

ANÁLISIS DE IMPACTOS A HIPERVELOCIDAD EN ESTRUCTURAS LUNARES MEDIANTE MODELOS DE HIDROCÓDIGO

Calonge, Julián D.; Gómez, Daniel; García, José J.; Valdés Jairo A.
Estudiante de la Maestría en Ingeniería – Énfasis en Ingeniería Civil
Universidad del Valle, Cali, Colombia
julian.calonge@correounivalle.edu.co

RESUMEN

Los recientes avances de la ciencia han generado un gran interés por la exploración espacial. Aunque las agencias espaciales internacionales han desarrollado infraestructuras extraterrestres resilientes, aún se requiere más información sobre su respuesta mecánica ante impactos de meteoritos. Los impactos a hipervelocidad representan una amenaza para las estructuras lunares debido a su recurrencia y la cantidad de energía liberada durante la colisión. Las velocidades de impacto estimadas superan los 20 km/s, provocando que la propagación de las ondas se produzca en breves lapsos de tiempo. Por lo tanto, esta investigación desarrolla un hidrocódigo Lagrangiano 2D para el análisis de impactos a hipervelocidad en estructuras lunares sometidas a un fenómeno de carga rápida y transitoria. El código desarrollado utiliza una discretización espacial por elementos finitos, un esquema temporal explícito, un algoritmo de contacto y una ecuación de estado para el cálculo de la componente hidrostática del tensor esfuerzo. Los resultados destacan la importancia de incorporar modelos que tengan en cuenta la degradación de las propiedades mecánicas cuando las estructuras lunares se ven sometidas a impactos a hipervelocidad. Este análisis permitiría identificar áreas de mejora en el diseño de estructuras lunares para optimizar su respuesta estructural a impactos de meteoritos.

ABSTRACT

Recent developments in science have generated a great interest in space exploration. Although international space agencies have developed resilient extraterrestrial infrastructures, more information on their mechanical response to meteorite impacts is still needed. Hypervelocity impacts constitute a hazard to lunar structures due to their recurrence and the amount of energy released during the collision. Estimate impact velocities exceed 20 km/s, causing wave propagation in short time lapses. Therefore, this research develops a 2D Lagrangian hydrocode for damage analysis on lunar structures subjected to fast and transient loading phenomenon. The developed code uses a finite element spatial discretization, an explicit temporal scheme, a contact algorithm and an equation of state for the calculation of the hydrostatic component of the stress tensor. The results highlighted the importance of incorporating models that consider the degradation of mechanical properties when lunar structures are subjected to hypervelocity impacts. This analysis would identify areas in lunar structure design that need enhancement to improve their structural response to meteorite impacts.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

El desarrollo científico y tecnológico reciente ha impulsado la exploración y colonización del espacio, enfocándose en la construcción de infraestructuras extraterrestres seguras y resilientes. La Luna se presenta como un destino accesible y una base transitoria para futuras misiones a otros planetas [1-6]. Sin embargo, el diseño y construcción de asentamientos seguros en la Luna enfrenta desafíos significativos debido a la escasez de recursos y las condiciones extremas del entorno lunar, lo que hace necesario el uso de recursos *in-situ* [7-12].

Las investigaciones recientes han abordado el diseño estructural de hábitats lunares considerando cargas propias, eventos sísmicos y presión interna, pero hay poca información sobre su respuesta ante impactos de meteoritos, que representan una amenaza significativa debido a la alta energía liberada [2-3,6,9-10,13-14]. Estos impactos requieren el uso de códigos hidrodinámicos computacionales (hidrocódigos) para modelar el comportamiento del material bajo condiciones extremas [14-16].

Esta investigación desarrolla un hidrocódigo bidimensional Lagrangiano para analizar estructuras lunares ante cargas rápidas y transitorias. Se estudia un cilindro de concreto sulfúrico presurizado, cubierto por regolito para protección. El impactador es un cuerpo cilíndrico a hipervelocidad. El código, basado en el método de elementos finitos y un esquema explícito, ofrece ventajas en eficiencia, personalización y flexibilidad frente a programas comerciales. Los resultados indican áreas de mejora en el diseño, como el grosor de las paredes y la altura del escudo de regolito, optimizando la respuesta ante impactos [14-16].

HIDROCÓDIGO DESARROLLADO

Los algoritmos hidrodinámicos computacionales o hidrocódigos son programas ampliamente utilizados para el estudio de problemas con cargas rápidas e intensas en materiales y estructuras. En términos generales, estos programas modelan la propagación de ondas de choque y calculan variables como velocidades, deformaciones y esfuerzos en función del tiempo y la posición. Para esto, resuelven de manera simultánea las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía, junto con las relaciones constitutivas que describen las propiedades del material. En esta investigación, se ha desarrollado un hidrocódigo basado en el método de los elementos finitos para el análisis de impactos a hipervelocidad en sólidos. Este hidrocódigo resuelve tres aspectos fundamentales para calcular las fuerzas que actúan en cada paso temporal: (i) las leyes de movimiento de Newton, (ii) la ecuación de estado (EOS) y (iii) el modelo constitutivo. Las leyes de movimiento de Newton se implementan como un conjunto de ecuaciones diferenciales establecidas a través de las ecuaciones de conservación de masa

Organiza:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0, \quad (1)$$

Momentum

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (2)$$

y energía

$$\frac{\partial (\rho I)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho I \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) - \nabla \cdot (p \mathbf{v}) + \dot{Q} \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del material, t el tiempo, ∇ es el operador diferencial gradiente, \mathbf{v} es el vector velocidad, $\boldsymbol{\sigma}$ el tensor de esfuerzos, \mathbf{b} las fuerzas de cuerpo por unidad de masa, p la presión, I la energía interna específica, κ la conductividad térmica, T la temperatura y \dot{Q} es la tasa de generación interna de calor generado por efectos como, por ejemplo, la fricción viscosa o la radiación. Por otra parte, La ecuación de estado (EOS) establece la relación entre la densidad o volumen del material, su energía interna o temperatura y su presión, así

$$p = p(\rho, I). \quad (4)$$

De esta manera, se consideran los efectos de la compresibilidad, que abarcan los cambios de densidad y los procesos termodinámicos irreversibles, como el calentamiento debido al choque. Por otro lado, las relaciones constitutivas describen la naturaleza específica del material al conectar los esfuerzos presentes en el material con la cantidad de deformación (ϵ) necesaria para generar dichos esfuerzos. Estas relaciones constitutivas pueden incorporar una variedad de efectos, como la sensibilidad a la velocidad de deformación ($\dot{\epsilon}$), el endurecimiento por deformación, el ablandamiento térmico y la pérdida de capacidad debida al daño (D) del material, entre otros [18]. Una descripción general del modelo constitutivo es

$$\boldsymbol{\sigma} = g(\epsilon, \dot{\epsilon}, I, D). \quad (5)$$

Debido a su alta no linealidad, las soluciones analíticas a las ecuaciones anteriores

Organiza:

sólo son posibles si se realizan algunas suposiciones que simplifiquen y reduzcan el número de variables a considerar ^[18]. En los procesos complejos, las variables son numerosas, por lo que las ecuaciones deben resolverse simultáneamente. Por lo tanto, para resolverlas se requieren técnicas numéricas que utilizan ordenadores digitales (como los hidrocódigos) ^[15].

ESQUEMA TEMPORAL EXPLÍCITO

El algoritmo explícito desarrollado se fundamenta en el método de las diferencias centrales, el cual es uno de los enfoques explícitos más destacados en la mecánica y la física computacional. Este método recibe su nombre porque el valor de la derivada en el centro de un intervalo de tiempo se calcula mediante la diferencia entre los valores de la función en los extremos de dicho intervalo. El método parte de las fórmulas de diferencia central para la velocidad y la aceleración. Además, tiene en cuenta que la masa se encuentra concentrada en los nodos de la malla, lo que implica que la matriz de masa es diagonal.

Este método se inicia a partir de la ecuación diferencial ordinaria en el tiempo de conservación del momentum lineal, que en el caso de una malla Lagrangiana adopta la siguiente forma

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{f}_{\text{ext}} - \mathbf{f}_{\text{int}} = \mathbf{f} \quad (6)$$

donde \mathbf{M} representa la matriz de masa diagonal, $\ddot{\mathbf{u}}$ la aceleración de los nodos de la malla, \mathbf{f}_{ext} las fuerzas externas aplicadas a la malla (fuerzas de volumen y de superficie), y \mathbf{f}_{int} las fuerzas internas generadas por el desplazamiento de los nodos. Para resolver esta ecuación diferencial en problemas no lineales, se emplea la integración temporal explícita.

En este método, se inicia en el tiempo $t = 0$ y se utilizan pasos temporales Δt de manera que en el paso de tiempo n , $t = n\Delta t$. El valor de una función en el tiempo $n\Delta t$ se denota con un superíndice. Por ejemplo, el desplazamiento \mathbf{u} , en un paso de tiempo n , estaría denotado por $\mathbf{u}^n = \mathbf{u}(n\Delta t)$. Como se mencionó anteriormente, este método se basa en las fórmulas de diferencia central para la velocidad y la aceleración. La velocidad se expresa mediante

$$\dot{\mathbf{u}}^n = \mathbf{v}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\mathbf{u}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{u}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{u}\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - \mathbf{u}\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)}{\Delta t} \quad (7)$$

donde la segunda igualdad se incluye para aclarar la notación, ya que se emplean

Organiza:

valores correspondientes a medio paso de tiempo para las velocidades. La aceleración se expresa mediante

$$\ddot{\mathbf{u}}^n = \mathbf{a}^n = \frac{\mathbf{v}^{n+\frac{1}{2}} - \mathbf{v}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \quad \text{o} \quad \mathbf{v}^{n+\frac{1}{2}} = \Delta t \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}^n + \mathbf{v}^{n-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

ALGORITMO DE CONTACTO

Se ha desarrollado un algoritmo de contacto para simular colisiones entre objetos con diversas geometrías y propiedades. Este algoritmo se ha integrado en el esquema explícito previamente desarrollado, comenzando con la identificación de las superficies potenciales de contacto, conocidas como superficies deslizantes, y distinguiendo entre la superficie Esclava y la superficie Maestra. La superficie Esclava generalmente corresponde a los nodos del objeto que se desplaza a mayor velocidad y que se anticipa que penetrarán en la superficie del cuerpo objetivo, la superficie Maestra.

El primer paso en el hidrocódigo consiste en determinar las superficies Esclava y Maestra durante la fase de preprocesamiento. Una vez definidas, el análisis avanza utilizando el esquema explícito. El proceso computacional para el manejo de contactos en el análisis Lagrangiano se estructura según el método de penalización y el método de fricción de Coulomb. Ambos son herramientas fundamentales en las simulaciones numéricas para facilitar las interacciones entre objetos sólidos. Este enfoque es eficaz para resolver problemas de contacto y colisión y se usa ampliamente en distintas ramas de ingeniería, así como en biomecánica para la simulación de tejidos blandos.

Método de penalización

El método de penalización previene la interpenetración físicamente imposible entre objetos generando una fuerza artificial, denominada fuerza de penalización, representada mediante resortes. Esta fuerza repele los objetos al detectar una penetración. La magnitud de esta fuerza es proporcional al grado de interpenetración y se regula ajustando el parámetro de penalización que corresponde a la rigidez k_p de los resortes. La elección adecuada de este parámetro es crítica; valores demasiado bajos pueden resultar en interpenetraciones no deseadas, mientras que valores excesivamente altos pueden provocar comportamientos físicos no realistas ^[17].

La *Figura 1* ilustra los nodos esclavos (representados por el subíndice s) que interpenetran simultáneamente la superficie maestra en un instante de tiempo t , en

Organiza:

las posiciones correspondientes j , junto a las velocidades perpendiculares a la superficie de contacto v de los nodos de la superficie maestra y v_s de la superficie esclava.

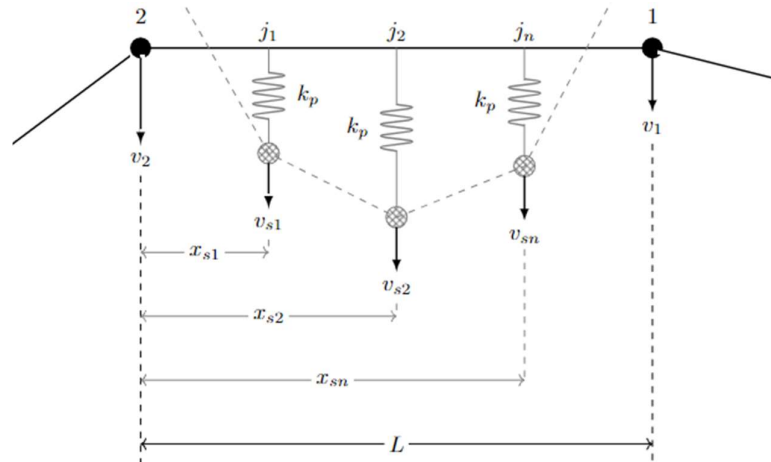


Figura 1. Múltiples intrusiones de nodos esclavos contra superficies maestras.
Adaptado de Zukas [14]

Este método ofrece la ventaja de ser relativamente sencillo de implementar y capaz de abordar grandes deformaciones y complejas variaciones en la topología de contacto. Sin embargo, presenta limitaciones en términos de eficiencia computacional, como requerir pasos de tiempo muy pequeños para garantizar la estabilidad numérica e iteraciones o actualizaciones en la configuración de contacto a lo largo de la simulación para asegurar resultados precisos y estables, especialmente en problemas dinámicos o altamente no lineales. La formulación matemática del método se basa en la aplicación de una fuerza de penalización F_p directamente proporcional a la penetración entre los cuerpos g , que se calcula como

$$g = \max\left(0, -\mathbf{n} \cdot (\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_j)\right) \quad (9)$$

donde \mathbf{x}_s representa el vector posición del nodo intruso en la superficie esclava, y \mathbf{x}_j representa el vector posición predictivo de un nodo en la superficie maestra, anticipando el punto de contacto del nodo intruso (Figura 1). El vector \mathbf{n} denota la normal a la superficie de contacto, orientada desde la superficie maestra hacia la

Organiza:

esclava. La fuerza de penalización \mathbf{F}_p , que se aplica en dirección normal a la superficie de contacto y es proporcional a la penetración detectada, se define como

$$\mathbf{F}_p = k_p \cdot g \cdot \mathbf{n} \quad (10)$$

donde k_p es el parámetro de penalización, que regula la rigidez de la respuesta al contacto. En una simulación de elementos finitos, la ecuación de movimiento se modifica para incluir las fuerzas de penalización. Para un sistema dinámico, la ecuación de movimiento podría expresarse como

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}_{\text{ext}} + \mathbf{F}_p \quad (11)$$

donde \mathbf{M} es la matriz de masa, \mathbf{C} es la matriz de amortiguamiento, \mathbf{K} es la matriz de rigidez, \mathbf{u} son los desplazamientos nodales, \mathbf{F}_{ext} son las fuerzas externas aplicadas, y \mathbf{F}_p son las fuerzas de penalización debidas al contacto.

ECUACIÓN DE ESTADO

En el hidrocódigo desarrollado, la EOS juegan un papel crucial para describir el comportamiento del material bajo condiciones extremas de presión y temperatura, como las que se encuentran durante los eventos de impactos de hipervelocidad. Generalmente, a temperatura constante, el módulo volumétrico K se define como

$$K = -V \left(\frac{\delta p}{\delta V} \right)_T \quad (12)$$

Donde p es la presión, V es el volumen y T la temperatura. Se ha implementado en el hidrocódigo la ecuación de estado de Murnaghan, que supone que el módulo volumétrico es una función lineal de la presión

$$K = K_0 + PK'_0 \quad (13)$$

Organiza:

Donde K_0 es el módulo volumétrico en una condición inicial sin compresión y K'_0 es la derivada del módulo volumétrico con respecto a la presión. La ecuación de Murnaghan es el resultado de la integración de la ecuación diferencial, y se expresa como

$$P(V) = \frac{K_0}{K'_0} \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^{-K'_0} - 1 \right] \quad (14)$$

RESULTADOS

Se ha realizado un análisis de impactos a hipervelocidad (5 km/s) en un hábitat lunar, con base en el diseño propuesto por Patiño en 2022 ^[19] (Figura 2). El hábitat consiste en una estructura cilíndrica de concreto sulfúrico, presurizada y cubierta con una capa de suelo lunar (regolito) necesaria para aislarla y protegerla de las amenazas del entorno lunar, como la radiación y los impactos de meteoritos. Este análisis permitió calcular esfuerzos máximos en el material y determinar que sobrepasan los esfuerzos máximos a tracción en el concreto, por lo que se evidencia la necesidad de mejorar aspectos del diseño como el espesor de la capa de regolito, para mejorar el comportamiento mecánico del hábitat frente a estos impactos.

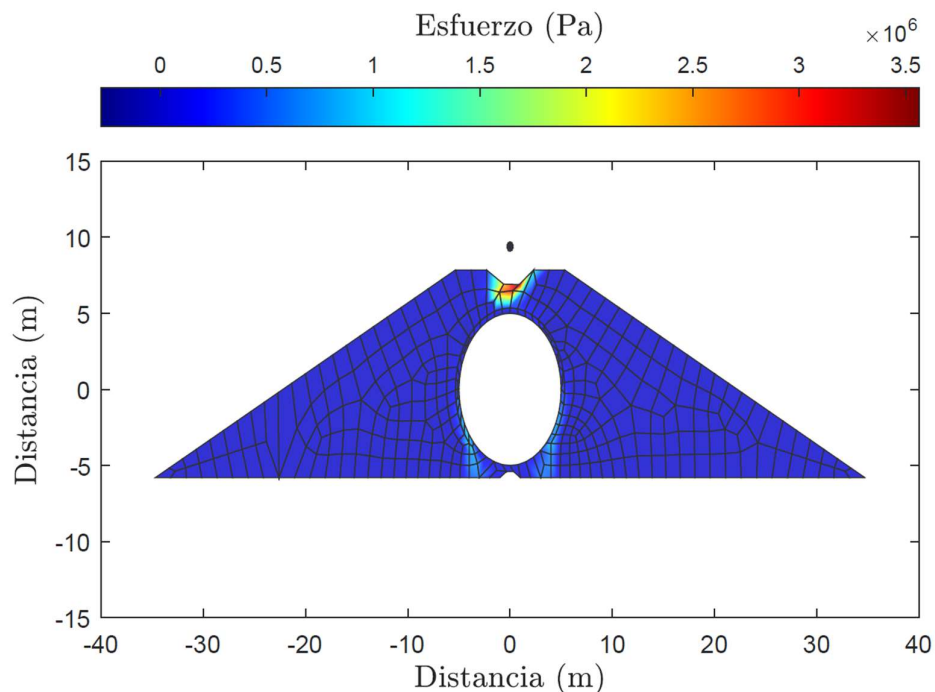


Figura 2. Impacto preliminar de un meteorito de 6 cm de diámetro sobre estructura lunar.

Organiza:

CONCLUSIONES

Los resultados pusieron de relieve la importancia de incorporar modelos que tengan en cuenta la degradación de las propiedades mecánicas cuando las estructuras lunares se ven sometidas a impactos a hipervelocidad. Se observó que un hábitat lunar podría sufrir daños o derrumbarse al ser golpeado por un meteorito. Por lo tanto, es necesario incluir los efectos de los impactos a hipervelocidad en el diseño de las estructuras lunares. El hidrocódigo propuesto es eficaz y preciso a la hora de cuantificar los esfuerzos provocados por impactos a hipervelocidad en estructuras lunares. Su desarrollo ofrece ventajas sobre programas comerciales, incluyendo el cálculo eficiente, la personalización y la flexibilidad en la implementación de materiales especializados y modelos constitutivos. Además, este análisis identifica áreas de mejora en el diseño de estructuras lunares, como el ajuste del grosor de las paredes y la altura del escudo de regolito, para mejorar su respuesta estructural a los impactos de meteoritos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado fue financiado por la Universidad del Valle mediante el proyecto de convocatoria interna 21078: *Diseño por desempeño de un hábitat lunar sometido a cargas sísmicas e impactos de meteoritos.*

REFERENCIAS

[1] Mottaghi, S., y Benaroya, H. (2015, 1). Design of a lunar surface structure. i: Design configuration and thermal analysis. *Journal of Aerospace Engineering*, 28. doi: 10.1061/(asce)as.1943-5525.0000382

[2] Allende, M. I., Miller, J. E., Davis, B. A., Christiansen, E. L., Lepech, M. D., y Loftus, D. J. (2020, 4). Prediction of micrometeoroid damage to lunar construction materials using numerical modeling of hypervelocity impact events. *International Journal of Impact Engineering*, 138. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103499

[3] Kalapodis, N., Kampas, G., y Ktenidou, O.J. (2020). A review towards the design of extraterrestrial structures: From regolith to human outposts. *Acta Astronautica*, 175, 540-569. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576520303210> doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.038>

[4] Theinat, A. K., Modiriasari, A., Bobet, A., Melosh, H. J., Dyke, S. J., Ramirez, J., . . . Organiza:

Gomez, D. (2020, 3). Lunar lava tubes: Morphology to structural stability. *Icarus*, 338. doi: 10.1016/j.icarus.2019.113442

[5] Benaroya, H. (2018). Building habitats on the moon: Engineering approaches to lunar settlements. New York: Springer Cham. doi: 10.1007/978-3-319-68244-0

[6] Allende, M. I., Kiremidjian, A. S., Lepech, M. D., y Loftus, D. J. (2021, 9). Performance-based engineering framework to quantify micrometeoroid damage to lunar surface structures. *Journal of Aerospace Engineering*, 34. doi: 10.1061/(asce)as.1943-5525.0001300

[7] Evans, S. W., Stallworth, R., Robinson, J., Stellingwerf, R., y Engler, E. (2006). Meteoroid risk assessment of lunar habitat concepts. doi: 10.1061/40830(188)73

[8] Benaroya, H., Bernold, L., y Chua, K. M. (2002). Engineering, design and construction of lunar bases. *Journal of Aerospace Engineering*, 15 (2), 33-45. doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2002)15:2(33)

[9] Benaroya, H. (2006). Structures for manned habitation. En (p. 1-8). doi: 10.1061/40830(188)78

[10] Ruess, F., Schaenzlin, J., y Benaroya, H. (2006). Structural design of a lunar habitat. *Journal of Aerospace Engineering*. doi: 10.1061/ASCE0893-321200619:3133

[11] Bell, L. (2011). Top-level considerations for planning lunar/planetary habitat structures. *Journal of Aerospace Engineering*. doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000062

[12] Ruiz, S., Cruz, A., Gomez, D., Dyke, S. J., y Ramirez, J. (2022, 9). Preliminary approach to assess the seismic hazard on a lunar site. *Icarus*, 383. doi: 10.1016/j.icarus.2022.115056

[13] Dorogoy, A., Rittel, D., y Weihs, D. (2020, 10). Effect of target velocity on damage patterns in hypervelocity glancing collisions. *International Journal of Impact Engineering*, 144. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103664

[14] Zukas, J. (2004). Introduction to hydrocodes. Elsevier Science. doi: 10.1016/S0922-5382(04)80006-0

[15] Collins, G. S. (2002). An introduction to hydrocode modeling. Applied Modelling and Computation Group, Imperial College London, 2–11.

[16] Pierazzo, E., y Collins, G. (2004). A brief introduction to hydrocode modeling of

Organiza:



impact cratering. En H. Dypvik, M. J. Burchell, y P. Claeys (Eds.), Cratering in marine environments and on ice (pp. 323–340). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-06423-8_16

[17] T. Belytschko, W.K. Liu, and B. Moran. Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. Wiley, 2000.

[18] Anderson, C. E. (1987). An overview of the theory of hydrocodes. International Journal of Impact Engineering, 5 (1), 33-59. (Hypervelocity Impact Proceedings of the 1986 Symposium) doi: 10.1016/0734-743X(87)90029-7

[19] Patiño, C., Ruiz, S., Gomez, D., Cruz, A., Dyke, S. J., y Ramirez, J. (2024). Seismic assessment of a long-term lunar habitat. Acta Astronautica, 214, 414426. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.11.004>

Organiza:



Tel/Fax: [+54] 11 5252.8838 | Whatsapp: [+54 9] 11 3180.3746 | Hipólito Yrigoyen 1144 Piso 1° - Of. 2 | Buenos Aires
Horario de atención: de lunes a viernes de 13:00 a 18:00 hs. | Mail: info@jornadasaie.org.ar - www.jornadasaie.org.ar