

SIMULACIÓN DE ASENTAMIENTOS DE UNA PLATAFORMA SOMETIDA A IMPACTO

SIMULATION OF SETTLEMENTS OF A PLATFORM SUBJECTED TO IMPACT

Facundo Isla^a, Santiago Zera^b, Martín Chimenti^b y Bibiana Luccioni^a

^a CONICET, Instituto de Estructuras “Arturo M. Guzmán”, FACET, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina, fisla@herrera.unt.edu.ar, bluccioni@herrera.unt.edu.ar, <http://www.facet.unt.edu.ar/iest/>

^b IMPSA, Carril Rodríguez Peña 2451 Godoy Cruz, Mendoza, Argentina, <https://www.impsa.com/>

Palabras clave: Suelo, Impacto, Asentamiento, Simulación dinámica explícita.

Resumen. En este trabajo se presenta un estudio realizado como etapa preliminar en el proceso de diseño de un bulto para transporte de Co-60 desarrollado por IMPSA S.A. para la firma Dioxitek S.A., con el objetivo general de verificar las herramientas y modelos numéricos a utilizar en el diseño del bulto. El trabajo tiene como objetivo particular estudiar el asentamiento de la plataforma de impacto usada en los ensayos de caída libre del bulto. Esto implica una adecuada modelación del suelo, del cual se dispone de resultados de estudios geofísicos y propiedades mecánicas. Se analizan y comparan los resultados de un modelo de Mohr Coulomb con un modelo elastoplástico de superficies anidadas. Se estudia el efecto de la variación de las propiedades del suelo en profundidad y de las distintas formas de aplicar la aceleración de la gravedad en el asentamiento de la plataforma. Finalmente se compara con resultados experimentales.

Keywords: Soil, Settlement, Explicit dynamic simulation.

Abstract. This paper presents a preliminary study carried out as part of the design process of a Co-60 transport package developed by IMPSA S.A. for Dioxitek S.A., with the general objective of verifying the tools and numerical models to be used for the design of the package. The specific objective of this work is to analyze the settlement of the impact platform used in the free-fall tests of the package. This requires appropriate ground modelling for which geophysical survey results and mechanical properties are available. The results obtained with the Mohr-Coulomb model are analyzed and compared with those obtained with an elastoplastic model of nested surfaces. The effects of the variation of the soil properties at depth and ways of taking into account gravity acceleration on the settlements of the platform are investigated and compared with experimental results.

1 INTRODUCCIÓN

Los materiales radiactivos se utilizan en los campos de la medicina, la industria, la investigación y la producción de energía nuclear. El uso de material radiactivo implica transporte del mismo y requiere la aplicación de medidas de seguridad y proteger a las personas, los bienes y el medio ambiente de los efectos de las radiaciones durante el transporte.

Los bultos de transporte de material radioactivo deben cumplir con ciertas especificaciones establecidas en la norma [AR 10.16.1 \(2016\)](#) que aseguran la integridad de los mismos frente a situaciones de caída durante el transporte normal y de accidente. Particularmente debe soportar la caída desde 1 m sobre un punzón y la caída libre desde una altura de 9 m sobre una superficie muy rígida. La rigidez de la plataforma debe ser tal que un aumento de la misma no produzca un aumento en el daño del bulto. Es necesario realizar ensayos que prueben que el bulto es capaz de soportar caídas sucesivas en las posiciones más desfavorables manteniendo sus capacidades de blindaje radiológico y contención del material radioactivo.

La simulación numérica resulta indispensable, no sólo para el diseño del bulto, sino también para el diseño de los ensayos de verificación. Esto último involucra tanto la determinación de las posiciones y secuencias de caída que generan más daño en el bulto, como el adecuado diseño de la plataforma a los efectos de cumplir las especificaciones de rigidez en la norma [AR 10.16.1 \(2016\)](#). De esta manera, se evita la realización de numerosos ensayos. En particular, para el diseño de la plataforma y la verificación de la rigidez de la misma es importante simular adecuadamente el suelo bajo la misma.

En las dos últimas décadas se han publicado varios trabajos relativos a la simulación numérica de bultos de transporte bajo caídas de accidente ([Wu et al. 2012](#); [Ivančo et al. 2013](#); [Saito et al. 2014](#); [Li et al. 2020](#); [Li et al. 2021](#); [Lim et al. 2021](#); [Kim et al. 2022](#); [Hao et al. 2022](#); [Gaiazov et al. 2023](#); [Yoo et al. 2023](#); [Cadot et al. 2023](#); [Lan et al. 2024](#)), algunos de los cuales incluyen comparación con resultados experimentales. En general, los trabajos se han centrado en la modelación de los recipientes y prácticamente no se ha estudiado el comportamiento ni el daño de la plataforma de impacto ([Li et al. 2021](#)), ni del suelo de apoyo.

Este trabajo forma parte de la etapa preliminar en el proceso de diseño de un bulto para transporte de Co-60 desarrollado por IMPSA S.A. para la firma Dioxitek S.A., con el objetivo de verificar las herramientas y modelos numéricos a utilizar en el diseño del bulto y de los ensayos requeridos para certificar el mismo antes las peores situaciones de accidente. A tal fin, se diseñó un espécimen que representa un modelo simplificado y de dimensiones reducidas del bulto que fue simulado numéricamente y luego ensayado a dos caídas sucesivas. En este trabajo se analiza particularmente la modelación del suelo bajo la plataforma de impacto y se comparan los resultados de asentamiento con los medidos en los ensayos.

2 MODELOS DE SUELO

Se presentan a continuación formas alternativas de modelar el suelo bajo la plataforma en el programa LS Dyna y resultados de simulaciones realizadas a los efectos de mostrar el comportamiento de distintos modelos constitutivos del suelo y parámetros de los mismos, tanto en la modelación de un elemento de suelo sometido a compresión cuasi estática, como bajo carga impulsiva.

2.1 Modelo de Mohr Coulomb

Se trata de un modelo elastoplástico con superficie de rotura definida por el criterio de Mohr Coulomb. Los datos incluyen los parámetros elásticos: módulo elástico transversal G y coeficiente de Poisson ν , la densidad ρ , la cohesión c , el ángulo de fricción interna ϕ y el ángulo de dilatación ψ . Permite variar los parámetros con la profundidad del suelo e incluir la variación

del módulo de corte, el ángulo de fricción interna y el ángulo de dilatancia con la deformación plástica.

Aunque no es un ensayo que pueda hacerse en el suelo, a modo ilustrativo del comportamiento del modelo, se presentan los resultados de la modelación de un cubo de suelo de 50 mm x 50 mm x 50 mm sometido a carga uniaxial cuasiestática, con carga y descarga. Los resultados que se muestran en la [Figura 1](#) corresponden $\rho = 1890 \frac{Kg}{m^3}$; $G = 117.9 Pa$; $\nu = 0.35$; $\phi = 0.604 rad$; $\psi = 0 rad$; $c = 0.0001 Pa$. Se incluye el efecto de la degradación de la rigidez elástica. Al no considerar la variación de las propiedades de la superficie de falla con la deformación plástica, el material se comporta como elasto-perfectamente plástico. La descarga es lineal, aún en el caso de considerar de degradación de rigidez. Si se confinan los laterales del cubo de manera que no pueda deformarse, el comportamiento es lineal durante la carga y descarga. Se trata de un modelo bastante limitado para reproducir el comportamiento dinámico del suelo.

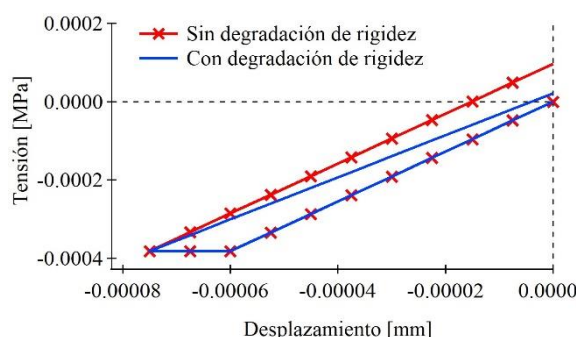


Figura 1. Cubo de suelo sometido a carga uniaxial (Modelo de Mohr Coulomb)

2.2 Modelo de Hysteretic Soil

Teniendo en cuenta las limitaciones encontradas del modelo de Mohr Coulomb, se analiza en esta sección el comportamiento del modelo *Hysteretic Soil* que permite simular la pérdida de rigidez secante y el amortiguamiento histerético del material en correspondencia con lo informado en el estudio geotécnico disponible. Se trata de un modelo elastoplástico con superficies de fluencia anidadas que permite simular endurecimiento y descargas no lineales. La superficie de fluencia en el modelo *Hysteretic Soil* está definida por la siguiente ecuación:

$$J_2 = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 \quad (1)$$

Donde a_0 , a_1 y a_2 son constantes que definen la forma de la superficie de fluencia y falla. A diferencia del criterio de Mohr Coulomb, esta superficie no depende del ángulo de Lode, de manera que su intersección con los planos meridianos es la misma para tracción ($\theta = -\pi/6$) que para compresión ($\theta = \pi/6$). En ese sentido, es más parecida a la superficie de fluencia de Drucker Prager pero los meridianos pueden ser curvos. Tomando

$$a_0 = c^2 \cos^2 \phi ; \quad a_1 = 2c \cos \phi \sin \phi ; \quad a_2 = \sin^2 \phi \quad (2)$$

se tiene un criterio similar a Drucker Prager que coincide con Mohr Coulomb en los meridianos de corte ($\theta = 0$, corte) como se muestra en [Figura 2a](#). También se pueden ajustar los parámetros para tener meridianos curvos que simulen la curva (roja) de la [Figura 2a](#). Dicha envolvente se obtiene a partir de las curvas de evolución de corte con la deformación angular sugeridas en el informe geotécnico ([Darendeli, 2001](#)) que se muestran en la [Figura 2b](#). Se hace notar que los máximos de esas curvas corresponden a los valores residuales (aproximadamente 65% del máximo) de tensión de corte medidos en los ensayos de corte directo para las mismas presiones de confinamiento. Si se dibuja la tensión máxima de corte de las curvas de la [Figura](#)

2b en función de la presión de confinamiento se obtiene la curva roja de la Figura 2a. En ese caso los parámetros de la curva son: $a_0 = 0$; $a_1 = 0.022$ MPa ; $a_2 = -0.015$

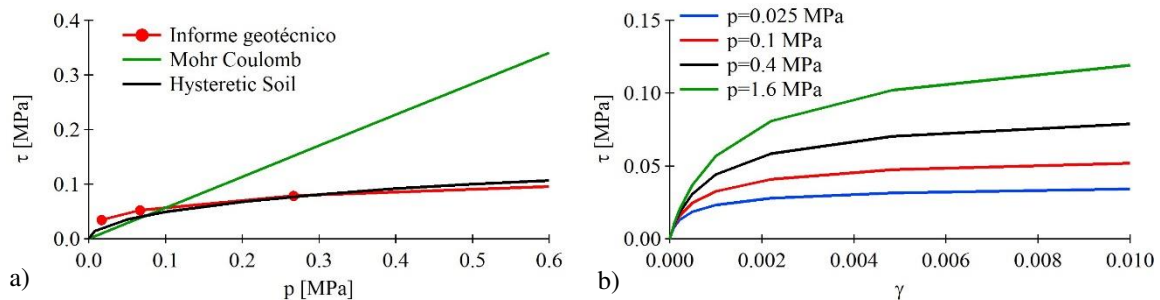


Figura 2. Ajuste del modelo *Hysteretic soil* a los resultados del estudio geotécnico. a) Resistencia al corte en función de la presión hidrostática (Propiedades de capa suelo 1 – 1.5m de profundidad) b) Tensión de corte en función de la deformación angular.

El amortiguamiento depende del área dentro de los ciclos de histéresis y está dado por:

$$D = \frac{\Delta E_i}{2\pi F_i \delta_i} \quad (3)$$

donde ΔE_i , F_i y δ_i se indican en la Figura 3a. La curva de la Figura 3b muestra la evolución del amortiguamiento histerético con la deformación angular. Si no se define la curva de amortiguamiento en función de la deformación plástica, el modelo presenta amortiguamiento definido por la regla de Mas (Darendeli, 2001).

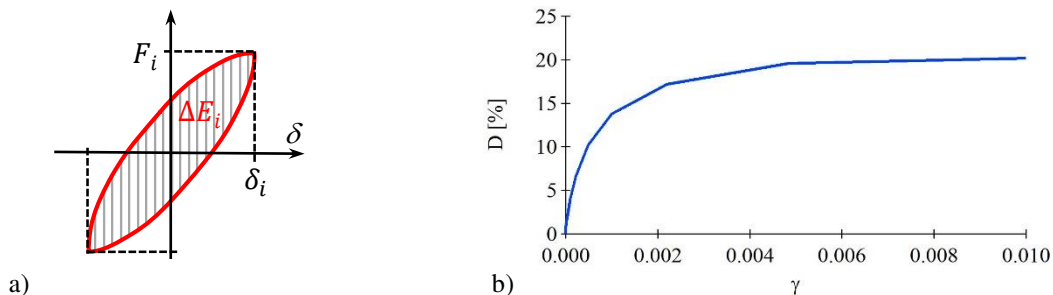


Figura 3. Amortiguamiento histerético. a) Esquema de comportamiento cíclico para definición de amortiguamiento (Arefi et al. 2012); b) Evolución del amortiguamiento para la presión de referencia ($p=0.1$ MPa)

Utilizando los parámetros calibrados, los mismos parámetros elásticos y densidad que en el modelo de Mohr Coulomb y tensión límite en tracción de 0.001 MPa, se resuelve ahora un cubo de suelo de 50 mm x 50 mm x 50 mm, sometido a carga uniaxial cuasiestática mediante un desplazamiento creciente y luego decreciente impuesto en su cara superior. En la Figura 4a se presenta la variación de la tensión con el desplazamiento obtenida. Se observa que la tensión de tracción no puede superar el límite de 0.001 MPa. En la misma figura se incluye el caso en el que el amortiguamiento se define de acuerdo al informe geotécnico. Las curvas evidencian el comportamiento no lineal con descargas en las que va cambiando la rigidez tangente y presenta amortiguamiento, aún cuando no se lo haya introducido como dato. Este comportamiento es típico de los modelos elastoplásticos de superficies anidadas. El amortiguamiento introducido es mayor que el “*mas damping*” para deformaciones bajas y luego, menor que el mismo para deformaciones mayores (Darendeli, 2001). Como consecuencia de ello, el lazo de histéresis cuya área está relacionada con el amortiguamiento es más estrecho. No obstante, la respuesta resulta algo extraña probablemente debido a que se está simulando un problema cuasiestático con un procesador explícito.

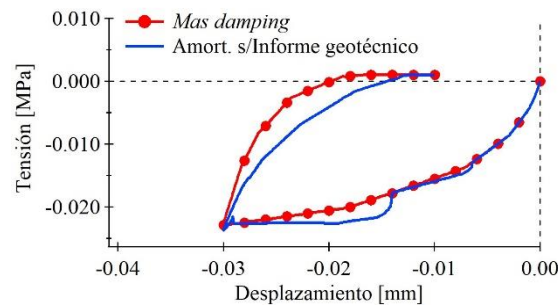


Figura 4. Cubo de suelo sometido a carga uniaxial cuasiestática (Modelo de *Hysteretic Soil*)

2.3 Comportamiento de suelo bajo carga de impacto

En esta sección se estudia el comportamiento de los modelos de suelo antes descriptos bajo carga de impacto. A tal fin, se analiza el modelo de la [Figura 5a](#), consistente en una base prismática de hormigón de 130cm x 130cm x 60cm de profundidad, con una chapa de acero en la parte superior de 100cm x 100cm x 3cm de espesor, inmersa en un volumen prismático suelo. El modelo representa un cuarto de simetría del problema. Para el hormigón que tiene una resistencia a la compresión de 30 MPa, se emplea el modelo K&C ([Fiengo et al. 2022](#)). Para la chapa de acero se emplea un modelo de plasticidad J2 con endurecimiento multilineal. En primer lugar, se aplica la aceleración de la gravedad de manera lenta como se muestra en la [Figura 5b](#) para generar el asentamiento del suelo por peso propio (suelo, base de hormigón y chapa de acero) que es un efecto cuasiestático. Luego se aplica en el centro de la chapa de acero una carga impulsiva hacia abajo correspondiente a $\frac{1}{4}$ de la carga del problema, estimada en simulaciones de impacto sobre superficie rígida. Ver [Figura 5c](#).

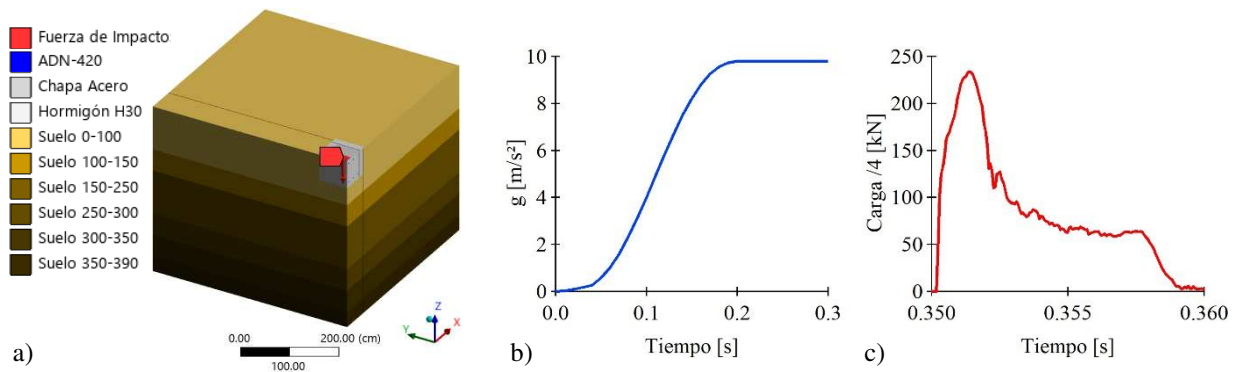


Figura 5. Suelo bajo una base de hormigón sometida a impacto. a) Modelo; b) Aceleración de la gravedad; c) Fuerza de impacto.

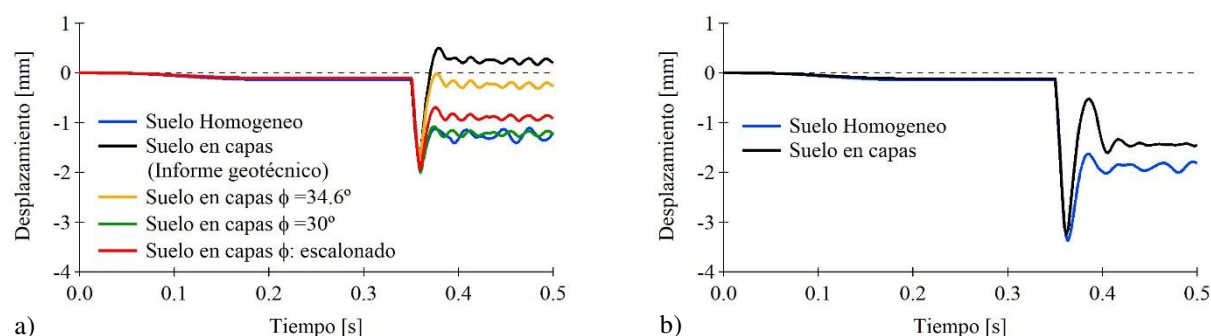
Toda la malla de elementos finitos está constituida por elementos sólidos hexaédricos lineales de 8 nodos con integración reducida (ELEM 1) con control de Hourglass (Tipo 6: Belytschko-Bindeman), salvo el caso de la armadura del hormigón armado para la que se utilizan elementos de barras lineales que están unidos a los elementos de hormigón mediante contacto. En la interfaz entre la chapa de acero y la base de hormigón y, la interfaz entre la base de hormigón y el suelo, se utilizó un contacto friccional con $\mu = 0.3$. Para la condición de apoyo, se restringieron los desplazamientos normales a las caras laterales del modelo y en el plano inferior del suelo.

Para el suelo se consideran dos situaciones: Suelo homogéneo con propiedades de la capa ubicada entre 1 a 1.5 m de profundidad y suelo con propiedades diferenciadas por capa según [Tabla 1](#) obtenidas a partir de los resultados del estudio geotécnico como se describió en la sección 2.2.

h [m]	Dens [t/m ³]	Cohes. c [MPa]	Ang fric interna ϕ [rad]	Mod. Elást. Transv G [MPa]	Coef. Poisson	Mód. Vol. K [MPa]	a ₀ [MPa]	a ₁ [MPa]	a ₂
0-1.0	1.67	0	0.60	104.55	0.30	226.53	0	0.020	-0.008
1.0-1.5	1.67	0	0.60	117.91	0.43	802.88	0	0.025	-0.010
1.5-2.5	1.89	0	0.60	231.10	0.38	885.86	0	0.100	-0.040
2.5-3.0	2.12	0	0.77	428.48	0.36	1387.44	0	0.320	-0.130
3.0-3.5	2.12	0	0.77	640.07	0.25	1066.78	0	0.700	-0.270
3.5-3.9	2.12	0	0.70	640.07	0.25	1066.78	0	0.700	-0.270

Tabla 1. Propiedades de las distintas capas de suelo.

En la [Figura 6](#) se presenta la variación del desplazamiento vertical del centro de la chapa de acero en función del tiempo. Se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo de Mohr Coulomb y con el modelo *Hysteretic Soil* y las distintas consideraciones de las capas. Hasta 0.35s se tiene el desplazamiento producido por el peso propio que es prácticamente el mismo para las distintas consideraciones y bastante menor que el producido por la carga de impacto.

Figura 6. Desplazamiento vertical del centro de la chapa de acero. a) Modelo Mohr Coulomb; b) Modelo *Hysteretic Soil*

Cuando se utiliza el modelo de Mohr Coulomb con los valores del ángulo de fricción interna variables según informe geotécnico (Tabla 1), se produce el levantamiento del centro de la chapa por efecto del impacto. Se muestran también los resultados de considerar ángulos de fricción interna constantes de 30° , 34.6° y con ángulo de fricción de [Tabla 1](#) pero multiplicado por 0.9. Resulta más razonable la respuesta del modelo *Hysteretic Soil*. Al distinguir las propiedades del suelo de las distintas capas se reduce el desplazamiento vertical final de la chapa de acero.

3 SIMULACIÓN DEL ENSAYO DE IMPACTO POR CAÍDA LIBRE

En esta sección se utilizan los modelos de suelo anteriormente calibrados para realizar la simulación de un modelo simplificado del bulto a escala de 250 kg, en adelante se lo llamara recipiente, que fue ensayado a impacto por caída libre desde 9 m de altura ([Rotili et al. 2023](#)). En la [Figura 7](#) se muestra el modelo de elementos finitos completo que incluye el recipiente, la plataforma de impacto (base de hormigón y chapa de acero) y el suelo en el que está inmersa. Los detalles de la malla y las propiedades de los materiales del recipiente son los mismos presentados en [Rotili et al. \(2023\)](#). Los modelos utilizados para el hormigón y las armaduras de la base son los mismos descriptos en la sección 2.3. En el trabajo de [Rotili et al. \(2023\)](#) las simulaciones se hicieron considerando la chapa de acero con superficie inferior fija en la

dirección vertical. En este trabajo se modela la base de hormigón y el suelo a los efectos de estudiar cómo influye la flexibilidad del conjunto en la respuesta del recipiente y validar los modelos a usar en el diseño de los ensayos del prototipo. Los detalles sobre tipo de elementos del suelo, los contactos y las condiciones de borde son similares a los del ejemplo de la sección 2.3. Se utiliza en este caso el modelo *hysteretic soil*. Las dimensiones del cilindro de suelo son lo suficientemente grandes para atenuar el efecto de reflexión de las ondas generadas por el impacto en los bordes del modelo. Se analizan distintas formas de considerar el efecto de la aceleración de la gravedad y dar tiempo a que se produzca el asentamiento del suelo por peso propio: a) Aceleración de la gravedad constante que inicia en el momento del impacto; b) Aceleración de la gravedad constante durante 0.3s y luego impacto; c) Aceleración de la gravedad aplicada en forma gradual durante 0.3s como en [Figura 5b](#) y luego impacto. En todos los casos el recipiente alcanza la chapa de acero con la velocidad correspondiente a caída libre desde 9m de altura (13.3 m/s).

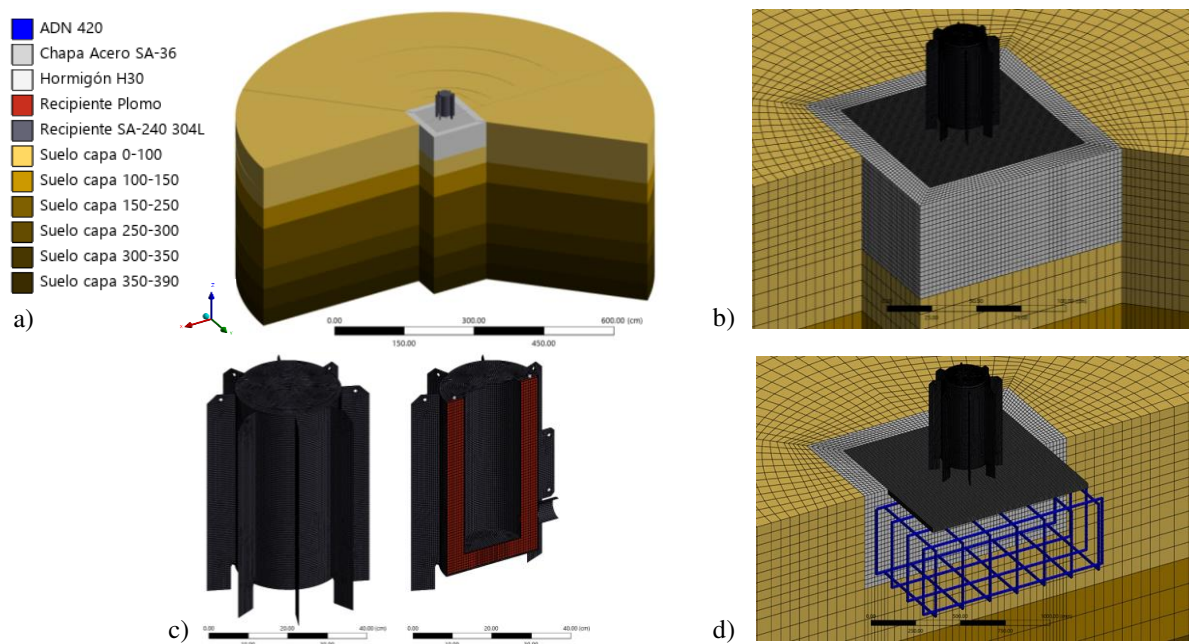


Figura 7: Modelo de impacto por caída libre de 9m. a) Vista de las capas de suelo; b) Malla de elementos finitos de la plataforma de hormigón armado y del suelo; c) Recipiente y detalle interno; d) Detalle de la armadura de la plataforma de H°A°.

En la [Figura 8a](#) se puede ver la evolución de la fuerza de impacto, para el caso de la chapa de acero fija ([Rotili et al. 2023](#)) y también considerando la chapa de acero, la base de hormigón y el suelo bajo la misma, con las distintas formas de introducir el efecto gravitatorio. Las curvas de los casos b) y c) han sido desplazadas en el tiempo para comparación. Las fuerzas de impacto no difieren sustancialmente para las distintas consideraciones. En el caso de la chapa fija en la base son levemente mayores que cuando se considera la flexibilidad de la plataforma y el suelo.

En la [Figura 8b](#) se puede ver la evolución de los desplazamientos verticales del centro de la chapa de acero producidos por el impacto del recipiente, para el caso de la chapa fija ([Rotili et al. 2023](#)) y nuevamente considerando la chapa de acero, la base de hormigón y el suelo bajo la misma, con las distintas formas de introducir el efecto gravitatorio. La curva correspondiente a la chapa de acero fija en la base y la del caso a) han sido desplazadas en el tiempo para comparación. El asentamiento del suelo por el peso del mismo y de la plataforma demora alrededor de 0.3 s en estabilizarse, mientras la fuerza debida al impacto dura alrededor de 12 ms. Esto hace que en el caso a), en el que ambas acciones se aplican simultáneamente en el

tiempo, no se haya producido el asentamiento durante el tiempo de análisis. En el caso b) se observan las vibraciones producidas por la aplicación de la gravedad como función escalón, lo cual no ocurre en la realidad porque se trata de un proceso cuasiestático. No obstante, se puede diferir la aplicación del impacto para que estas oscilaciones estén suficientemente atenuadas.

En general, cuando se considera la base de hormigón y el suelo, los resultados de los distintos casos aproximan bien el desplazamiento medido luego del ensayo de -0.7mm respecto del nivel del suelo ya asentado de -0.176mm .

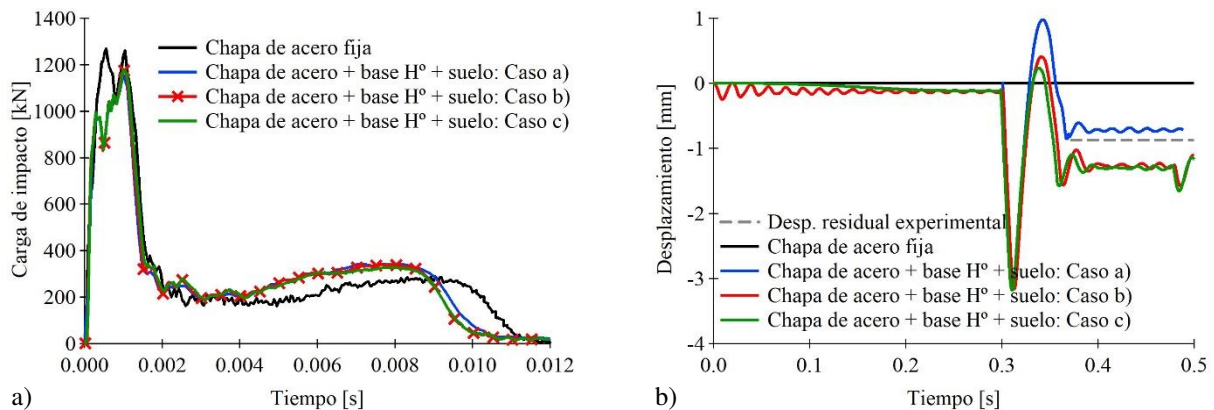


Figura 8: Respuesta a impacto por caída libre del modelo. a) Fuerza total de impacto en la chapa de acero; b) Desplazamiento vertical del centro de la chapa de acero.

En la [Figura 9a](#) se pueden ver las deformaciones plásticas efectivas del suelo para el caso a). Se observa que, por efecto del impacto, el suelo plastifica alrededor de las aristas de la base de hormigón, absorbiendo parte de la energía de la caída, ver [Figura 9b](#). La energía residual de la [Figura 9b](#) corresponde a la energía disipada por el suelo y resulta mayor en el caso a) que en los casos b) y c) descontando en estos la energía durante el asentamiento por peso propio.

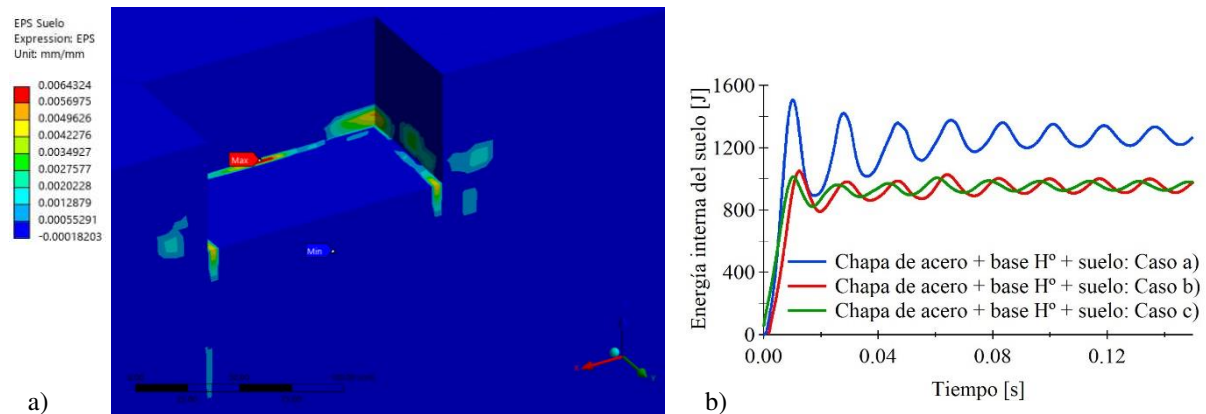


Figura 9: Respuesta del suelo a impacto caída libre del modelo. a) Deformación plástica efectiva del suelo Caso a); b) Evolución de la energía interna del suelo.

En la [Figura 10](#) se pueden ver las deformaciones plásticas efectivas del recipiente para las distintas condiciones de apoyo de la chapa de acero y casos de aplicación de la aceleración de la gravedad. Se observa que la influencia de las diferencias de flexibilidad del conjunto plataforma-suelo en las deformaciones permanentes del recipiente son pequeñas, 10% si se compara la placa apoyada en su base con los casos en los que se considera la plataforma de hormigón y el suelo y 1% entre las distintas formas de aplicar la aceleración de la gravedad.

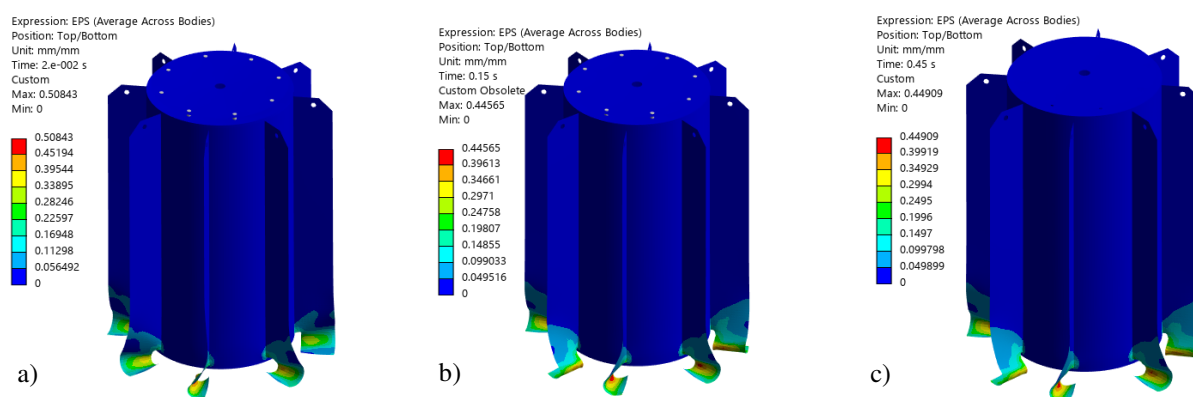


Figura 10. Deformaciones plásticas efectivas del recipiente. a) Chapa de acero fija en la superficie inferior; b) Chapa de acero sobre base de hormigón y suelo con asentamiento - Caso a); b) Placa de acero sobre base de hormigón y suelo - Caso c).

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia numéricamente el impacto de un recipiente que representa un bulto de transporte a escala sometido a impacto por caída libre a fin de validar los modelos disponibles para el suelo. Los resultados muestran que el modelo *Hysteretic Soil* reproduce adecuadamente el comportamiento del suelo bajo este tipo de solicitaciones. La consideración de las distintas capas de suelo con rigidez y resistencia creciente en profundidad permite reproducir mejor los resultados experimentales de los desplazamientos de la chapa de acero.

La aplicación de la gravedad en forma gradual permite simular adecuadamente el efecto cuasiestático del peso propio. Si lo que se busca es una solución rápida y conservadora para el recipiente, se puede aplicar simultáneamente la gravedad y el impacto.

La consideración del asentamiento previo del suelo por peso propio del mismo y de la plataforma de impacto conduce desplazamientos mayores, pero del mismo orden que los registrados en el ensayo. La diferencia puede atribuirse, en parte, al uso de los valores de resistencia residual para calibrar el modelo.

Si bien la plataforma de impacto y el suelo absorben parte de la energía, la flexibilidad provista por la plataforma de impacto y el suelo bajo la misma no afectan sensiblemente las deformaciones inelásticas del modelo. Esto muestra que, a los efectos del diseño, se puede trabajar con un modelo que no incluya el suelo, que conduce a resultados conservadores, y luego hacer la verificación con el modelo completo. También muestra que un aumento de la rigidez de la plataforma de impacto y del suelo debajo de la misma no modifican prácticamente el daño del recipiente como lo especifica la norma.

Los resultados numéricos obtenidos en este trabajo corresponden a un modelo de dimensiones reducidas. No se puede escalar directamente a un bulto de dimensiones reales con otra geometría por lo que debería hacerse la verificación en cada caso.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a Dioxitek S.A por permitir la publicación del presente documento. También se agradecen al CONICET y a la UNT por el apoyo económico brindado.

REFERENCIAS

- ARN, Transporte de Materiales Radiactivos - Norma AR10.16.1 Revisión 3, 2016.
 Arefi, M.J., Cubrinovski M. and Bradley, B.A. A model for nonlinear total stress analysis with consistent stiffness and damping variation, 15 WCEE Lisboa 2012.

- Cadot, N., Bourasseau, N., Abas Mohamed, M., Louis, B., Graff, G., Ledroit, F.; Gauthier, F. and Le Bars, I. Full numerical approach to demonstrate compliance with safety standards. Patram 2022. 20th Int. Symp. Packaging and Transportation of Radioactive Materials, 2023.
- Darendeli, M.B. *Development of a new family of normalized modulus and material damping curves*. PhD Thesis, The University of Texas at Austin, USA, 2001.
- Fiengo Pérez, F., Luccioni, B., Vivas, J.C., Isla, F. and Sfer, D. High strength fiber reinforced beams under impact load. *Int J Impact Eng*, 159:104039, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104039>
- Gaiazov, A.Z., Gaiazov, O.Z., Kozlov, V.Y., Pavlov, S.V. and Samsonov, A.A. Calculation and experimental studies for the spent nuclear fuel shipping cask sealing assembly. *Nuclear Energy and Technology*, 9(3): 183–187, 2023. <http://doi.org/10.3897/nucet.9.113520>
- Hao, Y., Li, Y., Lin, M., Wu, B., Ma, T., Wang, H., Liu B. and Wang J. Containment integrity and sealing assessment for htr-pm600 fresh fuel transport package under impact loading, *Front Energy Res*, 10:914090, 2022. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.914090>
- Ivančo, V., Orečný, M., Huňady, R., and Kalina, M. Simulation of 9 m Drop Test of the Cask for Transport of Radioactive Material. *Amer J of Mech Engng*, 1(7): 198-203, 2013.
- Jia, B., Rusinek, A., Pesci, R., Bernier, R., Bahi, S., and Bendarma, A. , Wood, P. Simple shear behavior and constitutive modeling of 304 stainless steel over a wide range of strain rates and temperatures, *Int J of Impact Eng*, 154:103896, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103896>
- Kim, H-T., Seo, J-M., Seo, K-W., Yoon, S-H., Kim, Y-J. and Oh, C Y. Effect of material hardening model for canister on finite element cask drop simulation for strain-based acceptance evaluation. *Nuclear Engng and Tech*, 54:1098e1108, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.006>
- Lan, T., Dong, J. and Sheng, F. Experimental and numerical investigation of scale model used in the development of a spent nuclear fuel transport cask. *J Vib Control*, 0: 1-13, 2024.
<https://doi.org/10.1177/107754632412376>
- Li, X-X., Wang, C. and Sato, J. Framework for dynamic analysis of radioactive material transport packages under accident drop conditions. *Nuclear Eng Des*, 360: 110480, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110480>
- Li, Z.C., Yang, Y.H., Dong, Z.F., Huang, T. and Wu H. Safety assessment of nuclear fuel reprocessing plant under the free drop impact of spent fuel cask and fuel assembly part I: Large-scale model test and finite element model validation. *Nuclear Eng & Tech* 53:2682e2695, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.02.004>
- Lim, J., Yang, Y.Y., Lee, J-Ch. Numerical estimation of errors in drop angle during drop tests of IPTYPE metallic transport containers for radioactive materials. *Nuclear Eng &Tech*, 53:1878e1886, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.12.022>
- Rotili, C., Beltramo, G., Chimenti, M., Isla, F., Luccioni, B. Simulación de ensayos de impacto por caída libre de un modelo simplificado de un bulto de transporte de CO-60. *Mecánica Computacional*, XL: 619-628, 2023.
- Saito, Y., Kishimoto, J., Matsuoka, T., Tamaki, H., and Kitada, A. Containment integrity evaluation of MSF-type cask for interim storage and transport of PWR spent fuel. *Int J Press Vessel Pip*. 117-118: 33e41, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2013.10.007>
- Wu, T-Y., Lee, H-Y. and Kang, L-C. Dynamic response analysis of a spent-fuel dry storage cask under vertical, drop accident. *Annals Nuclear Ener*, 42: 18–29, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.12.016>
- Yoo, Y., Kim, J., Park, J. and Kim H. Development of nuclear fuel assembly finite element model for mechanical. *Nuclear Eng Des*, 413:112523, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112523>