así un estado de fluidización global (triángulos verdes en la figura 5).

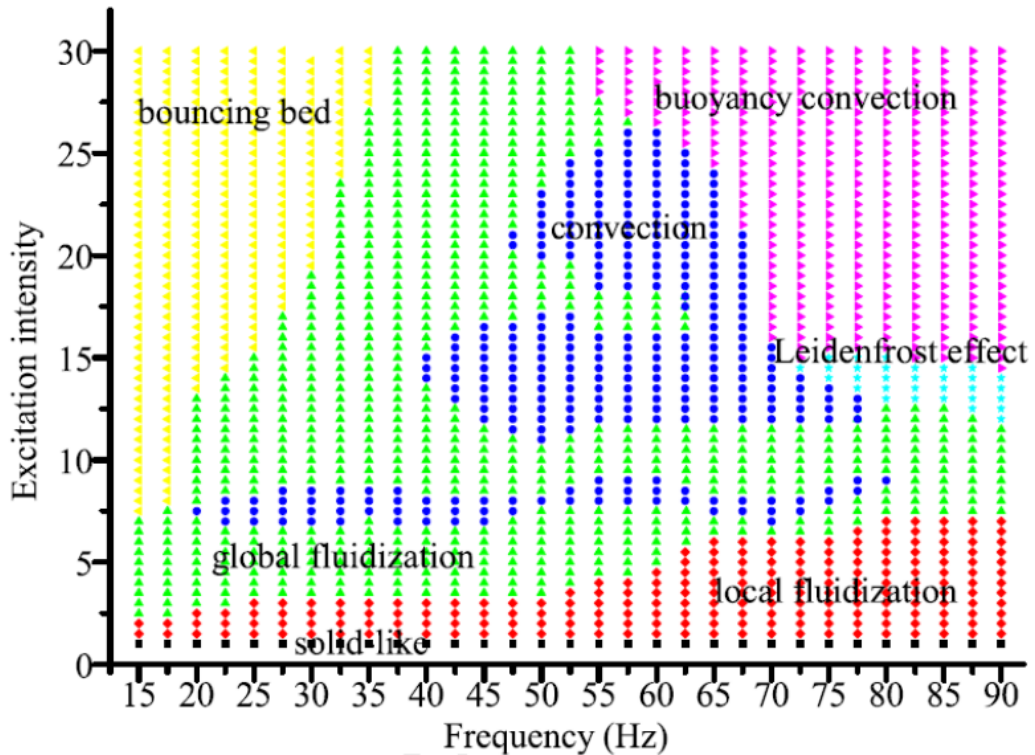


Figura 5: Diferentes estados del medio granular que se encuentran dentro del recinto de un AG, dependiendo la amplitud de excitación y la frecuencia. Imagen extraída de [26].

Para amplitudes y frecuencias intermedias, aparece el estado de convección, donde no sólo hay un movimiento relativo entre las partículas, sino que también hay un intercambio de la posición de las partículas entre las capas granulares (círculos azules en la figura 5). Las partículas se desplazan desde las capas inferiores a las superiores y viceversa. Cuando la intensidad de vibración es alta y la frecuencia es baja las partículas se mueven en conjunto, rebotando de manera sincrónica con el techo y el piso del recinto. A este estado se lo llama *bouncing bed*, cuya traducción es *cama rebotante* (triángulos amarillos en figura 5). En el caso de intensidad de vibración intermedia y frecuencias altas, se produce el efecto *Leidenfrost*, en el cual hay partículas en algunas capas que oscilan mientras que otras se mantienen flotando cerca de su posición original (estrellas celestes en figura 5). Por último, el estado *buoyancy*

convection, traducible al español como convección de flotabilidad (triángulos magenta en la figura 5), puede verse como un estado superposicional de efecto Leidenfrost y convección, es decir, la convección ocurre en capas granulares suspendidas que se encuentran en el estado de efecto *Leidenfrost*. De todos los estados mencionados, hay uno para el cual se obtiene una mayor disipación de energía y es en el cual la totalidad de las partículas rebotan como un todo (estado *bouncing bed*).

Otros autores confeccionan diagramas similares, con diferencias relacionadas únicamente con la forma de excitación del AG bajo estudio. Meyer *et al.* [28], por ejemplo, excitan su AG de manera periódica pero en dirección horizontal, por lo que no encuentran los estados de convección, convección de flotabilidad o *Leidenfrost* obtenidos por Zhang *et al.* [26]. En un trabajo experimental, llevado adelante por Sack *et al.* [29], donde se excita un AG en dirección horizontal en condiciones de microgravedad, aparece caracterizado, al igual que en los trabajos de Meyer y Zhang [28, 26], el movimiento de las partículas como un todo, en el régimen que denominan *collect-and-collide* o *bouncing bed*. Este régimen se caracteriza por la sincronización entre el movimiento del centro de masa de los granos y del contenedor. Se puede describir observando la figura 6, que muestra instantáneas del AG en distintas fases del movimiento.

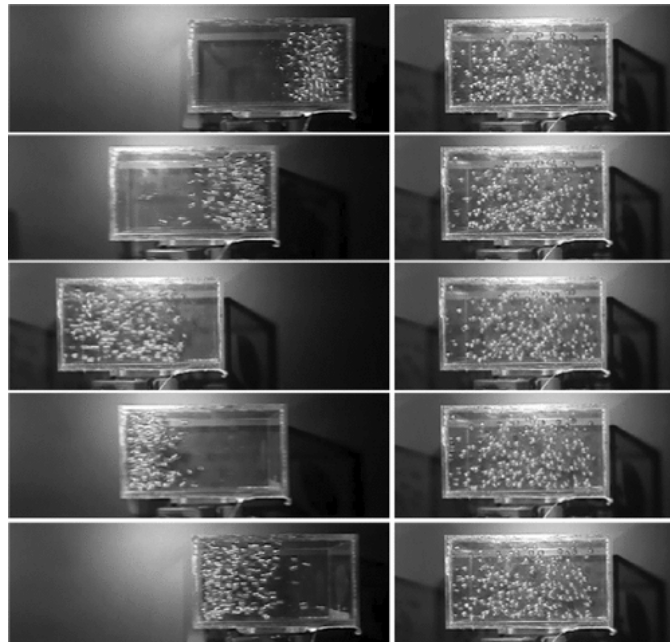


Figura 6: Instantáneas del movimiento de un AG en condiciones de microgravedad en diferentes fases del movimiento, que ilustran los dos regímenes del movimiento granular. A la izquierda, el modo *collect-and-collide*. A la derecha, el comportamiento de los granos como un gas. Figura extraída de [29].

Cuando la amplitud del forzado es suficientemente grande, la pared lateral del contenedor empuja las partículas, colectándolas y acumulándolas en una capa relativamente densa que se mueve junto con el contenedor (primera instantánea a la izquierda en figura 6). Dado que el movimiento de la pared es armónico, después de alcanzar la fase de máxima velocidad, la rapidez comienza a decrecer de modo que los granos, moviéndose colectivamente, dejan atrás el contenedor (segunda y tercera instantáneas a la izquierda en figura 6). Cuando impactan contra la pared opuesta, una buena parte de la energía cinética se disipa debido a las múltiples colisiones inelásticas (cuarta y quinta instantáneas a la izquierda en figura 6). La cantidad de energía disipada depende de la velocidad relativa entre las partículas y la pared en el momento del impacto, y esto está determinado por la amplitud y la frecuencia de la vibración del recinto. Este régimen ha sido estudiado de manera experimental y teórica [30] e identificado como el de mayor eficiencia disipativa, incluso cuando se encuentra bajo la acción de la gravedad.

La no linealidad de la respuesta de los AG es un problema que despierta gran interés, por lo cual ha habido varios intentos para describirlo y solucionarlo. Por ejemplo, la incorporación de obstáculos en el interior de los amortiguadores granulares surge como estrategia interesante para mejorar la respuesta y la capacidad de amortiguación. En trabajos preliminares [31] realizados por el Grupo de Física de Sistemas Granulares (GFSG) de la FCEyN de la UNLPam se realizaron simulaciones basadas en el método de elementos discretos (DEM) de diferentes AG, que se muestran de manera esquemática en la figura 7, a la izquierda.

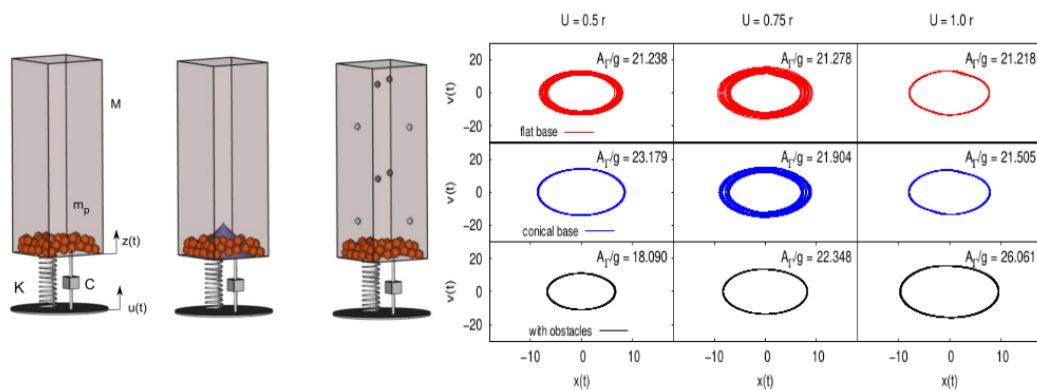


Figura 7: Izquierda: esquema de los recintos utilizados para la simulación. El primero es un recinto prismático tradicional, el segundo uno con base cónica, el tercero con obstáculos fijos en el interior. Derecha: diagrama de fase (velocidad vs posición) para la caja contenedora. Se observa que cuando el AG tradicional (curvas de color rojo) presenta comportamiento no periódico, tanto la base cónica (curvas de color azul) como los obstáculos fijos (curvas de color negro) pueden evitarlo. Figura extraída de [31].

Se estudiaron dos modelos de AG, uno con una base cónica y otro con obstáculos fijos en el interior y se estudió la respuesta de éstos en comparación con el AG tradicional de base plana (prismático). El objetivo de estas modificaciones en el recinto es el de lograr una transferencia de momento lineal de las partículas hacia la caja contenedora de manera progresiva, de modo de evitar golpes aislados. Para cada caso, se confeccionó el diagrama de fase (esto es, la velocidad de la caja versus su posición). Los resultados obtenidos (figura 7, derecha) muestran que la inserción de obstáculos en el interior del recinto pueden alterar significativamente la dinámica y prevenir el desarrollo de respuestas caóticas al compararlos con otros tipo de amortiguadores (prismático y prismático con base cónica). Se observa que cuando el AG tradicional presenta comportamiento no periódico, tanto la base cónica como los obstáculos fijos pueden evitarlo.

Estudios más recientes utilizan AG con mallas, diferentes estructuras y polímeros deformables en su interior (ver figura 8) con el objetivo de aumentar la robustez en la disipación. Meyer *et al.* [28] realizaron mediciones experimentales para el análisis de la disipación de un AG forzado horizontalmente, abarcando un rango de frecuencias de 40 Hz a 1000 Hz y aceleraciones de 0 g a 40 g. Además utilizan el método de elementos discretos para obtener una visión más profunda de los efectos dinámicos de los nuevos diseños de amortiguadores. En su trabajo colocan estructuras internas con forma de viga, que modifican la disipación respecto del AG tradicional (que usan a modo de control). Por ejemplo, a altas frecuencias de excitación, obtienen disipación mayor con estructuras internas. Estos efectos pueden incluso incrementarse variando la cantidad de estructuras internas o modificando el radio de las partículas.

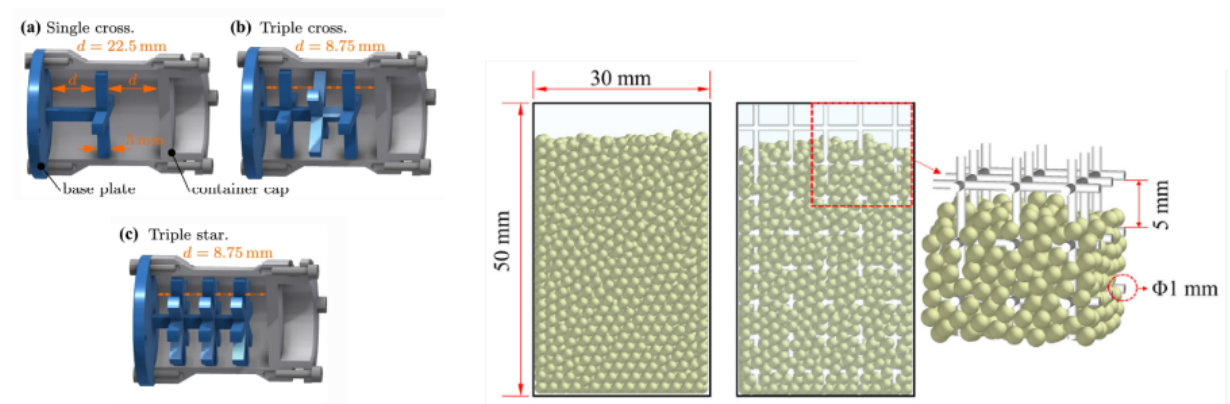


Figura 8: Izquierda: diferentes recintos con estructuras en su interior [28]. Derecha: recinto con malla interior [32].

Zhang *et al.* [32] realizaron un estudio mediante experimentos y simulaciones para evaluar como se ve afectada la amortiguación al colocar una malla en el interior del AG. Como se observa en la figura 9, la disipación para el caso en que se utiliza una malla (línea sólida roja) es mayor para amplitudes de aceleración superiores a 4 g, incluso decae más lentamente que para el caso en el que no hay obstáculos en su interior (línea sólida azul). En línea punteada se muestran los datos de las simulaciones para el caso con malla (rojo) y sin obstáculos (azul).

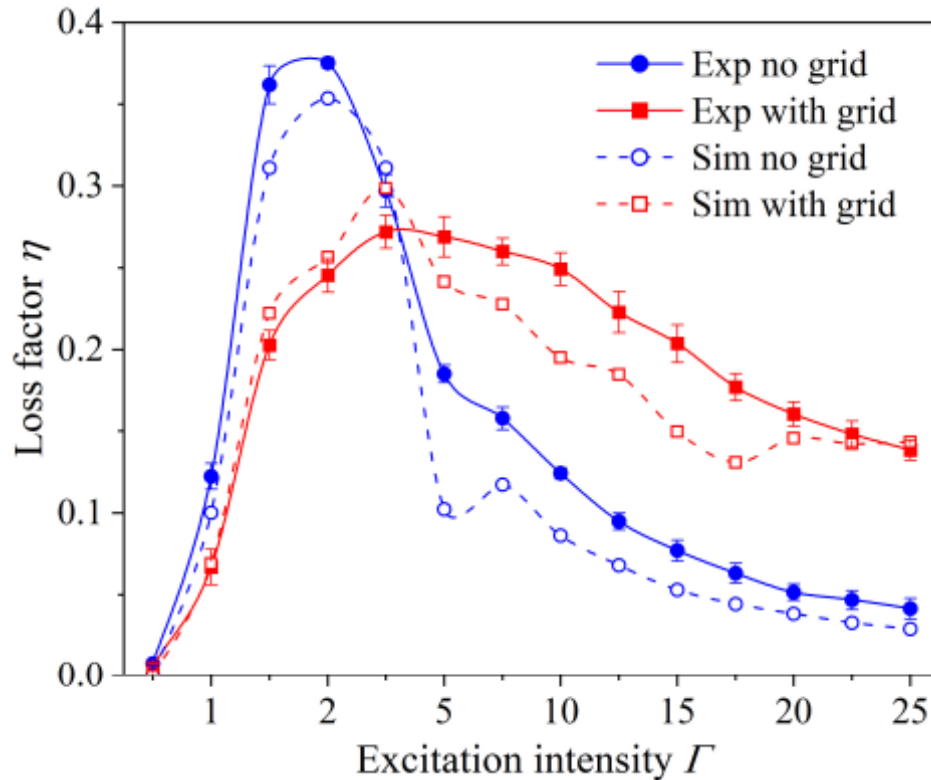


Figura 9: Factor de pérdida de energía (disipación) en función de la intensidad de excitación (a 120 Hz) para un AG con y sin malla interna, comparando los resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación. Se observa que la malla interna modifica la capacidad de amortiguamiento del AG. Figura extraída de [32].

1.4. Objetivos de este trabajo

El presente trabajo se enfoca en estudiar, de manera experimental, la dinámica de un AG con un único obstáculo inserto en su interior. Nos interesa conocer cómo influye en la amortiguación, insertar un obstáculo cilíndrico en el interior del AG y variar su diámetro, en comparación con un AG convencional. Dentro del recinto de contención de un AG estándar, las partículas granulares impactan una y otra vez por ciclo de oscilación contra el techo y piso

del recinto, intercambiando cantidad de movimiento entre ellas y con el contenedor, lo que hace que estos impactos se produzcan en intervalos de tiempos muy cortos con relación a un ciclo de oscilación. Esto hace que la respuesta de nuestro sistema no sea armónica y se vea afectada cuando las colisiones son bruscas, produciendo ruido y alejándola de la periodicidad.

Nuestro objetivo específico es verificar si con la introducción del obstáculo, la transferencia de cantidad de movimiento es más progresiva. Se busca evitar colisiones frontales entre las partículas y las paredes del recinto, disminuyendo así significativamente el ruido en nuestras oscilaciones armónicas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se detalla el dispositivo experimental utilizado, los diferentes amortiguadores granulares y características de las partículas. Se describen el protocolo de medición, la forma de adquisición de los datos y el análisis de las señales, caracterizando la respuesta mecánica a partir de la masa efectiva del AG y el factor de pérdida de energía.

2.1. Equipo experimental

El equipo utilizado para las medidas se muestra en la figura 10. Este dispositivo está conformado por un amortiguador granular (AG), montado sobre un *shaker* (mecanismo que produce la vibración sobre el AG). Entre el *shaker* y el AG se coloca un sensor de fuerza y se acopla un sensor de aceleración en la parte superior del AG.

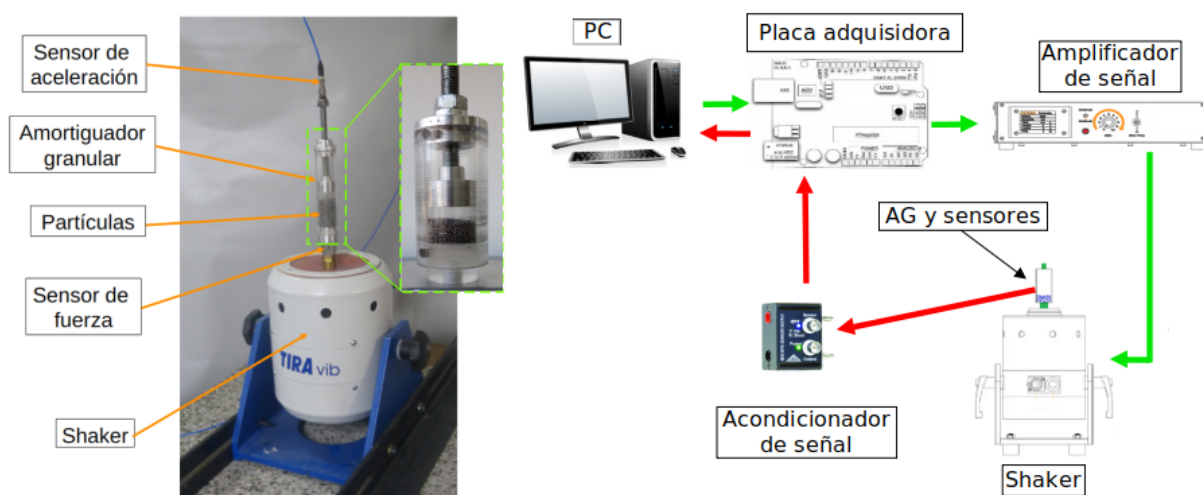


Figura 10: Lado izquierdo: Fotografía del dispositivo experimental. El sensor de fuerza se acopla en la parte superior del shaker, sobre el cual se atornilla el AG y por encima de este se pega el sensor de aceleración. Cabe mencionar que el AG transparente que se muestra en la figura es para ver el interior del mismo; en nuestros experimentos utilizamos un AG opaco construido con Polipropileno. Lado derecho: Esquema del set experimental.

Como se puede observar en el lado izquierdo de la figura 10, el equipo experimental está montado sobre una plataforma antivibratoria para evitar que intervengan en las mediciones vibraciones externas al sistema en estudio. El shaker utilizado es el modelo TIRA vib 51110-M, que emplea un mecanismo de excitación electromecánica para controlar las vibraciones. Éste está conectado al amplificador de señal BAA 120, que a su vez se conecta a una salida analógica de la placa adquisidora (USB-1608GK-2AO de Measurement computing), la cual

envía una señal senoidal de amplitud y frecuencia deseada. Un sensor de fuerza (PCB modelo 208C02) se acopla en el vástago móvil del shaker. Sobre el sensor de fuerza se atornilla el amortiguador granular (AG). Un sensor de aceleración (PCB modelo 352C68) se coloca sobre el AG. Ambos sensores están conectados a entradas analógicas de la placa adquisidora mediante acondicionadores de señal (Metra Mess modelo M29).

El sensor de fuerza es un tipo de sensor de carga que se utiliza para medir la fuerza aplicada a través de una superficie, utilizando tecnología piezoeléctrica. Esto significa que convierte la fuerza en una señal eléctrica. Es un sensor de carga de bajo perfil, diseñado para medir fuerzas en una dirección específica. El sensor de aceleración es un tipo de sensor de aceleración uniaxial de alta precisión. En este trabajo medimos la aceleración en la dirección vertical.

Para llevar a cabo los experimentos, los AG se rellenaron parcialmente con esferas de acero de 1.0 mm de diámetro (de densidad 7850 kg/m^3). La masa granular empleada se mantuvo constante en 16.7 g. Se muestra en la figura 11 una imagen donde se aprecia el material granular utilizado.



Figura 11: Material granular utilizado en los experimentos: esferas de acero de 1.0 mm de diámetro.

2.2. Amortiguadores granulares

Para realizar el estudio se utilizaron dos AG diferentes: uno estándar y otro con un obstáculo cilíndrico en su interior. En todos los casos, se fabrican con un tubo de Polipropileno, una base de acrílico, y una tapa que actúa como techo, construida en aluminio. Esta tapa consta de un mecanismo de rosca que permite variar la altura del techo, de modo que el volumen interno del AG puede modificarse fácilmente. Cabe destacar que todos los AG se han construido de manera artesanal. A continuación se detallan cada uno de ellos.

2.2.1. Amortiguador granular estándar

En la figura 12 se puede observar el esquema de un amortiguador granular convencional, que consta de un recinto cilíndrico de Polipropileno con un diámetro interior de 22.0 mm y una altura de 70.0 mm, una base plana de acrílico y un techo plano (de aluminio) que puede moverse en dirección vertical, de manera que se pueda regular el espacio entre la cama granular y el techo (lo que se conoce como *gap*).

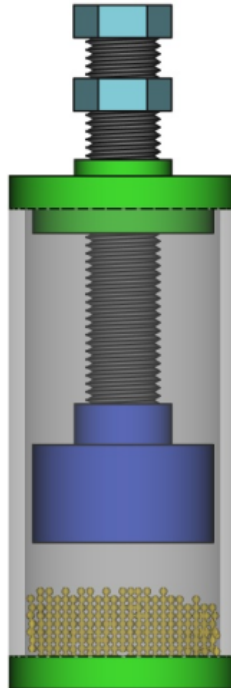


Figura 12: Esquema del amortiguador granular convencional. Consta de un recinto cilíndrico con tapas planas y altura del techo regulable.

2.2.2. Amortiguador granular con obstáculo

En la figura 13 se muestran los esquemas de los amortiguadores granulares con obstáculos. A diferencia del anterior, éstos tienen colocado en su interior un cilindro horizontal de metal, colocado de manera diametral y se fija mediante un pegamento, que funciona como obstáculo cuando las partículas se mueven en su interior. En la figura 13 se esquetizan los distintos obstáculos utilizados, a los cuales se les modificó el diámetro, siendo el más chico de 1.3 mm y el más grande de 9.0 mm. El resto de las partes que componen al AG con obstáculos son las mismas que se detallaron para el AG convencional.

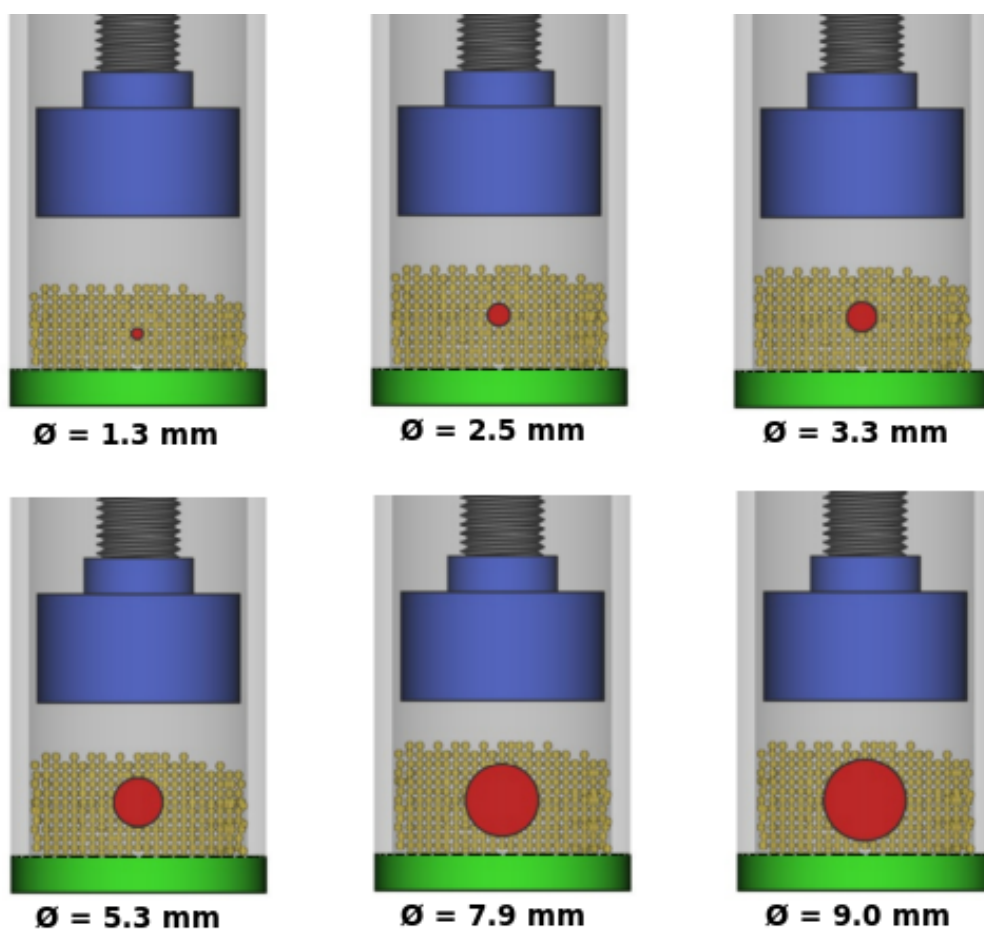


Figura 13: Esquemas del amortiguador granular con obstáculo para los distintos diámetros de obstáculos.

2.3. Metodología de las mediciones

El procedimiento para llevar a cabo las mediciones se divide en dos etapas: el armado del dispositivo, con la correcta disposición de las tapas y los obstáculos (si corresponde) y la posterior adquisición de datos.

2.3.1. Armado y llenado del amortiguador granular

Antes de iniciar las mediciones, es necesario preparar el amortiguador granular, ya sea con o sin obstáculos. En primer lugar, una vez determinada la masa de los granos que se utilizará en los experimentos, se deben insertar las partículas dentro del recinto. Para todos los experimentos que se realizaron durante este trabajo, se utilizaron 16.7 g de partículas de acero (ver sección 2.1). A continuación, se coloca el mecanismo que conforma el techo del amortiguador y permite variar el tamaño del *gap*, como se observa de manera esquemática en la figura 14. Éste se ajusta mediante dos tornillos de manera que se fija al AG el soporte

de fijación. Por medio de la varilla roscada se baja el techo hasta que apriete las partículas. En este punto se agita el AG para que las partículas se reacomoden y se vuelve a reajustar el techo de manera que las esferas de acero queden bien apretadas. A partir de este nivel, se eleva el techo hasta obtener el espacio deseado. Para nuestros experimentos, el gap utilizado es de 3.0 mm. Todas estas partes se fijan con la tuerca 1 de la figura 14. Finalmente, se acopla el AG y el sensor de fuerza a la base del shaker utilizando los tornillos de berilio provistos por el fabricante, con los cuales fue calibrado de fábrica. Éste se ajusta aplicando el torque recomendado por el fabricante mediante el uso de un torquímetro (1.3 Nm). Por encima del AG se sujeta con pegamento el sensor de aceleración (sobre la tuerca 2 en la figura 14).

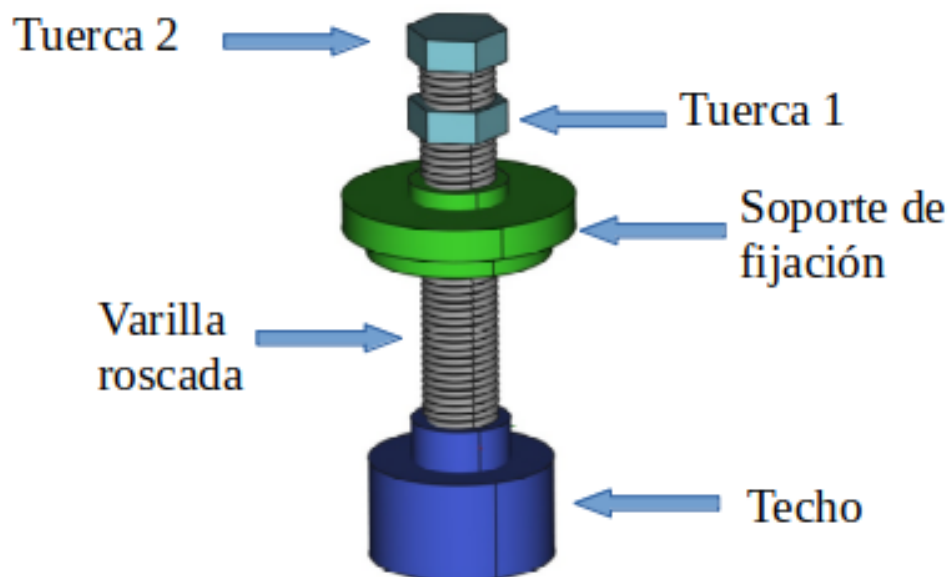


Figura 14: Esquema del techo del AG, con detalle de las partes que lo componen. La varilla roscada permite la regulación de la altura del recinto interior del AG.

2.3.2. Protocolo de medición

A continuación, se describe el protocolo utilizado para llevar a cabo los experimentos. Los parámetros de control que se utilizaron son la frecuencia y la amplitud del forzado que el shaker le imprime a los distintos amortiguadores.

1. Armado y llenado del amortiguador granular.
2. Excitación del AG: Se selecciona la frecuencia y amplitud del forzado sobre el AG. Para ésto, fijamos la frecuencia y variamos la amplitud en un mismo set de mediciones,

utilizando un script *ad hoc*. Este script, escrito en Python, controla la salida analógica de la placa adquisidora y envía una señal senoidal al amplificador de señal de amplitud y frecuencia deseada. Finalmente, esta señal amplificada se aplica al shaker.

3. Adquisición de datos: La placa adquisidora registra los valores en modo de barrido alternando entre el sensor de aceleración y fuerza durante un período de tiempo total de 30 s. Para asegurarse de que los datos adquiridos se encuentran en el régimen estacionario se descartan los primeros 5 s. Finalmente, entre cada valor de amplitud definido en el punto anterior, el shaker se detiene durante 5 s.

En particular, para nuestras mediciones, se utilizaron 24 valores de amplitudes de forzado, que dan amplitudes de aceleración que abarcan un rango entre 0 g y 25 g. El tiempo durante el cual se registran los datos se eligió de manera de tener al menos 500.000 valores para cada uno de los sensores, obteniendo así un muestro de al menos 500 puntos por cada ciclo de oscilación.

2.4. Adquisición y análisis de datos

Para la adquisición de datos se utilizan dos sensores, uno de fuerza y uno de aceleración, acoplados al AG, que se conectan mediante acondicionadores de señales a las entradas analógicas de la placa adquisidora de *Measurement Computing (MC)*. Una vez configurados los parámetros de control, mencionados en la sección 2.3.2, se procede con la adquisición de datos. Ésta se realiza en modo de barrido alternando entre los canales de entrada analógica (multiplexado) correspondientes a los sensores de fuerza y aceleración. Esto da lugar a un desfase temporal de las señales de 1/20.000 segundos, que se corrige en el tratamiento posterior.

Por cada amplitud de forzado, se registran un total de 500.000 datos por sensor. Éste valor, dividido el tiempo por el cual se adquieren los datos y la frecuencia de agitación, nos da el muestreo para cada ciclo de oscilación. Por ejemplo, a 40 Hz, se obtiene un muestreo de 500 puntos por ciclo de oscilación para cada uno de los sensores.

La resolución con la que se adquieren los valores es de 16 bits en el rango de -10 V a 10 V, lo que da una resolución de $3,05 \times 10^{-4}$ V. Los datos obtenidos por cada uno de los sensores se convierten de voltaje al sistema internacional utilizando las conversiones provista por el fabricante. A saber, 10,2 mV/(m/s²) para el sensor de aceleración y 11,241 mV/kN para el sensor de fuerza.

Finalmente, por cada una de las frecuencias estudiadas (30, 40, 50, 100 y 110 Hz) se crea un archivo de texto para cada amplitud seteada. En estos archivos se escriben los datos adquiridos, incluyendo el tiempo transcurrido y los valores de fuerza y aceleración. Una vez finalizada la etapa de adquisición, se procede al análisis de los datos obtenidos.

2.5. Caracterización de la respuesta del amortiguador

En un amortiguador granular, el factor de pérdida de energía y la masa efectiva son dos cantidades importantes que se utilizan para describir la respuesta mecánica del mismo. Para nuestro análisis, utilizamos las definiciones propuestas por Salueña *et al.* [25] y Masmoudi *et al.* [18], quienes definen el factor de pérdida η en un AG como la razón entre la energía disipada por ciclo E_d y la energía cinética máxima E_k lograda durante un ciclo,

$$\eta = \eta(\omega) = \frac{E_d(\omega)}{2\pi E_k(\omega)} = \tan \phi(\omega), \quad (1)$$

donde $\phi(\omega) = \phi = \phi^z - \phi^F$ es la diferencia de fase entre las señales de posición $z(t)$ y fuerza $F(t)$ a la frecuencia ω . En la práctica se mide la aceleración y no la posición del AG, por lo que $\phi(\omega)$ se calcula como $\phi^a - \phi^F + \pi$. Las magnitudes F y γ y las fases ϕ^F y ϕ^γ corresponden a la componente fundamental de la serie de Fourier en ω , estimadas como

$$F e^{j\phi^F} = \frac{1}{nT_0} \int_0^{nT_0} F(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2)$$

$$\gamma e^{j\phi^\gamma} = \frac{1}{nT_0} \int_0^{nT_0} \gamma(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (3)$$

En la figura 15, se grafica una señal de aceleración $\gamma(t)$ en función del tiempo, a modo de ejemplo, obtenida durante una medición. En azul claro se muestra la señal adquirida, mientras que en rojo la primera componente de Fourier. Las líneas punteadas están a $\pm\gamma/g$, la amplitud de Fourier de la señal. Los datos se muestran normalizados por la aceleración de la gravedad g y el período del movimiento T_0 . Las fluctuaciones que se observan en cada período de la señal son debido a las colisiones de las partículas contra el piso y el techo del recinto del AG.

Para cada señal de aceleración y fuerza, las magnitudes F y γ y las fases ϕ^F y ϕ^γ se calculan utilizando integración por rectángulos de las ecuaciones 2 y 3, sobre las señales adquiridas a la frecuencia ω , empleada como excitación.

La masa efectiva de un sistema granular es una medida de la masa aparente del material bajo condiciones de vibración. Cuando un medio granular está sujeto a vibraciones, las partí-

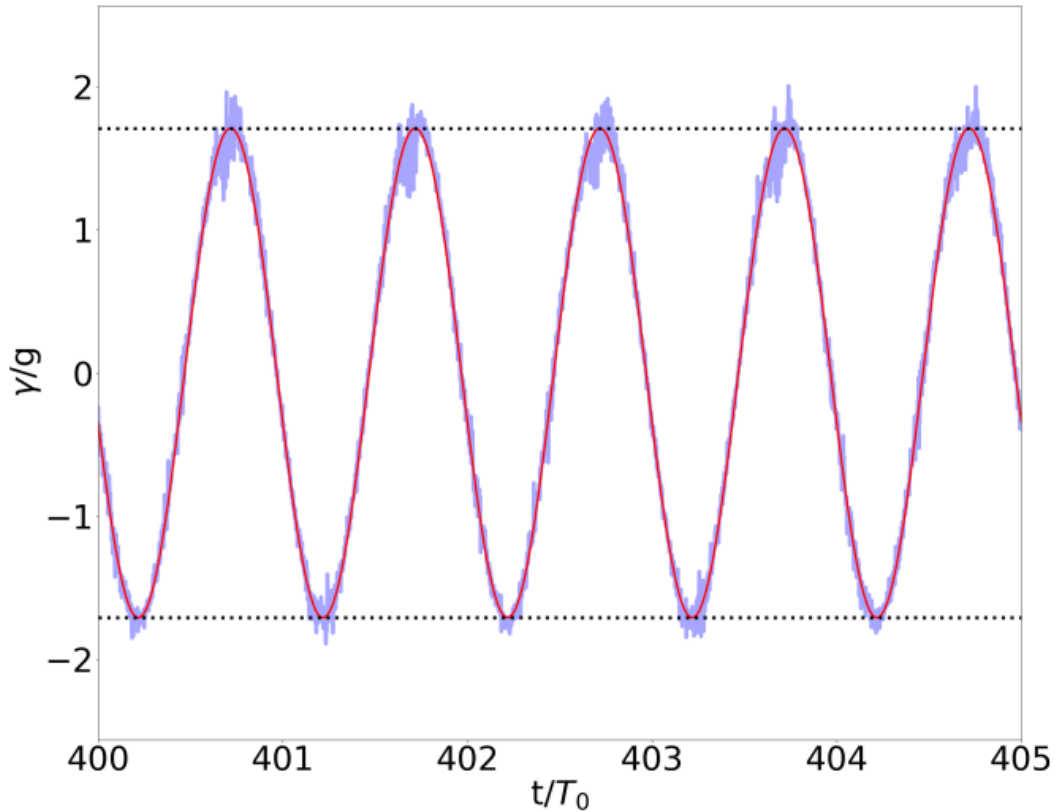


Figura 15: Ejemplo de señal de aceleración en función del tiempo obtenida durante una medición. En azul claro se muestra la señal adquirida, mientras que en rojo la primera componente de Fourier. Las líneas punteadas están a $\pm\gamma/g$, la amplitud de Fourier. Los datos se muestran normalizados por la aceleración de la gravedad g y el período del movimiento T_0 .

culas interactúan entre sí y transmiten fuerzas entre ellas. Si la aceleración es suficientemente grande, los granos pueden despegarse del suelo e incluso tocar el techo del recinto que los contiene. Estas interacciones conducen a una redistribución de las fuerzas internas y a una modificación de las características efectivas del material: la masa del contenedor, medida en condiciones dinámicas, no será necesariamente la misma que su masa en reposo. Con el fin de obtener información sobre la transferencia de momento entre el medio granular y el recinto, a partir de la masa efectiva M_1 del AG, se utiliza la siguiente definición:

$$M_1 = M(\omega) = \frac{F}{\gamma} = M + m_1 \quad (4)$$

donde m_1 representa la masa dinámica del material granular percibida por el contenedor a la frecuencia de forzado y M es la masa del recipiente. En la figura 16 se muestra un ejemplo de la masa efectiva obtenida para una frecuencia de 40 Hz en función de la amplitud de aceleración (en unidades de g). La línea de color rojo es el valor de la masa total del sistema

cuando está en reposo (recipiente más las partículas) y la línea en color violeta es la masa sólo del contenedor.

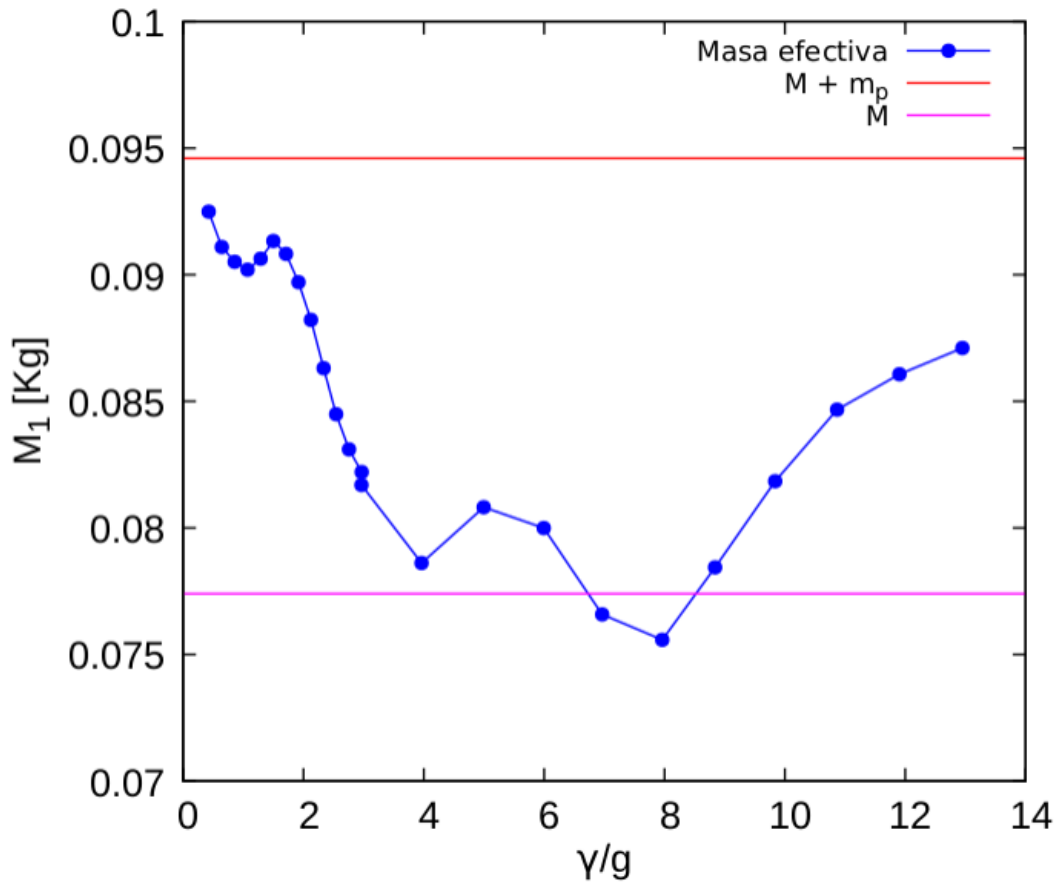


Figura 16: Ejemplo de masa efectiva en función de la amplitud de aceleración en unidades de g. La línea azul es la masa total del sistema, contenedor más partículas, cuando está en reposo (94.6 g). La línea roja es la masa sólo del contenedor (77.4 g).

En la gráfica 16 se ve cómo a medida que la amplitud de aceleración aumenta, la masa efectiva disminuye, debido al movimiento interno de las partículas respecto del contenedor. Alrededor de $\gamma = 8$ g, donde las partículas viajan juntas golpeando como un todo (régimen *collect-and-collide*), se observa el valor más bajo. Si aumenta aún más la amplitud de aceleración, la masa efectiva vuelve a aumentar: las partículas abandonan el régimen *collect-and-collide*, para entrar en un movimiento desacoplado.

Para evaluar la deformación de la señal de forzado, producto de los golpes de las partículas, una opción es calcular la Distorsión Armónica Total (THD, por sus siglas en inglés) [33] de la señal adquirida. La THD indica el grado en que una señal sinusoidal pura se altera al agregar armónicos. Se calcula como la razón entre la raíz cuadrada de la suma de la amplitud al cuadrado de todos los armónicos de la serie de Fourier y el valor del fundamental. En

la práctica, sólo los primeros cinco o seis armónicos son significativos en la medición de la THD, ya que los términos de orden superior suelen tener una amplitud muy reducida.

$$\text{THD} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_1}, \quad (5)$$

donde V_i es la amplitud del armónico i .

Una variante de la definición de THD es la THD+N (distorsión armónica total + ruido), que considera el ruido presente en la señal que se manifiesta en las frecuencias no múltiplos del fundamental presentes en la transformada de Fourier. La THD+N proporciona una evaluación más completa que la THD, ya que no sólo aborda la distorsión armónica, sino también la contribución del ruido en la señal.

$$\text{THD+N} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \text{armónicos} + \text{ruido}}}{\text{fundamental}} \quad (6)$$

Cabe aclarar que si la señal no presenta una distorsión grande, la diferencia entre ambas definiciones es despreciable.

En este trabajo de tesis empleamos el concepto de la THD+N para evaluar la deformación de la señal del forzado. Para ello, realizamos un análisis de la señal empleando la transformada rápida de Fourier (FTT, por sus siglas en inglés) sobre los datos de aceleración, con esto descomponemos la señal en sus diferentes componentes de frecuencia. Una vez obtenida la FFT, multiplicamos cada componente de frecuencia por su conjugado. Esto nos da el valor absoluto al cuadrado de cada componente. Posteriormente, calculamos la suma de las áreas bajo la curva formada por los valores al cuadrado de las distintas componentes de frecuencia exceptuando el pico fundamental. Finalmente, a esta suma se la divide por todo el área del pico fundamental.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para llevar a cabo este trabajo de tesina se fabricaron dos amortiguadores granulares idénticos, de forma artesanal. A uno de ellos se le colocó obstáculos de diámetro creciente, que fueron hechos con varillas metálicas de origen variado. Se realizaron medidas para cinco frecuencias diferentes (30, 40, 50, 100 y 110 Hz). Para cada una de estas frecuencias se realizó un barrido de 24 amplitudes de forzado, que resultan en una amplitud de aceleración que va desde 0 hasta 15 g para el caso del AG sin obstáculos y hasta 25 g para los AG con obstáculos. El *gap* utilizado (el espacio entre las partículas y el techo) fue de 3.0 mm en todos los experimentos. En el caso de los AG con obstáculos, éstos fueron colocados de modo tal que las partículas los cubran completamente, dejando a su vez espacio para que pueda circular al menos una partícula entre el piso y la parte inferior del obstáculo (ver figura 13).

3.1. Amortiguador granular sin obstáculo

Dado el carácter artesanal de la construcción de los dispositivos creados para el presente trabajo, se ha verificado en la primera etapa de las mediciones que dos AG fabricados con las mismas especificaciones presenten la misma respuesta mecánica, esto es, que los resultados sean reproducibles. Además, se verificó que haya repetibilidad con un mismo artefacto. Para esto, se midió el factor de pérdida de energía en función de la amplitud de la aceleración para dos AG distintos, construidos con las mismas especificaciones, y para un sólo AG en días diferentes. Estos resultados se muestran en la gráfica 17, para una frecuencia de 40 Hz. En ésta, se contrastan los resultados obtenidos entre un mismo AG en distintos días (círculos rojos y azules) con los de un nuevo AG (círculos verdes). Los datos obtenidos mediante el mismo AG no muestran diferencias significativas en el factor de amortiguación, lo que indica una buena repetibilidad del experimento. Al fabricar un nuevo AG y repetir las mediciones, se aprecian ligeras variaciones respecto al dispositivo anterior, posiblemente debido a la naturaleza artesanal en el proceso de fabricación. Sin embargo, el comportamiento general es el mismo.

La forma de las curvas en la figura 17 se puede explicar a partir del movimiento relativo entre las partículas y el contenedor. Se observa que amplitudes de aceleración menores a 1.2 g, donde las partículas se mueven de manera solidaria al AG, casi no experimentan colisiones entre sí o contra las paredes del recinto, ya que no se despegan del piso. En esta situación el factor de amortiguación es prácticamente nulo.

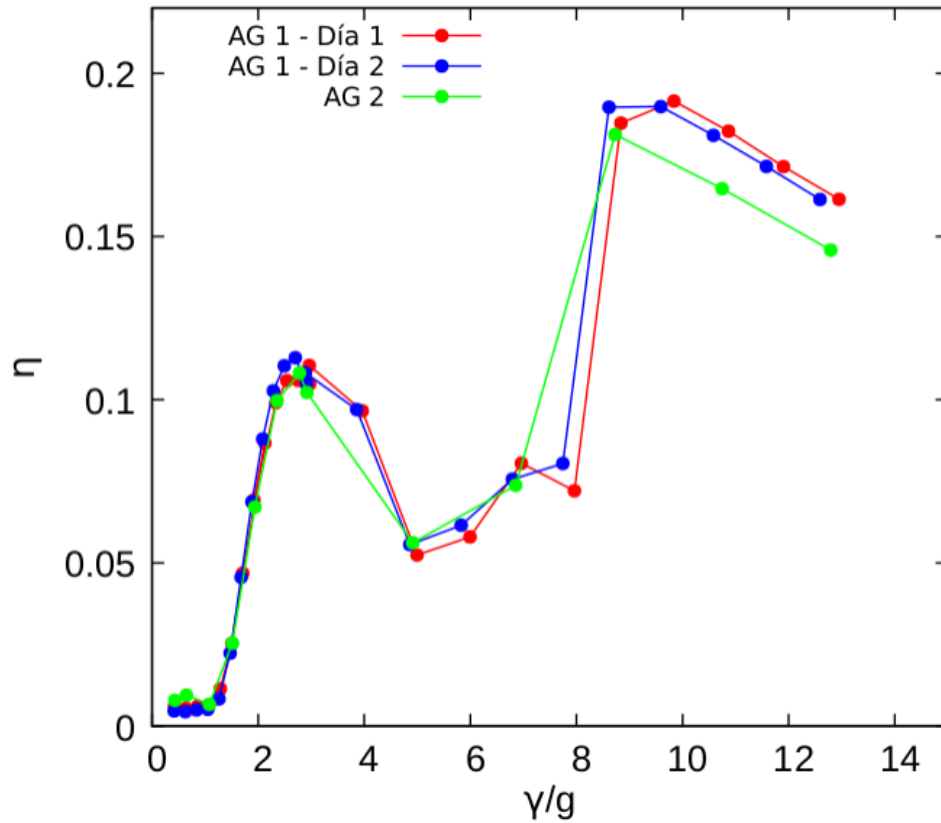


Figura 17: Factor de amortiguación en función de la amplitud de aceleración para una frecuencia de 40 Hz. Las medidas uno y dos corresponden al mismo AG. Los círculos verdes son los datos obtenidos al fabricar un nuevo AG.

A medida que la intensidad de excitación aumenta, de modo que γ está por encima de 1.2 g, las partículas comienzan a tomar vuelo: se despegan del suelo a velocidades cada vez más grandes y alcanzan alturas mayores respecto del piso. En una primera etapa, los granos ocupan sólo una parte del volumen total disponible (no alcanzan aún el techo del recinto). Cuando chocan entre sí y con las paredes, intercambian cantidad de movimiento, produciendo un aumento en el factor de amortiguación, que alcanza un máximo alrededor de 2.5 g.

Al incrementar la excitación del AG de modo que la amplitud γ sea mayor que 2,5 g, el tiempo de vuelo de las partículas aumenta. Los granos ahora ocupan un mayor volumen dentro del recinto, lo que reduce la probabilidad de colisiones entre partículas y, en consecuencia, el factor de amortiguación disminuye. Ésto se detiene al llegar a una amplitud de aceleración de unos 5 g. En este punto, algunas partículas alcanzan el techo del AG. Los granos ocupan todo el volumen disponible, por lo que al aumentar la intensidad de vibración, éste se mantiene sin cambios. El factor de amortiguación se mantiene más o menos constante mientras las partículas ocupen todo el volumen del recinto. El estado de los granos se parece al de un gas:

el movimiento es individual y parece desacoplado del movimiento del AG.

Si la intensidad de la excitación aumenta, se produce la transición al estado *collect-and-collide*, aproximadamente para una amplitud de aceleración de 9 g. En este modo de movimiento, las partículas se mueven de manera colectiva formando una especie de cama granular, compacta. El volumen que ahora ocupan los granos se reduce. Cada vez que el colchón de granos se encuentra con el techo o el piso del recinto provoca un colapso inelástico. Se disipa la energía cinética de todas las partículas, que por un breve lapso de tiempo ahora acompañarán el movimiento del contenedor, tal como fue mostrado por Sack *et al.* [29] (figura 6). El modo *collect-and-collide*, se sabe, es el que mayor disipación presenta. Ésto se ve reflejado en la figura 17, donde se observa un segundo máximo entre 8 y 10 g. El máximo ocurre cuando la cama granular choca exactamente en contrafase con el contenedor [19]. Para intensidades mayores, si bien la disipación sigue siendo alta, la falta de sincronismo provoca una disminución de η .

En la figura 18, se compara, para todas las frecuencias estudiadas, cómo varía el factor de amortiguación en función de la amplitud de aceleración.

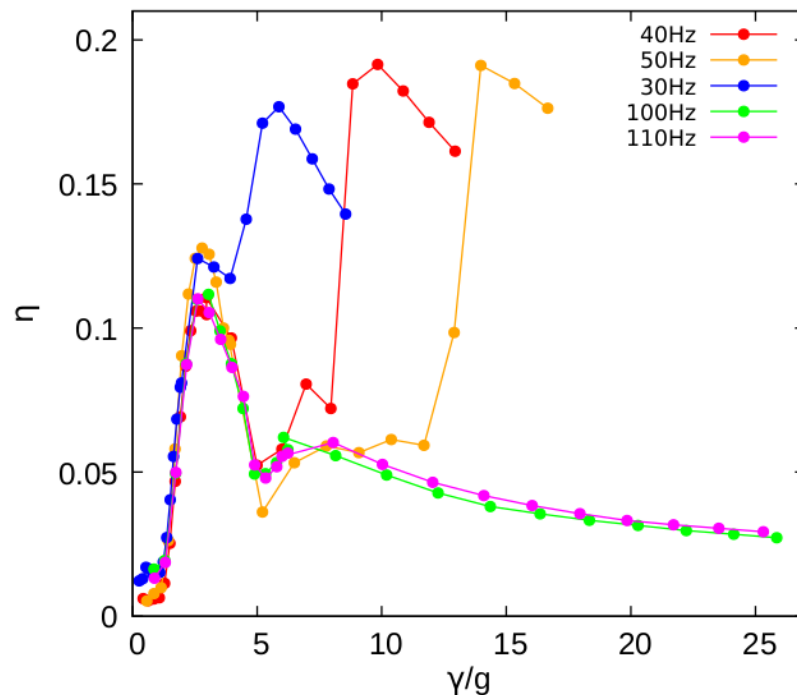


Figura 18: Factor de amortiguación en función de la amplitud de aceleración para todas las frecuencias estudiadas. Para las frecuencias más bajas se logra observar el fenómeno *collect-and-collide*.

Para los valores de frecuencias más bajas (30, 40 y 50 Hz) se observa que el segundo pico,

relacionado con el fenómeno de *collect-and-collide*, se mueve hacia la derecha a medida que aumenta la amplitud de aceleración, esto es, aparece para valores más altos de γ . Esto hace pensar que la posición de este máximo local depende de la frecuencia de excitación. Incluso, para valores de frecuencias más altos (100 y 110 Hz), dado que en nuestros experimentos sólo se alcanzan amplitudes de aceleración hasta 26 g, no es posible observar este segundo pico en el factor de amortiguación. Es decir, las partículas no logran colisionar contra el techo y el piso del AG de forma colectiva. Aunque no es exacto, una buena descripción cualitativa del comportamiento de las partículas resulta a partir del *inelastic bouncing ball model (IBBM)*. Mehta *et al.* describen el movimiento de una pelota que colisiona inelásticamente con una plataforma vibratoria [34]. Siguiendo este modelo, y de acuerdo con lo descrito por Mas-moudi *et al.* [18], encontramos que el desplazamiento vertical máximo de una partícula que toma vuelo dentro del recinto del AG es directamente proporcional a la amplitud de aceleración e inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de forzado. Para una frecuencia fija, las partículas que se despegan del suelo alcanzarán el techo del AG con una velocidad relativa al mismo que depende de la amplitud de la aceleración. A mayor velocidad relativa entre éstos, mayor es el intercambio de movimiento en la colisión. Al principio, cuando las primeras partículas empiezan a llegar al techo, no se observa un cambio grande en el factor de amortiguación. El modo *collect-and-collide*, que tiene un máximo de disipación cuando la colisión de los granos ocurre en contrafase con el movimiento del recinto, tiene lugar para amplitudes de aceleración mayores a aquella a la cual las partículas comienzan a llegar al techo. De igual modo, el mismo fenómeno tendrá lugar a amplitudes de aceleración mayores si se incrementa la frecuencia, lo que concuerda con los resultados mostrados en la figura 18.

3.2. Amortiguador granular con obstáculo

Para el estudio del amortiguador granular con obstáculos también se realizó el análisis de reproducibilidad, comparando los resultados al utilizar el mismo AG y al fabricar uno nuevo. Los resultados se pueden observar en la figura 19 para una frecuencia de 40 Hz y 100 Hz utilizando un obstáculo de 9.0 mm de diámetro. Cuando se comparan los resultados obtenidos a 40 Hz con el mismo AG (puntos rojos y azules) no se observan cambios significativos en el factor de amortiguación. Sin embargo, varía levemente para amplitudes mayores de 7 g cuando se lo compara con el nuevo AG. Esto se debe a que la fabricación se realiza de forma artesanal y la colocación del obstáculo no resulta exacta. Para frecuencias más altas, de 100 Hz, no se observan cambios en el factor de amortiguación al usar un AG u otro.

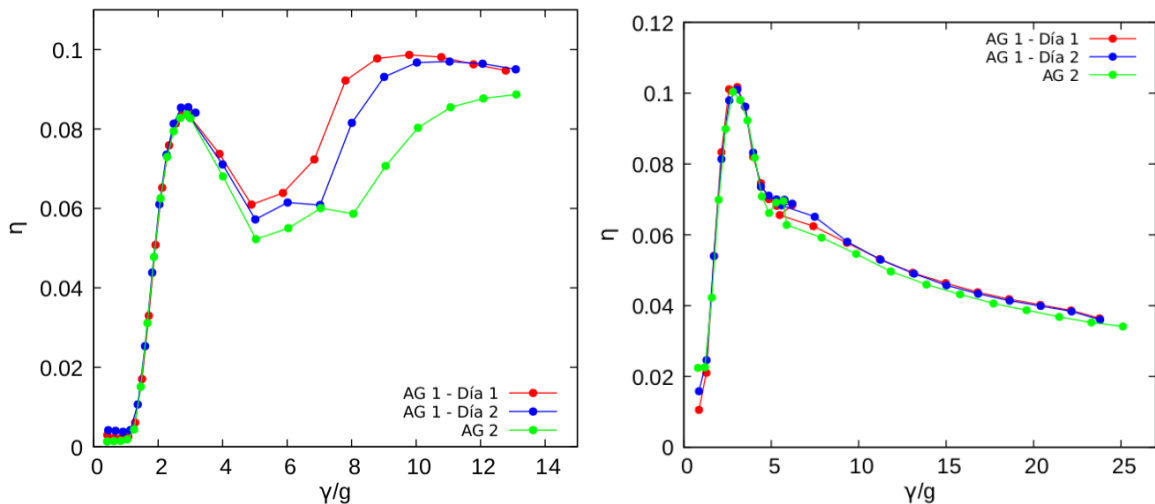


Figura 19: Izquierda: Factor de amortiguación en función de la amplitud de aceleración para una frecuencia de 40 Hz. Círculos rojos y azules corresponden a dos realizaciones del experimento utilizando el mismo AG con un obstáculo de 9.0 mm de diámetro (ver figura 13). Los puntos azules son los datos obtenidos al utilizar un nuevo AG fabricado desde cero. Derecha: Mismas mediciones a 100 Hz.

Ya verificada la reproducibilidad y repetibilidad del experimento, realizamos medidas para averiguar si el diámetro del obstáculo cilíndrico que se inserta de manera horizontal en el contenedor cambia la respuesta mecánica del AG. Se utilizaron seis diámetros diferentes: 1.3, 2.5, 3.3, 5.3, 7.9 y 9.0 mm y se testearon amplitudes de excitación que dan lugar a aceleraciones entre 0.1 y 26 g.

En la figura 20 se muestra, para una frecuencia de 40 Hz, el factor de amortiguación para distintos diámetros del obstáculo. Para esta frecuencia, los dos obstáculos más pequeños (1.3 y 2.5 mm de diámetro) no provocan un cambio considerable respecto del AG convencional. Sin embargo, aumentar el diámetro del obstáculo por encima de 3 mm hace que el factor de amortiguación muestre una variación menor para amplitudes de aceleración mayores a 7 g en comparación con el AG convencional, evitando el salto abrupto que se produce en el factor de amortiguación para el AG convencional o incluso cuando se utilizan obstáculos menores a 3 mm. Además, los obstáculos con un diámetro superior a 5 mm disminuyen la altura del primer pico, lo cual tiene como consecuencia una reducción en la variabilidad en el factor de amortiguación.

Disminuir la variación en el factor de amortiguación es deseable: significa que el AG tendrá un comportamiento similar a distintas amplitudes de aceleración, lo que puede resultar atractivo para aplicaciones industriales. Sin embargo, es importante señalar que la disipación

en estos casos es significativamente menor.

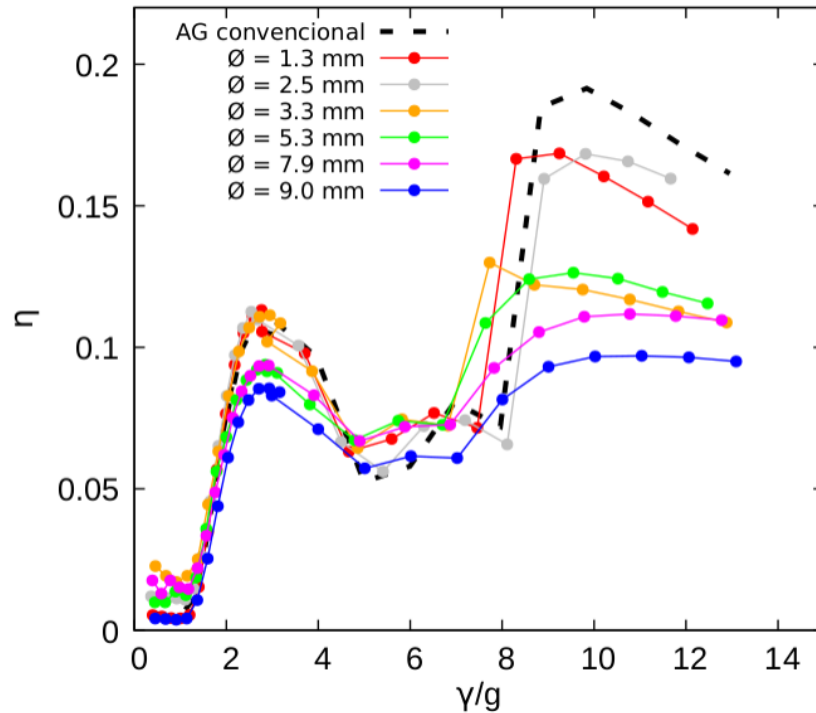


Figura 20: Factor de amortiguación en función de la amplitud de aceleración para una frecuencia de 40 Hz. La línea punteada de color negro representa los datos obtenidos para el AG convencional. El resto de los puntos de colores corresponden a los distintos diámetros de obstáculo utilizados en los experimentos.

Según se observa en la figura 21, donde se muestra la disipación para distintos tamaños de obstáculos a 100 Hz, insertar obstáculos con diámetros que van desde 1.3 mm hasta 3.3 mm producen un aumento en el primer pico del factor de amortiguación en comparación con el AG convencional. Mientras que para el resto de los diámetros utilizados este primer pico disminuye. Para amplitudes de aceleración mayores a 5 g, no se observan cambios en el factor de amortiguación cuando se compara el AG convencional con el de obstáculos. Esto se debe a que la presencia del obstáculo modifica la respuesta del AG cuando éste alcanza el régimen *collect-and-collide*. En nuestros experimentos, dado el shaker utilizado, no es posible alcanzar dicho régimen para frecuencias tan altas. Otro autores, por ejemplo Meyer *et al.* [28], logran llegar a este régimen para frecuencias de 100 Hz a amplitudes cercanas a 40 g.

Cabe mencionar que si bien se muestran los resultados para 40 Hz y 100 Hz, en este trabajo se estudiaron tres frecuencias más (30, 50 y 110 Hz). Como los resultados obtenidos para las frecuencias bajas y altas son cualitativamente comparables con los obtenidos para 40

Hz y 100 Hz respectivamente, sólo se eligieron dos frecuencias para explicar los resultados obtenidos.

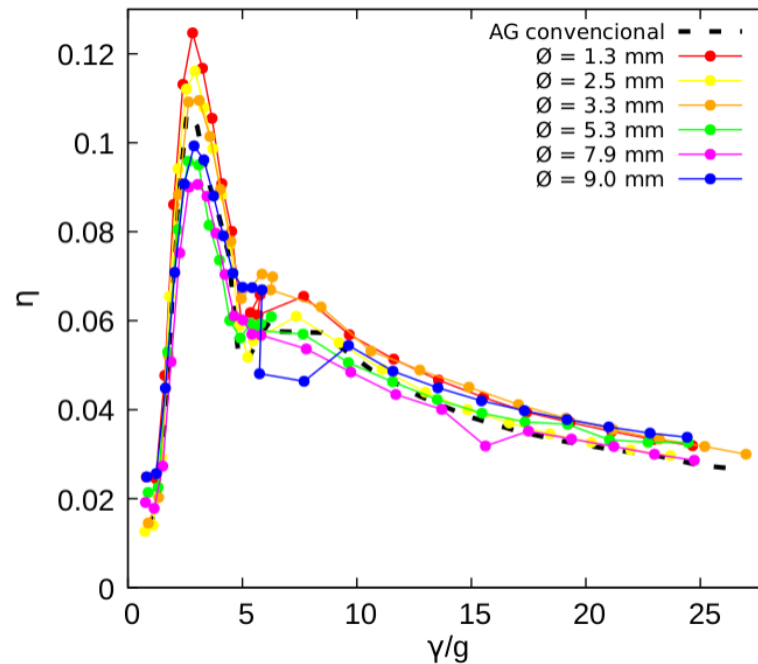


Figura 21: Factor de amortiguación en función de la amplitud de aceleración para una frecuencia de 100 Hz. La línea punteada en color negro representa los datos obtenidos para el AG convencional. El resto de los puntos de colores corresponden a los distintos diámetros de obstáculo utilizados en los experimentos.

Para evaluar la distorsión de la señal armónica debido a las colisiones de las partículas, se realizó un análisis sobre la distorsión armónica total más ruido (THD+N) de la señal adquirida. En la figura 22, se muestra la THD+N de la señal de aceleración en función de la amplitud de aceleración para una frecuencia de 40 Hz. Los puntos negros corresponden al AG convencional, mientras que los puntos rojos (diámetro del obstáculo de 1.3 mm), verdes (diámetro del obstáculo de 7.9 mm) y azules (diámetro del obstáculo de 9.0 mm) representan el AG con obstáculos. Se observa que introducir en el interior del recinto del AG obstáculos con diámetros de 7.9 mm y 9.0 mm reduce la THD+N a la mitad cuando se lo compara con el AG convencional. Sin embargo, no se observan tales diferencias cuando se utilizan obstáculos con un diámetro menor. Por ejemplo, los puntos en color rojo en la figura 22, que corresponden al AG con obstáculos de 1.3 mm de diámetro.

El análisis de la THD+N para una frecuencia de 100 Hz se muestra en la figura 23. En negro se muestran los datos obtenidos para el AG convencional. Los puntos en rojo, verde y azul corresponden al AG con obstáculos de 1.3 mm, 7.0 mm y 9.0 mm respectivamente. Para

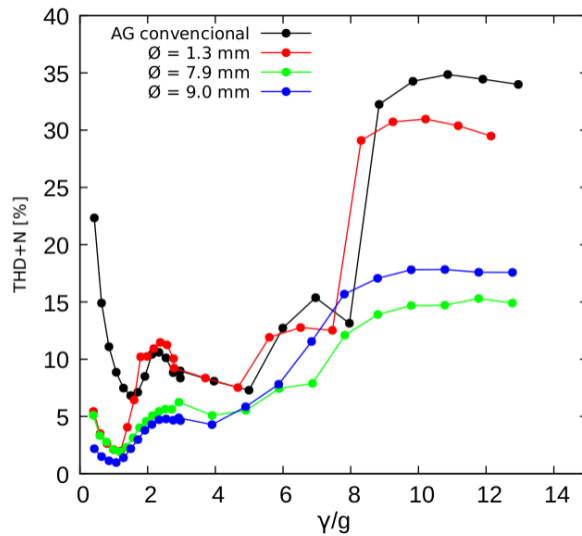


Figura 22: Distorsión armónica total más ruido (THD+N) en función de la amplitud de aceleración en unidades de g para una frecuencia de 40 Hz. En negro se muestran los datos obtenidos para el AG convencional. Los puntos en rojo, verde y azules corresponden al AG con obstáculos de 1.3 mm, 7.0 mm y 9.0 mm respectivamente.

esta frecuencia, introducir un obstáculo en el interior del AG reduce a la mitad la THD+N con respecto al AG convencional. Sin embargo no se observan diferencias significativas cuando se coloca un obstáculo con diámetro de 1.3 mm.

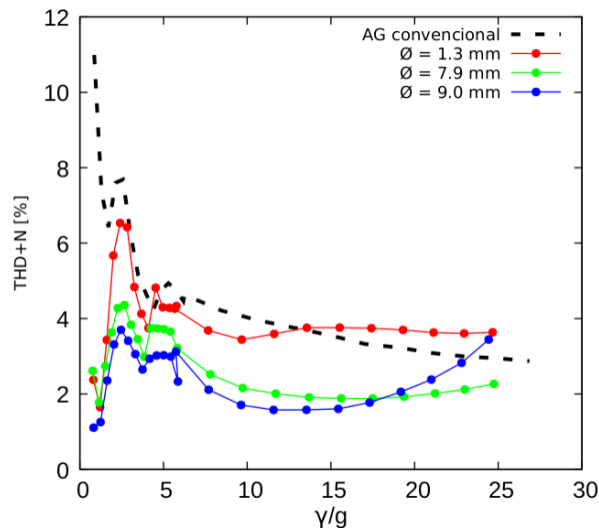


Figura 23: Distorsión armónica total más ruido (THD+N) en función de la amplitud de aceleración en unidades de g para una frecuencia de 100 Hz. Los puntos negros corresponden al AG convencional. Los puntos en verde y celeste corresponden al AG con obstáculos de 7.9 mm y 9.0 mm respectivamente. Si bien en la gráfica sólo se muestran los obstáculos más grandes, no se observan diferencias con ninguno de los diámetros estudiados.

Cabe destacar, que el análisis sobre la THD+N se realizó para todas las frecuencias y los distintos obstáculos estudiados. Para frecuencias de 30 y 50 Hz se obtiene un gráfico muy similar al que se mostró para 40 Hz (ver figura 22), siendo los obstáculos más grandes los que producen una reducción en la THD+N. Los AG con obstáculos menores a 5 mm no presentan diferencias con respecto a un AG convencional para ninguna de las tres frecuencias más bajas. También se realizó este análisis para una frecuencia de 110 Hz, obteniendo un resultado cualitativamente comparable al que se obtuvo para 100 Hz (ver figura 23).

3.3. Masa efectiva

La masa efectiva es una medida de cuánto interactúan las partículas con el recinto del AG durante la vibración. Como ya se mencionó en la sección 2.5, estas interacciones conducen a una redistribución de las fuerzas internas y a una modificación de la inercia efectiva del AG como un todo.

En la figura 24, se muestra la masa efectiva M_1 normalizada por la masa del recinto más la de las partículas en reposo ($M + m_p$), en función de la amplitud de aceleración para una frecuencia de 40 Hz. La línea punteada de color negra representa el AG convencional. El resto de los colores corresponden a los distintos diámetros utilizados para los obstáculos.

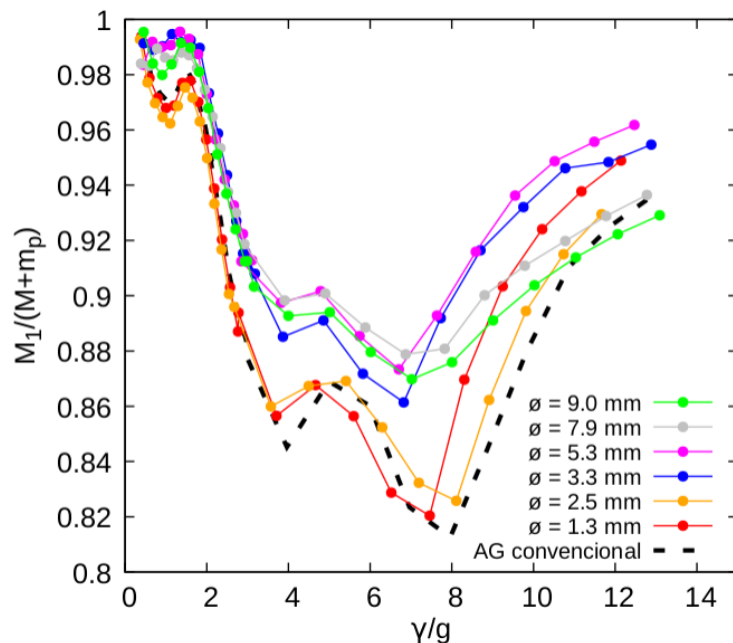


Figura 24: Masa efectiva normalizada por $M + m_p$ en función de la amplitud de aceleración. La línea punteada negra corresponde al AG convencional. El resto de los colores a los AG con obstáculos.

En la figura 24 se ve cómo mientras que la amplitud de aceleración aumenta de cero hasta 1.2 g, donde las partículas se mueven solidarias al recinto del AG, el valor $M_1/(M + m_p)$ es prácticamente igual a 1, esto es, no presenta diferencias con la masa en reposo. Para valores de γ mayores a 1.2 g la masa efectiva se reduce, debido a que las partículas comienzan a levantar vuelo y aumentar el volumen que ocupan dentro del recinto, hasta que comienzan a tocar el techo (alrededor de 4 g). La masa de los granos representa el 18% de la masa total del AG. Entre 4 y 8 g la masa efectiva se acerca a la masa en reposo del AG ($0,82(M + m_p)$), cuando no hay obstáculos en el interior. Esto se debe a que las partículas están gran parte del tiempo en el aire, en un estado tipo gas, interactuando de manera no colectiva con el contenedor. Con la presencia de obstáculos esta interacción aumenta, con el consecuente acrecentamiento de la masa efectiva. Alrededor de $\gamma = 8$ g, cuando las partículas viajan colectivamente y golpean fuertemente el techo y el piso del AG (régimen *collect-and-collide*), se observa el valor más bajo en la masa efectiva, ya que las partículas colisionan como un todo contra el techo y piso del contenedor. La aceleración resultante del AG es producida tanto por la fuerza que ejerce el shaker como por la de los golpes de los granos. Si estas fuerzas tienen el mismo sentido, la aceleración resultante será mayor a la que ocurriría sólo por acción del shaker y esto se percibe como una masa efectiva menor. Para valor de amplitud de aceleración aún mayores, la masa efectiva vuelve a aumentar: las partículas abandonan el régimen *collect-and-collide*, para entrar en un movimiento desacoplado. Se puede observar que hay dos conjuntos bien definidos de curvas. El primero corresponde al AG convencional y los AG con obstáculos de 1.3 mm y 2.5 mm, mientras que para el resto de los obstáculos con diámetros mayores a 3.0 mm forman el segundo conjunto. En éste se puede observar que la masa efectiva tiene menos variaciones.

3.4. Patrón de colisiones

Con el objetivo de analizar y entender la interacción de las partículas con el recinto del AG durante la excitación, es posible resumir las señales de aceleración o fuerza en función del tiempo y en función de la amplitud de aceleración, en lo que llamamos patrón de colisiones. Elegimos las señales de aceleración para llevar a cabo este análisis.

Llamemos *experimento* a la colección de señales que se recolectan para un AG, con un barrido en amplitud a una misma frecuencia de forzado. Cada experimento está compuesto, en este trabajo, por 24 señales de aceleración que son recolectadas para los 24 valores distintos de amplitud que se le imponen al forzado. Cada curva de aceleración en función del tiempo

puede ser considerada como una señal armónica a la que se le suma el efecto de las colisiones de las partículas con el recinto. El panel izquierdo de la figura 25 ilustra un período de una señal de aceleración (línea roja), normalizada por la amplitud de la aceleración. La línea punteada, en color negro, representa el fundamental de la señal original, que se obtiene al calcular la primer componente de Fourier de la misma.

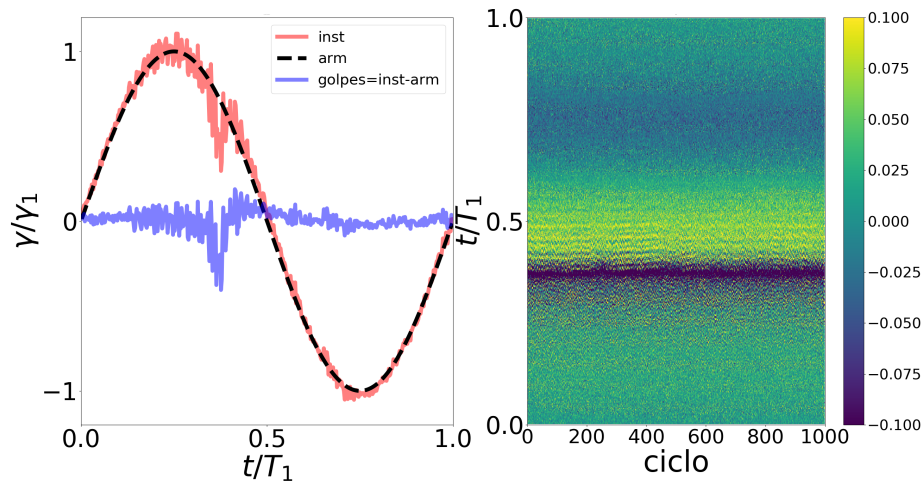


Figura 25: Ejemplo del análisis de las señales. Izquierda: un período de oscilación de la señal original (en color rojo), su correspondiente fundamental (línea punteada de color negro), y la señal de las colisiones (línea azul) que se obtiene al restar a la señal original el fundamental. Derecha: Mapa de color de una señal para una frecuencia de 40 Hz, amplitud de aceleración de 2.3 g, utilizando el AG convencional.

Para observar sólo el efecto de las colisiones sobre la aceleración del AG, basta con restar a la señal original el fundamental. Esto se ilustra en la figura 25, en el panel izquierdo, en color azul. Una vez obtenida la señal de colisiones en función del tiempo, se secciona en segmentos de largo de un período y se ordenan en una matriz. La matriz resultante tendrá tantas columnas como períodos tenga la señal y tantas filas como puntos de muestra tenga un período. Si se hace el mapa de color de la matriz, esto es, se le asocia una escala de colores según el valor del elemento matricial, obtendremos de manera gráfica un mapa que nos indica en qué punto del período ocurren las colisiones. En el panel derecho de la figura 25, se observa que en todos los ciclos, la colisión de las partículas ocurre justo antes de la mitad del período (banda azul oscuro en el medio del mapa). Esto nos indica, además, que la señal es periódica: la colisión ocurre una vez por ciclo y siempre en el mismo lugar.

Se puede confeccionar un mapa de color para cada amplitud del barrido del forzado.

En cada mapa de color se puede promediar a lo largo de todos los ciclos (promedio de las filas) y resumir un mapa a una única columna. Luego, la columna promedio obtenida para cada amplitud puede ordenarse en una nueva matriz de modo que cada columna corresponde a una amplitud de aceleración. Así se obtiene el patrón de colisiones para un experimento completo, el cual nos brindará información acerca de en qué momento del ciclo y con qué intensidad las partículas colisionan con el piso o el techo del recinto según se varía la amplitud de excitación. Esta representación fue usada previamente por Ferreyra et al. [35], un ejemplo de esto puede verse en el panel superior de la figura 26.

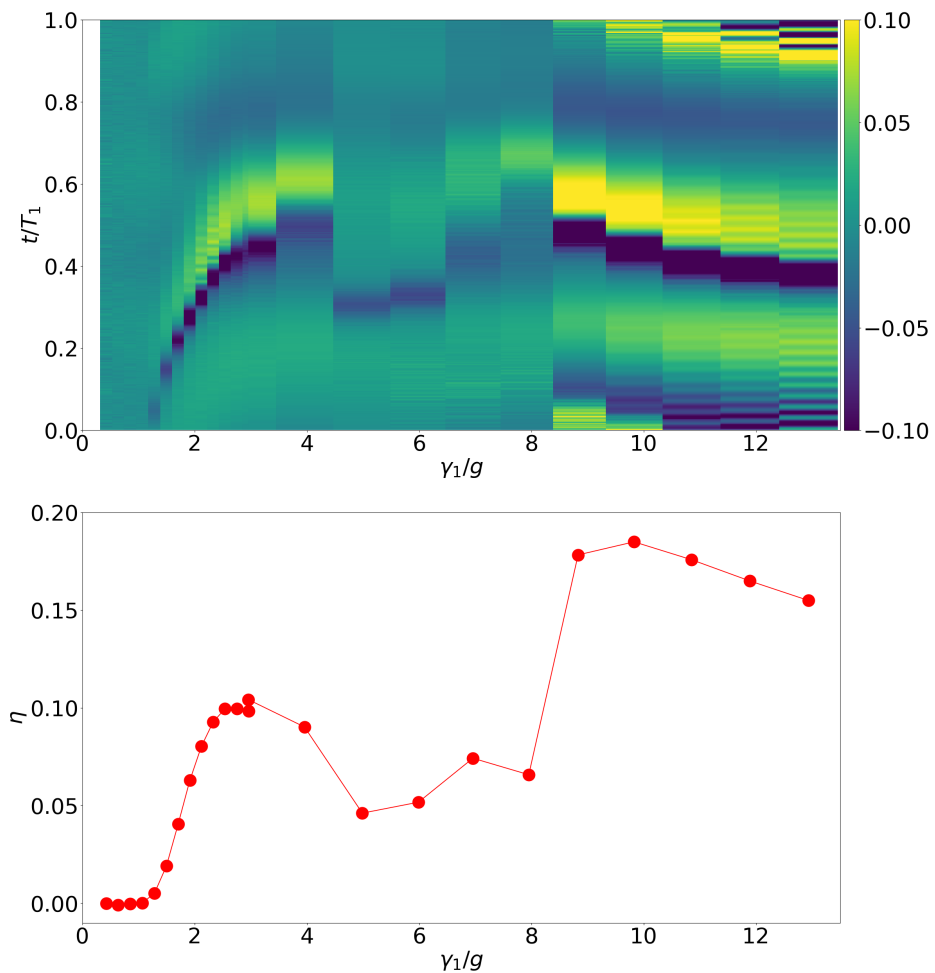


Figura 26: Arriba: patrón de colisiones en función de la amplitud de vibración para un experimento con un AG convencional a la frecuencia de 40 Hz. Abajo: factor de amortiguación del mismo experimento.

Analizando la figura 26, para amplitudes de aceleración menores a 1.2 g, donde las partículas se mueven solidarias al AG, no se observan impactos en el patrón de colisiones. A medida que la intensidad de excitación aumenta, de modo que γ está por encima de 1.2 g, las partículas comienzan a tomar vuelo y empiezan a impactar como un bloque contra el piso del recinto en cada período de oscilación. Esto puede apreciarse, en color azul oscuro, en el patrón de colisiones. El punto del período en el que se produce el impacto se desplaza conforme γ aumenta. Las bandas azules en general aparecen rodeadas de zonas en color amarillo, que muestran la oscilación alrededor del armónico del forzado después de cada colisión de las partículas.

Si la amplitud de aceleración aumenta por encima de 2.5 g, las partículas ocupan un volumen del recinto cada vez mayor. En esta zona la dinámica es más compleja y ya no se aprecian impactos bien definidos, debido a que las partículas se encuentran en estado de gas y colisionan contra el piso de manera individual en lugar de como un bloque.

Finalmente, si sigue aumentando la amplitud de aceleración se alcanza el régimen *collect-and-collide*, alrededor de 9 g. Se ve en el patrón de colisiones cómo las partículas colisionan tanto con el piso como con el techo del AG, de manera colectiva, en un mismo período de oscilación: entre 9 y 10 g se observan colisiones al principio y a mitad del período. Para amplitudes de aceleración mayores, el intervalo temporal entre el golpe contra el piso y el techo deja de ser simétrico.

La correlación entre el patrón de colisiones y la curva de factor de amortiguación es explícita. En el panel inferior de la figura 26 es posible observar que la disipación aumenta hasta que γ está alrededor de 2.5 g, rango en el cual aparecen los golpes en el patrón de colisiones. Para amplitudes de aceleración mayores, en donde el factor de amortiguación disminuye, puede verse que en el patrón de colisiones ya no se observan golpes tan definidos. Cuando γ está entre 8 y 9 g se produce un cambio abrupto en el factor de amortiguación que coincide cuando las colisiones ocurren al principio y a mitad del período en el patrón de colisiones.

En la gráfica 27, se compara el patrón de colisiones del AG convencional (a izquierda) y el AG con obstáculo de 9.0 mm (a derecha) para una frecuencia de 40 Hz. En este caso el patrón de colisiones se grafica cortando la señal cada dos períodos, con el fin de mostrar el rango de amplitudes de aceleración donde se observa que el movimiento del AG sufre una duplicación de período. En ambos casos, no se observan colisiones hasta que la amplitud de aceleración no supera los 1.2 g. A medida que la amplitud de aceleración aumenta, hasta

unos 5 g, se observa que las partículas comienzan a chocar contra la base del AG cada vez con mayor intensidad. Para amplitudes de aceleración entre 5 y 7 g, se ve en el patrón de colisiones del AG convencional, la existencia de una duplicación de período, es decir, en el primer período no se observan colisiones de las partículas pero en el segundo sí (línea azul oscuro). Esto significa que el movimiento del AG es periódico, en el sentido en que se repite en el tiempo, pero el intervalo temporal característico de esa repetición ahora es el doble que el del forzado. Sin embargo, esto sólo sucede para amplitudes de aceleración de alrededor de 6 g en el caso del AG con obstáculo.

La diferencia más notoria entre el patrón de colisiones del AG convencional y el AG con obstáculo se produce cuando las partículas están en el régimen *collect-and-collide*, alrededor de 9 g. Al introducir un obstáculo en el interior del AG, puede verse en el patrón de colisiones, como los golpes ahora son más suaves, reduciendo el movimiento colectivo de las partículas.

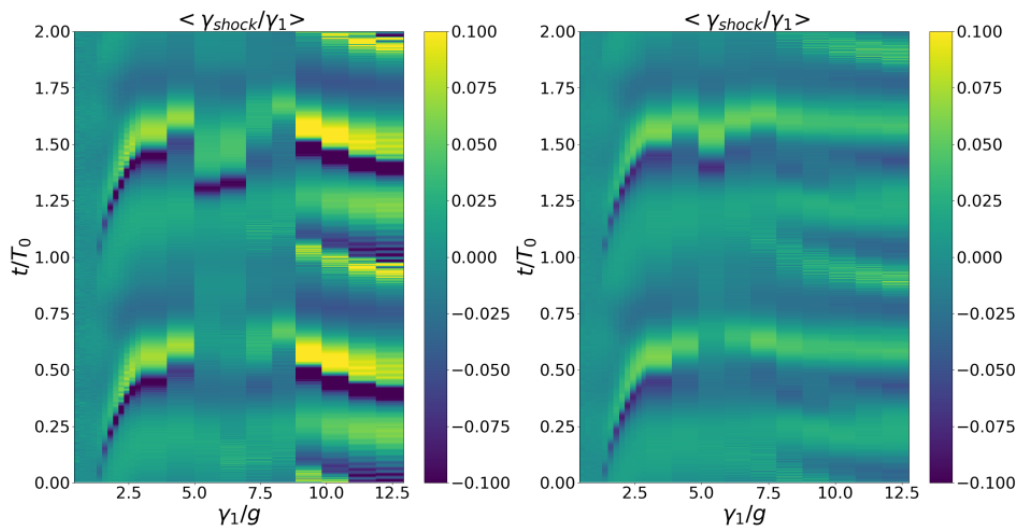


Figura 27: Patrón de colisiones cada dos períodos de oscilación para una frecuencia de 40 Hz. Izquierda: AG convencional; Derecha: AG con obstáculo de 9.0 mm.

En la figura 28 se compara el patrón de colisiones del AG convencional y el AG con obstáculo de 9.0 mm de diámetro para una frecuencia de 100 Hz. Al igual que sucede para el caso de 40 Hz, no se observan colisiones para valores de γ menores a 1.2 g. Cuando aumenta aún más la amplitud de aceleración, las partículas comienzan a tomar vuelo (sin llegar a tocar el techo), se observan los impactos (color azul) en el patrón de colisiones. Para amplitudes de aceleraciones mayores a 10 g, las partículas ocupan todo el volumen dentro del recinto (como si fuesen un gas). Esto se ve reflejado en el patrón de colisiones al no tener golpes bien definidos.

Al comparar entre el AG convencional y el que tiene un obstáculo de 9.0 mm de diámetro, no se observan diferencias sobre la dinámica de las partículas. Ésto concuerda con lo que observamos cuando se compara el factor de amortiguación (ver figura 21).

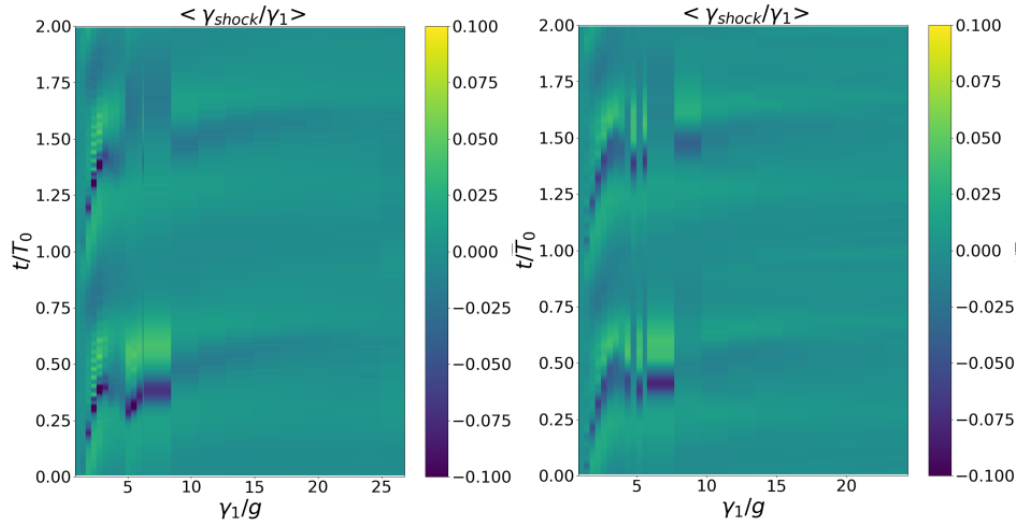


Figura 28: Patrón de colisiones cada dos períodos de oscilación para una frecuencia de 100 Hz. Izquierda: AG convencional; derecha: AG con obstáculo de 9.0 mm.

4. CONCLUSIONES

Esta tesis de licenciatura tiene como objetivo analizar de forma experimental la influencia de la colocación de un obstáculo cilíndrico en el interior de un amortiguador granular (AG) sobre el factor de amortiguación. Para ello, se emplearon obstáculos de diferentes diámetros, que variaron desde 1.3 mm hasta 9.0 mm, y se compararon los resultados con un amortiguador granular convencional. Se realizaron mediciones a distintas frecuencias y amplitudes de aceleración para evaluar las diferencias en el comportamiento del sistema.

Los resultados experimentales revelaron que la inserción de un obstáculo cilíndrico en el interior del (AG) afecta significativamente el factor de amortiguación, pero sólo cuando el diámetro del obstáculo es mayor a 3.3 mm y la frecuencia de excitación se encuentra alrededor de 40 Hz (ver figura 20). Sin embargo, el valor máximo de amortiguación es menor pero con una variabilidad menos marcada para un rango más amplio de amplitudes de aceleración, eliminando el fenómeno de *collect-and-collide* [29]. Este resultado concuerda con los obtenidos por Meyer *et al.* [28], donde utilizan un AG con estructuras internas y encuentran que el factor de amortiguación es más bajo, pero tiene un comportamiento más robusto cuando se lo compara con el AG convencional (siendo robustez del AG la poca variación de la disipación en un rango de amplitudes de aceleración determinado).

Al realizar las mismas mediciones a frecuencias mayores (100 y 110 Hz) no se observaron diferencias significativas en el factor de amortiguación para amplitudes más altas, incluso cuando se utilizan los obstáculos más grandes (7.9 mm y 9.0 mm).

Otro resultado interesante es la reducción, en casi un 50%, en la THD+N cuando la frecuencia es cercana a 40 Hz y se utilizan obstáculos mayores 7.9 mm. Para frecuencias más altas, también se observa una reducción, aproximadamente del 50%, en la THD+N para el rango de amplitudes de aceleración estudiado.

Este estudio experimental ayuda a comprender la influencia de obstáculos cilíndricos en un amortiguador granular y su efecto en el factor de amortiguación. Los resultados obtenidos tienen relevancia en el desarrollo de amortiguadores más eficientes y efectivos en diversas aplicaciones en que la amplitud de aceleración puede variar por diversos factores y se desea un AG con un factor de amortiguación poco sensible a estos cambios.

Para futuras investigaciones, se espera poder ampliar el alcance del estudio incorporando un rango más amplio de valores de frecuencias y amplitudes de aceleración. Asimismo, se considerará la fabricación de los amortiguadores granulares (AG) mediante tecnología de

impresión 3D, lo que permitirá integrar el obstáculo y el amortiguador en una sola pieza, reduciendo potenciales errores inherentes a la fabricación artesanal.

Otro estudio dentro de las posibilidades es el de agregar más de un obstáculo en el interior del AG o incluso probar con distintas formas de obstáculos, con el fin de que las colisiones sean menos intensas y la transferencia de momento más progresiva.

Referencias

- [1] Braun, S., D.J. Ewins y S.S. Rao: *Encyclopedia of vibration*. Academy Press, (2002), ISBN 978-0-12-227085-7.
- [2] De Silva, C.W.: *Vibration and Shock Handbook*. Engineering and Technology, (2005), ISBN 0-07-137081-1.
- [3] Sun, J. Q., M. R. Jolly y M. A. Norris: *Passive, Adaptive and Active Tuned Vibration Absorbers—A Survey*. Journal of Mechanical Design, 117:234, (1995). <https://doi.org/10.1115/1.2836462>.
- [4] Constantinou, M.S. y G. Dargush: *Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit*. MCEER, (1998), ISBN 0-9656682-1-5.
- [5] Bittanti, S. y F. Cuzzola: *Generalized active control of vibrations in helicopters*. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 25:340, (2002). <https://doi.org/10.2514/2.4887>.
- [6] Duran, J. y R. Behringer: *Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials*. Physics Today - PHYS TODAY, 54:63, (2001). <https://doi.org/10.1063/1.1383168>.
- [7] Jaeger, H. M., S. R. Nagel y R. P. Behringer: *Granular solids, liquids, and gases*. Rev. Mod. Phys, 68:1259, (1996). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.68.1259>.
- [8] Schroeder, D. V.: *An introduction to thermal physics*. Addison Wesley, (1999), ISBN 0201380277.
- [9] Panossian, H. V.: *Structural damping enhancement via non-obstructive particle damping technique*. Journal of Vibration and Acoustics, 114:101, (1992). <https://doi.org/10.1115/1.2930221>.
- [10] Peterka, F. y B. Blazejczyk-Okolewska: *Some aspects of the dynamical behavior of the impact damper*. Journal of Vibration and Control, 11:459, (2005). <https://doi.org/10.1177/1077546304043267>.
- [11] Duncan, M. R., C. R. Wassgren y C. M. Krousgrill: *The damping performance of a single particle impact damper*. Journal of sound and vibration, 286:123, (2005). <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.09.028>.

- [12] Masri, S. F.: *General motion of impact dampers*. Acoustical Society of America, 47:229, (1970). <https://doi.org/10.1121/1.1911470>.
- [13] Bapat, C.N. y S. Sankar: *Single unit impact damper in free and forced vibration*. Journal of Sound and Vibration, 99:85, (1985). [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(85\)90446-8](https://doi.org/10.1016/0022-460X(85)90446-8).
- [14] Sadek, M. y B. Mills: *Effect of Gravity on the Performance of an Impact Damper: Part I. Steady-State Motion*. Journal of Mechanical Engineering Science, 12:268, (1970). https://doi.org/10.1243/JMES_JOUR_1970_012_048_02.
- [15] Luck, J. y A. Mehta: *Bouncing ball with a finite restitution: chattering, locking, and chaos*. Physical Review E, 48:3988, (1993). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.48.3988>.
- [16] Simonian, S. S.: *Particle beam damper*. Smart Structures and Materials, 2445:149, (1995). <https://doi.org/10.1117/12.208884>.
- [17] Zheng, L., S. Masri y L. Xilin: *Origination, development and applications of particle damping technology*. Springer, 1:21, (2020). https://doi.org/10.1007/978-981-15-3499-7_2.
- [18] Masmoudi, M., J. Stéphane, M. Abbas, I. Tawfiq y M. Haddar: *Experimental and numerical investigations of dissipation mechanisms in particle dampers*. Granular Matter, 18:71, (2016). <https://doi.org/10.1007/s10035-016-0667-4>.
- [19] Sánchez, M, G Rosenthal y L. A. Pugnaloni: *Universal response of optimal granular damping devices*. Journal of Sound and Vibration, 331:4389, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.05.001>.
- [20] Sánchez, M., C. M. Carlevaro y L. A. Pugnaloni: *Effect of particle shape and fragmentation on the response of particle dampers*. Journal of Vibration and Control, 20:1846, (2014). <https://doi.org/10.1177/1077546313480544>.
- [21] Bai, X, L Keer, Q Wang y R. Q. Snurr: *Investigation of particle damping mechanism via particle dynamics simulations*. Granular Matter, 11:417, (2009). <https://doi.org/10.1007/s10035-009-0150-6>.

- [22] Chen, T., K. Mao, X. Huang y M. Y. Wang: *Dissipation mechanisms of nonobstructive particle damping using discrete element method*. Volumen 4331, página 294. Smart Structures and Materials, (2001). <https://doi.org/10.1117/12.432713>.
- [23] Sánchez, M. y C. M. Carlevaro: *Nonlinear dynamic analysis of an optimal particle damper*. Journal of Sound and Vibration, 332:2070, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.09.042>.
- [24] Wong, C., A. Spencer y J. Rongong: *Effects of enclosure geometry on particle damping performance*. 1:2689, (2009). <https://doi.org/10.2514/6.2009-2689>.
- [25] Salueña, C., T. Pöschel y S. E. Esipov: *Dissipative properties of vibrated granular materials*. American Physical Society, 4:4422, (1999). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.59.4422>.
- [26] Zhang, K., T. Chen y L. He: *Damping behaviors of granular particles in a vertically vibrated closed container*. Powder Technology, 321:173, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.08.020>.
- [27] Yin, Z., F. Su y H. Zhang: *Investigation of the energy dissipation of different rheology behaviors in a non-obstructive particle damper*. Powder Technology, 321:270, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.090>.
- [28] Meyer, N y R. Seifried: *Design of robust particle dampers using inner structures and coated container walls*. Granular Matter, 25:10, (2023). <https://doi.org/10.1007/s10035-022-01298-4>.
- [29] Sack, A., M. Heckel, J. Kollmer, F. Zimmer y T. Pöschel: *Energy dissipation in driven granular matter in the absence of gravity*. Physical review letters, 111:180, (2013). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.018001>.
- [30] Bannerman, M, J Kollmer, A Sack, M Heckel, P Mueller y T. Pöschel: *Movers and shakers: Granular damping in microgravity*. American Physical Society, 84:113, (2011). <https://doi.org/10.1103/physreve.84.011301>.
- [31] Ferreyra, M.V, J.M Gómez-Paccapelo, R Suarez y L.A. Pugnaloni: *Avoiding chaos in granular dampers*. Volumen 249, página 15003. EPJ Web of Conferences, (2021). <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124915003>.

- [32] Zhang, J., Y. Hu, J. Jiang y H. Zan: *Damping Characteristics of Cantilever Beam with Obstacle Grid Particle Dampers*. MDPI, 10:989, (2022). <https://doi.org/10.3390/machines10110989>.
- [33] Blagouchine, I. y E. Moreau: *Analytic Method for the Computation of the Total Harmonic Distortion by the Cauchy Method of Residues*. Communications, IEEE Transactions on, 59:2478, (2011). <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2011.061511.100749>.
- [34] Mehta, A y J.M. Luck: *Novel temporal behavior of a nonlinear dynamical system: The completely inelastic bouncing ball*. Physical review letters, 65:393, (1990). <https://doi/10.1103/PhysRevLett.65.393>.
- [35] Ferreyra, M. V., L. A. Pugnaroni y S. Job: *How to achieve a flat damping capacity in granular dampers under gravity*. Sin publicar, 2023.