

Informe final publicable de proyecto

Procesos geofísicos y astrofísicos en medios granulares

Código de proyecto ANII: FCE_1_2019_1_156451

Fecha de cierre de proyecto: 01/09/2022

TANCREDI, Gonzalo (Responsable Técnico - Científico)
GALLOT GUILLOTEAU, Thomas (Co-Responsable Técnico-Científico)
VINCENT, Maxime (Investigador)
GINARES, Alejandro (Investigador)
CAMPO-BAGATIN, Adriano (Investigador)
NESMACHNOW, Sergio (Investigador)
RICHARDSON, Derek (Investigador)
RIVIERE, Jacques (Investigador)
ROCCHETTI, Nestor (Investigador)
SHOKOUHI, Parisa (Investigador)
WEATHERLEY, Dion (Investigador)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE CIENCIAS (Institución Proponente) \\
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE INGENIERÍA

Resumen del proyecto

La física de los medios granulares estudia materiales formados por un conjunto de objetos macroscópicos (llamados granos) que interactúan por medio de contactos temporales o permanentes. Estos materiales comparten propiedades comunes cuando la escala del fenómeno es significativamente mayor al tamaño del grano. Hemos estudiado diversos procesos geofísicos y astrofísicos que ocurren en estos medios. Conjugando diversas fuentes de financiamiento, se instaló el primer laboratorio de física de medios granulares del país. Hemos desarrollado capacidades humanas y de software para su simulación numérica en plataformas de cómputo de alto desempeño.

El proyecto posibilitó consolidar la inversión realizada mejorando las capacidades experimentales. Se desarrollaron principalmente dos líneas de investigación: análisis del pasaje de ondas sísmicas inducidas por impactos y estudio de la elasticidad no-lineal mesoscópica en medios granulares.

Los asteroides son, en su mayor parte, aglomerados de rocas de diverso tamaño mantenidos por autogravedad. Los impactos producen ondas sísmicas que se propagan a su interior, produciendo cambios estructurales. Realizamos experimentos de impacto a velocidades intermedias y simulaciones numéricas en condiciones de baja gravedad. Hemos puesto a punto un paquete de simulación numérica de medios granulares que incluye autogravedad. Hicimos contribuciones en las predicciones sobre los fenómenos que podrán observarse en la misión de impacto NASA-DART. Determinamos la relación entre la velocidad de propagación de una onda sísmica generada por un impacto y la presión dada por el nivel de confinamiento del medio.

Los procesos geofísicos que ocurren en la corteza terrestre, como la nucleación de fallas sísmicas, se encuentran perturbados por el aspecto mesoscópico de la mecánica de los geomateriales. Caracterizamos la elasticidad no-lineal mesoscópica en materiales granulares confinados.

El proyecto apoyó la formación de posgrado en Geofísica, una nueva opción dentro de la Licenciatura de Física, brindando un laboratorio para desarrollar experimentos en medios de interés geofísico.

Ciencias Naturales y Exactas / Ciencias Físicas / Física de los Materiales Condensados / Medios granulares.

Procesos geofísicos y astr

Palabras clave: medio granular / geofísica / asteroides /

Antecedentes, problema de investigación, objetivos y justificación.

La física de medios granulares estudia aquellos materiales formados por un por un conjunto de partículas sólidas macroscópicas (llamados granos) que interactúan por medio de contactos temporales o permanentes: cereales, harina, talco, arena, grava, etc.. Los avances en el conocimiento del comportamiento de estos materiales tienen múltiples aplicaciones en la industria minera, agrícola, de la construcción y farmacéutica entre otras. Ejemplos concretos son: almacenamiento y transporte de granos, píldoras y materiales de construcción. En este tipo de procesos se han identificado fenómenos como: atascamiento de granos, formación de arcos, segregación por tamaño, respuesta a golpes e impactos, fracturación, etc.

Estos procesos se han estudiado mediante el desarrollo de experiencias de laboratorio, y en las últimas décadas, en forma numérica. Los materiales granulares comparten propiedades comunes cuando la escala del fenómeno es significativamente mayor que el tamaño del grano. Por ejemplo, el comportamiento mecánico de un medio granular compuesto de una gran cantidad de esferas no se puede explicar solamente considerando contactos Hertzianos [Hertz_1881] entre esas esferas (o cualquier otro modelo [Johnson_1987]). La idea fundamental de linealidad no aplica en tales medios; y finalmente, es más importante el conjunto de elementos que los elementos en sí, pues es lo que caracteriza un comportamiento mesoscópico. Este proyecto se ha enfocado en los medios granulares para estudiar, a escala del laboratorio, diferentes fenómenos mesoscópicos. En las siguientes secciones describimos los temas de interés del proyecto: (a) el estudio de propagación de ondas en medios granulares, lo que es útil para caracterizar (b) la elasticidad no-lineal mesoscópica, que es un fenómeno relevante para diversos (c) procesos geofísicos. Por otro lado, las ondas generadas por impactos son importantes para (d) fenómenos astrofísica planetarios, los que pueden ser estudiados experimentalmente así como en (e) simulaciones numéricas.

a) Estudio de ondas en medios granulares

Desde el punto de vista de la propagación de ondas, los medios granulares tienen una complejidad sumamente interesante [Tournat_2009, Norris_1997]. En particular, exhiben significativos cambios reversibles de sus propiedades elásticas (elasticidad y atenuación) bajo perturbaciones mecánicas [Johnson_1989]. Los fluidos y los materiales homogéneos también sufren cambios de elasticidad bajo perturbaciones pero siempre del mismo signo que la deformación; un material comprimido se vuelve más duro [Hugues_1953]. Los medios granulares tienen un comportamiento diverso dependiendo de las

características del medio y de la perturbación; por ejemplo, los medios granulares compactados tienden a disminuir [Guyer_1999] o aumentar [Brunet_2008, Gallot_2019] su elasticidad cuando sufren alguna perturbación.

b) Elasticidad no-lineal mesoscópica.

Los modelos de elasticidad no-lineal se pueden clasificar en dos grandes familias [Guyer_2009]: los modelos que se centran en las interacciones entre partículas (Hystertic Elastic Element [Capogrosso-Sansone_2002], modelo de Hertz-Mindlin [Duffaut_2010], espacio de Preisach-Mayergoyz (PM space) [Guyer_1995]). A pesar de que explican importantes observaciones, es difícil asociar parámetros físicos mensurables a esos modelos. Por el contrario, la segunda familia de modelos considera el medio mesoscópico como un medio homogéneo equivalente. Los parámetros no-lineales mensurables resultan de teorías clásicas de elasticidad no-lineal [Murnaghan_1951, Landau_1986].

Empíricamente constatamos que los parámetros no-lineales dependen de la amplitud y de la frecuencia de la perturbación [Riviere_2016, Gallot_2015]. Adicionalmente, los cambios de elasticidad reversibles exhiben tiempo de recuperación extremadamente largos (dinámica lenta de varias horas [Shokouhi_2017]). En consecuencia los modelos mesoscópicos no permiten incluir toda la complejidad de tales fenómenos y se necesitan estudios adicionales para lograr entenderlos.

c) Procesos geofísicos

Las técnicas de interferometría de ruido sísmico desarrolladas en los últimos 20 años [Campillo_2003] han otorgado la posibilidad de monitorear la velocidad de propagación de ondas sísmicas a gran escala (50km) [Brenquier_2008]. Uno de los integrantes de la propuesta ha publicado varios artículos en esta temática [Gallot_2011, Gallot_2012, Benech_2009]. Esos cambios son interpretados como una no-linealidad mesoscópica asociada a sismos de importante magnitud ($M > 6.0$). Existe entonces una interrelación entre los procesos mesoscópicos de variación de elasticidad y los ciclos de acumulación/relajación de energía elástica responsable de la nucleación sísmica. Los experimentos de fricción a escala del laboratorio permiten observar los regímenes de nucleación sísmica [Latour_2011]. Los fenómenos de "earthquake triggering" [Gomberg_2001] o de sismos lentos [Ide_2007, Shokouhi_2017] son probablemente relacionados a características de no-linealidades mesoscópicas [TenCate_1996, Johnson_2005a].

d) Procesos astrofísicos

Existen varios datos observacionales que indican que los asteroides son, en gran parte, aglomerados de rocas de diverso tamaño mantenidos por autogravedad [Tancredi_2012]. Hay varios procesos como la segregación por tamaños de las rocas y la eyección de comas de polvo que pueden ser interpretados como consecuencia de fenómenos asociados al comportamiento de medios granulares sometidos a vibraciones, producto de sismos inducidos por impactos.

Producto de la autogravedad, un asteroide presenta gradientes de presión (en función de la profundidad) que afectan el pasaje de ondas sísmicas. Para caracterizar la propagación de las ondas al interior de un asteroide, podemos variar la presión de confinamiento del medio granular en el laboratorio ([Tancredi_2018, Gallot_2019, Gallot_2017]).

Estas experiencias son de relevancia para la misión DART de la NASA, que hará impactar un proyectil sobre un pequeño asteroide binario; como forma de testear la técnica de impactor cinético para la deflexión de asteroides en curso de impacto con la Tierra. También tiene aplicaciones para el estudio de la generación de colas de polvo en asteroides que sufrieron un impacto, como es el caso de los Asteroides Activados ([Jewitt_2012]).

e) Simulaciones numéricas.

Para las simulaciones numéricas de la evolución de medios granulares, se ha desarrollado el método de los elementos discretos (Discrete Element Method - DEM); que simula el comportamiento mecánico de un medio formado por un conjunto de partículas, las cuales interactúan entre sí a través de sus puntos de contacto ([Cundall_1979], [Pöschel_2005]). Luego de un estudio comparativo, optamos por trabajar con el paquete open-source ESyS-Particle [Abe_2004]; al que hemos introducido nuevas interacciones [Tancredi_2012, Lopez_2017]. También hemos implementado la autogravedad entre las partículas, denominando al nuevo paquete ESyS-Gravity ([Nesmachnow_2015], [Rocchetti_2017], [Rocchetti_2018]). Es el segundo paquete existente a nivel mundial para este problema; pero, mientras que el otro paquete existente (pkdgrav+Soft-Spheres, [Richardson_2011], [Schwartz_2012]) es privado, el paquete ESyS-Gravity será de dominio público cuando se culminen las estandarizaciones y benchmarking. Las simulaciones numéricas permiten extender los resultados de las experiencias de laboratorio al medio interplanetario, en condiciones de baja gravedad, ausencia de medios fluidos en espacios intersticios y con una amplia gama de velocidades de impacto.

Metodología/Diseño del estudio

Los experimentos y simulaciones numéricas que hemos implementado en el presente proyecto consisten en monitorear las propiedades de propagación de ondas en un medio que sufre una perturbación mecánica (cuasi-estática o dinámica). Estudiamos medios granulares compactados porque son representativos de los medios reales (geológicos o planetarios en general). Si bien los experimentos de laboratorios buscan simplificar los fenómenos observados en la naturaleza, tienen la

gran ventaja de proveer control sobre una cantidad de parámetros y permiten el análisis complementario a las observaciones a escala real. Para las experiencias, se usó un sistema mecánico de confinamiento de material granular para entender dos fenómenos que se describen a continuación.

(a) Propagación de ondas sísmicas generadas por impactos.

El objetivo de esta experiencia es determinar la dependencia de las propiedades de la propagación de una onda sísmica generada por un impacto con los niveles de confinamiento del material, en un amplio rango de presiones y velocidades del proyectil, y para materiales con diversas propiedades geomecánicas y tamaño de granos. Obtuvimos resultados para presiones de confinamiento intermedias (20 a 200 kPa), velocidades de impacto (entre 60 y 300 m/s) inferiores a la velocidad del sonido en el medio y dos tipos de materiales granulares (granos entre 0.5 y 1mm). Se observó una fuerte dependencia de la velocidad de propagación con la presión de confinamiento y una fuerte atenuación de la amplitud de la onda. Se compararon los resultados obtenidos entre ondas generadas por impactos con los obtenidos con vibraciones generadas por un vibrador (shaker) en el rango audible (20Hz-20kHz). No encontramos dependencia de la velocidad de onda con la frecuencia y establecimos que fuera de la amplitud, los parámetros de propagación de onda (velocidad y atenuación) de las ondas sísmicas generadas por impactos son equivalentes de las ondas generadas por vibración mecánica. Este resultado tiene relevancia para analizar la propagación de una onda sísmica en el interior de un asteroide aglomerado, en el cual la presión aumenta con la profundidad respecto de la superficie por el peso de las capas superiores. Queda pendiente estudiar teóricamente y mediante simulaciones numéricas la variación de presión al interior de un asteroide aglomerado, para aplicar las leyes de dependencia entre velocidad y presión que encontramos experimentalmente (ver sección c). Al no encontrar diferencias en los resultados entre las ondas generadas por impactos y por el shaker, podemos diseñar un experimento en condiciones de microgravedad (caída libre, vuelo parabólico o en órbita), para el cual un sistema de vibración es más factible de implementar que un sistema de impacto. Integrantes del team de Hermes (P. Abell) (dispositivo para el estudio de medios granulares instalado en la International Space Station), nos ofrecieron colaborar en este diseño.

(b) Caracterización de la elasticidad no-lineal mesoscópica

Los modelos clásicos de elasticidad no-lineal mesoscópica introducen módulos elásticos intrínsecos al material. Sin embargo, la medición de tales parámetros demuestra que varían según los parámetros de la perturbación. Es relevante preguntarse por qué esos módulos no son constantes. Tal dependencia limita la universalidad de los modelos clásicos ya que equivale a considerar que la ecuación de estado depende de condiciones externas y no solamente del material.

Para mejorar el entendimiento de esas discrepancias, propusimos mejorar la caracterización de la no-linealidad mediante: (1) medir integralmente los módulos de no-linealidad clásica en un medio granular; (2) caracterizar los módulos en función de las propiedades de la perturbación del medio (amplitud, dinámica lenta y rápida).

Experimentalmente, los estudios muestran que el cuarto orden de elasticidad es suficiente para describir la energía elástica, introduciendo nueve módulos elásticos (dos módulos lineales, y siete no-lineales [Zabolotskaya_1986]). En la literatura se encuentran experimentos que miden coeficientes de no-linealidad relacionados a los módulos [Nakata_2019]. Son combinaciones lineales de los 9 módulos que describen parcialmente la elasticidad no-lineal. Sin embargo, una descripción completa requiere medir la totalidad de los nueve módulos. Para medirlos, varias configuraciones de sonda y perturbación dinámica son necesarias: dirección relativa de propagación y tipo de deformación (compresión o cizalla). Con cuatro mediciones independientes, es posible caracterizar exhaustivamente la elasticidad no-lineal.

Para realizar esas mediciones era necesario aumentar la frecuencia de la onda para controlar la dirección y la polarización de la perturbación. Tuvimos un problema de fuerte atenuación por encima de 50 kHz, que nos impide medir una señal con un cociente señal/ruido compatible con una detección de perturbaciones temporales esperadas del orden de la décima de microsegundos. En consecuencia trabajamos en la caracterización de la no-linealidad mesoscópica en medio granular con un solo parámetro no lineal.

(c) Simulaciones numéricas

En paralelo con las experiencias de laboratorio, se hicieron simulaciones numéricas que intentaban reproducir las experiencias usando el paquete ESyS-Particle. Se trabajó con diversas formulaciones de las fuerzas de contacto (resorte amortiguados, hertzianas) y con partículas esféricas. Se hicieron simulaciones con cientos de miles de partículas, proyectiles a diferentes velocidades y mallas como símiles de los vibradores. La comparación de los resultados ha permitido ajustar los parámetros de los modelos numéricos, para luego extender los experimentos a otras condiciones: presiones de confinamiento extremadamente bajas, cercanas a cero, velocidades más altas y objetos de mayor tamaño.

El paquete ESyS-Gravity, que implementa la autogravedad entre las partículas ha requerido diversas, ha requerido una serie de testeos de la exactitud de los cálculos y mejoras de la performance. También se

A su vez, alguna de las simulaciones anteriores se desarrollaron con el paquete pkdgrav+Soft-Spheres (por parte del grupo de

Richardson, Campo-Bagatin) para benchmarking y confirmación de resultados. permitió simular el pasaje de la onda sísmica en un cuerpo aglomerado.

En el año 2021 la NASA lanzó la misión Double Asteroid Redirection Test (DART), que el 26/9/2022 impactará contra el satélite Dimorphos del asteroide (65803) Didymos. DART está acompañada del cubesat LICIACube, que observará de cerca los primeros minutos después del impacto. El objetivo es desviar, con el impacto, levemente la órbita del satélite respecto a su primario, como forma de testear la técnica de deflexión de asteroides conocida como impactor cinético. La ESA proyecta enviar unos años después la sonda Hera para estudiar los resultados del experimento y determinar la estructura interna del objeto impactado. Tancredi ha formado parte de los grupos de trabajo de ambas misiones. Los resultados de los experimentos de laboratorio y las simulaciones numéricas antes descritas tienen un directo interés para la interpretación de los resultados de estas misiones.

Resultados, análisis y discusión

Se realizaron experiencias de laboratorio para estudiar la propagación de ondas sísmicas generadas por impactos y vibraciones con diferentes medios granulares, variando la presión de confinamiento. La presión de confinamiento más baja alcanzada es de algunas decenas de kPa. Hicimos un trabajo de caracterización completa de la respuesta cuasi-estática del medio granular que se comporta como un medio cuasi-elástico con fuerte histéresis.

Las ondas que generan los impactos en el medio granular ven todas sus propiedades alteradas cuando sube la presión de confinamiento: forma de onda (frecuencias), amplitud y velocidad de propagación. Estudiamos las ondas generadas por impactos, así como las ondas generadas por la vibración de un shaker que permite controlar la amplitud y la forma de onda. Un modelo numérico enfocado en la propagación de ondas permitió entender la naturaleza de esas ondas en una región del orden de la longitud de onda, en la cual la propagación por compresión y por cizalla no se pueden considerar en forma independientemente. Sin embargo, demostramos que la fuerte dependencia de la velocidad de la onda en el medio con la presión de confinamiento es un efecto real y no un artefacto debido a las interferencias de las ondas dentro de la caja u otro efecto ondulatorio. El modelo numérico también permite estimar la atenuación de la onda. La velocidad para los diferentes medios varía desde ~150 m/s a baja presión, hasta 500-700 m/s para las presiones más altas (~200 kPa). Una dependencia similar con la frecuencia implica que la longitud de onda es del orden del metro independientemente de la presión. Hemos observado que las diferencias entre las ondas generadas por impacto o por shaker se encuentran dentro del margen de incertidumbre. Hemos comparado la dependencia en presión de la elasticidad con diferentes modelos teóricos basados en la micro-mecánica de los granos o en expresión no-lineal de la elasticidad mesoscópica. Las observaciones en los diferentes medios granulares (arena, grava o esferas de vidrio) son cualitativamente similares.

Se desarrolló una primera versión de un dispositivo para acelerar proyectiles a velocidades de más de 300m/s, basado en un acelerador electrotérmico similar al fabricado por [Rott_1993]. Las pruebas que se realizaron no lograron las velocidades esperadas, apenas alcanzando los 300m/s. Con la colaboración de la persona que se contrató para la fabricación de la electrónica y el asesoramiento del diseñador original del dispositivo (Ing. Martin Rott, Technische Universität München, Alemania), se han implementado nuevos tests para identificar el problema de diseño que está limitando la velocidad de generación del plasma. Se seguirán haciendo nuevos tests y mejoras al dispositivo a fin de alcanzar las velocidades esperadas.

Estos resultados se presentaron en:

* "Monitoring impacted waves in confined granular media "(Gallot et al.) , Passive Imaging and Monitoring in Wave Physics, Cargese, France, 5/2022.

Se encuentra en revisión el siguiente artículo:

* "Elastic waves generated by impact and vibration in confined granular media", Gallot T., Sedoifeito C., Ginares A., Tancredi G.; Enviado a Geophysical Journal International, 9/2022.

Comparamos estos resultados con simulaciones numéricas utilizando el paquete DEM ESyS-Particle. Las propiedades mecánicas del material granular y del proyectil, así como la velocidad de impacto del proyectil, se hicieron variar en una amplia gama de valores; se estudiaron velocidades de impacto entre 50 y 500 m/s y presiones de confinamiento en 7 órdenes de magnitud (desde 10⁻² a 10⁶ Pa). Los resultados numéricos en cuanto a velocidad, atenuación y transmisión de energía se compararon con los experimentales. Con los experimentos numéricos extendimos los resultados de laboratorio a los ambientes de baja gravedad de los asteroides aglomerados así como a presiones muy altas. Se pudieron encontrar las leyes de dependencia de la velocidad de la onda con la presión de confinamiento para diferentes materiales, observando una dependencia que no se ajusta con algunos modelos teóricos anteriores.

Estos resultados, conjuntamente con los de la sección anterior, se presentaron en:

* "Propagation of impact-induced seismic waves into the interior of a rubble-pile asteroid" (Tancredi et al.) 7th IAA Planetary

Defense Conference 2021 (4/2021, United Nations Office for Outer Space Affairs,) y 53rd Annual Division for Planetary Sciences Meeting (10/2021).

Tenemos un artículo en preparación:

* "Propagation of impact-induced seismic waves into the interior of a rubble-pile asteroid" Tancredi G., Gallot T., Sedoiteo C., Domínguez B. (a enviar en 11/2022).

Estos resultados son relevantes para comprender los resultados de los impactos en asteroides considerados como pilas de escombros o grava. En particular, fueron considerados para discutir la viabilidad de la alternativa del impactor cinemático para desviar un asteroide peligroso entrante, que se probará en la misión NASA-DART.

Se realizaron simulaciones numéricas para simular la onda sísmica generada por el impacto de la sonda espacial en el asteroide Dimorphos, y su propagación al interior del asteroide. La onda generará una sacudida en amplias zonas del asteroide, lo que producirá el levantamiento de polvo superficial. Este efecto fue inicialmente propuesto en [Tancredi 2012], y se realizaron algunas experiencias de laboratorio para analizar la física de este proceso, al que se denominó "efecto cocoa". Las partículas de polvo eyectadas desde la superficie generarán una nube de polvo que produce un repentino abrillantamiento del sistema y un aspecto brumoso de la superficie de Dimorphos. Por efecto de la presión de radiación solar, el polvo formará una cola de polvo que se podría observar desde la Tierra durante varios días posteriores al impacto. Se hicieron predicciones sobre la observabilidad de estos procesos. Se compararon estas predicciones con las observaciones de Asteroides Activos.

Estos resultados se presentaron en:

* "Low-Speed Ejecta Lofting from Distal Locations" Tancredi et al.; NASA-DART Investigation Team Meeting 1/2022, 7/2022

* "Rastros de polvo generados en el experimento DART" (Tancredi et al.) XI Taller de Ciencias Planetarias, San Juan Argentina (Febrero 2022).

* "Dust trails generated by the dart experiment" Tancredi et al.; 44th COSPAR Scientific Assembly, 7/2022; XXXIst General Assembly of international Astronomical Union (IAUGA 2022), Busan, Korea (8/2022)

Resultados han sido incluidos en los siguientes artículos:

* "Pre-Encounter Predictions of DART Impact Ejecta Behavior and Observability" (2022) Fahnestock E., Cheng A., Ivanovski S., Michel P., Raducan S., Rossi A., Abell P., Chesley S., Dotto E., Ferrari F., Kolokolova L., Kramer E., Li J.-Y., Schwartz S., Soldini S., Tancredi G., Campo Bagatin A., Zhang Y. *Planetary Science Journal*, *The Planetary Science Journal*, 3, 9, 206; <https://doi.org/10.3847/PSJ/ac7fa1>

* "Ground-based observability of Dimorphos DART impact ejecta: Photometric predictions" (2022) Moreno F., Campo Bagatin A., Tancredi G., Liu P.-Y., Domínguez B.; *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 515, 2, 2178–2187; <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1849>

* "Lofting of low speed ejecta produced in the DART experiment and production of a dust cloud" (2022) Tancredi G., Liu P.-Y., Campo Bagatin A., Moreno F., Domínguez B.; enviado a *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (enviado 9/2022)

Para estas simulaciones se utilizó por primera vez la mejora que habíamos desarrollado del paquete ESyS-Particle, para incluir los efectos de autogravedad: ESyS-Gravity.

Se hicieron varios test del paquete ESyS-Gravity, haciendo diferentes implementaciones de los algoritmos de cálculo de la autogravedad, lo que permitieron hacer mejoras de la performance y precisión. En el artículo "Lofting of low speed ejecta produced in the DART experiment ..." incluimos una primera comparación de resultados entre pkdgrav+Soft-Spheres y ESyS-Gravity, donde se mostró que los resultados de las simulaciones son similares.

Se publicó el artículo:

* "High performance computing simulations of self-gravity in astronomical agglomerates" (2021) Rocchetti N., Nesmachnow S., Tancredi G.; *Simulation*; DOI: 10.1177/0037549721998766.

Tenemos un artículo en preparación:

* "An open-package including DEM and self-gravity: ESyS-Gravity" Tancredi G., Rocchetti N., Nesmachnow S., Frascarelli D. (a enviar en 12/2022).

Conclusiones y recomendaciones

Se realizó una caracterización mecánica de medios granulares tanto en una dinámica cuasiestática como en baja frecuencia en un rango de baja presión de confinamiento (< 200 kPa). En el rango de compresión cuasi-estática, se midió un comportamiento cuasi-elástico con una elasticidad de presión constante, que aumenta suavemente a lo largo de los ciclos de compresión-relajación. La estimación del factor de redirección indica que la fricción sólo es importante durante la relajación y puede despreciarse durante la compresión. Por otro lado la relajación revela una relación tensión-deformación altamente histórica y un almacenamiento de energía elástica durante el inicio de la relajación que luego se libera a menor presión. Para cada paso de presión de confinamiento, los impactos en medio granular generan ondas elásticas altamente atenuadas que se

propagan en un medio homogéneo. La ausencia de un proceso de difusión de ondas se debe principalmente a una diferencia de tres órdenes de magnitud entre el tamaño del grano y la longitud de onda.

La naturaleza granular del material sólo es relevante para entender la incidencia de la presión de confinamiento en la elasticidad homogénea equivalente del medio. Esta conclusión está respaldada por la concordancia entre las simulaciones numéricas y los experimentos en cuanto a la velocidad de la onda, la amplitud y la polarización de la onda elástica, siendo generado por un impacto o por vibración. La equivalencia de las observaciones en las dos formas de generación demuestra que para esas velocidades de impactos, pasado la zona del cráter, la onda es línea y el medio no se encuentra perturbado. Eso observación apoya la idea de utilizar una fuente de vibración en un experimento de microgravedad para simplificar el dispositivo.

También demostramos que el campo de ondas es principalmente compresivo, propagándose a casi la velocidad de la onda P. La propagación en la región de sub-longitud de onda tiene lugar en un medio cerrado donde, gracias a una fuerte atenuación se demuestra que las mediciones de la velocidad de onda tienen un error limitado. Por último, se demuestra que la velocidad de la onda P aumenta más de lo esperado por la teoría de medios efectivos (EMT) con un número de coordinación constante. Propusimos un modelo de EMT modificado con número de coordinación proporcional a la presión. Mostramos que este modelo es equivalente a un modelo no lineal mesoscópico basado en la energía elástica no lineal de tercer orden. Ambos modelos se ajustan a las observaciones. La interpretación de estos modelos es una profunda reorganización en la red de contacto de las partículas durante el proceso de compactación cuasi-estática.

Basados en los resultados de simulaciones numéricas del proceso de propagación de ondas sísmicas generadas por impactos y las sacudidas que pueden generar en puntos distantes del lugar de impacto, se hicieron predicciones de lo que se podrá observar como consecuencia del experimento de la misión NASA-DART. Se estimó un abrillantamiento de varias magnitudes que podría perdurar por cerca de una semana después del impacto, y la generación de una cola de polvo que podría perdurar por semanas. También se prevé la formación de una nube de polvo densa que podría dificultar las observaciones de LICIACube.

Se logró implementar exitosamente un paquete para simulaciones DEM incluyendo la autogravedad (ESyS-Gravity), que ha logrado resultados similares a otros paquetes ya establecidos, con la ventaja de que se pondrá disponible públicamente.

Quedan abiertas líneas de trabajo que son extensiones de lo desarrollado en el proyecto o nuevas propuestas como ser: ondas sísmicas generadas por impactos a hipervelocidad; "efecto cocoa" y sus consecuencias en la formación de Asteroides Activos; diseño de experimentos de laboratorio a muy baja gravedad; diseño de un nuevo dispositivo de confinamiento para trabajar a presiones más altas para poder trabajar con ondas de más altas frecuencias; implementación del monitoreo de deformación de medio granular por imagen ultrasonido para observar ondas en medio granulares blando, así como la fricción sólida de un medio granular confinado; integración de códigos Smooth Particle Hydrodynamics y DEM para el estudio de impactos a hipervelocidad y la propagación de las ondas sísmicas generadas.

Dado que hemos logrado montar un laboratorio con un equipamiento variado, se requerirá una baja inversión para el desarrollo de las experiencias arriba mencionadas. Además, con la existencia del cluster.uy, y la contribución económica que se realizó, se podrá continuar desarrollando nuevas simulaciones numéricas con el paquete ESyS-Gravity.

Referencias bibliográficas

Referencias que incluye a algunos de los miembros del proyecto:

- [Benech_2009] N. Benech, S. Catheline, J. Brum, T. Gallot, and .A. Negreira. 1-D Elasticity Assessment in Soft Solids from Shear Wave Correlation : The Time-Reversal Approach. IEEE UFFC, 56(11) :2400-2410, 2009.
- [Gallot_2011] T. Gallot, S. Catheline, P. Roux, J. Brum, N. Benech, and C. Negreira. Passive Elastography : Shear-Wave Tomography From Physiological Noise Correlation in Soft Tissues. IEEE UFFC, 58(6) :1122-1126, 2011.
- [Gallot_2012] T. Gallot, S. Catheline, P. Roux, and M. Campillo. A passive inverse Filter for Green's function retrieval. Journal of the Acoustical Society of America, 131(1):EL21-EL27, 2012.
- [Gallot_2017] T. Gallot, F. Lopez, A. Ginares, J. Sanshis, and H. Ortega. Laboratory scale experimental analysis of impact generated waves in agglomerated asteroids. In Asteroids, Comets and Meteors 2017, Montevideo, Uruguay, 2017.
- [Gallot_2015] T. Gallot, A. Malcolm, T.L. Szabo, S. Brown, D. Burns, and M.I Fehler. Characterizing the nonlinear interaction of s- and p-waves in a rock sample. Journal of Applied Physics, 117(3) :034902, 2015.
- [Gallot_2019] T. Gallot, G. Tancredi, and A. Ginares. Impacted waves in granular media : A laboratory scale asteroids experiment. Acoustical Society of America Journal, 145:1903- 1903, 2019.
- [Latour_2011] S. Latour, T. Gallot, S. Catheline, C. Voisin, F. Renard, E. Larose, and M. Campillo. Ultrafast ultrasonic imaging of dynamic sliding friction in soft solids : the slowslip and the super-shear regimes. European Physics Letter, 96(5) :59003, 2011.
- [Lopez_2017] F. Lopez, G. Tancredi, and T. Gallot. Numerical simulations of impact generated waves in agglomerated asteroids. In Asteroids, Comets and Meteors 2017, Montevideo, Uruguay, 2017.
- [Nesmachnow_2015] Nesmachnow, S.; Frascarelli, D.; Tancredi, G. In: Gitler I., Klapp J. "A parallel multithreading algorithm for self-gravity calculation on agglomerates" (eds) High Performance Computer Applications. ISUM. Communications in Computer and Information Science, vol 595. Springer, Cham, 2015.
- [Rocchetti_2017] Rocchetti N., Frascarelli D., Nesmachnow S., Tancredi G.; in: Mocskos E., Nesmachnow S. " Performance Improvements of a Parallel Multithreading Self-gravity Algorithm" (2018). (eds) High Performance Computing. CARLA. Communications in Computer and Information Science, vol 796. Springer, Cham. DOI:88/10.1007/978-3-319-73353-1_21, p. 291-306, 2017.
- [Rocchetti_2018] Rocchetti N., Nesmachnow S., Tancredi G. In: Meneses E., Castro H., Barrios Hernández C., "Comparison of Tree Based Strategies for Parallel Simulation of Self-gravity in Agglomerates." Ramos-Pollan R. (eds) High Performance Computing. CARLA 2018. Communications in Computer and Information Science, vol. 979. Springer, Cham, 2019.
- [Tancredi_2012] G. Tancredi, A. Maciel, L. Heredia, P. Richeri, S. Nesmachnow, "Granular physics in low-gravity environments using DEM". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 420, 3368-3380, 2012.
- [Tancredi_2018] Tancredi, G.; Rocchetti, Ne.; Nesmachnow, S.; Frascarelli, D.; Gallot, T.; Ginares, A.; "Simulations and experiments of low-velocity collisions between agglomerated asteroids" American Astronomical Society, DPS meeting #50, id.404.03(2018)

Otras referencias:

- [Abe_2004] Abe S., Place D., Mora P., Pure Appl. Geophys., 161, 2265, 2004.
- [Brenquier_2008] F. Brenquier, M. Campillo, C. Hadziioannou, N. M. Shapiro, R. M. Nadeau, E. Larose. Science, 321(5895) :1478-1481, SEP 12 2008.
- [Brunet_2008] Brunet, T., Jia, Johnson, Transitional nonlinear elastic behaviour in dense granular media, Geophysical Research Letters, 35 (19) 2008.
- [Campillo_2003] M. Campillo, A. Paul. Long-range correlations in the diffuse seismic coda. Science, 299 :547-549, 2003.
- [Capogrosso-Sansone_2002] B. Capogrosso-Sansone, RA Guyer. Dynamic model of hysteretic elastic systems. Physical Review B, 66(22) :224101, 2002.
- [Cundall_1979] Cundall, Strack, A discrete numerical model for granular assemblies Geotechnique, 29, 47, 1979.
- [Duffaut_2010] K. Duffaut, M. Landrø, R. Sollie. Geophysics, 75(3) :E143-E152, 2010.
- [Gomberg_2001] J Gomberg, PA Reasenber, P I Bodin, RA Harris. Earthquake triggering... Nature, 411(6836) :462, 2001.
- [Guyer_1999] RA Guyer, PA Johnson. Nonlinear mesoscopic elasticity : Evidence for a new class of materials. Physics Today, 52(4) :30-36, APR 1999.
- [Guyer_1995] RA Guyer, KR McCall, GN Boitnott. Hysteresis, discrete memory, and nonlinear wave propagation in rock : A new paradigm. Physical Review Letters, 74(17):3491, 1995.

[Guyer_2009] RA Guyer, Paul A Johnson. Nonlinear mesoscopic elasticity. 2009.

[Hertz_1881] H. Hertz. J. für Mathematik, vol. 92 :p. 156-171, 1881.

[Hughes_1953] K. Hughes; Second-order elastic deformation of solids, *Physical Review*, 92:1145-1149, 1953.

[Ide_2007] S. Ide, G. Beroza, D. Shelly, T. Uchide. A scaling law for slow earthquakes. *Nature*, 447(7140) :76, 2007.

[Jewitt 2012] D. Jewitt. The Active Asteroids. *The Astronomical Journal*, 143:66 (14pp), doi:10.1088/0004-6256/143/3/66, 2012.

[Johnson_1987] Johnson, Johnson. Contact mechanics. Cambridge university press, 1987.

[Johnson_2005a] PA Johnson, X. Jia. *Nature*, 437(7060) :871-874, 2005.

[Johnson_1989] PA Johnson, TJ Shankland. Nonlinear generation of elastic waves... *Journal of Geophysical Research*, 94(B12) :17729-17733, 1989.

[Koschny_2001] Koschny, D., Grun E.. Impacts into ice–silicate mixtures: Crater morphologies, volumes, depth-to-diameter ratios and yield. *Icarus* 154, 243– 253, 2001.

[Landau_1986] LD Landau, EM Lifshitz. *Course of Theoretical Physics Vol 7 : Theory of Elasticity*. Pergamon Press, Oxford, UK, 3rd edition, 1986.

[Murnaghan_1951] F.D. Murnaghan. *Finite Deformation of an elastic solid*. New york John wiley & sons, inc., 1951.

[Nakata_2019] N. Nakata, L. Gualtieri, A. Fichtner. *Seismic Ambient Noise*. Cambridge University Press, 2019.

[Norris_1997] AN Norris, DL Johnson. Nonlinear elasticity of granular media. *Journal of Applied Mechanics*, 64(1) :39-49, 1997.

[Pöschel_2005] Pöschel, Schwager "Computational Granular Dynamics: Models and Algorithms", Ed. Springer-Verlag, 2005.

[Richardson_2011] Richardson, Walsh, Murdoch, Michel, Numerical simulations of granular dynamics: I. Hard-sphere discrete element method and tests. *Icarus* 212, 427–437, 2011.

[Riviere_2016] J. Rivière, L. Pimienta, M. Scuderi, T. Candela, P. Shokouhi, P. Fortin, A. Schubnel, C. Marone, P. A Johnson. Frequency, pressure, and strain dependence of nonlinear elasticity in berea sandstone. *Geophysical Research Letters*, 43(7) :3226-3236, 2016.

[Rott_1993] Rott, M. The LRT/TUM small caliber electrothermal accelerator, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 29, 597-602, 1993.

[Schwartz_2012] Schwartz, S.R., Richardson, D.C., Michel, P., An implementation of the softsphere discrete element method in a high-performance parallel gravity treecode. *Granul. Matter* 14, 363–380, 2012.

[Shokouhi_2017] P.Shokouhi, J. Rivière, R. Guyer, P. Johnson. Slow dynamics of consolidated granular systems : Multiscale relaxation. *Applied Physics Letters*, 111(25):251604, 2017.

[TenCate_1996] JA TenCate, TJ Shankland. *Geophysical Research Letters*, 23(21) :3019-3022, OCT 15 1996.

[Tournat_2009] V. Tournat, VE Gusev. *Physical Review E*, 80(1) :011306, 2009.

[Zabolotskaya_1986] EA Zabolotskaya. Sound beams in a nonlinear isotropic solid. *SOVIET PHYSICS ACOUSTICS-USSR*, 32(4) :296-299, 1986.

H e r m e s F a c i l i t y a t I n t e r n a t i o n a l S p a c e S t a t i o n ,
https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/Investigation.html?id=7557

Licenciamiento

Reconocimiento 4.0 Internacional. (CC BY)