



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Mecánica



DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN HARNERO VIBRATORIO PARA SU APLICACIÓN EN AMBIENTE LUNAR

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Mecánica

POR: Pedro Enrique Cáceres Slimming
Profesor Guía: Cristian Gabriel Rodríguez Godoy

Concepción, Chile 2023

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Tabla de Contenido

CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Identificación y cuantificación del problema/oportunidad	1
1.2 Estado del arte	2
1.2.1 I. Crawford, <i>Lunar Resources: A Review</i> , SAGE, 2015 (Crawford, 2015).....	2
1.2.2 C. L. McLeod y M. P. S. Krekeler, <i>Sources of Extraterrestrial Rare Earth Elements: To the Moon and Beyond</i> , Resources, 2017 (McLeod & Krekeler, 2017).	4
1.2.3 L. Zhao et al., <i>Optimization of a circular vibrating screen based on DEM simulation and Taguchi orthogonal experimental design</i> , Powder Technology, 2017 (Zhao, Zhao, Bao, & Qinfu, 2017).	4
1.2.4 H. Aghlmandi, <i>Discrete element modelling of vibrating screens</i> , 2018 (Aghlmandi Harzanagh, Caner Orhan, & Levent Ergun, 2018).....	4
1.2.5 H. Kawamoto & K. Chin, Particle-Size Classification of Lunar Regolith through Inclined Vibrating Tube. (Kawamoto & Chin, 2021).	4
1.2.6 Li et al., <i>Research on particle swarm screening mechanism and performance optimization based on simulated lunar microgravity</i> . Advances in Space Research, 2023 (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).	5
1.3 Solución propuesta	11
1.4 Hipótesis y objetivos.....	11
1.4.1 Hipótesis	11
1.4.2 Objetivos	11
1.5 Metodología	11
2 MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1 Descripción del equipo o sistema a modelar o simular	13
2.2 Marco teórico	13
2.3 Mallado y convergencia de malla.	15
2.3.1 Geometría y parámetros para la comparación Tierra – Luna.....	15
2.3.2 Geometría y parámetros para el estudio en ambiente lunar.	17
CAPÍTULO 3	23
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
3.1 Resultados de malla doble en ambiente terrestre y lunar.	23
3.1.1 Estudio a distintos ángulos de inclinación.	23
3.1.2 Estudio a distintas frecuencias de excitación.	24
3.1.3 Estudio a distintas amplitudes vibratorias.....	26
3.2 Resultados estudio con regolito.	27

3.3 Misión de transporte del harnero.....	29
CAPÍTULO 4	31
4 CONCLUSIONES.....	31
5 Bibliografía	33

Índice de Tablas

Tabla 1. Magnitud de variables tras optimización (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).....	10
Tabla 2. Variables estudiadas y su rango de valores.	12
Tabla 3. Parámetros constantes de las simulaciones de harnero de malla doble (Otto, Kerst, Roloff, Janiga, & Katterfeld, 2018).....	16
Tabla 4. Distribución de tamaño de partícula por porcentaje acumulado.	16
Tabla 5. Parámetros constantes para las simulaciones según parámetro variable.....	17
Tabla 8. Variables utilizados y obtenidos en simulación final de malla doble en ambiente lunar.	17
Tabla 9. Variables utilizados y obtenidos en simulación final de malla doble en ambiente terrestre.	17
Tabla 10. Granulometría basada en la muestra JSC-1A.	19
Tabla 11. Características de la malla y la alimentación se la simulación con malla N° 140.	19
Tabla 12. Parámetros constantes de simulación de malla N° 140.....	20
Tabla 13. Configuración de simulación en la Luna, equivalente a la de mejor desempeño en Tierra.....	20
Tabla 14. Configuraciones adicionales.....	20
Tabla 15. Variables de simulación para la malla ASTM E11 de 40 mm de largo.	21
Tabla 16. Configuraciones de movimiento adicionales para malla ASTM E11.	22
Tabla 17. Eficiencia de las configuraciones estudiadas.....	28
Tabla 18. Largo de malla y su respectiva eficiencia, configuración 3.	28
Tabla 19. Eficiencia de harneado de las configuraciones adicionales de la malla ASTM E11. ...	29
Tabla 20. Requerimiento de cambio de velocidad y consumo de combustible del proceso de alunizaje.....	30

Índice de Figuras

Figura 9. Distribución de composición de regolito lunar en el lado visible (izquierda) y lado oculto (derecha) basado en datos de imágenes multiespectral de la misión Clementine. En azul: tierras altas de anortita, en amarillo basaltos de bajo contenido de Titanio, en rojo basaltos de alto contenido de Titanio (Crawford, 2015; Spudis, Zellner, & Delano, 2002).....	2
Figura 10. Concentración estimada de Helio-3 en partes por billón de masa en el regolito lunar, con: (a) lado cercano, (b) lado lejano. Los contornos blancos muestran las concentraciones en las zonas conocidas como Oceanus Procellarum (izquierda) y Mare Tranquillitatis (derecha) (Crawford, 2015).	3
Figura 11. Mapa de la concentración superficial de Torio en la Luna, en el lado cercano (izquierda) y el lado lejano (derecha) medida usando el espectrómetro de rayos Gamma abordo del Lunar Prospector Spacecraft de la NASA (Crawford, 2015).....	3
Figura 8. Esquema del sistema propuesto por Kawamoto y Chin (Kawamoto & Chin, 2021).....	5
Figura 1. Diagrama del equipo experimental (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).....	6
Figura 2. Diagrama teórico y equipo experimental para la verificación del método de compensación magnética de la gravedad (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).....	6
Figura 3. Comparación de altura obtenida en simulación y en el prototipo de pruebas (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).	7
Figura 4. (a) Relación entre frecuencia vibratoria y eficiencia de harneado. (b) Relación entre frecuencia vibratoria y tiempo de harneado. (c) Relación entre razón de frecuencia vibratoria y eficiencia de harneado. (d) Relación entre razón de frecuencia vibratoria y tiempo de harneado (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).	8
Figura 5. (a) Relación entre amplitud vibratoria y eficiencia de harneado. (b) Relación entre amplitud vibratoria y tiempo de harneado. (c) Relación entre razón de amplitud vibratoria y eficiencia de harneado. (d) Relación entre razón de amplitud vibratoria y tiempo de harneado (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).....	8
Figura 6. (a) Relación entre ángulo de vibración y eficiencia de harneado. (b) Relación entre ángulo de vibración y tiempo de harneado. (c) Relación entre razón de ángulo de vibración y eficiencia de harneado. (d) Relación entre razón de ángulo de vibración y tiempo de harneado (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).....	9
Figura 7. (a) Relación entre el ángulo de inclinación de la malla y la eficiencia de harneado. (b) Relación entre el ángulo de inclinación de la malla y el tiempo de harneado. (c) Relación entre el espaciado de las mallas y la eficiencia de harneado. (d) Relación entre el espaciado de las mallas y el tiempo de harneado (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).	10
Figura 12. Mallas utilizadas en el análisis de sensibilidad, corresponden con los elementos numerados (1) y (2) de la figura, y el ancho es equivalente a 1/12 del ancho del harnero en el que se basa el modelo CAD. Imagen cortesía de M. Moncada (Moncada Merino & Rodríguez Godoy, 2018).....	16
Figura 13. Diagrama de funcionamiento del método SLM (izquierda) y LENS (derecha) (Isachenkov, Chugunov, Akhatov, & Shishkovsky, 2021; He & Liu, 2009).....	18
Figura 14. Distribución de tamaño de partículas para distintas muestras de regolito lunar (Otto, Kerst, Roloff, Janiga, & Katterfeld, 2018).....	18
Figura 15. Modelo CAD de malla ASTM E11 N° 140, de 3x200 mm.....	19
Figura 16. Geometría de la simulación.	21
Figura 17. Eficiencia de flujo inferior del harnero de doble malla a distintos ángulos, en la Tierra y la Luna.	23
Figura 18. PSD en la Luna, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintos ángulos de inclinación.	24
Figura 19. PSD en la Tierra, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintos ángulos de inclinación.	24

Figura 20. Eficiencia de flujo inferior del harnero de doble malla a distintas frecuencias, en la Tierra y la Luna.	25
Figura 21. PSD en la Luna, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintas frecuencias de excitación.	25
Figura 22. PSD en la Tierra, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintas frecuencias de excitación.	26
Figura 23. Eficiencia de flujo inferior del harnero de doble malla a distintas amplitudes, en la Tierra y la Luna.	26
Figura 24. PSD en la Luna, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintas amplitudes vibratorias.....	27
Figura 25. PSD en la Tierra, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintas amplitudes vibratorias.....	27
Figura 26. Proceso de simulación de la malla para regolito, con partículas sobre la fracción de malla.	28
Figura 27. Esquema de misión de alunizaje, considerando la lanzadera en LLO (Donahue, 2020).	29
Figura 28. Aproximación de masa de harnero según la superficie de la malla.	30

Resumen

La minería lunar es un proceso necesario para el establecimiento de bases de operaciones y colonias humanas en nuestro satélite natural, ya que los altos costos de transporte desde la Tierra a la Luna obligan a utilizar los recursos encontrados in situ. Estos recursos pueden ser utilizados para la fabricación de estructuras y maquinaria, como fuente de energía y de oxígeno, estando este último elemento asociado a los componentes del regolito lunar.

El objetivo de este proyecto es evaluar la aplicación de un harnero vibratorio capaz de trabajar en ambiente lunar y con minerales lunares, validado con simulaciones a través del Método de Elementos Discretos (DEM). Para ello se debe caracterizar la granulometría del regolito lunar, así como describir sus propiedades físicas de interés para la simulación, para luego cuantificar mediante simulaciones el desempeño de harneros vibratorios y posteriormente decidir la configuración y geometría de la malla del harnero. Finalmente, se realizará un estudio de la misión de transporte del harnero desde la Tierra hasta la Luna.

Para la caracterización del regolito se recurre a la bibliografía existente, obteniéndose la granulometría de distintas muestras de regolito disponibles gracias a las distintas misiones de exploración lunar realizadas hasta la fecha. Conocidas las propiedades de regolito, se procede a evaluar la eficiencia de un modelo harnero disponible de estudios previos en distintas configuraciones, mediante el estudio de la variación de la eficiencia de harneado a diferentes valores de amplitud vibratoria, frecuencia de excitación e inclinación de malla. Una vez se identifican los efectos de las distintas variables en la eficiencia del proceso de harneado, se estudia una malla de apertura aproximada de 100 micras, con partículas que se ajusten a la granulometría de una muestra de regolito, obteniendo una eficiencia de 0.769.

Adicionalmente, se analiza la factibilidad de enviar un harnero con una capacidad de procesar 3 toneladas métricas por hora de regolito, para lo cual se estudia una misión de alunizaje desde una órbita de inyección trans lunar, según las capacidades actuales del Sistema de Lanzamiento Espacial de la *National Aeronautics and Space Administration*, basados en los estudios de una posible misión tripulada a la Luna.

Se concluye que es posible transportar hacia la Luna un harnero con la capacidad mencionada anteriormente, pues su masa máxima no supera el límite estimado de una misión de alunizaje, y que este harnero tendría una eficiencia de al menos un 76.9%. No se logra establecer una relación entre las variables estudiadas y la eficiencia de la malla propuesta, para lo que se requiere un estudio más profundo.

Palabras clave: Harneros vibratorios, Mineralogía, Minería Lunar.

Abstract

Lunar mining is a necessary process for the establishment of operational bases and human colonies on our natural satellite, as the high costs of transportation from Earth to the Moon necessitate the utilization of in-situ resources. These resources can be used for the manufacturing of structures and machinery, as a source of energy and oxygen, with the latter being associated with lunar regolith components.

The objective of this project is to assess the application of a vibrating screen capable of operating in a lunar environment with lunar minerals, validated through simulations using the Discrete Element Method (DEM). To achieve this, it is necessary to characterize the particle size distribution of lunar regolith, as well as describe its physical properties relevant for simulation. Subsequently, the performance of vibrating screens will be quantified through simulations, leading to the determination of the configuration and mesh geometry of the screen. Finally, a study will be conducted on the transport mission of the screen from Earth to the Moon.

For the characterization of regolith, existing literature is consulted, from which the particle size distribution of different regolith samples is obtained, thanks to various lunar exploration missions conducted to date, was obtained. With the properties of regolith known, an evaluation of the efficiency of an available screen model from previous studies was carried out in different configurations, through a study on the variation in screening efficiency at different values of vibration amplitude, excitation frequency, and mesh inclination. Once the effects of the different variables on the screening process efficiency were understood, a mesh with an approximate opening of 100 microns is studied, using particles that conform to the particle size distribution of a regolith sample, obtaining an efficiency of 0.769.

In addition, the feasibility of sending a screen with a capacity to process 3 metric tons per hour of regolith is analyzed. This involves studying a landing mission from a trans-lunar injection orbit, based on the current capabilities of the National Aeronautics and Space Administration's Space Launch System, as per studies for a possible manned mission to the Moon.

It is concluded that it is feasible to send a screen with the aforementioned capacity, as its maximum mass does not exceed the estimated limit of a landing mission, and this screen would have an efficiency of 76.9%. A direct relationship between the studied variables and the efficiency of the proposed mesh could not be established, indicating the need for further in-depth study.

Keywords: Vibrating screens, Mineralogy, Lunar Mining.

NOMENCLATURA

Acrónimos

DEM	:	Discrete Elements Method
ESA	:	European Space Agency
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration
PSD	:	Particle Size Distribution

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Identificación y cuantificación del problema/oportunidad

La exploración espacial es un motor que impulsa la investigación y el desarrollo tecnológico desde al menos el siglo XX. De todos los cuerpos celestes el más estudiado por el hombre es la Luna, a la cual se han enviado diversas misiones tripuladas y no tripuladas, entre ellas las misiones Apollo (1961-1973), Luna (1959-1976), Kaguya (2007) y Chang'e (2007-2020) que han alunizado u orbitado la Luna (Institute of Space and Astronautical Science, s.f.; European Space Agency, 2018; National Aeronautics and Space Administration, 2022; Li, y otros, 2021). De estas misiones se ha logrado obtener muestras o datos de regolito y rocas lunares, así como estudios desde órbita lunar del regolito en la superficie, y gracias a ello se conoce un aproximado de la composición del suelo lunar y su riqueza en diferentes recursos (Isachenkov, Chugunov, Akhatov, & Shishkovsky, 2021).

Actualmente distintas agencias espaciales como la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la European Space Agency (ESA), además de gobiernos como el de Luxemburgo buscan ampliar la exploración espacial, cuyo siguiente paso corresponde al establecimiento de bases en el satélite desde las cuales realizar misiones de exploración y extracción de minerales, articulándose una carrera por los recursos del espacio cercano a la Tierra (Sherwood, 2019; Filippi, Gillespie, Willson, & Vasile, 2020; Fall & Rovella, 2021).

NASA ya ha iniciado su misión de colonización por medio del proyecto Artemis, consistente una serie de misiones tripuladas y no tripuladas con las que se pretende llevar a humanos a la Luna para el 2024 y tener sistemas habitables en el 2028, además de crear una lanzadera en órbita lunar desde la cual facilitar los siguientes alunizajes (National Aeronautics and Space Administration, 2019).

Por su parte, la ESA tiene pretensiones de crear su propia colonia en el satélite, para lo que se ha creado un consorcio de empresas europeas que estarán encargadas de la investigación y desarrollo de tecnologías necesarias para la colonización, con especial foco manufactura aditiva para la fabricación de estructuras (De Kestelier, Dini, Cesaretti, Colla, & Pambaguian, 2015).

La Administración Espacial Nacional de China fue la primera en alunizar una misión no tripulada en el lado lejano de la Luna, específicamente en el cráter Von Kármán, localizado en la cuenta Atkin en el polo sur lunar, en el marco del proyecto de exploración lunar Chang'e. El lugar del alunizaje fue escogido por ser el más grande y antiguo cráter de la Luna, lo que facilita el estudio de la composición de la corteza lunar. El proyecto Chang'e ha logrado identificar la presencia de agua en el lado lejano de la Luna, además de transportar nuevas muestras de regolito a la Tierra (Zhang, y otros, 2021).

1.2 Estado del arte

Debido a la limitada cantidad de estudios dedicados a la aplicación de maquinaria minera en ambiente espacial, el presente estado del arte incluirá estudios dedicados de forma separada a hornos vibratorios y otros estudios dedicados a la mineralogía de la Luna.

1.2.1 I. Crawford, *Lunar Resources: A Review*, SAGE, 2015 (Crawford, 2015).

Entre los recursos listados por el autor, se encuentra el Aluminio y Titano, presente en el regolito lunar; el Helio-3, material necesario para reacciones de fusión en conjunto con el Deuterio, útil de poder construirse algún reactor de fusión; Torio y Uranio, fuente de energía para reactores de fisión; elementos de tierras raras, como se mencionó anteriormente son de interés debido a su general escasez, pero el autor se abre a la posibilidad de encontrar yacimientos de mayor importancia al aumentar la resolución de las imágenes tomadas de la superficie lunar, pues al momento de escribir el artículo a resolución disponible era de alrededor de 130 km con el instrumento utilizado. En la Figura 1 se puede ver la composición del regolito, en la que se destaca que la anortita posee altas cantidades de Hierro y Aluminio, mientras que los basaltos de las tierras bajas poseen altas concentraciones de Titanio. La composición del regolito será de interés para la extracción de éste, puesto que guiará según los requerimientos de fabricación dónde ubicar los puestos mineros.

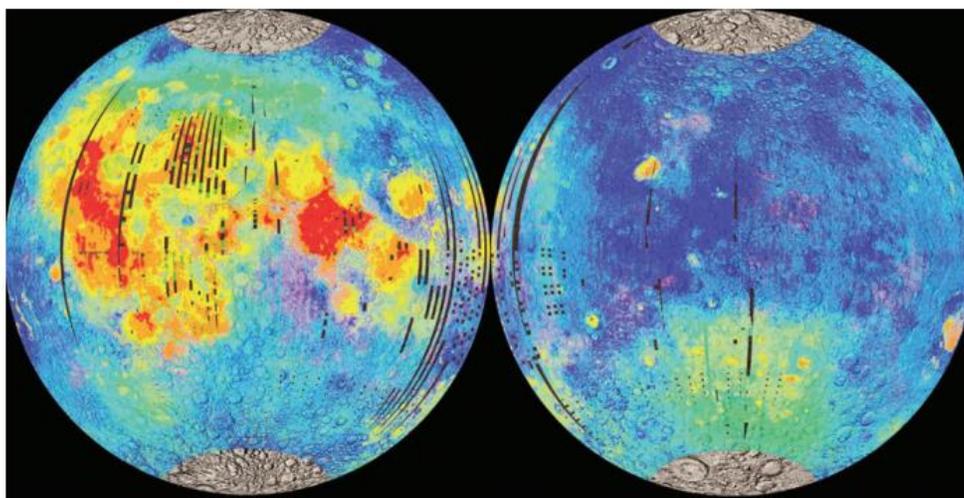


Figura 1. Distribución de composición de regolito lunar en el lado visible (izquierda) y lado oculto (derecha) basado en datos de imágenes multiespectral de la misión Clementine. En azul: tierras altas de anortita, en amarillo basaltos de bajo contenido de Titanio, en rojo basaltos de alto contenido de Titanio (Crawford, 2015; Spudis, Zellner, & Delano, 2002).

En la Figura 2 se ve la concentración de Helio-3, de importancia si es que en el futuro se planea establecer reactores de fusión en la Luna, lo que facilitaría el establecimiento de nuevas colonias gracias el excedente de energía generado, o bien, enviar desde la Luna este material para reactores terrestres, lo que es más probable debido a la complejidad que de instalar un reactor de fusión en la Luna.

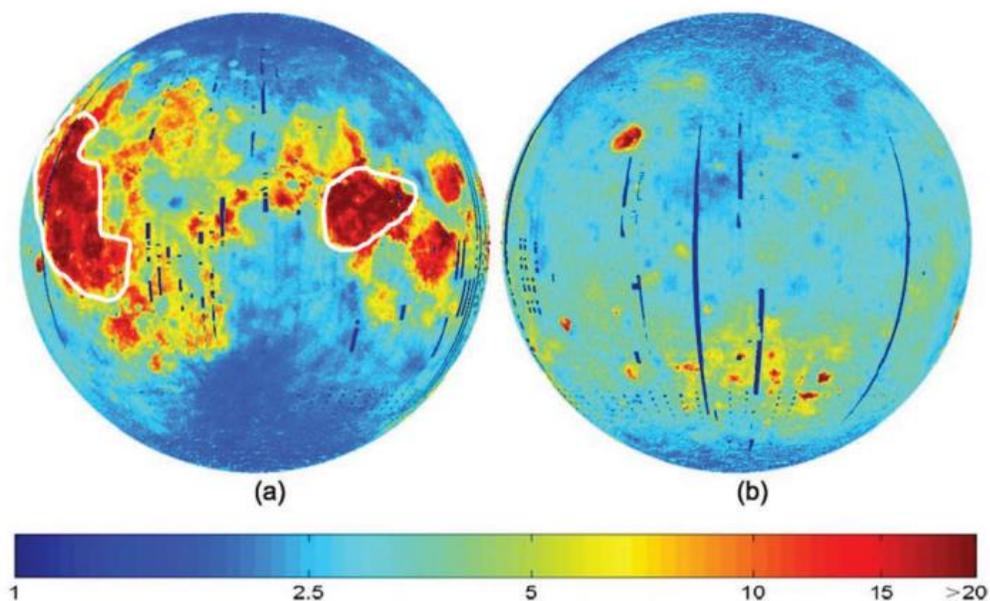


Figura 2. Concentración estimada de Helio-3 en partes por billón de masa en el regolito lunar, con: (a) lado cercano, (b) lado lejano. Los contornos blancos muestran las concentraciones en las zonas conocidas como Oceanus Procellarum (izquierda) y Mare Tranquillitatis (derecha) (Crawford, 2015).

En la Figura 3 se puede ver la concentración de Torio, asociado a la presencia de Elementos de Tierras Raras, cuya disponibilidad en el satélite permitirían suplir la escasez de estos recursos en la Tierra, que son listados por la Unión Europea como materiales de alta prioridad, y cuya extracción estaría limitada por su abundancia en nuestro planeta, así como por los efectos medioambientales de la minería, en caso de estar los yacimientos cerca de zonas de preservación o comunidades humanas.

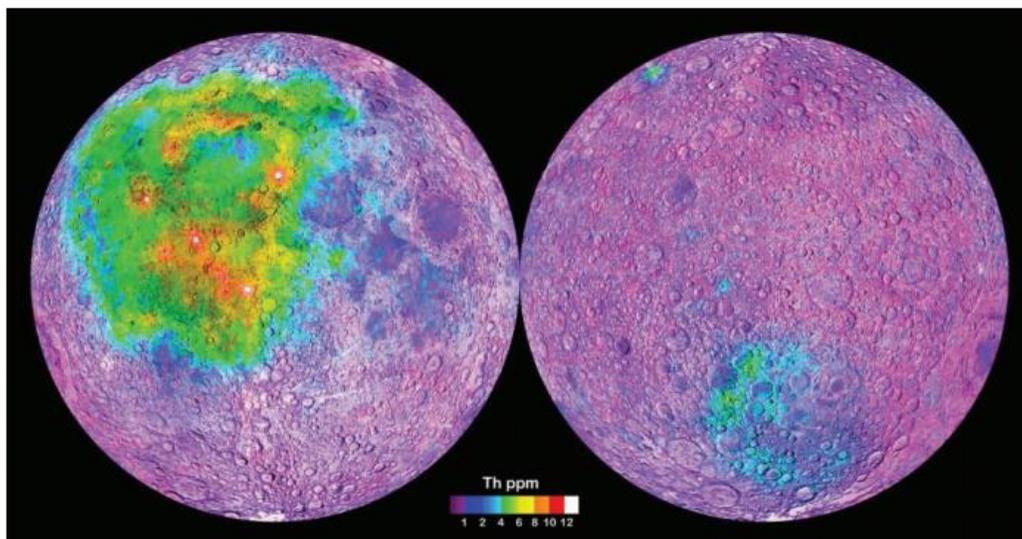


Figura 3. Mapa de la concentración superficial de Torio en la Luna, en el lado cercano (izquierda) y el lado lejano (derecha) medida usando el espectrómetro de rayos Gamma abordo del Lunar Prospector Spacecraft de la NASA (Crawford, 2015).

La importancia de este estudio radica en que muestra los recursos disponibles en la superficie lunar, lo que guiará el Desarrollo minero en el satélite, representando oportunidades de extracción y desarrollo económico, además de guiar los trabajos futuros, que han de concentrarse en un conjunto acotado de materiales lunares.

1.2.2 C. L. McLeod y M. P. S. Krekeler, *Sources of Extraterrestrial Rare Earth Elements: To the Moon and Beyond*, Resources, 2017 (McLeod & Krekeler, 2017).

Según lo expuesto en este estudio, los Elementos de tierras raras (REEs) se encuentran asociados principalmente a minerales que también poseen Potasio (K) y Fósforo (P), conjunto mineral a los que se les denomina KREEPs. Se asocia además la presencia de KREEPs con concentraciones de torio, tal como ocurre en la corteza terrestre, presentándose un mapeo de la concentración de torio para analizar posibles concentraciones de KREEPs. Si bien se menciona que las concentraciones de elementos de tierras raras no son lo suficientemente grandes como para que se consideren menas (Concentraciones menores a 100 ppm), se menciona que debido a la escasez de estos elementos en la Tierra será necesario explotar estos yacimientos. Además, se indica las posibles fuentes de aluminio, hierro y magnesio en la Luna, presentes en distintos componentes del regolito lunar.

1.2.3 L. Zhao et al., *Optimization of a circular vibrating screen based on DEM simulation and Taguchi orthogonal experimental design*, Powder Technology, 2017 (Zhao, Zhao, Bao, & Qinfu, 2017).

Este estudio realizado por Zhao et al. Muestra los resultados de simulación mediante el algoritmo del Método de Elementos Discretos (DEM) de la distribución de material sobre harneros, y muestran la incidencia de la amplitud de desplazamiento, frecuencia de la vibración y ángulo de inclinación de la malla del harnero sobre la eficiencia del proceso de separación. Además, se estudia el efecto de alterar a velocidad media de las partículas, es decir, aumentar la rapidez del proceso, sobre la misma eficiencia de separación.

Este trabajo concluye que existe un compromiso entre la rapidez del proceso de separación y la eficiencia del harnero, siendo inversamente proporcionales, y que las simulaciones mediante partículas no esféricas, es decir, con geometrías irregulares predefinidas, tienen resultados más cercanos a los que se obtuvieron mediante un proceso experimental que fue utilizado como validación del modelo DEM.

1.2.4 H. Aghlmandi, *Discrete element modelling of vibrating screens*, 2018 (Aghlmandi Harzanagh, Caner Orhan, & Levent Ergun, 2018)

Este trabajo realizado por Aghlmandi et al. analiza cómo afecta la velocidad de alimentación, la inclinación de la estructura y las variables vibratorias (incluyendo el ángulo de vibración) en la eficiencia del proceso de separación. Se concluye para el caso de estudio que vibraciones a frecuencias cercanas a los 15 Hz, con amplitud de 2 mm y una inclinación de la malla de 5°, constituyen la mejor combinación de variables para aumentar la eficiencia.

1.2.5 H. Kawamoto & K. Chin, *Particle-Size Classification of Lunar Regolith through Inclined Vibrating Tube*. (Kawamoto & Chin, 2021).

Kawamoto y Chin propusieron un método de clasificación de partículas de regolito lunar basados en el efecto de nuez de Brasil (*Brazil nut effect*) (Schröter, Ulrich, Kreft, Swift, & Swinney, 2006),

efecto consecuencia de la excitación vibratoria de una mezcla de partículas de distinto tamaño, según el cual los elementos de mayor tamaño tienden a posicionarse por sobre los elementos más pequeños. Para ello, proponen utilizar un tubo inclinado, sometido a un movimiento oscilatorio en un plano vertical que por el que pasa el eje del cilindro, clasificando las partículas que atraviesan el tubo en dirección ascendente y descendente gracias al movimiento ascendente de las partículas más gruesas. Un esquema del sistema propuesto se muestra en la Figura 4.

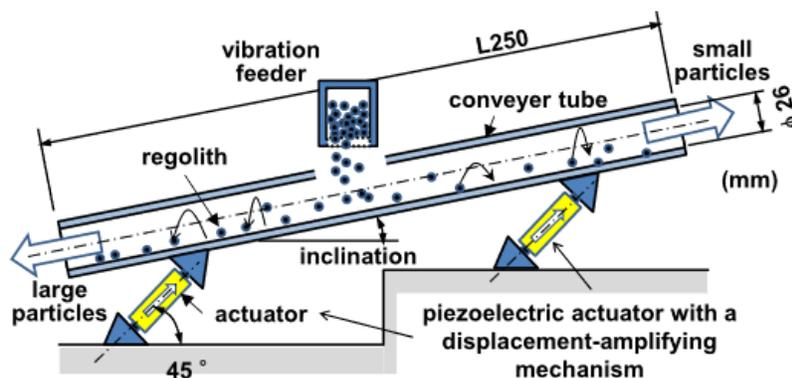


Figura 4. Esquema del sistema propuesto por Kawamoto y Chin (Kawamoto & Chin, 2021).

1.2.6 Li et al., *Research on particle swarm screening mechanism and performance optimization based on simulated lunar microgravity*. *Advances in Space Research*, 2023 (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).

El trabajo realizado por los autores cuantifica la eficiencia y tiempo de harneado bajo gravedad lunar, mediante la aplicación del Método de Elementos Discretos, además de realizar una validación de los resultados mediante un banco de ensayos que simula la microgravedad de la Luna al someter las partículas del proceso experimental a un campo electromagnético.

La validación experimental se realizó con una bobina de Helmholtz-Maxwell, generando un campo magnético en el cual se ubica un vibrador simple que desplaza una partícula encapsulada dentro de un tubo a presión controlada durante su movimiento armónico. La altura alcanzada por las partículas es registrada mediante video, y se mide para distintas presiones de aire dentro del tubo de ensayos en el que se encuentran. Los resultados del proceso experimental son contrastados con los resultados numéricos obtenidos para la misma situación simulada utilizando DEM, validando la aplicación de DEM para la simulación de movimiento de partículas en microgravedad. Un diagrama con fotos del montaje experimental se puede ver en la Figura 5, con todas las partes necesarias para la experiencia, excepto la cámara de video utilizada para la medición del desplazamiento. Además, en la Figura 6 se puede ver un diagrama del funcionamiento del sistema, con una comparación con lo que se apreciaría en la simulación DEM.

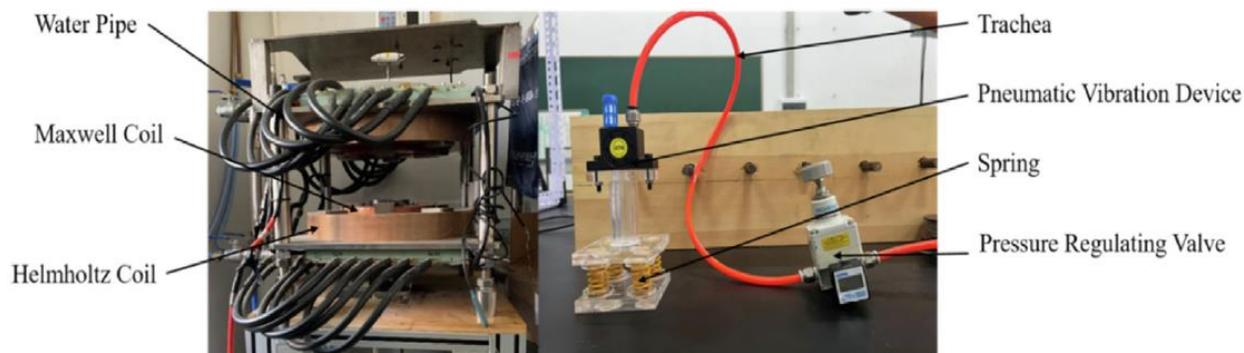


Figura 5. Diagrama del equipo experimental (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).

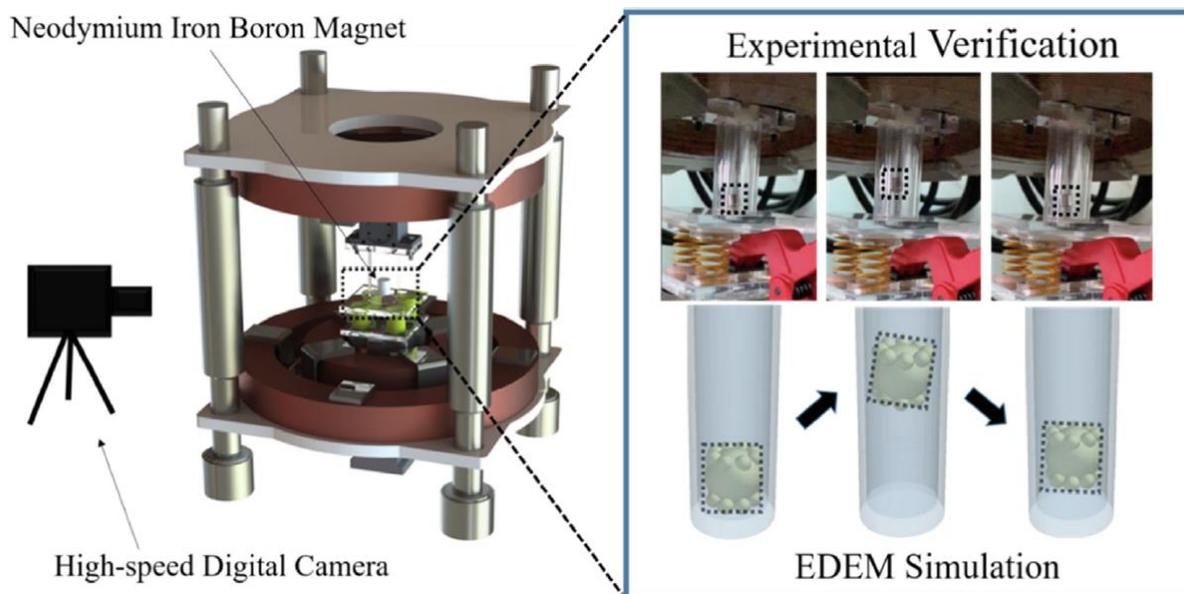


Figura 6. Diagrama teórico y equipo experimental para la verificación del método de compensación magnética de la gravedad (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).

En la Figura 7 se puede ver la altura obtenida tanto en la propuesta experimental como en la simulación DEM, en base a lo cual los autores concluyen que los resultados de la simulación son consistentes con lo que se experimenta en la realidad, dando por explicación para las diferencias que se aprecian a los problemas que suponen las variaciones de distancia entre la partícula y las bobinas para cada caso de estudio, lo que produce una variación en las fuerzas de cuerpo de la partícula.

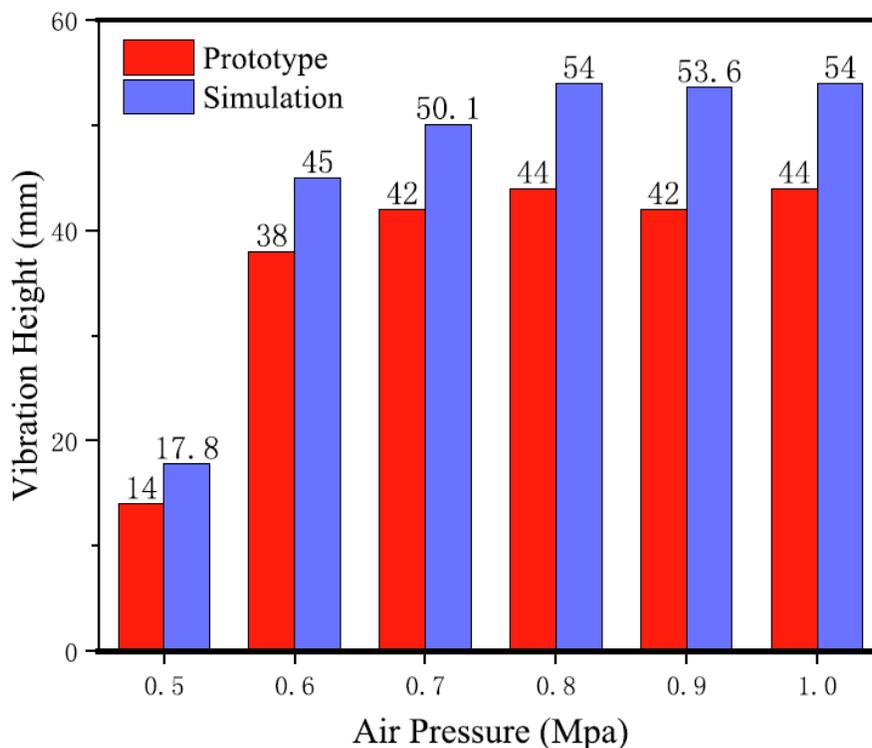


Figura 7. Comparación de altura obtenida en simulación y en el prototipo de pruebas (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).

Este trabajo se realiza con un harnero de doble malla, con movimiento lineal, y se estudia el impacto en la eficiencia y tiempo de harneado de cinco variables: frecuencia, amplitud, ángulo de dirección de la vibración, ángulo de inclinación de las mallas, y la distancia entre las dos mallas.

La primera parte del estudio trata el efecto de la proporción entre las magnitudes de amplitud, frecuencia y ángulo de inclinación vibratoria entre las mallas superiores e inferiores sobre la eficiencia y el tiempo de harneado. Se designa a/b a la relación de una magnitud de la malla superior respecto de la inferior, y b/a a la relación de una magnitud de la malla inferior respecto de la superior. Además, se define el factor k_d como el factor de tamaño de partícula, indicando $k_d = 1$ que la partícula es del tamaño de la abertura de la malla, y $k_d < 1$ un tamaño menor que el de la abertura. Así, se designa cualitativamente al grupo de partículas con $k_d < 0.9$ como partículas permeables, y al grupo de partículas con $0.9 < k_d < 1$ como partículas semi permeables, por lo cual se realiza un análisis para dos grupos distintos de partículas, el primero de aquellas que incluyen solo partículas permeables y el segundo incluyendo también partículas semi permeables. En la Figura 8 se puede ver los efectos de alterar las razones a/b y b/a para la frecuencia de vibración en una vecindad de 1, en la Figura 9 se puede ver el caso homólogo para la amplitud vibratoria, y en la Figura 10 para la dirección de vibración.

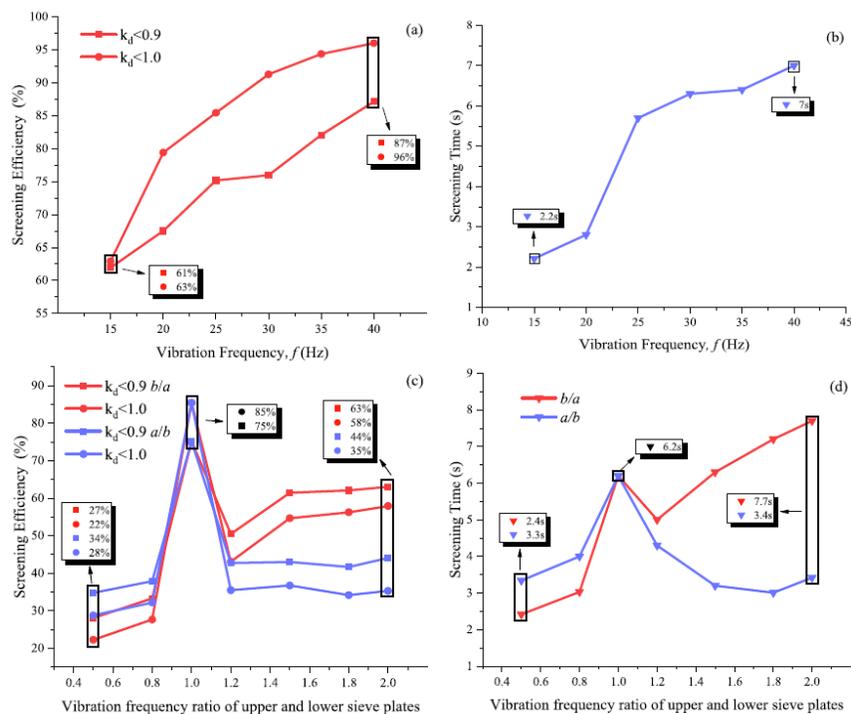


Figure 8. (a) Relación entre frecuencia vibratoria y eficiencia de harneado. (b) Relación entre frecuencia vibratoria y tiempo de harneado. (c) Relación entre razón de frecuencia vibratoria y eficiencia de harneado. (d) Relación entre razón de frecuencia vibratoria y tiempo de harneado (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).

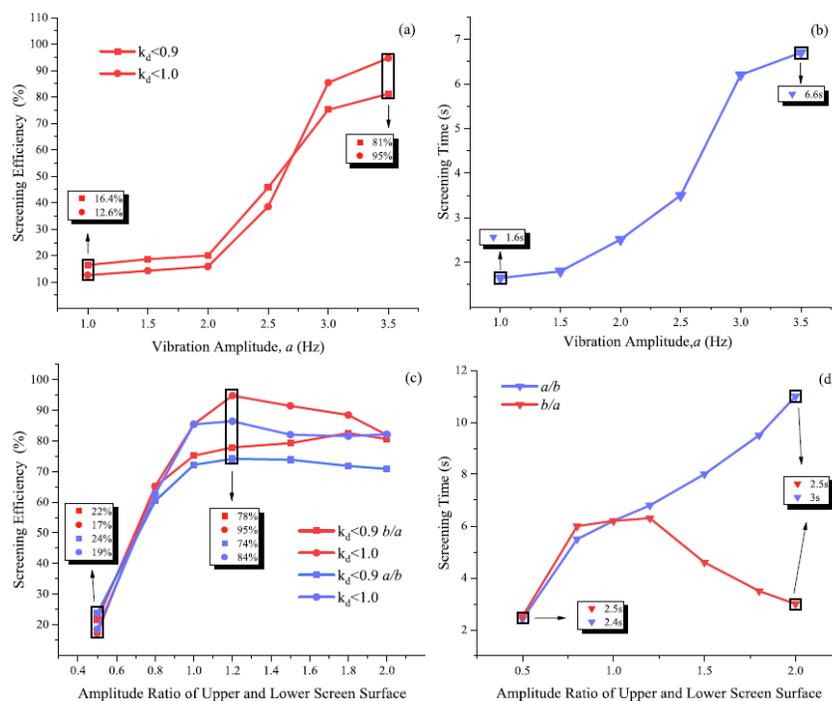


Figure 9. (a) Relación entre amplitud vibratoria y eficiencia de harneado. (b) Relación entre amplitud vibratoria y tiempo de harneado. (c) Relación entre razón de amplitud vibratoria y eficiencia de harneado. (d) Relación entre razón de amplitud vibratoria y tiempo de harneado (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).

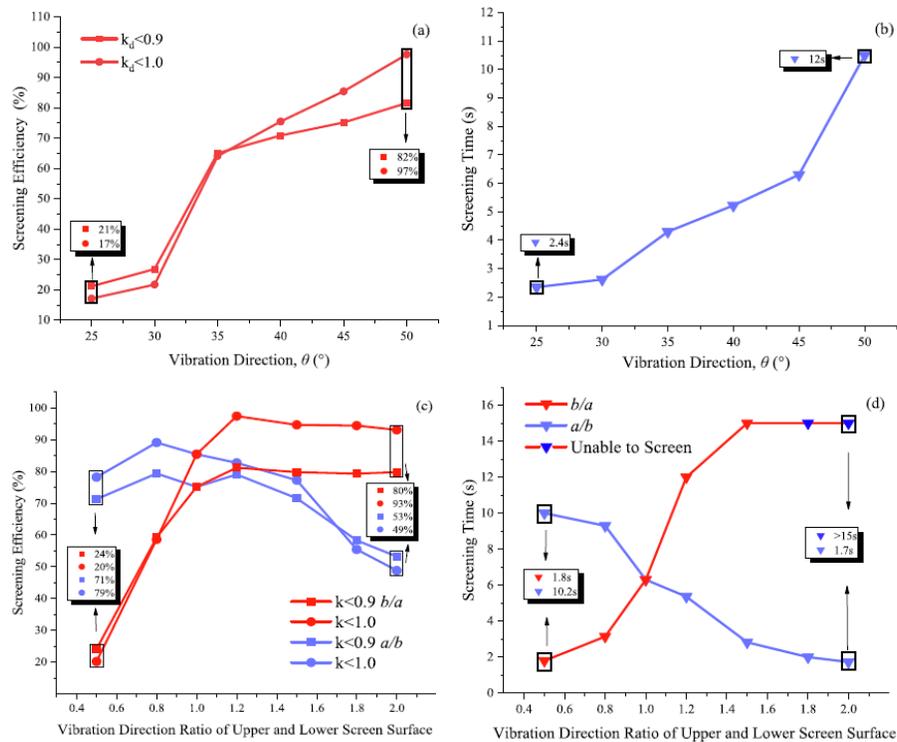


Figura 10. (a) Relación entre ángulo de vibración y eficiencia de harneado. (b) Relación entre ángulo de vibración y tiempo de harneado. (c) Relación entre razón de ángulo de vibración y eficiencia de harneado. (d) Relación entre razón de ángulo de vibración y tiempo de harneado (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).

De los resultados anteriores se concluye que para la optimización no se considerará una razón distinta de 1 para la frecuencia de vibración de ambas mallas; para la amplitud, se considerará en la solamente el modo a/b de variaciones proporcionales; para la dirección de vibración será considerado solamente el modo b/a , puesto que es el modo más estable en cuanto a eficiencia de harneado.

A continuación, en la Figura 11, se puede ver los resultados de la simulación en distintos valores de ángulo de inclinación de malla y el espaciado.

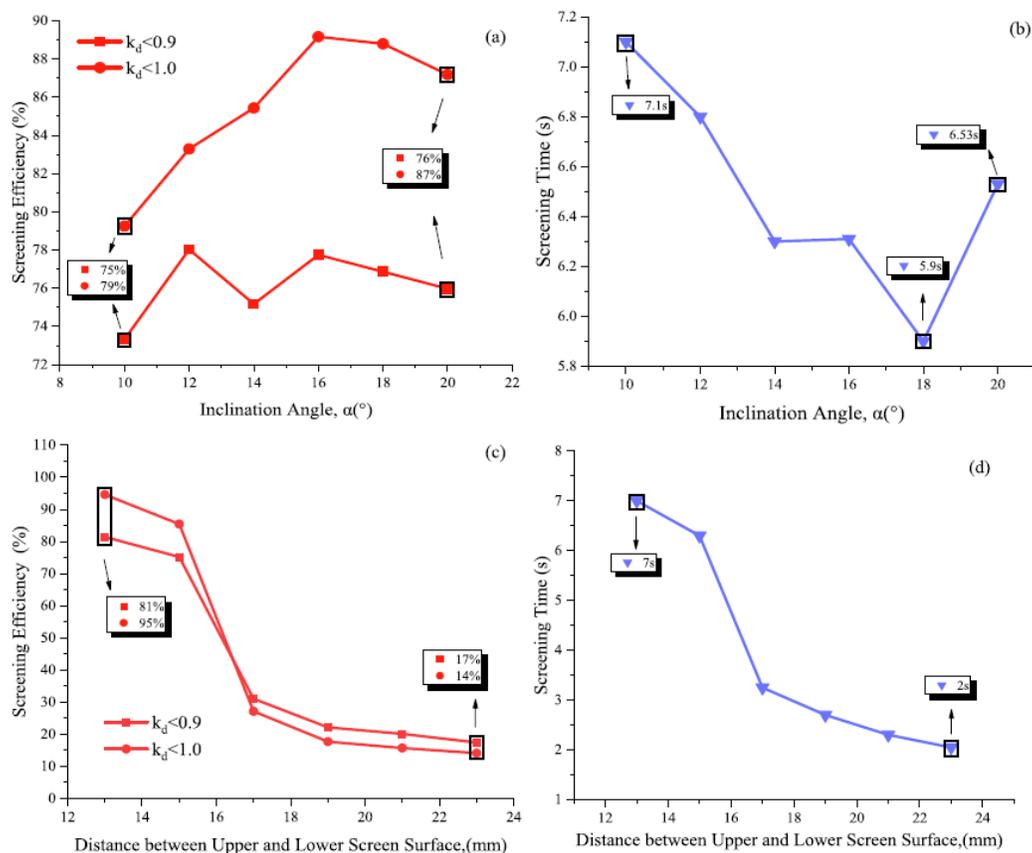


Figura 11. (a) Relación entre el ángulo de inclinación de la malla y la eficiencia de harneado. (b) Relación entre el ángulo de inclinación de la malla y el tiempo de harneado. (c) Relación entre el espaciado de las mallas y la eficiencia de harneado. (d) Relación entre el espaciado de las mallas y el tiempo de harneado (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).

Los resultados obtenidos fueron optimizados mediante una red neuronal, optimizando el tiempo y la eficiencia de harneado, obteniendo que los valores óptimos son los mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Magnitud de variables tras optimización (Li, Si, Jia, Xiao, & Tong, 2023).

Variable	Magnitud
Frecuencia vibratoria	43.58 Hz
Amplitud	3.05 mm
Razón de amplitud para malla inferior	1.83
Dirección de vibración	35.05 $^{\circ}$
Razón de ángulo de dirección para malla superior	1.02
Ángulo de inclinación de malla	18.35 $^{\circ}$
Espaciado entre mallas	17.42 mm

Una posible mejora al estudio realizado es el aumento de la cantidad de partículas utilizadas, con tal de obtener un flujo constante de partículas sobre las mallas del harnero, para así simular correctamente la operación continua del harnero, puesto que en el presente trabajo solo se utilizan 8000 partículas. También sería necesario utilizar una malla con aperturas más pequeñas, ya que en este estudio se utiliza una apertura de 2 milímetros, tamaño que, como se verá más adelante, es mayor a que la mayor parte de las partículas que se encuentran en el regolito lunar.

Los puntos más interesantes de este trabajo son la utilización de partículas ferromagnéticas y bobinas para simular el ambiente de microgravedad, idea que puede ser utilizada para validar trabajos futuros en gravedad menor a la terrestre. Además, la utilización de redes neuronales para la optimización de las variables consideradas abre la posibilidad a aplicar un proceso similar para optimizar las variables que se consideren en el proyecto a desarrollar, pero abre a una falta dentro de lo recién mostrado, pues no se realiza una simulación de comprobación con las magnitudes obtenidas para verificar si estas logran una eficiencia superior o un menor tiempo de harneado respecto de las simulaciones realizadas para la obtención de los datos de entrada.

1.3 Solución propuesta

Se propone estudiar la eficiencia de distintas mallas de harneros vibratorios bajo gravedad lunar, mediante el método de elementos discretos, utilizando el software Rocky DEM, con tal de proponer un diseño conceptual de un harnero que sea efectivo en la clasificación del regolito lunar. Para ello se utiliza la granulometría conocida del suelo lunar, y las propiedades mecánicas que están disponibles en la literatura. Una vez propuesta la geometría y disposición de la o las mallas a utilizar, se estudia la factibilidad de transportar el harnero que las contiene hacia la Luna, mediante la aplicación de la ecuación de Tsiolkovski.

1.4 Hipótesis y objetivos

1.4.1 Hipótesis

Es posible lograr una eficiencia de harneado superior 0.8 en un ambiente de condición de gravedad lunar simulada.

1.4.2 Objetivos

1.4.2.1 Objetivo general

Verificar la aplicación de un harnero vibratorio capaz de trabajar en ambiente lunar y con minerales lunares, validado con simulaciones computacionales a través del método de elementos discretos.

1.4.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar las propiedades físicas de importancia del regolito lunar e identificar los minerales disponibles, clasificando según su abundancia e importancia económica y tecnológica, identificando las propiedades físicas para la operación del harnero.
2. Cuantificar el desempeño de harneros vibratorios en ambiente lunar mediante el método de elementos discretos.
3. Analizar la factibilidad del transporte del harnero desde la Tierra a la Luna mediante la ecuación del cohete de Tsiolkovsky.

1.5 Metodología

La simulación numérica es realizada en el software Rocky DEM, por la facilidad de manipular las variables vibratorias y gravitacionales, facilitando el trabajo de simulación del trabajo de harneros en ambiente lunar. Para la modelización del harnero se modelará solamente la malla, además de considerar un ancho correspondiente a 1/12 del ancho total esperado para disminuir el coste computacional. Las partículas utilizadas serán esféricas para disminuir el coste computacional.

Para evitar las pérdidas laterales de partículas se utilizan fronteras laterales periódicas. Además, basado en el trabajo de Aghlmandi (Aghlmandi Harzanagh, Caner Orhan, & Levent Ergun, 2018), se realizará un estudio de la sensibilidad de la eficiencia de harneado a las siguientes variables, indicadas en la Tabla 2 donde se puede apreciar además el rango en el que se realizará la variación.

Tabla 2. Variables estudiadas y su rango de valores.

Variable	Rango
Amplitud [mm]	3-6
Frecuencia [Hz]	15-30
Inclinación de la malla [°]	5-20

Cada una de estas variables se estudia dejando las demás fijas, además de estudiarse 4 casos de cada variable para condiciones terrestres y lunares, abarcando los límites de cada rango y siendo los valores intermedios equiespaciados respecto de los demás.

El diseño de la propuesta nueva de mallado de harnero se realizará utilizando el software Inventor 2021, diseño que será validado con simulaciones en Rocky DEM para obtener su eficiencia en condiciones óptimas según lo obtenido en el estudio previo.

Para la obtención de la curva de predicción de eficiencia, se utilizará el método de mínimos cuadrados por medio de un algoritmo en el ambiente MATLAB, basado en los resultados del estudio inicial.

Para aplicar la ecuación de Tsiolkovski (1) se recurrirá a misiones pasadas de alunizaje, considerando también la infraestructura planificada para la instalación de misiones lunares, a fin de realizar una aproximación del combustible necesario para el transporte, así como si es posible trasladar la masa total del harnero en un solo lanzamiento. La masa del harnero será estimada con la información disponible de proveedores en línea, y se considerará que estará construido en mayor parte en acero, en primera instancia, y en aluminio, en caso de que el acero se pruebe demasiado pesado para la aplicación.

$$\frac{\Delta m}{m} = 1 - e^{-\frac{\Delta v}{I_{sp}g_0}} \quad (1)$$

CAPÍTULO 2

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del equipo o sistema a modelar o simular

El equipo por modelar consiste en una malla de harnero, reducida en primera instancia a una cuarta parte del ancho total de la malla, en el ambiente Rocky DEM. La malla se encuentra sometida a un movimiento vibratorio, bajo condiciones de gravedad lunar o terrestre según el caso de estudio, dentro de un dominio tridimensional definido por un prisma rectangular. Dentro del dominio, los límites laterales restituyen las partículas que lo atraviesan en el límite opuesto, de modo de simular el flujo en una sección central del harnero, mientras que los demás límites aniquilan las partículas que los atraviesan, constituyendo estos la única forma de eliminación de las partículas que entran.

Las simulaciones para la clasificación de regolito son realizadas en primera instancia utilizando mallas de la norma ASTM E-11, con límites establecidos de la misma forma que para la simulación anterior. Más adelante, en la Figura 26 se puede ver una captura del proceso de simulación, en la que se aprecia la malla utilizada, las partículas esféricas que representan al regolito, y los límites del dominio de la simulación, así como el cuadrilátero que demarca la alimentación de partículas para el sistema.

2.2 Marco teórico

El Método de Elementos Discretos fue originalmente propuesto por Cundall y Strack (Cundall & Strack, 1979; Moncada Merino & Rodríguez Godoy, 2018), sin embargo, el modelo de contacto utilizado en este estudio, a través de Rocky DEM, es el propuesto por Walton y Braun, conocido como modelo hysterético de resortes lineales (Walton & Braun, 1986; ESSS, 2020). Este modelo se puede apreciar en las ecuaciones (2) y (3), que se presentan a continuación (ESSS, 2020):

$$F_{n,j} = \begin{cases} \min(K_{nl} \cdot s_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu} \cdot \Delta s_n), & \text{si } \Delta s_n \geq 0 \\ \max(F_n^{t-\Delta t} + K_{nu} \cdot \Delta s_n, \lambda \cdot K_{nl} \cdot s_n^t), & \text{si } \Delta s_n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta s_n = s_n^t - s_n^{t-\Delta t} \quad (3)$$

Donde:

- F_n^t y $F_n^{t-\Delta t}$ son las fuerzas de contacto elastoplástico en el instante t y $t - \Delta t$, respectivamente, donde Δt es el paso de tiempo.
- Δs_n es el cambio de en la superposición de las partículas, que en este caso son esféricas, por lo que la distancia se calcula entre centros de ambas en consideración con los radios de cada partícula en contacto. Se asume positivo si las partículas se están acercando, y negativo si se están alejando. s_n^t y $s_n^{t-\Delta t}$ son la superposición en los instantes t y $t - \Delta t$.
- K_{nl} y K_{nu} son los valores de rigidez de contacto de carga y descarga. Estos valores se calculan a partir del módulo de Young de las partículas.

- λ es una constante adimensional, cuyo valor para Rocky es de 0.001. La parte de la expresión en la que se encuentra este término asegura que la fuerza de contacto normal se haga cero cuando la superposición de partículas sea también cero.

Para la fuerza tangencial se utiliza, por otra parte, el modelo de resortes lineales con límite de Coulomb, definido por la siguiente relación:

$$\mathbf{F}_\tau^t = \min(|F_t'|, \mu F_{n,j}) \frac{\mathbf{F}_t'}{|F_t'|} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{\tau,e}^t = \mathbf{F}_\tau^{t-\Delta t} - K_\tau \Delta \mathbf{s}_\tau \quad (5)$$

$$K_\tau = r_K K_{nl} \quad (6)$$

Donde:

- $\mathbf{F}_\tau^{t-\Delta t}$ es la fuerza de contacto tangencial del instante anterior.
- $\Delta \mathbf{s}_\tau$ es el desplazamiento tangencial relativo de las partículas durante un paso de tiempo.
- K_τ es la rigidez tangencial.
- K_{nl} es la rigidez de contacto en carga.
- r_K es la razón de rigidez tangencial, propia de la interacción entre dos materiales.
- \mathbf{F}_τ^t es la fuerza de contacto normal en el instante estudiado.
- μ es el coeficiente de roce, que será el estático o el dinámico dependiendo de si hay o no deslizamiento.

El modelo de fricción rodante utilizado se presenta en la ecuación (7), siendo este modelo en encargado de acercar el comportamiento de resistencia a la rodadura de las partículas simuladas, que en la realidad no son esféricas, dentro del modelo de partículas esféricas utilizado en la presente investigación.

$$\mathbf{M}_r = -\mu_r |r| F_n \frac{\boldsymbol{\omega}}{|\boldsymbol{\omega}|} \quad (7)$$

En esta ecuación \mathbf{M}_r es el momento de par que experimenta la partícula estudiada, μ_r es el coeficiente de fricción estática de los cuerpos que interactúan, F_n es la magnitud de la fuerza normal de contacto entre la partícula y otro cuerpo, y $\boldsymbol{\omega}$ es la velocidad angular de la partícula.

Las ecuaciones del movimiento que gobierna a cada i -ésima partícula son las que se presentan a continuación. Como se puede apreciar, el movimiento de las partículas está definido en parte por la magnitud de la aceleración por gravedad, variable que es estudiada en este trabajo.

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^N \mathbf{F}_{ij} \quad (8)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^N \mathbf{T}_{ij} \quad (9)$$

Para definir la eficiencia del proceso de separación por medio de harneros se utilizan dos definiciones auxiliares de eficiencia: la eficiencia del flujo inferior (10) y la eficiencia del flujo superior (11), en referencia a los dos flujos de material resultantes del proceso de separación. La definición de cada eficiencia se presenta a continuación. Para el flujo inferior se tiene la siguiente definición de eficiencia,

$$E_u = \frac{\dot{m}_{u,U}}{\dot{m}_{u,F}} \quad (10)$$

Donde E_u es la eficiencia basada en el flujo inferior, de partículas menores que el tamaño de separación de la malla, $\dot{m}_{u,U}$ es el flujo de material de menor tamaño que los agujeros de la malla en la salida inferior, y $\dot{m}_{u,F}$ es el flujo de material de menor tamaño que los agujeros de la malla en la alimentación.

Para el flujo superior la definición de eficiencia es similar a la definición para el flujo inferior, y se tiene que es como sigue:

$$E_o = \frac{\dot{m}_{o,O}}{\dot{m}_{o,F}} \quad (11)$$

Donde E_o es la eficiencia basada en el flujo superior, de partículas mayores que el tamaño de separación de la malla, $\dot{m}_{o,O}$ es el flujo de material de mayor tamaño que los agujeros de la malla en la salida superior, y $\dot{m}_{o,F}$ es el flujo de material de mayor tamaño que los agujeros de la malla en la alimentación.

Por último, la eficiencia global del proceso de harneado E se define en función de la eficiencia de flujo superior y la eficiencia del flujo inferior.

$$E = E_o \cdot E_u \quad (12)$$

Para este estudio se utilizará la eficiencia de flujo inferior descrita en (10), pues describe la capacidad del harnero de separar partículas evitando que aquellas que cumplen con el criterio de separación vuelvan a ser procesadas, disminuyendo efectivamente el consumo de energía del proceso de conminución.

2.3 Mallado y convergencia de malla.

El primer grupo de simulaciones utiliza una malla de un harnero que opera en condiciones terrestres, y se estudia su desempeño en condiciones lunares, con tal de conocer los efectos de la gravedad en el desempeño del proceso de harneado. El segundo grupo de simulaciones utiliza una malla de apertura tal que logra clasificar un grupo de partículas con distribución de tamaño similar a una de las muestras disponibles de regolito. Las características de cada una de estas mallas y los parámetros asociados a cada una se presentan en las siguientes secciones.

2.3.1 Geometría y parámetros para la comparación Tierra – Luna.

Para cuantificar las diferencias entre la operación en la Tierra y la Luna se hace necesario estudiar cómo afectan los distintos parámetros que intervienen en la operación del harnero, como son amplitud vibratoria, frecuencia de excitación, e inclinación de la malla.

Los siguientes resultados se obtuvieron para simulaciones de un harnero de doble, con partículas esféricas y un movimiento vibracional de órbita circular. Los parámetros generales de las distintas simulaciones realizadas en Rocky DEM se presentan a continuación, en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros constantes de las simulaciones de harnero de malla doble (Otto, Kerst, Roloff, Janiga, & Katterfeld, 2018).

Parámetro	Valor
Duración de simulación	120 s
Paso de tiempo	0.05 s
Retraso de sobreposición de partículas	0.025 s
Alimentación	20 t/h
Densidad de partículas	2,997.68 kg/m ³
Módulo de elasticidad de partículas	5 MPa
Número de Poisson de partículas	0.3
Cantidad de partículas	148,648
Coef. de fricción rodante entre partículas	0.7
Coef. de fricción estática entre partículas	0.3
Coef. de fricción partícula - pared	0.465

La granulometría del estudio fue escogida de tal forma que se tenga una distribución uniforme en cantidad de partículas para los tres flujos resultantes, y se muestra a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Distribución de tamaño de partícula por porcentaje acumulado.

Tamaño de partícula [mm]	Porcentaje acumulado [%]
30	100
20	50
11	25

Además, las mallas tienen un largo de 8.2 m, y su distribución horizontal es como se indica en la Figura 12.

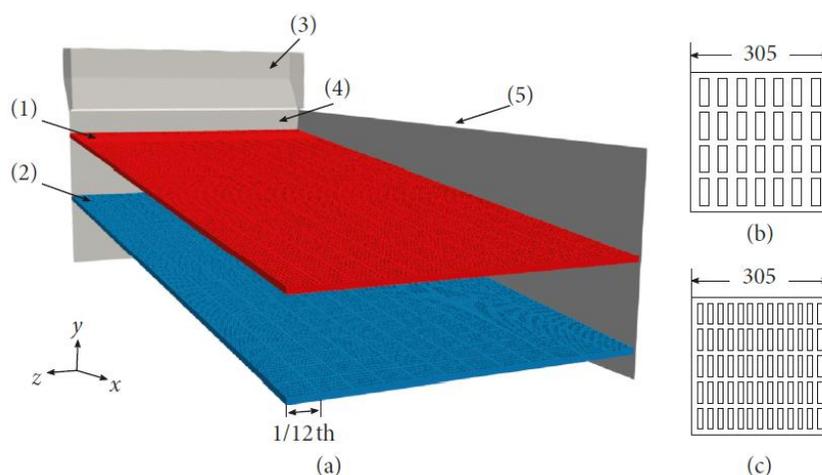


Figura 12. Mallas utilizadas en el análisis de sensibilidad, corresponden con los elementos numerados (1) y (2) de la figura, y el ancho es equivalente a 1/12 del ancho del harnero en el que se basa el modelo CAD. Imagen cortesía de M. Moncada (Moncada Merino & Rodríguez Godoy, 2018).

Para la simulación a distinta inclinación se utilizaron valores de 5°, 10°, 15° y 20°, en simulaciones diferentes, para un total de 8 simulaciones, 4 por cada aceleración de gravedad. De forma similar

a la anterior, se realizaron simulaciones en ambiente lunar y terrestre a distintas frecuencias de inclinación. Para ello se estudió la eficiencia a 15, 20, 25 y 30 Hz, en ambos ambientes. La última variable de interés simulada es la amplitud vibratoria del movimiento de la malla, que varía entre los valores de 2, 3, 4 y 5 mm de amplitud. Los valores constantes de cada una de estas simulaciones se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros constantes para las simulaciones según parámetro variable.

Simulación	Parámetro	Valor
Inclinación variable	Amplitud de vibración	5 mm
	Frecuencia de vibración	20 Hz
Frecuencia variable	Amplitud de vibración	4 mm
	Inclinación de malla	15 °
Amplitud variable	Frecuencia de vibración	15 Hz
	Inclinación de malla	15 °

Para finalizar esta sección del estudio, utilizando los resultados que se expondrán más adelante, se realizó una simulación con la combinación de parámetros que entregaron un mejor desempeño. Las características de estas simulaciones se ven en la Tabla 6 para el ambiente lunar, y en la Tabla 7 para el ambiente terrestre, donde además se puede ver la eficiencia obtenida para cada una de las configuraciones.

Tabla 6. Variables utilizados y obtenidos en simulación final de malla doble en ambiente lunar.

Variable	Valor
Frecuencia vibratoria	15 Hz
Inclinación de malla	15 °
Amplitud vibratoria	3 mm
Gravedad	1.62 m/s ²
Eficiencia global	0.7706

Tabla 7. Variables utilizados y obtenidos en simulación final de malla doble en ambiente terrestre.

Variable	Valor
Frecuencia vibratoria	15 Hz
Inclinación de malla	15 °
Amplitud vibratoria	4 mm
Gravedad	9.81 m/s ²
Eficiencia global	0.4840

2.3.2 Geometría y parámetros para el estudio en ambiente lunar.

Según lo expuesto por Isachenkov et al. (Isachenkov, Chugunov, Akhatov, & Shishkovsky, 2021), dos de los métodos de fabricación que pueden ser utilizados en la Luna, con regolito como materia prima, son los conocidos como *Selective Laser Melting (SLM)* y *Laser Engineered Net Shaping (LENS)*, que requerirían de partículas de 50 y 100 micras respectivamente. Se puede apreciar en la Figura 13 un diagrama de funcionamiento de estos procesos de manufactura aditiva, utilizando la granulometría requerida por estos procesos como guía para la selección de la malla de harnero para regolito lunar.

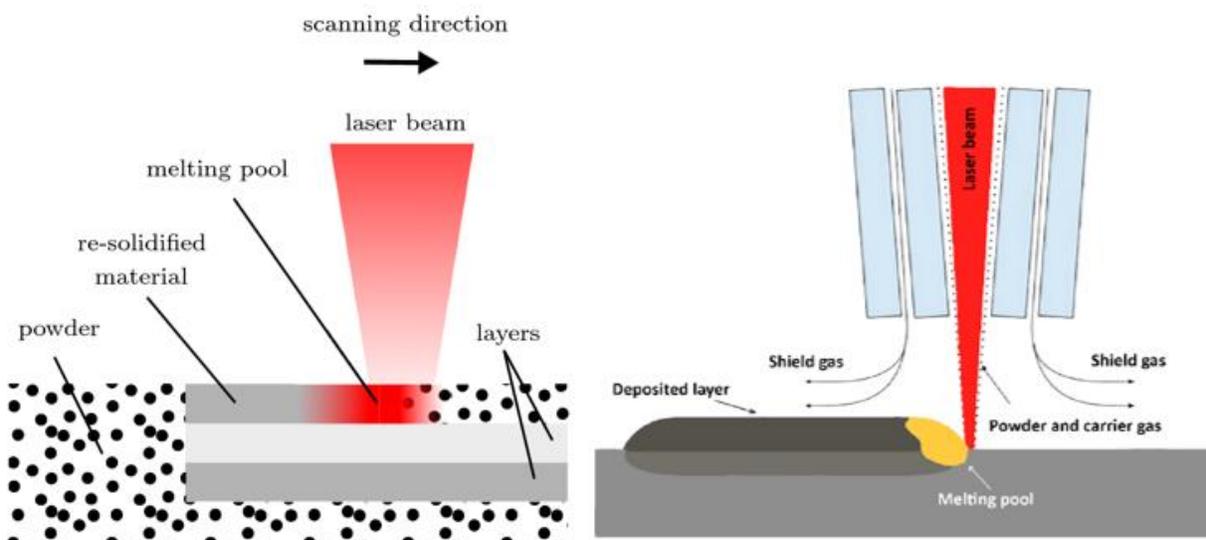


Figura 13. Diagrama de funcionamiento del método SLM (izquierda) y LENS (derecha) (Isachenkov, Chugunov, Akhatov, & Shishkovsky, 2021; He & Liu, 2009)

Según lo expuesto por Otto (Otto, Kerst, Roloff, Janiga, & Katterfeld, 2018), las partículas de regolito tienen una distribución de tamaño que varía entre las 10 micras y 10 milímetros de tamaño de malla, según se puede ver en la Figura 14, por lo que se requeriría de un proceso de separación capaz de dividir previamente las partículas, para luego proceder con la conminución del material de mayor tamaño.

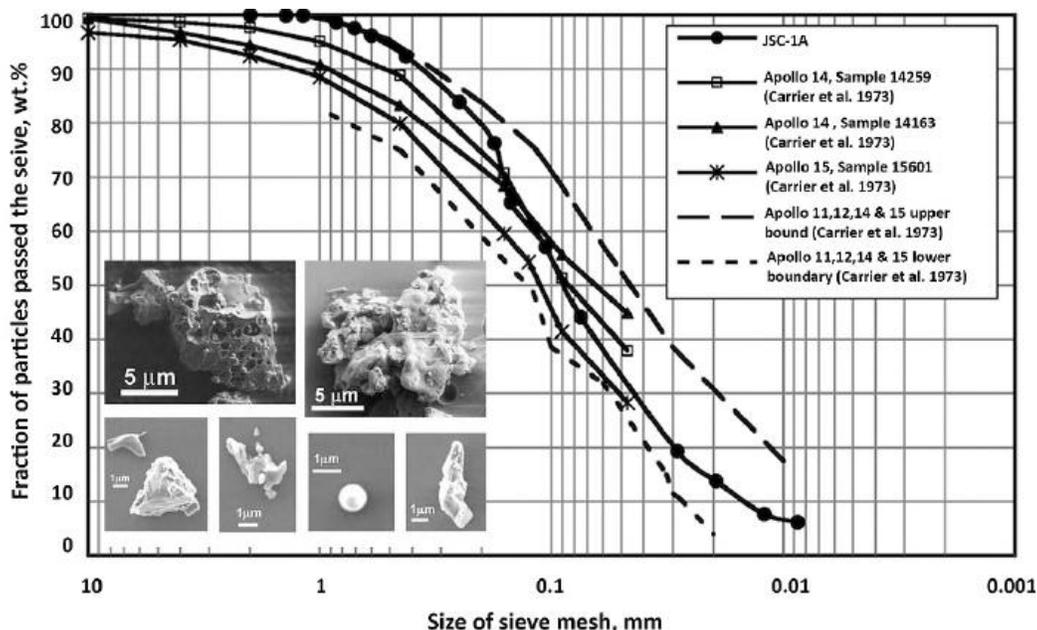


Figura 14. Distribución de tamaño de partículas para distintas muestras de regolito lunar (Otto, Kerst, Roloff, Janiga, & Katterfeld, 2018).

La granulometría escogida para este estudio corresponde a la muestra JSC-1A, según la cual se ingresa a Rocky DEM una distribución acumulada como la que se presenta en la Tabla 8.

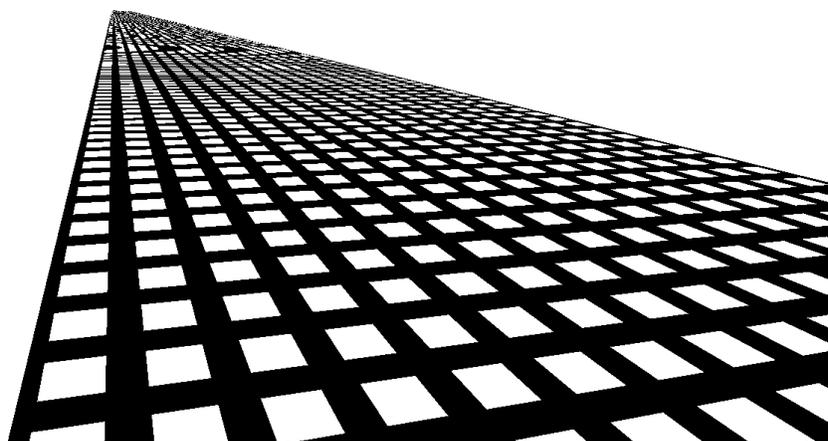
Tabla 8. Granulometría basada en la muestra JSC-1A.

Tamaño de partícula [mm]	Porcentaje acumulado [%]
1	100
0.28	90
0.2	80
0.15	70
0.1	55
0.09	50
0.04	28

Para esta investigación se realizó una separación de partículas a 100 micras, límite para el método *LENS*, para lo cual se realizó una simulación con un modelo de malla ASTM E11 N° 140. Una captura del modelo de la malla utilizada se puede apreciar en la Figura 15, mientras que en la Tabla 9 se pueden ver las características de esta malla.

Tabla 9. Características de la malla y la alimentación se la simulación con malla N° 140.

Característica	Valor
Largo	200 <i>mm</i>
Ancho	3 <i>mm</i>
Apertura	0.106 <i>mm</i>
Tamaño de fibra	0.071 <i>mm</i>

**Figura 15.** Modelo CAD de malla ASTM E11 N° 140, de 3x200 mm.

Los parámetros ingresados para la simulación del harnero de malla N° 140 son los que se aprecian en la Tabla 10, donde las propiedades de las partículas se extraen del trabajo de Otto et al (2018).

Tabla 10. Parámetros constantes de simulación de malla N° 140.

Parámetro	Valor
Duración de simulación	12 s
Frecuencia de muestreo	0.05 s
Alimentación	80 g/h
Densidad de partículas	2997.68 kg/m ³
Módulo de elasticidad de partículas	5 MPa
Número de Poisson de partículas	0.3
Coef. de fricción rodante entre partículas	0.7
Coef. de fricción estática entre partículas	0.3
Coef. de fricción partícula - pared	0.465

Para las simulaciones con esta malla, se utilizó como referencia los resultados de las simulaciones en ambiente terrestre realizadas anteriormente, para la cual se calcula el *Throwing Index* definido por He et al. (2009), según la ecuación (13), para la condición óptima de operación en la Tierra, según se puede apreciar en la Tabla 7.

$$K_v = \frac{A\omega^2}{g \cos(\alpha)} \quad (13)$$

En la Tabla 11 se puede apreciar el *Throwing Index* de la mejor configuración en la Tierra, el de la configuración aplicada a la malla de 100 micras, y el valor de las variables escogidos para lograr el *Throwing Index* deseado.

Tabla 11. Configuración de simulación en la Luna, equivalente a la de mejor desempeño en Tierra.

Variable	Mejor configuración en la Tierra	Configuración equivalente en la Luna
Amplitud [mm]	4	1.5
Frecuencia [Hz]	15	10
Inclinación [°]	5	2.5
Aceleración de gravedad [g]	9.81	1.62
Throwing Index K_v [-]	3.64	3.66

Además, se realizaron simulaciones en tres distintas configuraciones, que se muestran a continuación, en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Configuraciones adicionales.

Variable	Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3
Amplitud [mm]	1	1.5	0.5
Frecuencia [Hz]	15	15	15
Inclinación [°]	2.5	2.5	2.5
Aceleración de gravedad [g]	1.62	1.62	1.62
Throwing Index K_v [-]	5.49	8.23	2.74

En la Figura 16 se puede ver el modelo de la malla N° 140 en el entorno Rocky DEM para la simulación del proceso de harneado, donde en la sección inferior se puede ver la malla implementada, y sobre esta está la alimentación, representada por un cuadrilátero en color rojo, desde donde son agregadas las partículas.

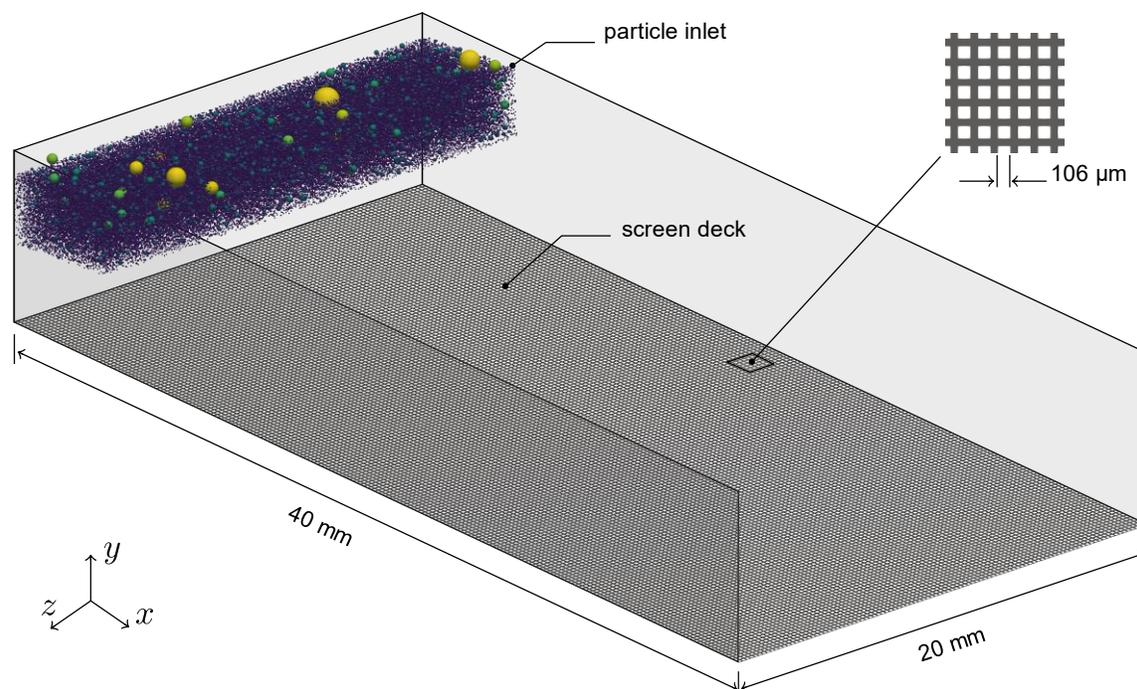


Figura 16. Geometría de la simulación.

Basado en los resultados de las cuatro configuraciones anteriores, se definen dos nuevas configuraciones, para una fracción de malla de un ancho de 5 mm, y un largo de 40 mm. Las configuraciones adicionales de la simulación se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Variables de simulación para la malla ASTM E11 de 40 mm de largo.

Parámetro	Valor
Duración de simulación	12 s
Paso de tiempo	0.05 s
Retraso de sobreposición de partículas	0.025 s
Alimentación	1 kg/s
Densidad de partículas	2997.68 kg/m ³
Cantidad de partículas	9,967,337
Módulo de elasticidad de partículas	5 MPa
Número de Poisson de partículas	0.3
Coef. de fricción rodante entre partículas	0.7
Coef. de fricción estática entre partículas	0.3
Coef. de fricción partícula - pared	0.465

La configuración del movimiento de la malla para estas dos configuraciones adicionales se presenta en la Tabla 14, donde se puede apreciar que se optó por simular movimientos de menor

amplitud, puesto que en el conjunto de simulaciones anterior se obtuvo un menor desempeño al disminuir este parámetro.

Tabla 14. Configuraciones de movimiento adicionales para malla ASTM E11.

Configuración	Amplitud [mm]	Frecuencia [Hz]	Inclinación [°]
Config. 5	0.5	15	0.769
Config. 6	0.2	15	0.616

CAPÍTULO 3

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de malla doble en ambiente terrestre y lunar.

3.1.1 Estudio a distintos ángulos de inclinación.

En la Figura 17 se puede ver el cambio en eficiencia de flujo inferior en ambos ambientes (terrestre y lunar) según el grado de inclinación cómo fue descrito anteriormente.

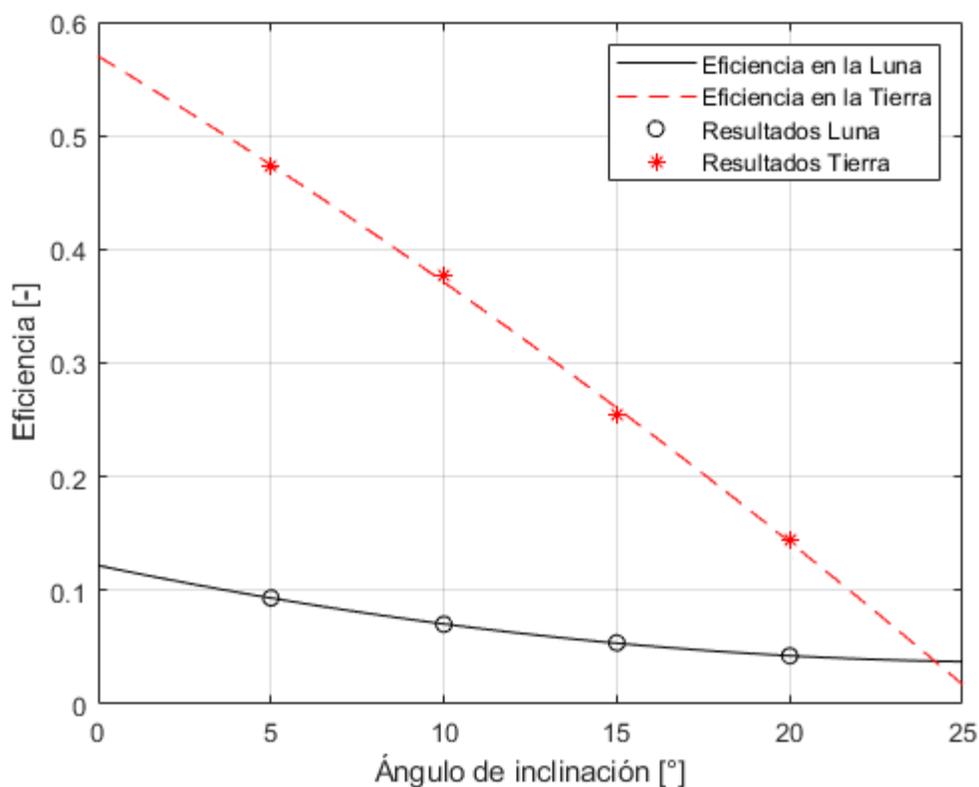


Figura 17. Eficiencia de flujo inferior del harnero de doble malla a distintos ángulos, en la Tierra y la Luna.

Además, se presenta la distribución de material en las salidas superiores tanto en la Luna como en la Tierra, en las siguientes ilustraciones.

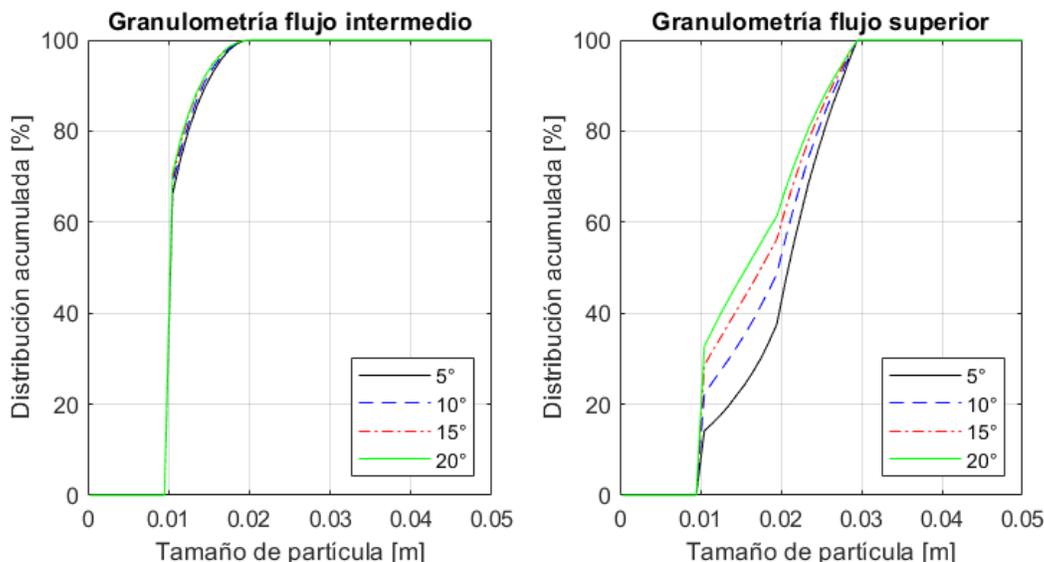


Figura 18. PSD en la Luna, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintos ángulos de inclinación.

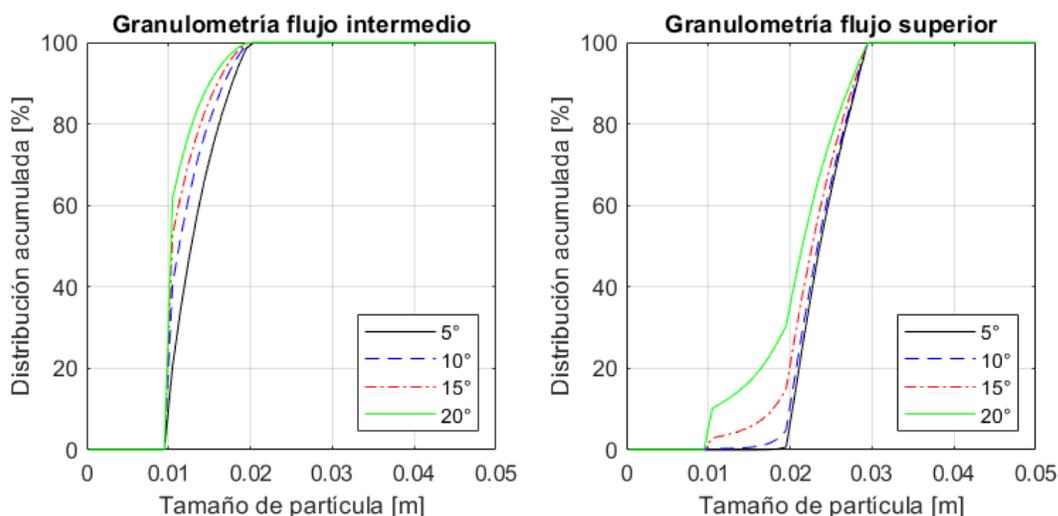


Figura 19. PSD en la Tierra, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintos ángulos de inclinación.

De los resultados anteriores es claro que la inclinación óptima para el trabajo en ambiente lunar es entre 10° y 15° , debido a su alta eficiencia, y que una inclinación entre 15° y 20° entrega flujos superiores con menor cantidad de partículas de bajo tamaño no separadas, por lo que en las simulaciones para el harnero a diseñar en su operación lunar se utilizará la inclinación de 15° .

3.1.2 Estudio a distintas frecuencias de excitación.

De forma similar a la anterior, se realizaron simulaciones en ambiente lunar y terrestre a distintas frecuencias de excitación. De estas simulaciones se obtuvo la distribución de eficiencia que se presenta en la Figura 20.

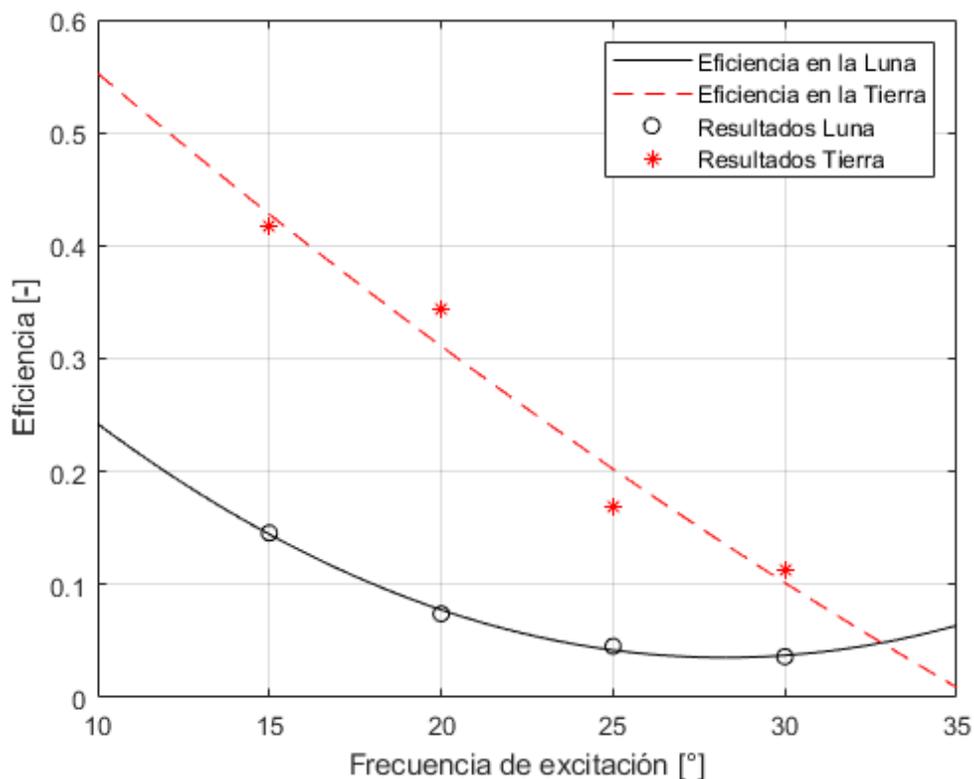


Figura 20. Eficiencia de flujo inferior del harnero de doble malla a distintas frecuencias, en la Tierra y la Luna.

A continuación, se presenta la granulometría de ambas salidas de material, en ambos ambientes, para cada frecuencia estudiada.

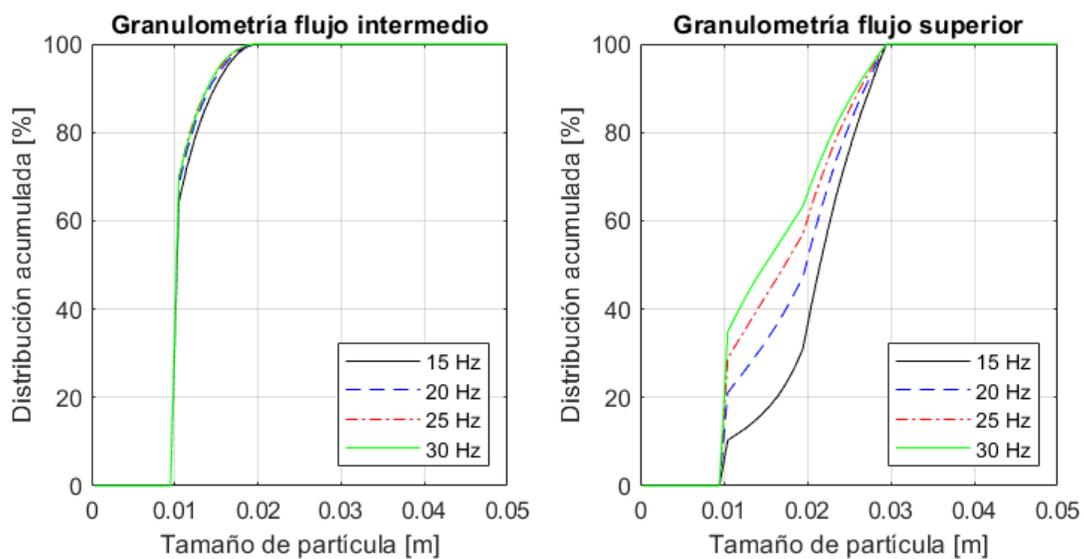


Figura 21. PSD en la Luna, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintas frecuencias de excitación.

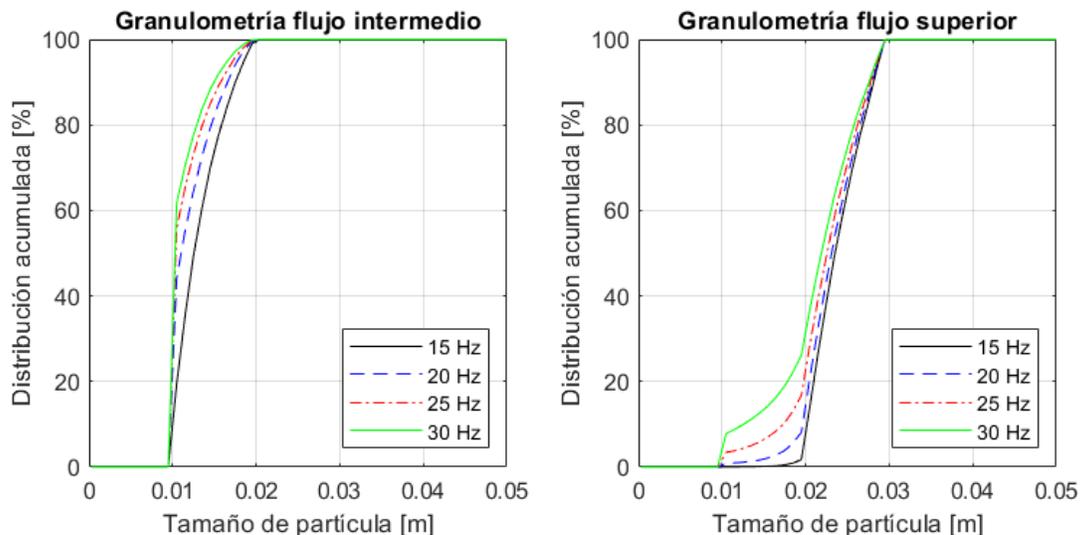


Figura 22. PSD en la Tierra, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintas frecuencias de excitación.

De esta sección del estudio se concluye que la frecuencia de excitación para operar en la Luna debe ser de 10° o menos, si es que se toma en cuenta la extrapolación de los datos.

3.1.3 Estudio a distintas amplitudes vibratorias.

La última variable de interés simulada es la amplitud vibratoria del movimiento de la malla, que varía entre los valores de 2, 3, 4 y 5 mm de amplitud. La eficiencia para cada valor de amplitud se presenta en la Figura 23, para ambos ambientes.

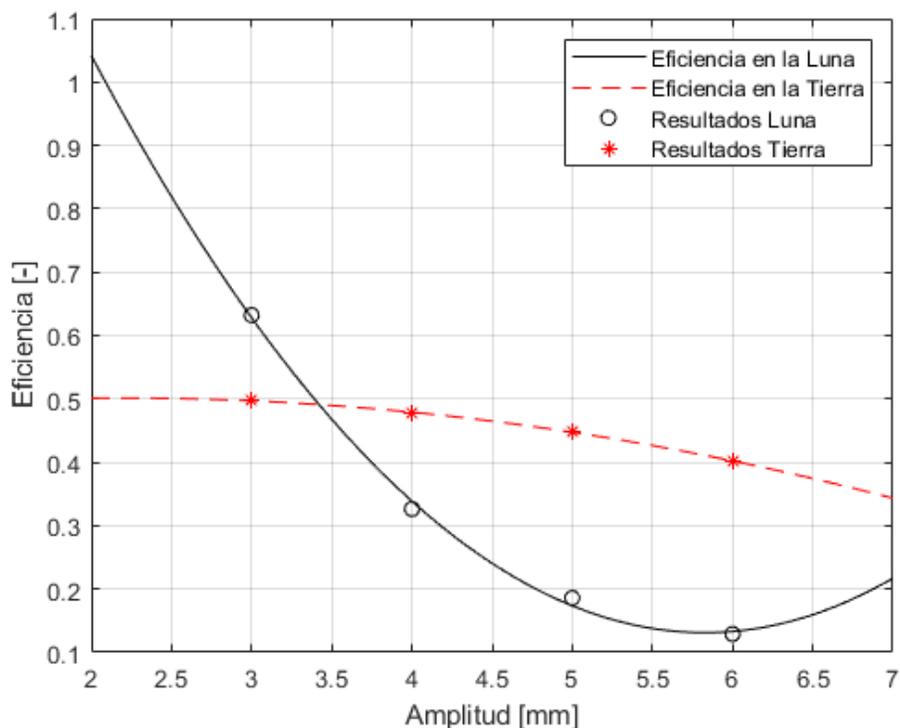


Figura 23. Eficiencia de flujo inferior del harrero de doble malla a distintas amplitudes, en la Tierra y la Luna.

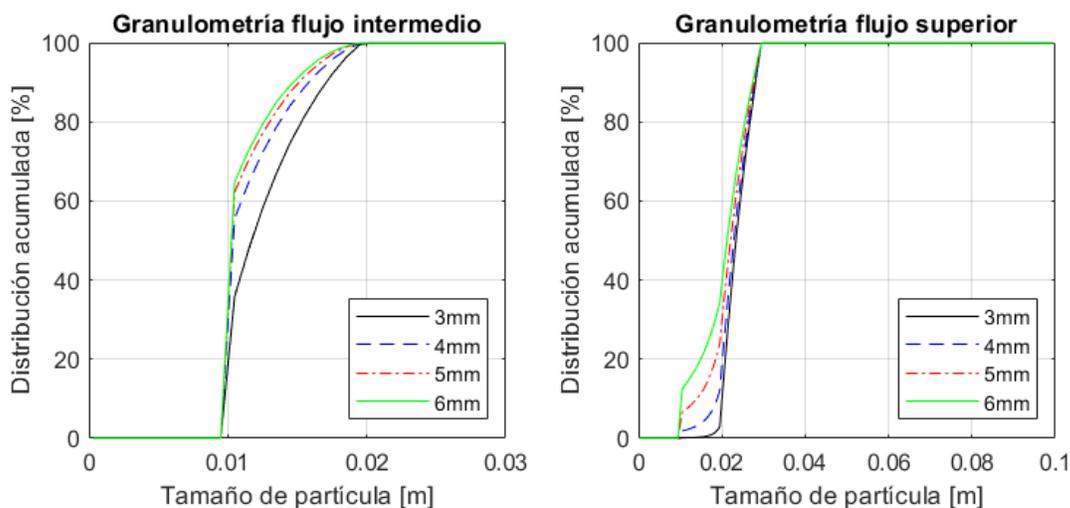


Figura 24. PSD en la Luna, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintas amplitudes vibratorias.

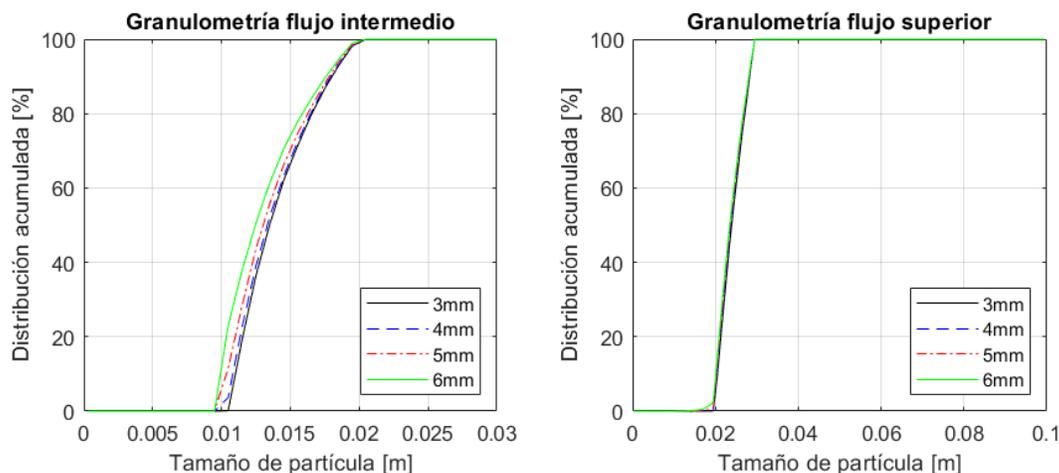


Figura 25. PSD en la Tierra, tanto para el flujo intermedio como para el flujo superior, para distintas amplitudes vibratorias.

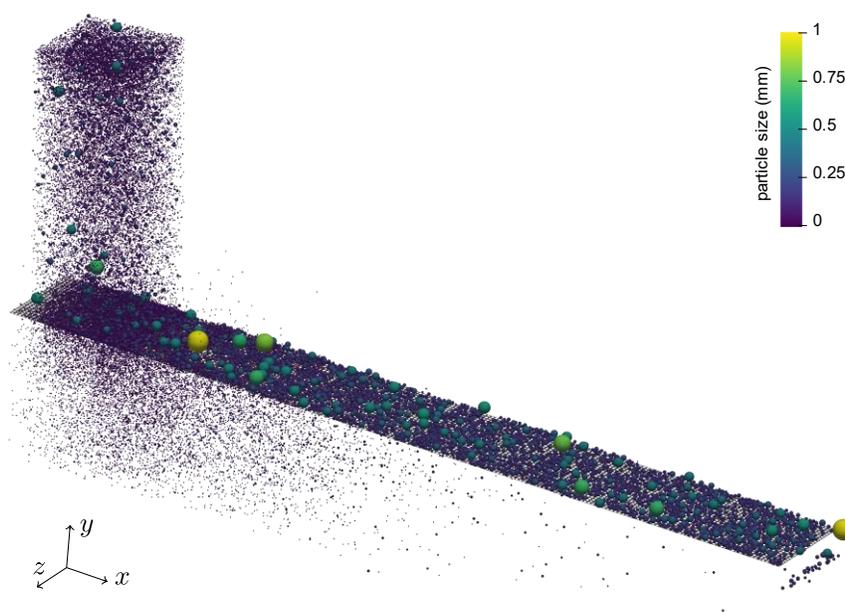
Según se aprecia en esta sección, la amplitud vibratoria tiene un impacto mucho mayor en la Luna que en la Tierra, alcanzando el harnero para los 3 mm de amplitud vibratoria un mejor desempeño en la Luna respecto de su funcionamiento en la Tierra.

3.2 Resultados estudio con regolito.

A partir de las cuatro configuraciones mostradas en la Tabla 11 y la Tabla 12, se estudia la eficiencia del proceso de harneado. En la Figura 26 se puede ver la interfaz gráfica del programa Rocky DEM con la malla y las partículas de la simulación para uno de los instantes estudiados. Además, en la Tabla 15 se puede ver la eficiencia obtenida en cada caso de estudio.

Tabla 15. Eficiencia de las configuraciones estudiadas.

Configuración	Eficiencia de harneado
Equivalente a la Tierra	0.507
Configuración 1	0.509
Configuración 2	0.564
Configuración 3	0.640

**Figura 26.** Proceso de simulación de la malla para regolito, con partículas sobre la fracción de malla.

De las configuraciones mencionadas anteriormente, se estudia la eficiencia de tramos de malla en incrementos de 10 mm cada uno para la configuración de mayor rendimiento (configuración 3), con tal de determinar el menor largo con el cual se logra la mayor eficiencia. Los valores para las primeras 5 secciones se muestran a continuación en la Tabla 16, constituyendo la cuarta sección, de 40 mm, la seleccionada como largo a aplicar, puesto que la adición de la siguiente sección sólo supone una mejora de un 0.1% en la eficiencia, mientras que la masa total del harnero puede aumentar en hasta un 25% respecto a la masa del largo seleccionado.

Tabla 16. Largo de malla y su respectiva eficiencia, configuración 3.

Largo de malla	Eficiencia	Largo de malla	Eficiencia
10 mm	0.544	40 mm	0.637
20 mm	0.617	50 mm	0.638
30 mm	0.632	200 mm	0.640

A partir de los resultados anteriores, se propusieron las simulaciones presentadas en la Tabla 14, que presentan una geometría con largo reducido a 40 mm con tal de permitir una simulación con un mayor ancho y una mayor alimentación. Con estas simulaciones se obtuvieron los resultados de eficiencia que se presentan en la Tabla 17, logrando eficiencias mayores a las obtenidas con las configuraciones de movimiento iniciales para esta malla, al disminuir principalmente la amplitud del movimiento.

Tabla 17. Eficiencia de harneado de las configuraciones adicionales de la malla ASTM E11.

Configuración	Eficiencia de harneado
Configuración 4	0.769
Configuración 5	0.616

Al ser la configuración 5 la de mayor eficiencia, se decide optar por esta configuración.

3.3 Misión de transporte del harnero.

Para análisis preliminar de una misión de transporte del harnero se utilizó como base la misión Artemis de la NASA, considerando así que el lanzamiento sería con el cohete *Space Launch System Block 1 Cargo (SLS Block 1 Cargo)* con capacidades de lanzamiento a órbita de inyección lunar (*Trans Lunar Injection, TLI*) de 27 toneladas métricas (National Aeronautics and Space Administration, 2022), desde donde una nave debe alunizar cargando con el harnero y con material anexo. Para los cálculos de flujo de combustible se utiliza la ecuación de Tsiolkovsky (1), un valor de impulso específico de $I_{sp} = 340$ s, que corresponde con el sistema contemplado para el alunizaje de astronautas para misiones tripuladas, además, se utiliza las diferencias de velocidad requeridas por las maniobras descritas por Donahue (2020) para una misión de alunizaje, considerando solamente la sección de descenso, pues no se planea el retorno de la máquina.

La trayectoria trazada por Donahue contempla una inserción a una *Near Rectilinear Halo Orbit (NRHO)* alrededor de la Luna, desde donde se entraría a órbita baja lunar (*LLO*), para proceder con el descenso y alunizaje (Donahue, 2020). Un esquema se puede ver la Figura 27.

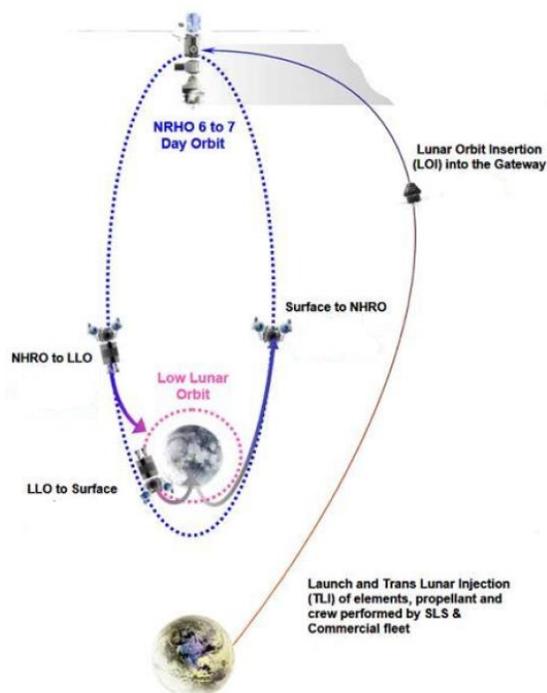


Figura 27. Esquema de misión de alunizaje, considerando la lanzadera en LLO (Donahue, 2020).

Las diferencias de velocidad total de cada maniobra y su consumo de combustible asociado se presentan en la Tabla 18, junto con la masa inicial y final de cada maniobra.

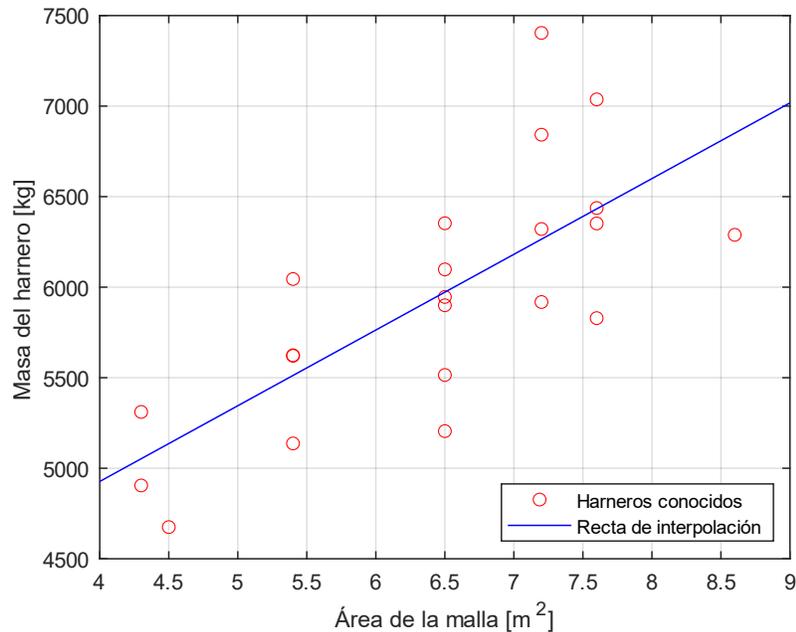
Tabla 18. Requerimiento de cambio de velocidad y consumo de combustible del proceso de alunizaje.

Orbita/Maniobra	Radio orbital r [km]	Semi eje mayor a [km]	Velocidad v [km/s]	Delta- v Δv [km/s]	Masa m [t]	Delta- m Δm [t]
LLO	1837.4	1837.4	1.63	0.02	27	0.14
Entry	1837.4	1787.4	1.61		26.86	
Descenso y alunizaje	1737.4	1737.4	0	1.61	18.88	7.98

Si se consideran los datos de la Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 16 se puede establecer mediante la ecuación (14) la superficie necesaria por cada tonelada por hora de alimentación que se desee. En la ecuación mencionada, L corresponde al largo de la malla, a al ancho de la malla, y \dot{m} a la alimentación, mientras que T corresponde a la relación entre área y alimentación.

$$T = \frac{L a}{\dot{m}} \quad (14)$$

Así, con la configuración 4 de la Tabla 14, se requiere de 0.2 m^2 por cada 1 t/h que se desee como alimentación. A partir de los datos disponibles de un proveedor de harneros vibratorios (Henan Afuruika Machinery Equipment Co., Ltd., s.f.), se realiza una estimación arbitraria de la masa de un harnero de 4.5 m^2 , capaz de procesar 22.5 t/h de regolito, según la curva de interpolación que se presenta en la Figura 28, obteniéndose una masa aproximada de 5.14 toneladas métricas, menor que las 18.9 toneladas que se estima se puede llevar a la Luna.

**Figura 28.** Aproximación de masa de harnero según la superficie de la malla.

Si se considera que la estructura estará construida íntegramente en titanio, con una densidad $\rho_{Ti} = 4507 \text{ kg/m}^3$, mientras que la estructura de los harneros expuestos anteriormente está constituida principalmente de hierro, con una densidad $\rho_{Fe} = 7860 \text{ kg/m}^3$, la masa final del harnero a enviar a la Luna es de aproximadamente 2.95 toneladas métricas.

CAPÍTULO 4

4 CONCLUSIONES

De las simulaciones del harnero de doble malla se evidencia la diferencia de la operación de un harnero en ambos ambientes (terrestre y lunar), siendo en general la operación en ambiente lunar la de menor eficiencia, esto como resultado de la menor aceleración de gravedad presente en el astro objetivo. Por otra parte, se evidencia que al operar en la Luna se obtiene un aumento de eficiencia al disminuir el valor de las tres variables estudiadas, como se ve en la Figura 17, la Figura 20 y la Figura 23, siendo la amplitud vibratoria la variable de mayor impacto en la eficiencia del proceso en el ambiente lunar, logrando una mayor eficiencia respecto al proceso terrestre al operar con una amplitud de 3 mm.

Utilizando como referencia el *Throwing Index* K_v , y según lo que se aprecia en el estudio de la eficiencia a distintos valores de las variables estudiadas, se procedió a estudiar la eficiencia de harneado de una malla N° 140 según norma ASTM E11, que consta de aperturas de $106 \mu\text{m}$, lo necesario para cumplir con los criterios de manufactura aditiva descritos por Isachenkov (Isachenkov, Chugunov, Akhatov, & Shishkovsky, 2021). De este estudio a distintos valores de K_v , en los que se estudió el efecto de la variación de la amplitud a una frecuencia constante de 10 Hz y una inclinación de 2.5° , además de un estudio a un K_v equivalente al mejor desempeño en la Tierra se logró una eficiencia máxima de 64%, y se propuso un nuevo set de simulaciones, logrando una eficiencia del 76.9%, por debajo de la meta establecida para el estudio de un 90%. Es de esperar que se logre una eficiencia mayor con la misma configuración de la simulación de mayor desempeño si es que se considera una malla de más de 40 mm de largo, sin embargo, por limitaciones computacionales, no fue posible realizar estas simulaciones, puesto que se superaba el límite recomendado de partículas para el software utilizado, que equivale a 10 millones.

No se apreció ninguna relación directa entre el valor de K_v y la eficiencia del proceso de harneado en la Luna, por lo que se requiere una mayor profundización en el estudio de este parámetro y su efecto en la eficiencia para lograr establecer una relación concreta, o bien, descartar a existencia de alguna relación entre ambos parámetros.

Hace falta, además, estudiar el efecto de la dirección y tipo de movimiento del harnero, puesto en que en el presente estudio se trabajó solamente con un movimiento lineal a 45° de inclinación respecto del plano de la malla del harnero. Es posible que obtenga una mayor eficiencia al aplicar un movimiento circular o elíptico de la malla.

Respecto a la misión de transporte del harnero, se utilizó como referencia documentos de análisis de posibles órbitas para futuras misiones del proyecto Artemis (National Aeronautics and Space Administration, 2022), y se determinó que es factible enviar un harnero que trabaje en las mejores condiciones encontradas hasta ahora para su operación, correspondientes a la configuración 3 de la Tabla 12, permitiendo además que el cargo de la misión incluya otras estructuras puesto que no utiliza la totalidad de la capacidad de lanzamiento y alunizaje estimada. Es necesario, por otra parte, revisar las órbitas establecidas en el documento citado, puesto que la misión de transporte mencionada contempla la instalación previa de una lanzadera en órbita NRHO alrededor de la Luna, por lo que de no utilizarse una órbita de esas características se necesitarían maniobras de distinta solicitud para el sistema de propulsión.

Finalmente, se concluye preliminarmente que se puede implementar harneros a la Luna, y existen medios para transportarlos hacia el satélite, pero se tendría una eficiencia menor a la esperada. Además, es necesario estudiar en el futuro el desgaste producido por el regolito sobre la malla y la estructura general del harnero, ya que, como se mencionó anteriormente, las partículas de regolito tienen formas irregulares que pueden generar daño en la estructura durante la operación de harneado, aumentando el costo de implementación, y sea por la necesidad de repuestos, como por la aplicación de materiales más pesados que resistan el flujo de partículas, lo que implicaría un aumento además en el costo de transporte del harnero. Por otra parte, la aplicación de harneros rotatorios podría ser una alternativa más eficiente, puesto que, como se puede apreciar en la Figura 26, las partículas se elevan de sobremanera en el ambiente lunar, provocando eventualmente que las partículas más pequeñas sean catapultadas hacia maquinaria cercana y las contamine. Otra solución que puede explorarse es la aplicación de una barrera superior, limitando el desplazamiento normal de las partículas de regolito, sin embargo, esto puede llevar a acumulaciones de material por sobre la malla.

5 Bibliografía

- Aghlmandi Harzanagh, A., Caner Orhan, E., & Levent Ergun, S. (2018). Discrete element modelling of vibrating screens. *Mineral Engineering*(121), 107-121.
- Crawford, I. A. (2015). Lunar Resources: A Review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 39, 137-167.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 19(1), 47-65.
- De Kestelier, X., Dini, E., Cesaretti, G., Colla, V., & Pambaguian, L. (2015). Lunar Outpost Design. *Foster & Partners*.
- Donahue, B. (2020). Crewed Lunar Missions and Architectures Enabled by the NASA Space Launch System. *2020 IEEE Aerospace Conference*, 1-13. doi:10.1109/AERO47225.2020.9172607
- ESSS. (2020). Rocky 4.4 DEM TECHNICAL MANUAL. 4-11.
- European Space Agency. (2018). *Future Moon base*. (RegoLight) Recuperado el 3 de Enero de 2023, de https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/11/Future_Moon_base
- Fall, R., & Rovella, D. (15 de Diciembre de 2021). *Bloomberg*. Obtenido de Bloomberg US Edition: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-12-15/space-mining-has-arrived-and-its-biggest-booster-is-luxembourg>
- Filippi, G., Gillespie, D., Willson, A., & Vasile, M. (2020). A resilience approach to the design of future moon base power systems. *International Astronautical Congress*, 71.
- He, X.-m., & Liu, C.-s. (2009). Dynamics and screening characteristics of vibrating screen with variable elliptical trace. *Mining Science and Technology*(19), 508-513.
- Henan Afuruika Machinery Equipment Co., Ltd. (s.f.). *PRODUCT: YA circular vibrating screen*. (Hanfa Group) Recuperado el 3 de Diciembre de 2022, de https://afuruika.com/products/YA_circular_vibrating_screen.html?campaignid=17733875480&adgroupid=142370407121&feeditemid=&targetid=kwd-22589422&device=c&creative=609938203379&keyword=vibrating%20screen&gclid=EAlQobChMlp_D1_PLj-wlVEEKRCh0FZg1REAAyBCAAEgl
- Institute of Space and Astronautical Science. (s.f.). *KAGUYA*. (Institute of Space and Astronautical Science) Recuperado el 3 de Enero de 2023, de <https://www.isas.jaxa.jp/en/missions/spacecraft/past/kaguya.html>
- Isachenkov, M., Chugunov, S., Akhatov, I., & Shishkovsky, I. (2021). Regolith-based additive manufacturing for sustainable development of lunar infrastructure – An overview. *Acta Astronautica*(180), 650-678.
- Karra, V. K. (1979). Development of a model for predicting the screening performance of a vibrating screen. *CIM Bull*, 72(804), 167-171.
- Kawamoto, H., & Chin, K. (2021). Particle-Size Classification of Lunar Regolith through Inclined Vibrating Tube. *Journal of Aerospace Engineering*, 34(3).
- Li, C., Zuo, W., Wen, W., Zeng, X., Gao, X., Liu, Y., . . . Ouyang, Z. (2021). Overview of the Chang'e-4 Mission: Opening the Frontier of Scientific Exploration of the Lunar Far Side. *Space Science Review*, 217(35).
- Li, Z., Si, Q., Jia, P., Xiao, G., & Tong, X. (2023). Research on particle swarm screening mechanism and performance optimization based on simulated lunar microgravity. *Advances in Space Research*.
- Lucey, P., Korotev, R. L., Gillis, J. J., Taylor, L. A., Lawrence, D., Campbell, B. A., . . . Maurice, S. (2006). Understanding the Lunar Surface and Space-Moon Interaction. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 60, 83-219.
- Mckay, D. S., & Ming, S. W. (1990). Properties of Lunar Regolith. *Developments in Soil Science*, 19, 449-462.

- McLeod, C. L., & Krekeler, M. P. (2017). Sources of Extraterrestrial Rare Earth Elements: To the Moon and Beyond. *Resources*, 6(3).
- Meurisse, A., Makaya, A., Willsch, C., & Sperl, M. (2018). Solar 3D printing of lunar regolith. *Acta Astronautica*, 152, 800-810.
- Moncada Merino, M., & Rodríguez Godoy, C. (2018). Dynamic Modeling of a Vibrating Screen Considering the Ore Inertia and Force of the Ore over the Screen Calculated with Discrete Element Method. 2018.
- National Aeronautics and Space Administration. (31 de Mayo de 2019). *Artemis Moon Program Advances – The Story So Far*. (National Aeronautics and Space Administration) Recuperado el 3 de Enero de 2023, de <https://www.nasa.gov/artemis-moon-program-advances>
- National Aeronautics and Space Administration. (29 de Julio de 2022). *SLS factsheet*. Recuperado el 30 de Noviembre de 2022, de <https://www.nasa.gov/exploration/systems/sls/fs/sls.html>
- National Aeronautics and Space Administration. (5 de Enero de 2022). *Apollo 11 Mission Overview*. (National Aeronautics and Space Administration) Recuperado el 4 de Enero de 2023, de https://www.nasa.gov/mission_pages/apollo/missions/apollo11.html
- Noll, I., Bartel, T., & Menzel, A. (2020). A computational phase transformation model for selective laser melting processes. *Comput Mech*, 66, 1321-1342.
- Otto, H., Kerst, K., Roloff, C., Janiga, G., & Katterfeld, A. (2018). CFD–DEM simulation and experimental investigation of the flow behavior of lunar regolith JSC-1A. *Particuology*.
- Schröter, M., Ulrich, S., Kreft, J., Swift, J. B., & Swinney, H. L. (2006). Mechanisms in the size segregation of a binary granular mixture. *PHYSICAL REVIEW E*, 74(1).
- Sherwood, B. (2019). Principles for a practical Moon base. *Acta Astronautica*, 160, 116-124.
- Spudis, P. D., Zellner, N., & Delano, J. (2002). Petrologic mapping of the Moon: a new approach. *Lunar and Planetary Science Conference*, 33, 1104.
- Walton, O. R., & Braun, R. L. (1986). Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. *Journal of Rheology*, 30(5), 949.
- Zhang, J., Zhou, B., Zhu, M.-H., Song, H., Dong, Z., Gao, Y., . . . Ouyang, Z. (2021). Lunar regolith and substructure at Chang'E-4 landing site in South Pole–Aitken basin. *Nature Astronomy*(5), 25-30.
- Zhao, L., Zhao, Y., Bao, C., & Qinfu, H. (2017). Optimization of a circular vibrating screen based on DEM simulation and Taguchi orthogonal experimental design. *Powder Technology*, 310, 307-311.