

## **SIMULACIÓN DE ENSAYOS DE IMPACTO POR CAÍDA LIBRE DE UN MODELO SIMPLIFICADO DE UN BULTO DE TRANSPORTE DE CO-60**

### **SIMULATION OF DROP TESTS OF A CO-60 TRANSPORT PACKAGE SIMPLIFIED MODEL**

**Cristian F. Rotili<sup>a</sup>, Guillermo Beltramo<sup>a</sup>, Martín Chimenti<sup>a</sup>, Facundo Isla<sup>b</sup> y Bibiana Luccioni<sup>b</sup>**

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

<sup>b</sup> Instituto de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, CONICET, CIMNE IBER, Av. Independencia 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina, <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/>

**Palabras clave:** Impacto, caída libre, bulto de transporte, 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 de verificar las herramientas y modelos numéricos a utilizar en el diseño del bulto. A tal fin se simuló y se ensayó un modelo simplificado a dos caídas consecutivas. En el trabajo se describe el modelo utilizado para la predicción numérica del conjunto previa al ensayo y se analizan los resultados obtenidos que se comparan con los del ensayo. Complementariamente, se presentan estudios que muestran la influencia sobre los resultados de algunos datos de los materiales intervinientes que no se conocen con precisión y de las formulaciones usadas en la modelación numérica que, de alguna forma, justifican las diferencias encontradas entre la primera predicción y los resultados experimentales.

**Keywords:** Impact, drop weight, transport package, explicit dynamic simulation.

**Abstract.** This paper presents a study carried out as a preliminary stage in the process of designing a package for the transport of Co-60 developed by IMPSA S.A. for the firm Dioxitek S.A. with the objective of verifying the tools and numerical models to be used in the design of the package and evaluation of full-scale tests. A simplified model was simulated and tested under two consecutive impact tests for this purpose. The work describes the model used for the numerical prediction and analyzes the results obtained that are compared with those of the test. Complementarily, studies that show the influence on the results of some data of the intervening materials that are not precisely known and of the formulations used in the numerical modeling are presented. In some way, the results justify the differences found between the first prediction and the 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. Estas últimas incluyen, entre otras, la caída desde 1 m sobre un punzón y la caída libre desde una altura de 9 m sobre una superficie rígida. Para el diseño de nuevos bultos 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 constituye una herramienta indispensable para el diseño de los nuevos bultos y la determinación de las posiciones de caída más desfavorables en las cuales se deberá ensayar los especímenes, evitando la realización de un gran número de ensayos. 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. 2021; Kim et al. 2022; Hao et al. 2022) algunos de los cuales incluyen comparación con resultados experimentales. En general, los trabajos se han realizado con códigos comerciales y no presentan los detalles completos de los modelos numéricos ni su validación.

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.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL BULTO Y ENSAYOS

El bulto utilizado para estos ensayos no representa un modelo a escala reducida del contenedor a diseñar, pero fue pensado para que tuviera formas y materiales similares de manera que pudiera servir para estimar la capacidad predictiva de los modelos numéricos en este tipo de problemas.

### 2.1 Geometría y materiales

En la Figura 1 se muestra el bulto ensayado que está constituido por distintos materiales que se indican en Tabla 1. El mismo se ensayó sobre una plataforma de acero anclada en una base de hormigón armado. La plataforma completa que fue diseñada con ayuda de simulaciones numéricas preliminares de manera que resistiera los impactos previstos y, a la vez, cumpliera con las especificaciones de la norma AR 10.16.1 que establece que la plataforma debe ser lo suficientemente rígida como para que un aumento de rigidez no modifique la respuesta del bulto en el impacto. Para uno de los ensayos se colocó sobre la placa de acero otra placa con punzón removible.

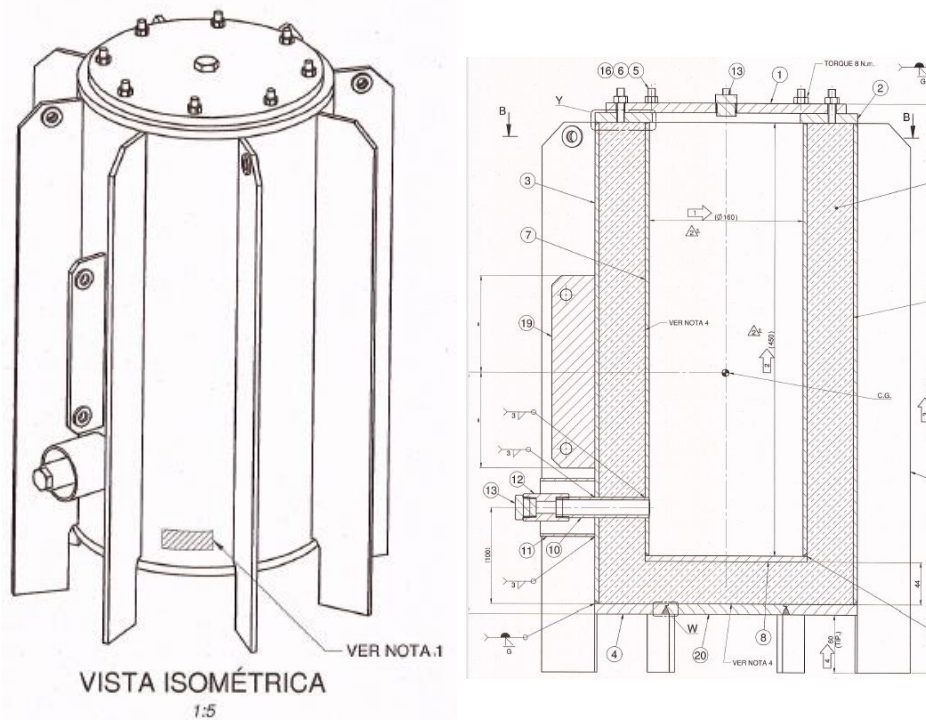


Figura 1: Bulto ensayado. a) Vista, b) Corte.

## 2.2 Ensayos realizados

El modelo se sometió a dos ensayos de caída libre consecutivos que representan caídas de accidente establecidas por la Norma AR10.16.1 (2016).

- 1) El primer ensayo consistió en una caída libre desde una altura de 1 m sobre la placa con punzón (Caída II). Para este ensayo el bulto se colocó en posición horizontal de manera que el punzón impactara en la zona entre dos aletas.
- 2) El segundo ensayo consistió en una caída libre en posición vertical (como se muestra en la Figura 1a) (Caída I).

En las Figuras 2a y 2b se muestra la deformación del bulto luego de la caída II y I respectivamente. En la Figura 2a se puede ver la impronta del punzón en el tubo externo que resultó con una profundidad de aproximadamente 15 mm. El punzón se deformó aproximadamente 0.5 mm en dirección vertical. Adicionalmente, se registró el cambio en el diámetro del recinto interno a la altura del impacto que resultó: 3.64 mm de acortamiento en dirección de la caída y 1.15 mm de aumento de diámetro en dirección transversal a la caída. Como se muestra en la Figura 2b, durante la caída se doblaron las puntas inferiores de las aletas que tienen una longitud libre de 60 mm (Ver Figura 1b), pero el fondo que quedó ligeramente convexo, no llegó a tocar la placa de impacto.

## 3 SIMULACIÓN NUMÉRICA

### 3.1 Modelo numérico

Las simulaciones numéricas se realizaron con el hidrocódigo comercial LS DYNA. En el modelo que se realizó previamente al ensayo se modeló todo con elementos de cáscara, excepto el núcleo de plomo y la placa de impacto que se modelaron con elementos sólidos. Para los sólidos se utilizaron elementos hexaédricos de 8 nodos e integración reducida (ELEM 1) con control de Hourglass Tipo 6 (Belytschko-Bindeman). En el caso de cáscaras, se utilizaron elementos SHELL cuadriláteros de 4 nodos con integración reducida y control

de Hourglass Tipo 4 (Flanagan-Belytschko) y 3 puntos de integración en el espesor. El tamaño de los elementos era de 5 mm en el plano de las cáscaras. En la Figura 3a se puede ver un detalle de la malla de elementos finitos para el caso de la caída II. No se muestran la placa con el punzón ni la placa de impacto.

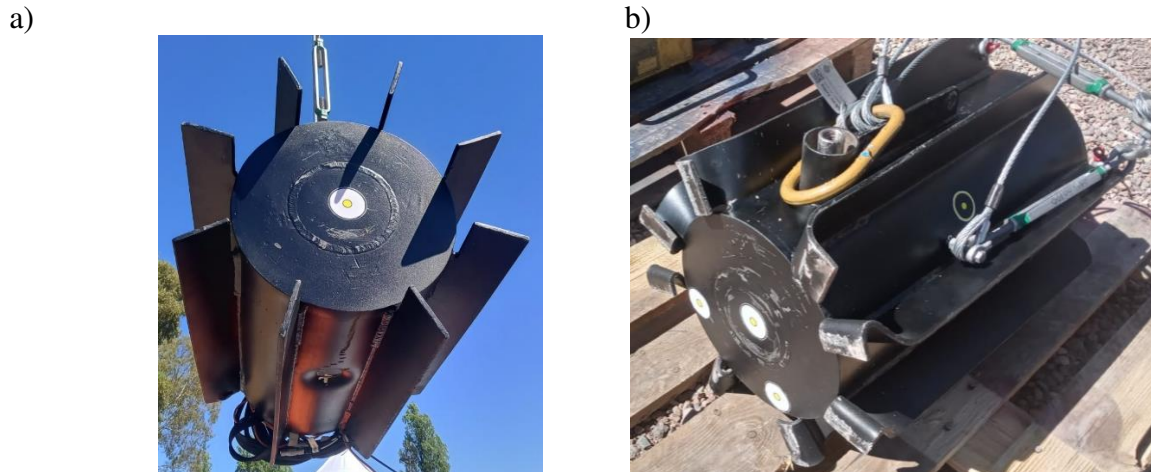


Figura 2: Bulto ensayado: a) Luego de la caída II; b) Luego de ensayo a caída II seguida de caída I

Los espárragos de la tapa se modelaron mediante elementos de viga de sección circular que admiten un comportamiento no lineal del material y de los cuales se puede obtener los esfuerzos axiales, de corte y flexión a los que están sometidas.

En la Figura 3b se pueden ver los materiales correspondientes a las distintas partes del modelo. En la Tabla 1 se presentan las principales propiedades mecánicas utilizadas para los distintos materiales. Las propiedades del SA-312 304L se consideraron similares a las del acero SA-240 304L. En todos los casos se usaron modelos elastoplásticos con criterio de Von Mises, flujo asociado y endurecimiento multi-lineal. Los valores de tensión y deformación consignados en Tabla 1 corresponden a valores de tensión real y deformación real obtenidos a partir de los valores ingenieriles consignados en las referencias asignadas. En ningún caso se establecieron criterios de falla. Tampoco se tuvo en cuenta en la simulación preliminar el efecto de la velocidad de deformación en las propiedades del material (*Strain-rate effect*), lo que es conservativo dado que las propiedades mecánicas de los materiales se incrementan al aumentarse la velocidad de deformación.

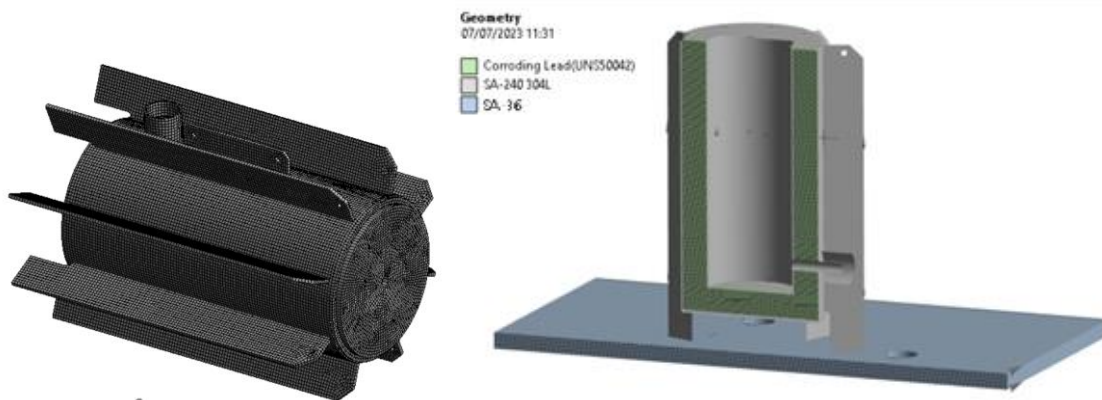


Figura 3: Modelo. a) Malla de elementos finitos (Caída II); b) Materiales aplicados (Caída I)

Se definió contacto tipo contacto friccional (coeficiente de fricción 0.3), sin gap, de todas

las partes entre sí, y consigo mismas en caso de plegados. Este contacto incluye todas las partes y materiales del modelo, tanto de plomo como de acero. Se utilizó un algoritmo de penalización en el cual se calcula una rigidez adicional de contacto denominada rigidez de estabilidad porque está basada en el criterio de estabilidad de Courant y depende de la masa de los segmentos en contacto y del paso del tiempo. Se utiliza en cada paso la mayor entre esta rigidez y la del algoritmo de penalización convencional.

La única condición de borde de los modelos es el empotramiento de la superficie inferior de la placa de impacto de acero, lo cual implica que la plataforma de hormigón donde apoya esta es infinitamente rígida e indeformable, siendo esta una hipótesis conservativa.

En la simulación de ambos ensayos se colocó el bulto a una distancia muy pequeña de la placa de impacto o el punzón. Y se impuso, como condición inicial, una velocidad de caída determinada con el criterio de conservación de energía potencial, despreciándose el efecto de la resistencia del aire. Las velocidades iniciales correspondientes a los ensayos de caída I y II resultan 13.3 y 4.45 m/s respectivamente.

Adicionalmente, se incluyó la aceleración de gravedad ( $9.81\text{m/seg}^2$ ) en todos los modelos analizados, siempre en dirección y sentido coincidente con la velocidad impuesta.

Se realizó un análisis explícito que consiste en la simulación del ensayo de caída II en la posición mostrada en Figura 3a durante 15 ms. Luego el bulto deformado y con los estados de tensión resultantes de la caída II fue sometido a la caída I en posición vertical como se indica en la Figura 3b y se simularon 20 ms. Para hacer las dos caídas secuenciales, en el entorno Workbench se levantaron los resultados de la caída II con el módulo External Model y se pasaron a un nuevo módulo de LS DYNA en el que se agregó la plataforma de impacto para impacto vertical.

Propiedades	Materiales		
	SA-240 304L (1)	Plomo (2)	SA-36 (1)
Densidad [ $\text{kg/mm}^3$ ]	8.0272E-6	1.134E-5	7.85E-6
Mód de elasticidad [MPa]	195000	14000	202000
Coef. de Poisson	0.31	0.42	0.3
Tens. Fluencia [MPa]	170.00	5.50	250.00
Tens. Máx. [MPa]	654.75	20.58	450.58
Def. tens.máx	0.299	0.385	0.181
Observaciones	Cuerpo del modelo, tubo de drenaje, tapa	Blindaje radiológico	Placa de impacto punzón

(1) ASME, 2019, (2) Asimilado a corrodng Lead UNS50042 (AMS, 2019)

Tabla 1. Principales propiedades mecánicas de los materiales

### 3.2 Principales resultados y comparación con resultados experimentales

En la Figura 4 se muestran las deformaciones del bulto luego de ambas caídas. Es clara la impronta producida por el punzón que externamente tiene una profundidad de 19.2 mm. Además, la disminución diámetro del recinto interno vertical es 13.6 mm y el aumento del diámetro horizontal de 0.5 mm. La forma de la impronta es similar a la de la Figura 2 pero las deformaciones son mayores en el modelo, siendo más marcada la diferencia en el recinto interno. La deformación vertical del punzón en el borde de la cara superior es de 0.45 mm.

Cuando se somete el bulto a la caída I luego de la caída II, las aletas se deforman de manera similar a lo observado en el ensayo, pero la deformación es mayor en el modelo numérico, llegando a chocar el fondo del bulto contra la plataforma. El acortamiento de las aletas máximo es de 58,2 mm. El fondo queda convexo, desplazándose el centro 1.8 mm respecto del contorno del mismo. La Figura 4c muestra la evolución de la fuerza de impacto en la plataforma que evidencia un primer golpe cuando pegan las aletas y un segundo golpe del fondo del recipiente

contra la plataforma. También se ha graficado el desplazamiento del fondo evidenciándose el impacto del mismo sobre la plataforma y posterior rebote.

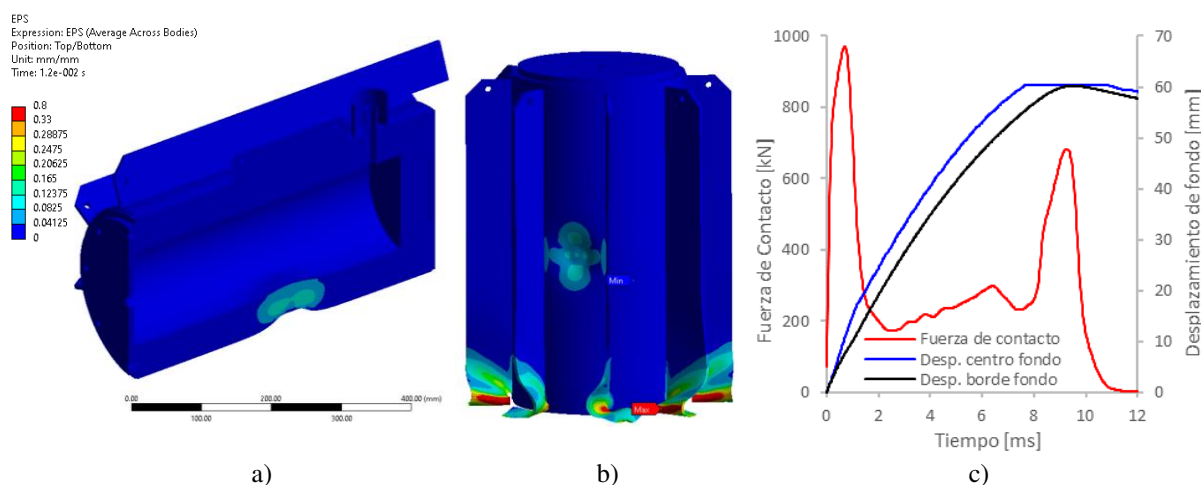


Figura 4: Resultados de las simulaciones: a) Deformación luego de caída II, b) Deformación luego de caída II seguida de caída I. c) Evolución de la fuerza de impacto y desplazamiento del fondo.

En la caída II la deformación plástica efectiva está cercana a la máxima del material mientras que en la caída I la supera ampliamente y el máximo se concentra en la parte inferior de la unión de las aletas con el tubo externo. Esto está en coincidencia con lo observado en el ensayo que evidenció la falla de la soldadura de algunas aletas en esa misma zona.

La comparación de los resultados muestra que la simulación realizada previamente al ensayo es conservadora como se supuso.

## 4 ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

En este punto se estudia la sensibilidad, de manera cualitativa, de la respuesta numérica de los ensayos de caída a distintos parámetros y condiciones del modelo de las cuales no se tienen datos ciertos, a los efectos de evaluar hasta qué punto estos parámetros o consideraciones pueden justificar las diferencias encontradas con los resultados experimentales. Por una cuestión de simplicidad en la interpretación de los resultados, estos estudios se hicieron sobre los ensayos de caída I y/o II en forma independiente pero no sobre los dos ensayos consecutivos.

### 4.1 Modelos y propiedades de los materiales.

En primer lugar, se incluyó en los modelos la dependencia de la velocidad de deformación. Se utilizó para ello el modelo de Cowper & Symonds en el que la tensión de fluencia depende de la velocidad de deformación a través de la siguiente ecuación

$$\sigma_y = \sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] = \sigma_{yest} \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] = DIF \sigma_{yest} \quad (1)$$

Donde  $\sigma_y$  es la tensión de fluencia,  $\sigma_{yest}$  es la tensión de fluencia estática,  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$  y  $p$  son constantes del material,  $\dot{\varepsilon}$  es la velocidad de deformación y  $DIF$  es el factor de amplificación dinámica. Como no se cuenta con ensayos dinámicos del acero 304 L, se recopilaron valores de  $DIF$  para este acero en la bibliografía que se presentan en Figura 5a. Puede verse que la curva dada por Cadoni et al. (2012) que corresponde a  $C = 39145$  1/s y  $p = 4.83$  representa un efecto intermedio.

Por otro lado, la curva de endurecimiento multilínea utilizada no coincide exactamente con la del acero. En la Figura 5b se muestra la curva de endurecimiento dada por ASME (2019)



para este acero (línea naranja), la cual se utiliza solo en los resultados mostrados en la Figura 8, comparándola con la curva realmente implementada en el modelo de referencia (línea celeste, que es la que se utilizó preliminarmente dado que son los datos con los que se contaba en el momento, y es la que se utilizaría en etapa de diseño cuando no se tienen datos certeros de las propiedades del material efectivo). Adicionalmente se modificó la curva de endurecimiento del acero de las aletas por la de un acero 304, con los datos de fluencia y rotura dados por el certificado de calidad del proveedor de la chapa de las aletas, la cual que se incluyó en Figura 5b (línea gris).

Tampoco se cuenta con datos ciertos sobre las propiedades del plomo por lo que se prueba con las propiedades provistas por Zhang et al. (2019) para un plomo 99.9%:  $A = 9.574 \text{ MPa}$ ,  $B = 24.48 \text{ MPa}$ ,  $n = 0.392$ ,  $C = 11359 \text{ 1/s}$ ,  $p = 10.469$ . En la Figura 6 se muestran el factor de amplificación dinámica y la curva de endurecimiento.

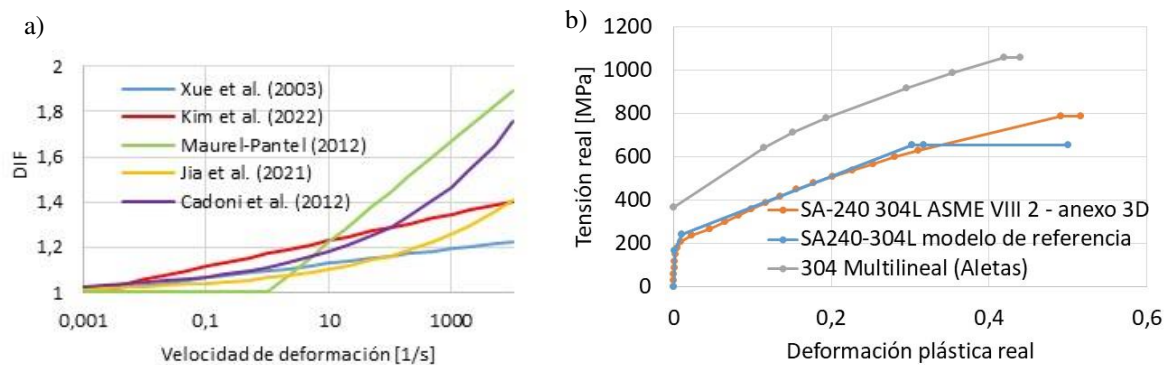


Figura 5: Propiedades del acero 304 L y 304: a) Factor de amplificación dinámica; b) Curva de endurecimiento

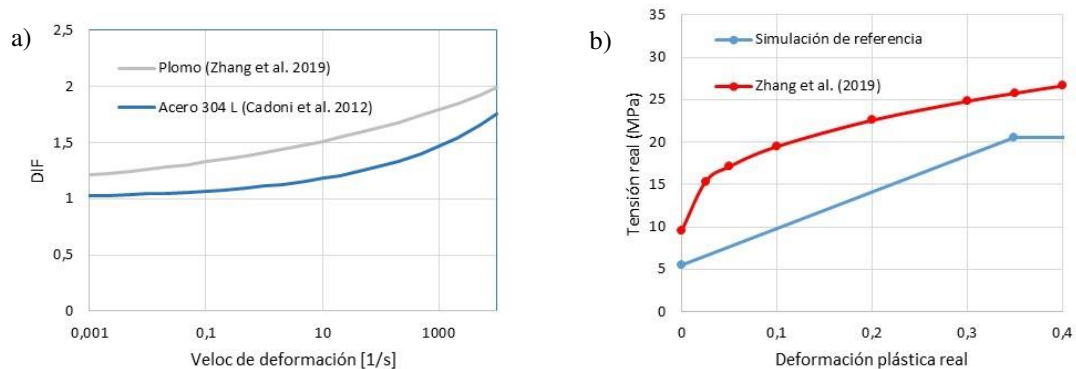


Figura 6: Propiedades del plomo 99.9%: a) Factor de amplificación dinámica; b) Curva de endurecimiento

En la Figura 7 se comparan las deformaciones plásticas efectivas luego de la caída I obtenidas con el modelo con las aletas de acero SA-240 304L con efecto *strain rate*, nueva curva de endurecimiento y nuevo modelo de plomo y las obtenidas con el modelo en el que las aletas son de acero SA-240 304 con la curva de endurecimiento definida en Figura 5b. Se puede observar que, al ser más resistente el acero SA-240 304, las aletas se deforman menos y las deformaciones efectivas plásticas máximas no se alcanzan en las aletas. El desplazamiento vertical del fondo es menor que en el modelo original y en ninguno de los casos de la Figura 7a y 7b el fondo del bulto golpea la plataforma.

En la Figura 8 se muestra la evolución de la profundidad de la impronta externa e interna (cambio de diámetro vertical) a lo largo del tiempo, obtenidos para los distintos modelos y propiedades usadas para los materiales, junto con los puntos que representan las deformaciones

remanentes medidas en el ensayo. Adicionalmente, en la Tabla 2 se presentan los valores finales de cambio de diámetro obtenidos con los distintos modelos indicados en la Figura 8 y los obtenidos en el ensayo. Se observa que, como era de esperar, al agregar el efecto *strain rate* disminuye las deformaciones y el mismo efecto tiene el nuevo modelo del plomo.

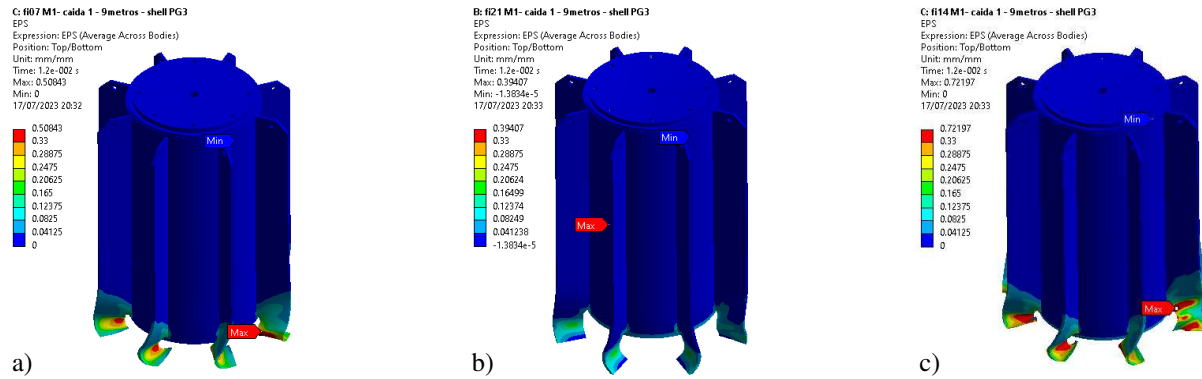


Figura 7. Comparación deformaciones plásticas efectivas caída I. a) Aletas SHELL de SA-240 304L con strain-rate (5mm); b) Aletas SHELL de SA-240 304 con strain rate (5mm); c) Aletas SHELL de SA-240 304L con strain rate (2mm)

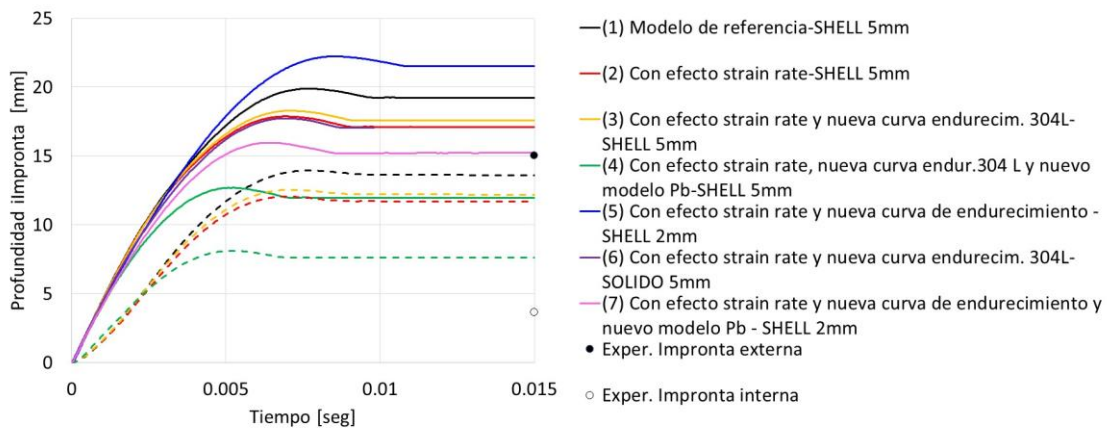


Figura 8. Deformaciones luego de caída II. (Línea llena impronta externa, línea de trazos impronta interna)

Deformación [mm]	Exper.	Modelo numérico (según referencias Figura 8)						
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Diám. vert. ext. (-)	-15.00	-19.23	-17.11	-17.58	-11.98	-21.54	-17.05	-15.23
Diám. vert. int (-)	-3.64	-13.61	-11.70	-12.20	-7.62	---	---	---
Diám. horiz. int (+)	1.15	0.53	0.55	0.53	0.40	---	---	---

Tabla 2. Cambios de diámetros finales luego de caída II

### 4.2 Densidad de la malla

Se redujo el tamaño de los elementos establecido en 5 mm a 2 mm. En las Figuras 7c y 8 y Tabla 2 se incluye la comparación de las deformaciones correspondientes a este caso. Se puede ver, al reducir el tamaño de los elementos, las deformaciones y desplazamientos aumentan.

Las pruebas realizadas con 9 puntos de integración en el espesor de las cáscaras muestran resultados prácticamente coincidentes en desplazamientos.



### 4.3 Tipo de elementos finitos

Se comparan en esta sección las soluciones obtenidas con elementos de cáscara con las obtenidas con elementos sólidos (elementos hexaédricos de 8 nodos e integración reducida y control de hourglass Tipo 6: Belytschko-Bindeman en los tubos y aletas. En ambos casos los elementos tienen 5 mm x 5 mm en el plano, en el caso de cáscaras se usan 9 puntos de integración en el espesor y en el caso de elementos sólidos se usan 6 elementos en el espesor.

En la Figuras 9 a y b se muestra la comparación de los resultados de la caída I modelada con elementos de cáscara y elementos sólidos respectivamente. Se observa que en el modelo con elementos sólidos las aletas se deforman mucho menos y de forma distinta que en el modelo con elementos de cáscara. Es necesario usar aún más elementos en el espesor para reproducir la deformación de las aletas. Además, en el modelo con elementos sólidos se alcanzan deformaciones plásticas efectivas mayores que en el modelo con elementos de cáscara, pero estos valores corresponden a la unión de las aletas con el cilindro externo. La profundidad de la impronta interna obtenida con elementos sólidos para los tubos de acero resulta ligeramente menor que con elementos de cáscara, ver Figura 8 y Tabla 2.

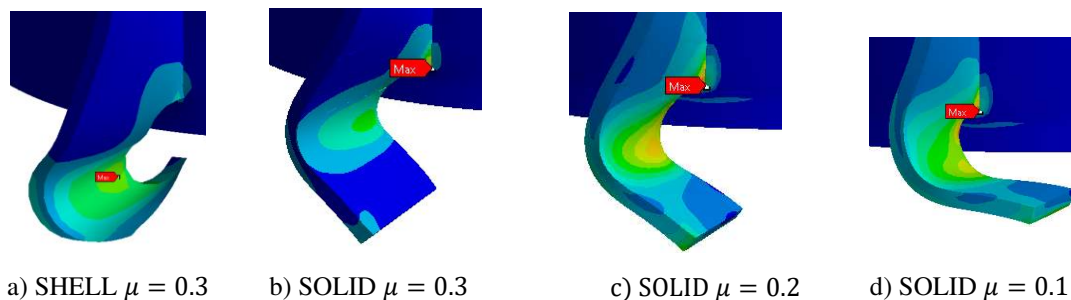


Figura 9. Deformaciones de las aletas luego de caída I, distintos elementos y coeficientes de roce.

### 4.4 Otros parámetros

En la Figura 9 también se muestra el efecto del coeficiente de roce en la base en la deformación de las aletas en la caída I. Se observa que, si se disminuye el coeficiente de roce en la base, se deforman más las aletas y puede llegar a pegar el fondo del bulto contra la plataforma. El coeficiente de roce entre los tubos de acero y el núcleo de plomo afecta levemente la profundidad de la impronta y los cambios de diámetro interno.

Otro parámetro que afecta la deformación de las aletas en la caída I es la inclinación del bulto. En la Tabla 3 se compara la fuerza de impacto y el desplazamiento de la base para distintas inclinaciones respecto de la vertical que suponen el primer golpe de una aleta. Los resultados corresponden a modelo con elementos sólidos de 5 mm y aletas modeladas con SA-240 304. Se puede observar que el desplazamiento máximo resultante es menor que 60 mm, lo cual significa que, en ninguno de los casos, pega el fondo del bulto contra la plataforma, pero una mínima inclinación del bulto da lugar a deformaciones mucho mayores de las aletas y la fuerza de impacto pico disminuye.

Inclinación [°]	0	0.56	1.12
Fuerza de Impacto máx [kN]	1990.2	1617.3	1427.9
Desplazamiento resultante máx [mm]	12.99	31.62	39.01

Tabla 3. Efecto de la inclinación del bulto en caída I

## 5 CONCLUSIONES

El modelo numérico logra reproducir adecuadamente las deformaciones del modelo ante las

caídas sucesivas y, con los parámetros de referencia, conduce a resultados conservadores respecto de las deformaciones del recinto y del plomo que son las que interesan para mantener el blindaje. Los estudios de sensibilidad realizados muestran que las diferencias encontradas en la profundidad de la impronta, así como los cambios de diámetro del recinto interno pueden deberse a la no consideración del efecto de la velocidad de deformación en el material y las diferencias de las propiedades de los materiales. Ajustando adecuadamente estas propiedades y refinando la malla, se podría reproducir con mayor precisión estas deformaciones.

Las deformaciones de las aletas para el ensayo de caída I dependen mucho de parámetros difíciles de medir y controlar como el rozamiento con la placa de impacto, una leve inclinación del bulto en la caída o, incluso pequeñas imperfecciones de fabricación de las aletas o asimetrías inducidas por el golpe previo. De todas formas, se observa que estas deformaciones no condicionan significativamente el blindaje del bulto.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Dioxitek S.A por permitir la publicación del presente documento.

## REFERENCIAS

- AMS, *Metals Handbook*, Vol 2. Properties and Selection: Non ferrous Alloys and Special Purpose Materials, 1990.
- ARN, *Transporte de Materiales Radiactivos* - Norma AR10.16.1 Revisión 3, 2016.
- ASME II, PART D, - *METRIC*, 2019.
- Cadoni, E., Fenu, L., and Forni, D. Strain rate behaviour in tension of austenitic stainless steel used for reinforcing bars, *Const & Build Mats*, 35: 399-407, 2012.
- 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.
- 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 Mechl 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 Engng*, 154:103896, 2021.
- 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.
- 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.
- Maurel-Pantel, A., Fontaine, M., Thibaud, S. and Gelin, JC. 3D FEM simulations of shoulder milling operations on a 304L stainless Steel. *Simul Model Pract and Theory* 22:13–27, 2012.
- 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 of Pressure Vessels and Piping* 117-118: 33e41, 2014.
- 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 of Nuclear Energy* 42: 18–29, 2012.
- Xue, Q., Nesterenko, V.F., and Meyers, M.A. Evaluation of the collapsing thick-walled cylinder technique for shear-band spacing, *Int J of Impact Engng* 28:257–280, 2003.