

IMPACTO DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS EN LA DESCARGA DE SÓLIDOS A GRANEL EN UNA TOLVA BIDIMENSIONAL: UN ANÁLISIS BASADO EN MODELOS DE ELEMENTOS DISCRETOS

IMPACT OF MECHANICAL VIBRATIONS ON BULK SOLIDS DISCHARGE IN A TWO-DIMENSIONAL HOPPER: AN ANALYSIS BASED ON DISCRETE ELEMENT MODELS

Sergio E. Bertone, Gabriel D. Puccini, Carlos A. Bonetti, Melina Denardi y Jezabel D. Bianchotti

Laboratorio de Métodos y Simulaciones Computacionales, Facultad Regional Rafaela, Universidad Tecnológica Nacional, Acuña 49, Rafaela 2300, Argentina, gabriel.puccini@frra.utn.edu.ar (G.D.P)

Palabras clave: Simulaciones DEM, Descarga de silos, Vibraciones inducidas, Materia granular

Resumen. En este artículo se simula el proceso de descarga de una tolva bidimensional con partículas esféricas de vidrio y se investiga el efecto de vibraciones verticales a frecuencias de 7 Hz y 15 Hz, junto con diferentes amplitudes, sobre la tasa de flujo de partículas descargadas en comparación con condiciones sin vibración. Los resultados muestran un aumento en la tasa de flujo a la frecuencia de 15 Hz. Sin embargo, a la frecuencia de 7 Hz se identifican dos regímenes de comportamiento que muestran una disminución en el caudal para amplitudes menores a 6 mm y un aumento para amplitudes mayores. También se observa que la tasa de flujo instantáneo sigue patrones de ráfagas periódicas de la misma frecuencia que la vibración inducida. El incremento en la intensidad de la vibración conlleva a un aumento en la tasa de flujo debido a estas ráfagas. Estos hallazgos aportan comprensión a la influencia de las vibraciones mecánicas en la manipulación de materiales granulares en tolvas, con implicaciones para la optimización de procesos industriales en entornos similares.

Keywords: DEM simulations, Silo discharge, Vibrations induced, granular matter

Abstract. In this article the discharge process of a two-dimensional hopper with spherical glass particles is simulated, and the effect of vertical vibrations at frequencies of 7 Hz and 15 Hz, along with different amplitudes, on the rate of discharged particles is investigated in comparison to conditions without vibration. The results reveal an increase in the discharge rate at 15 Hz. However, at 7 Hz two distinct regimes are identified, showing a decrease in flow for amplitudes less than 6 mm and an increase for larger amplitudes. In addition, it is observed that the instantaneous flow rate follows patterns of periodic bursts synchronized with vibration, and the increase in vibration intensity leads to an increase in the flow rate due to these bursts. These findings provide insight into the influence of mechanical vibrations on the handling of granular materials in hoppers, with implications for optimizing industrial processes in similar environments.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la manipulación de sólidos a granel, la descarga desde tolvas es un proceso de gran relevancia en diversas industrias. Una estrategia que ha cobrado importancia en este contexto es la aplicación de vibraciones mecánicas para influir en el flujo de sólidos a granel en tolvas. En este trabajo se analiza cómo impactan las vibraciones mecánicas en la descarga de una tolva bidimensional, variando tanto la frecuencia como la amplitud de las vibraciones aplicadas.

Este trabajo se centra en el estudio de la descarga de una tolva bajo dos condiciones fundamentales: una sin la aplicación de vibraciones y la otra bajo la influencia de vibraciones mecánicas verticales de distintas frecuencias y amplitudes. Para llevar a cabo este análisis, se utiliza el Método de Elementos Discretos (DEM) (Cundall y Strack, 1979), una poderosa herramienta de simulación computacional ampliamente utilizada por investigadores e ingenieros en el diseño, análisis y optimización de sistemas y equipos para la manipulación de materiales granulares, incluyendo flujos de partículas (Zhu et al., 2007, 2008). El DEM permite modelar y analizar el comportamiento de partículas individuales dentro de la tolva, proporcionando una comprensión detallada de cómo las vibraciones mecánicas influyen en el flujo de sólidos a granel.

Una de las ventajas destacadas del uso del DEM radica en su capacidad para revelar características del flujo de partículas que son difíciles o incluso imposibles de observar experimentalmente. A través de simulaciones DEM, se puede obtener información detallada sobre trayectorias de partículas, fuerzas transitorias y otros aspectos microscópicos del flujo granular que están más allá del alcance de las técnicas experimentales convencionales. Además, el DEM brinda la capacidad de simular condiciones extremas que pueden ser inalcanzables en experimentos prácticos. Por ejemplo, se puede estudiar el impacto de amplitudes de oscilación excepcionalmente altas que podrían resultar poco realistas o peligrosas en un entorno experimental. Estas capacidades únicas de DEM permiten profundizar en el entendimiento de cómo las vibraciones mecánicas afectan la eficiencia de la descarga en una tolva bidimensional.

Trabajos previos han estudiado la influencia de las vibraciones en el proceso de descarga de partículas desde tolvas. Wassgren et al. (2002) analizaron la descarga de partículas de vidrio con diámetros comprendidos entre 0.8 y 1.2 mm desde una tolva tridimensional de fondo inclinado, aplicando vibraciones verticales de distintas frecuencias y amplitudes. Pascot et al. (2020) estudiaron la descarga de partículas de vidrio con un diámetro de 1.1 mm desde una tolva bidimensional de fondo plano, analizando vibraciones verticales en diferentes regímenes de frecuencia y amplitud.

En este trabajo se simula el proceso de descarga de una tolva bidimensional de fondo plano que contiene partículas esféricas de vidrio. Además, se incorporan simulaciones de vibraciones verticales a frecuencias de 7 y 15 Hz, junto con un rango de amplitudes que aumentan de manera discreta desde 0 mm (sin vibración) hasta 12 mm. El propósito principal es analizar el impacto de estas vibraciones verticales en el flujo de descarga, en comparación con la tasa de flujo en ausencia de vibración. Los resultados obtenidos a través de las simulaciones DEM proporcionan conclusiones significativas que arrojan luz sobre el papel de las vibraciones mecánicas en la manipulación de sólidos a granel en tolvas. Estas conclusiones pueden tener aplicaciones prácticas de gran interés para la optimización de procesos industriales que involucran la descarga de materiales granulares en entornos similares.

2. MÉTODOS

En este trabajo se emplearon modelos basados en el Método de Elementos Discretos (DEM, *Discrete Element Method*) con el propósito de simular el proceso de descarga de partículas de vidrio en una tolva bidimensional.

2.1. Geometría.

La geometría consiste en un tolva rectangular de fondo plano. La distancia entre las caras principales de la tolva es ligeramente mayor al diámetro promedio de las partículas. Esta configuración garantiza que, durante el proceso de llenado del silo, se forme una capa de partículas que promueve un flujo bidimensional. Las dimensiones de la tolva fueron elegidas para evitar la aparición de efectos de pared en las proximidades de la apertura ubicada en el fondo del silo y asegurar un flujo estable a lo largo de un período de tiempo adecuado. La dimensión de la abertura del silo se fijó en 20 mm, lo que equivale a más de cinco veces el tamaño promedio de las partículas, con el propósito de minimizar la probabilidad de formación de arcos y, como consecuencia, la ocurrencia de atascos en el sistema.

2.2. Modelo de elementos discretos.

Se implementó en este trabajo un modelo DEM de partículas blandas (Bertone et al., 2018; Venier et al., 2021). El método de partículas blandas, originalmente desarrollado por (Cundall y Strack, 1979), permite que estas partículas experimenten deformaciones que son utilizadas para calcular las fuerzas elásticas, plásticas y de fricción que surgen entre ellas.

En un flujo granular, las partículas pueden experimentar tanto traslación como rotación, lo que les permite interactuar con partículas vecinas o con las superficies del entorno. El movimiento de traslación y rotación de estas partículas se describe usando las leyes del movimiento de Newton. Para una partícula i de masa m_i y momento de inercia I_i , las ecuaciones de gobierno para el movimiento son:

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \sum_j \vec{F}_{ij}^c + \vec{F}_i^g,$$

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \sum_j \vec{M}_{ij},$$

donde \vec{v}_i y $\vec{\omega}_i$ son las velocidades de traslación y angular de la partícula i , respectivamente, \vec{F}_{ij}^c y \vec{M}_{ij} son las fuerzas de contacto y torque actuando en la partícula i a través de la partícula j o las paredes, y \vec{F}_i^g es la fuerza gravitacional.

Para resolver este sistema de ecuaciones utilizando el método de Elementos Discretos, se seleccionó un paso de tiempo numérico menor que un valor crítico, lo que asegura que las perturbaciones no puedan propagarse más allá de las partículas vecinas inmediatas durante cada paso de tiempo.

El método DEM emplea modelos simplificados para calcular las fuerzas y torques de contacto entre las partículas. En este estudio, se optó por utilizar el modelo no lineal de Hertz-Mindlin (Hertz, 1882; Mindlin y Deresiewicz, 1953).

Las partículas fueron simuladas utilizando un modelo de partículas esféricas. Los parámetros DEM (densidad, coeficientes de rozamiento, coeficiente de restitución) se establecieron siguiendo referencias bibliográficas previas (Pascot et al., 2020). Para prevenir la cristalización

en el sistema de partículas, se implementó una distribución de tamaños que variaba en el rango de diámetros de 2.4 a 2.7 mm. Los valores específicos utilizados se detallan en la Tabla 1. La selección del valor del módulo de Young se llevó a cabo con el doble objetivo de mejorar la eficiencia en el tiempo de simulación y asegurar la obtención de estimaciones realistas del flujo de partículas dentro del silo.

Parámetro	Valor
Diámetro de partícula [mm]	2,4 – 2,7
Número de partículas	6540
Densidad [Kg/m ³]	2500
Módulo de Young [Pa]	5×10^6
Coefficiente de Poisson	0,45
Coefficiente de restitución part/part	0,30
Coefficiente de restitución part/pared	0,50
Coefficiente de fricción part/part μ_{pp}	0,50
Coefficiente de fricción part/pared μ_{pw}	0,10

Tabla 1: Valores de los parámetros adoptados para el modelo DEM

2.3. Simulación de la descarga de la tolva.

Las simulaciones se iniciaron a partir de una configuración inicial en la que la tolva estaba completamente llena, con un total de 6540 partículas. En un primer paso, se llevó a cabo la simulación del proceso de descarga del silo en condiciones de geometría estática, con el fin de establecer un caudal de referencia que permitiera la normalización de los valores de caudal en distintos regímenes de operación. Posteriormente, se procedió a simular la descarga de la tolva aplicando vibraciones verticales a la malla del modelo, variando las frecuencias y amplitudes de estas vibraciones en distintas configuraciones. Para cada una de estas configuraciones se realizaron múltiples simulaciones, partiendo de arreglos de partículas generados a partir de diferentes semillas para garantizar la introducción de aleatoriedad en los resultados. Todas las simulaciones se implementaron usando el software de simulación LIGGGHTS (Kloss et al., 2012).

Las mediciones de la masa descargada se realizaron calculando el número de partículas que atraviesan un plano horizontal fijo a una distancia de 20 mm por debajo del fondo de la tolva. Se eligió esta distancia considerando que el fondo de la tolva llega a desplazarse 12 mm en condiciones de máxima amplitud estudiada.

3. RESULTADOS

3.1. Caudal sin vibración

En la Figura 1(A) se muestran dos instantáneas de la simulación DEM para la tolva lleva y durante el proceso de descarga. Los diferentes colores de las partículas guardan relación con su diámetro. En la Figura 1(B) se muestra la evolución temporal de la descarga de masa. La descarga alcanza casi instantáneamente un régimen de flujo estacionario con una tasa de flujo constante, independientemente de los parámetros utilizados. Todas las mediciones subsiguientes se realizan en ese régimen de flujo estacionario.

El flujo de materiales granulares a través de una abertura circular se espera que siga la ley de Beverloo (Beverloo et al., 1961):

$$Q = C\rho\phi_b\sqrt{g}(D - kd)^{5/2} \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del material, ϕ_b es la fracción de volumen, g es la constante gravitatoria, y C y k son parámetros de ajuste.

Esta ecuación puede generalizarse para una tolva rectangular bidimensional:

$$Q = C\rho\phi_b\sqrt{g}W(D - kd)^{3/2} \quad (2)$$

donde $W = 0,003$ m es la profundidad del silo. En la Figura 1(B) se muestra que la evolución de la descarga es excelentemente ajustada por la Ec. (2) con los parámetros $\phi_b = 0,47$, $C = 0,46$ y $k = 0,113$.

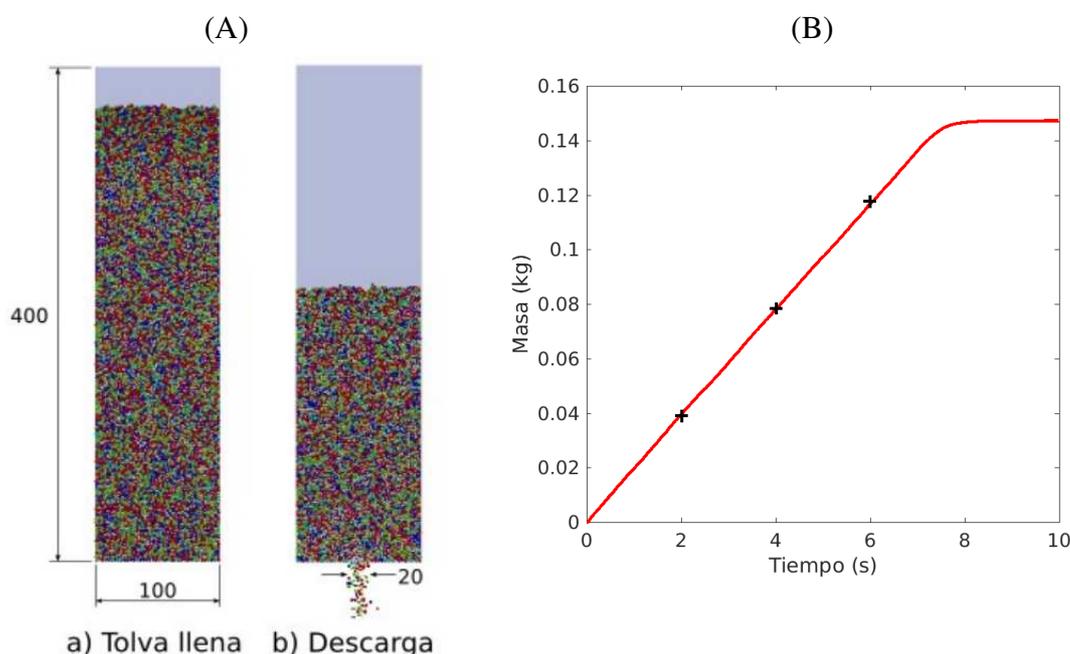


Figura 1: (A) Vistas del sistema simulado para la tolva llena y durante el proceso de descarga. Las partículas están coloreadas según su diámetro. (B) Evolución temporal de la descarga de masa de partículas con el modelo DEM. Las cruces muestran el ajuste que corresponde a la tasa de flujo calculada con la ecuación de Beverloo para el caso 2D.

3.2. Caudal con vibración

Mediante simulaciones DEM, se aplicaron vibraciones verticales (90°) al silo 2D y se volvió a medir la tasa de flujo a dos frecuencias diferentes, $f = 7$ Hz y $f = 15$ Hz. Las simulaciones se llevaron a cabo con diferentes valores de amplitud de vibración, manteniendo constante la frecuencia. Para evaluar el efecto de las vibraciones en el caudal, la masa descargada M se normalizó en relación con la masa descargada medida sin vibraciones, M_0 . En la Figura 2(A) se presenta la evolución de M/M_0 a lo largo del tiempo para varios valores de amplitud de vibración (A) y las dos frecuencias simuladas. Los resultados muestran que, a una baja frecuencia de vibración (7 Hz), la relación M/M_0 se mantiene prácticamente constante alrededor del 5% en un rango de amplitudes que va desde 0,75 mm hasta 6,00 mm. Sin embargo, se observa un aumento en M/M_0 cuando la amplitud de la vibración alcanza los 9,00 mm. Al aumentar la frecuencia de vibración a 15 Hz, se aprecia un incremento en el flujo que se intensifica con valores crecientes de las amplitudes.

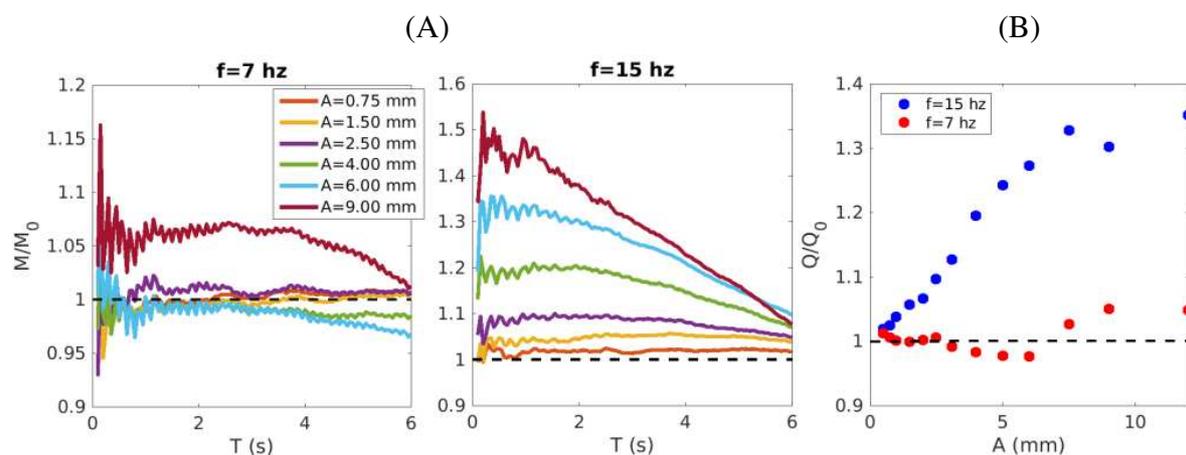


Figura 2: (A) Evolución de la masa descargada normalizada M/M_0 para diferentes amplitudes de vibración y para $f = 7$ Hz y $f = 15$ Hz. (B) Evolución del caudal normalizado Q/Q_0 en función de la amplitud de la vibración.

Para cuantificar el efecto de las vibraciones en la tasa de flujo, se normalizó Q utilizando Q_0 , definida como la tasa de flujo medida sin vibraciones. En la Figura 2(B), se presenta la evolución de Q/Q_0 en función de la amplitud de vibración A para dos valores de frecuencia f . Los resultados indican que, para la frecuencia de 15 Hz, Q/Q_0 aumenta en todas las amplitudes de vibración. Sin embargo, a 7 Hz, se observa la existencia de dos regímenes distintos como ha sido observado en Pascot et al. (2020). Para amplitudes menores a 6 mm, se registra una disminución en el caudal, mientras que para amplitudes mayores se observa un aumento. Por lo tanto, la tasa de flujo en el segundo régimen, donde se produce el incremento del caudal, depende de la frecuencia de vibración f .

Para explicar este comportamiento en el flujo debido a la amplitud de la vibración, en la Figura 3 se analiza la tasa de flujo instantáneo Q_{inst} normalizada por el caudal sin vibración Q_0 en para distintas amplitudes ($A = 3,1$ mm, $A = 6,0$ mm y $A = 12,0$ mm) y para $f = 15$ Hz. Se observa que la dinámica de la tasa de flujo instantáneo ocurre en forma de ráfagas periódicas con la misma frecuencia de la vibración. Además, las ráfagas presentan un desplazamiento de fase que no es constante cuando se lo compara con las diferentes amplitudes de vibración y está relacionado con la distancia del plano de medición al fondo de la tolva. También, en líneas de trazos se representa la tasa de flujo promedio para cada amplitud que coincide con el aumento del caudal observado en la Figura 2(B). El aumento de la intensidad de la vibración conduce a un aumento de la tasa de flujo que ocurre debido a la dinámica de ráfagas periódicas inducidas por la vibración de la tolva.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el impacto de las vibraciones verticales en la tasa de flujo de partículas descargadas de la tolva bidimensional. Se observó que a una frecuencia de vibración de 15 Hz, la tasa de flujo aumentó en todas las amplitudes de vibración estudiadas. Sin embargo, a una frecuencia de 7 Hz, se identificaron dos regímenes de comportamiento diferente. Para amplitudes de vibración inferiores a 6 mm, se registró una disminución en la tasa de flujo, mientras que para amplitudes mayores se observó un aumento. Por lo tanto, la tasa de flujo en el segundo régimen, donde se produce el aumento del caudal, depende significativamente de la frecuencia de vibración f .

También se analizó la tasa de flujo instantáneo Q_{inst} normalizada por la tasa de flujo sin

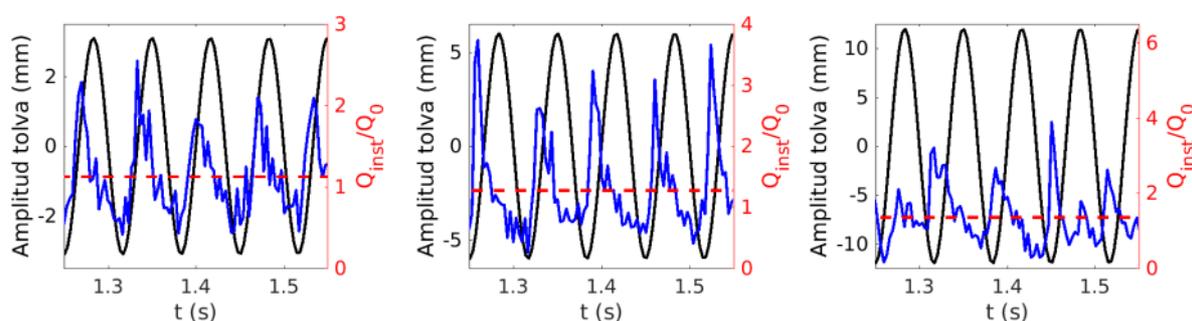


Figura 3: Evolución temporal de la posición vertical del silo y la tasa de flujo instantáneo de descarga normalizado Q_{inst}/Q_0 para $A = 3,1$ mm, $A = 6$ mm y $A = 12$ mm y para $f = 15$ Hz.

vibración Q_0 para distintas amplitudes y una frecuencia de 15 Hz. Se observó que la dinámica de la tasa de flujo instantáneo ocurre en forma de ráfagas periódicas con la misma frecuencia que la vibración de la tolva. El aumento de la intensidad de la vibración, representado por mayores amplitudes, condujo a un aumento en la tasa de flujo. Este aumento en la tasa de flujo se debió a la dinámica de ráfagas periódicas inducidas por la vibración de la tolva, lo que sugiere una relación directa entre la intensidad de la vibración y la mejora en el proceso de descarga.

Estas conclusiones proporcionan una comprensión fundamental del efecto de las vibraciones mecánicas en la manipulación de sólidos a granel en tolvas, lo que puede ser de interés práctico para la optimización de procesos industriales que involucran la descarga de materiales granulares en condiciones similares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional por financiar esta investigación en el marco del proyecto con Código ASUTNRA0007817.

REFERENCIAS

- Bertone S., Puccini G., Monier E., y Jappert S. Simulación de flujos de sólidos a granel en tolvas utilizando modelos de elementos discretos. *XII Congreso Argentino de Mecánica Computacional Mecom 2018*, páginas 1–10, 2018.
- Beverloo W., Leniger H., y van de Velde J. The flow of granular solids through orifices. *Chemical Engineering Science*, 15(3):260–269, 1961.
- Cundall P. y Strack O. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29:47–65, 1979.
- Hertz H. Über die berührung fester elastischer körper. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 92:156–171, 1882.
- Kloss C., Goniva C., Hager A., Amberger S., y Pirker S. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM. *Progress in Computational Fluid Dynamics, An Int. J.*, 12(2/3):140–152, 2012.
- Mindlin R. y Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. *Journal of Applied Mechanics*, 20:327–344, 1953.
- Pascot A., Gaudel N., Antonyuk S., Bianchin J., y De Richter S.K. Influence of mechanical vibrations on quasi-2d silo discharge of spherical particles. *Chemical Engineering Science*, 224:115749, 2020.
- Venier C.M., Márquez Damián S., Bertone S.E., Puccini G.D., Risso J.M., y Nigro N.M. Discre-

- te and continuum approaches for modeling solids motion inside a rotating drum at different regimes. *Applied Sciences*, 11(21):10090, 2021.
- Wassgren C.R., Hunt M.L., Freese P.J., Palamara J., y Brennen C.E. Effects of vertical vibration on hopper flows of granular material. *Physics of Fluids*, 14(10):3439–3448, 2002.
- Zhu H., Zhou Z., Yang R., y Yu A. Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments. *Chemical Engineering Science*, 62(13):3378–3396, 2007.
- Zhu H., Zhou Z., Yang R., y Yu A. Discrete particle simulation of particulate systems: a review of major applications and findings. *Chemical Engineering Science*, 63(23):5728–5770, 2008.