

SIMULACIÓN DE ENSAYO DE CAÍDA DE CONTENEDOR DISEÑADO PARA TRANSPORTAR SUSTANCIAS FÍSILES

Wesley, M.¹, Gonzalez, N.O.¹, Cocco, R.G.¹

¹INVAP SE, Av. Cmte. Luis Piedrabuena 4950 (R8403CPV), San Carlos de Bariloche,
Río Negro, Argentina

RESUMEN

El transporte seguro de materiales radioactivos requiere de dispositivos de confinamiento (contenedores) cuya función es contener las sustancias físi les y aislar la carga útil. Los contenedores deben garantizar la seguridad de las sustancias a transportar, proteger a las personas, los bienes y el medio ambiente de los efectos de la radiación. De acuerdo a las reglamentaciones vigentes los dispositivos de confinamiento deben asegurar la integridad y funcionalidad durante un posible accidente en el transporte. El presente trabajo muestra el estudio de un contenedor para el transporte terrestre, marítimo y aéreo de sustancias físi les. Se analiza el caso de caída libre e impacto del contenedor sobre una superficie rígida desde una altura de 9 m mediante simulación por el método de elementos finitos. Los resultados de la simulación son contrastados y validados con un ensayo a escala real. La validación de la simulación numérica permite posteriormente simular el caso de accidente severo de una caída desde mayor altura, impactando a una velocidad de 100 m/s.

1. INTRODUCCIÓN

En este estudio se evalúa la integridad estructural de un contenedor para el transporte de sustancias físi les identificado como LEUPA (Low Enrichment Uranium Package) sometido a una caída y posterior impacto sobre un suelo rígido. Este es uno de los requisitos de las reglamentaciones nacionales AR 10.16.1 [1] e internacionales SSR-6/IAEA [2].

El LEUPA está diseñado para el transporte de Material Fisionable (MF) y debe ser capaz de proteger su carga de impactos accidentales y temperaturas exteriores elevadas. El objetivo del contenedor es confinar su carga ante cualquier tipo de accidente en el transporte.

Uno de los requisitos es que el contenedor mantenga su función de confinación luego de una caída libre desde una altura suficiente para alcanzar una velocidad terminal previa al impacto de 100 m/s. Para alcanzar esta velocidad se requiere una altura (H) que se estima en la siguiente ecuación:

$$H = \frac{V^2}{2g} = \frac{(100 \frac{m}{s})^2}{2 \times 10 \frac{m}{s^2}} = 500 [m] \quad (1)$$

Donde V es la velocidad y g es la aceleración gravitatoria.

¹E-mail del Autor. mwesley@invap.com.ar

Un ensayo a escala real no es viable de practicar debido a la considerable altura, luego se recurrió a una herramienta computacional para la simulación del ensayo.

2. METODOLOGÍA GENERAL

Para la simulación del impacto se empleó el programa de cálculo *Workbench ANSYS* [3], con una extensión de *LS-DYNA*.

El análisis se realizó en dos etapas. En la primera se realizó un ensayo a escala real de una caída libre y colisión del LEUPA desde una altura de 9 m. Este ensayo se realizó con el objeto de validar y ajustar los parámetros del código de simulación. En la segunda etapa, luego de ajustada y validada la herramienta computacional se simuló el ensayo de caída libre desde 500 m de altura.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se describe a continuación brevemente las características del LEUPA y de su modelado en el programa de cálculo.

3.1. Descripción del contenedor

En síntesis, el contenedor está compuesto por un recipiente interno de acero inoxidable de dos capas de 8 mm de espesor y un revestimiento de cadmio. Dicho recipiente es el que contiene al MF, y a su vez está contenido en un recipiente de mayores dimensiones fabricado en chapa de acero inoxidable con un espesor de 3 mm. El contenedor está reforzado por perfiles L y además posee ocho chapas de refuerzo dispuestas en forma radial para centrar al recipiente interno, Figura 1. Los espacios entre las chapas radiales son rellenados con un aislante térmico denominado “kaolite” que es una arcilla mineral. El contenedor tiene una masa total aproximada de 440 kg.

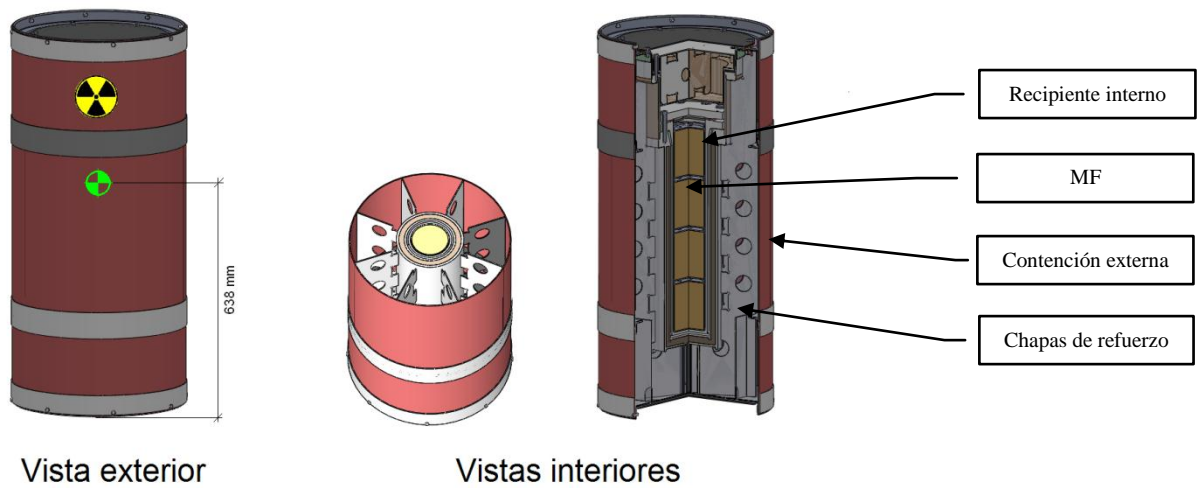


Figura 1. Vistas del contenedor.

3.2. Modelado del contenedor

El ensayo se modeló con el método de elementos finitos, mediante un método explícito no lineal. Con el fin de facilitar el mallado del modelo se simplificaron detalles de algunos componentes, tales como biseles y uniones abulonadas.

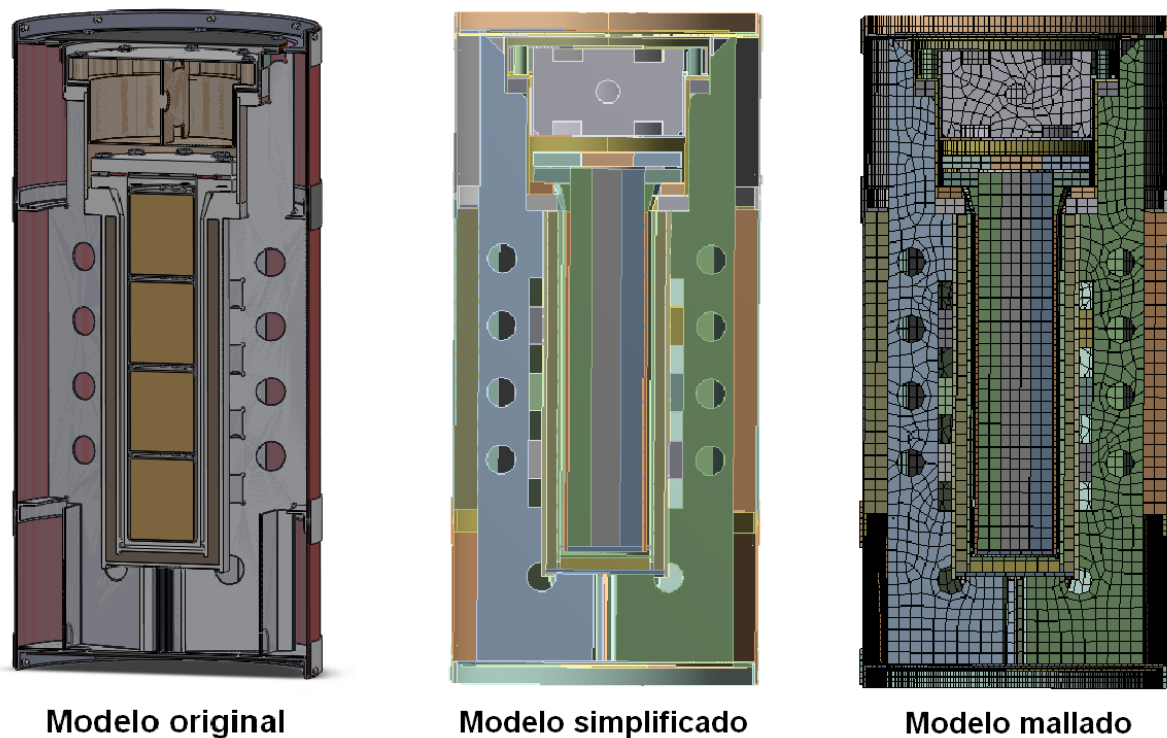


Figura 2. Simplificación del modelo y mallado.

3.2.1. Hipótesis simplificativas

Para poder simular este ensayo con alto grado de no linealidad con la mayor precisión posible se practicaron una serie de simplificaciones, además de la simplificación geométrica indicada anteriormente.

Se asumió que todos los componentes (incluso la carga útil o MF) es del mismo material que el contenedor (acero inoxidable). El aislamiento no se lo incluyó en el modelo por no tener una función estructural importante debido a las bajas propiedades mecánicas. Esta omisión resulta ser una hipótesis simplificativa conservativa por no considerar su limitado aporte estructural. Para considerar su masa se modificó la densidad de la carga útil que está ubicada en el centro de masa del contenedor. De este modo se mantiene la masa total del contenedor.

El contenedor tiene simetría geométrica por lo cual se modeló únicamente una mitad para optimizar los recursos de cálculo, aplicando la condición de simetría.

3.2.2. Mallado

Se emplearon elementos hexa y tetraédricos, generando una malla de 25833 elementos sólidos con refinamientos de la malla en las partes inferiores donde se produce el impacto. Los tamaños de los elementos varían entre 20 y 10 mm. Ver Figura 2.

3.2.3. Materiales

El contenedor está fabricado en acero inoxidable tipo 304L cuyas propiedades elásticas se detallan en la siguiente Tabla 1 .

Tabla 1 Propiedades mecánicas del acero 304L, obtenidas de la referencia [4].

Material	A312-TP304L
Módulo de Elasticidad	193[GPa]
Coefficiente de Poisson	0,31
Tensión de Fluencia	240[MPa]

Para la simulación del impacto se requieren también las propiedades no lineales del material correspondientes al comportamiento elastoplástico. En la Figura 3 y Figura 4 se muestran las curvas de tensión-deformación considerados en la simulación.

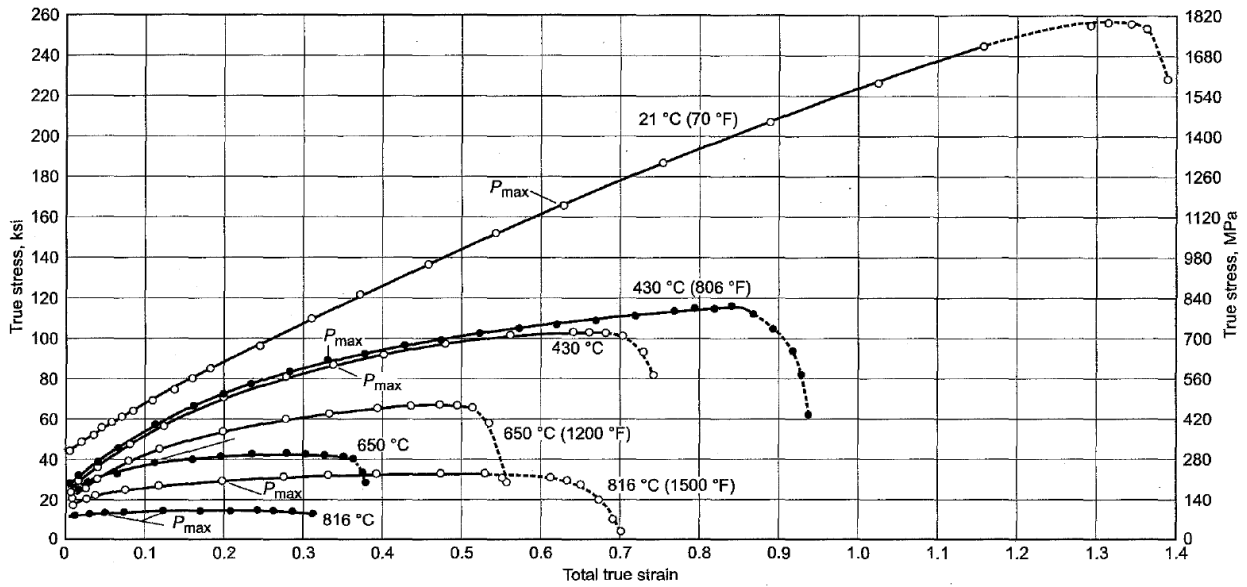


Figura 3. Curva Tensión-Deformación verdadera del acero 304L, tomado de la referencia [4]. Se consideró la curva a temperatura ambiente.

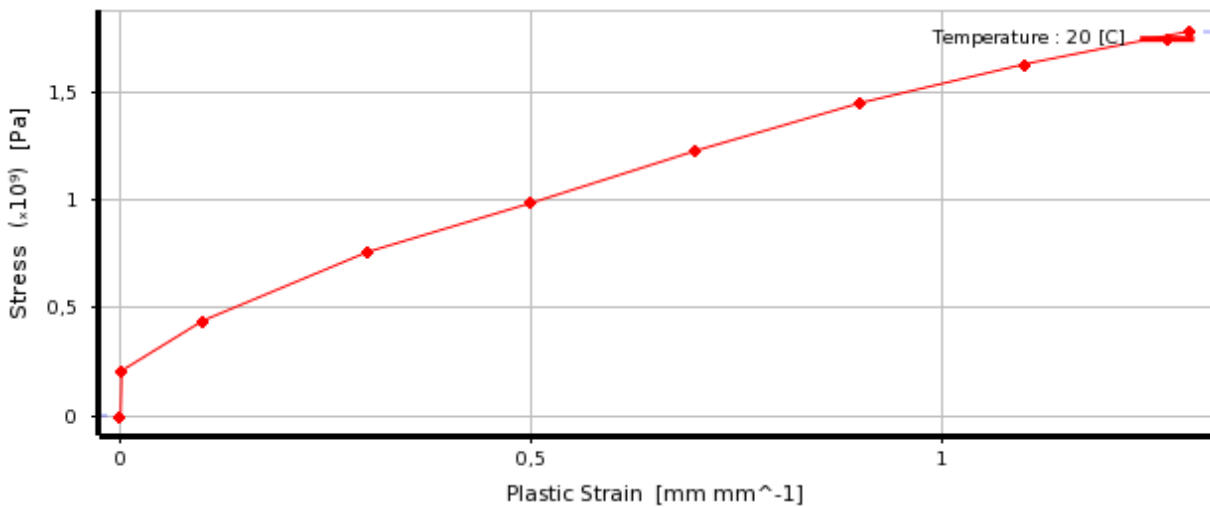


Figura 4. Curva Tensión-Deformación verdadera cargada en el programa de cálculo para la simulación.

La curva de tensión deformación verdadera cargada al modelo es necesaria para poder modelar las grandes deformaciones plásticas. El material inicialmente tiene una respuesta lineal para tensiones por debajo de los 240 MPa. Superándose éste límite elástico el acero presenta un estado de fluencia y el endurecimiento del material hasta la tensión de 1770 MPa.

3.3. Modelado de la colisión

Con el objeto de simular la colisión más desfavorable se simuló una caída donde el LEUPA impacta con el suelo con un ángulo del eje contenedor de 23° con respecto a la normal al suelo como se representa en la Figura 5. En esta posición el centro de masa del LEUPA se ubica exactamente sobre la arista inferior.

Para simular la colisión se asumió que el LEUPA colisiona con un bloque rígido es del mismo acero, como se muestra en la Figura 6. El bloque permanece fijo mientras el contenedor colisiona desde las distintas alturas.

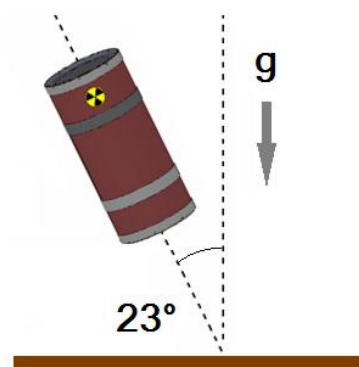
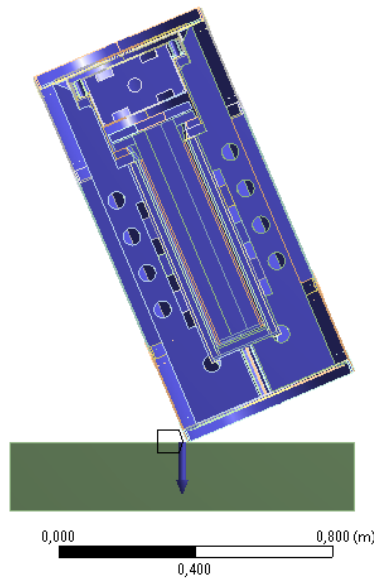


Figura 5. Ángulo de colisión.

4. ENSAYO DE VALIDACION A BAJA ALTURA

El ensayo de validación consistió en una caída libre del LEUPA desde una altura de 9m (ver Figura 8). De la ecuación (1) se puede deducir que la velocidad pre-impacto es aproximadamente 13 m/s; luego se configuró este valor en el modelo para simular la caída, Figura 6.

B: Workbench LS-DYNA 9 m
Velocity
19/02/2015 15:33
Velocity: 13 m/s



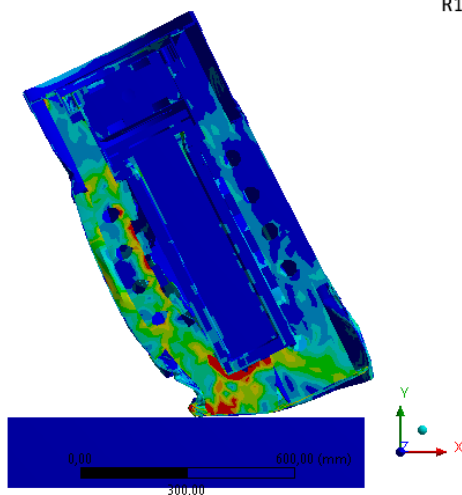
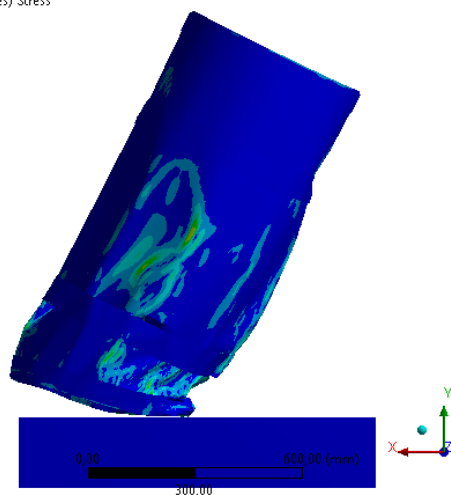
ANSYS
R15.0

Figura 6. Modelo para simular caída de 9 m de altura (velocidad pre-impacto 13 m/s).

En la Figura 7 se presentan las tensiones de Von Mises en el instante de la colisión. En la figura se muestra una vista exterior del LEUPA (izquierda) y una vista interior (derecha). Se fijó como límite de escala de colores la tensión de fluencia del material (en rojo). La deformada se muestra en escala real.

B: Workbench LS-DYNA 9 m
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 2,e-002
19/02/2015 13:52

809,4 Max
240
210
180
150
120
90,002
60,003
30,003
0,0037691 Min



ANSYS
R15.0

Figura 7. Resultados de tensiones de Von-Mises en la colisión a 9 m de altura.

En la Figura 8 se muestra una fotografía del instante en que el LEUPA colisiona con la superficie rígida en el ensayo a escala real a baja altura. El ensayo se realizó respetando la posición de impacto que se indica en la Figura 5.



Figura 8. Fotografía post-impacto del ensayo a escala real de caída libre desde 9 m de altura.

Si se compara la Figura 7 con la fotografía de la Figura 8 se pueden contrastar las deformaciones exteriores resultantes de la simulación y del ensayo a escala real en la zona inferior del contenedor. Si bien los pliegues que se producen en la chapa no se reproducen exactamente igual en la simulación, el grado de deformación es algo mayor en el modelo pero del mismo orden de magnitud que el observado en el ensayo a escala real. Las diferencias posiblemente son atribuidas a las hipótesis simplificadoras aplicadas al modelo. El efecto del relleno de aislante que no fue simulado a pesar de no tener rigidez le da un cierto respaldo a las chapas exteriores del contenedor real. La diferencia descrita anteriormente hace que el modelo simulado sea más conservativo tal como se describió en la sección 3.2.1, dado que las deformaciones serán mayores siempre en el caso simulado.

De esta manera caso real valida la herramienta computacional para posteriormente simular el caso de interés para una caída libre desde 500 m de altura y velocidad de impacto de 100 m/s.

5. SIMULACIÓN DE CAÍDA LIBRE DESDE GRAN ALTURA

Empleando el mismo modelo utilizado para simular el ensayo a baja altura, se estudió la caída libre desde gran altura donde el LEUPA colisiona a una velocidad pre-impacto de 100 m/s. El parámetro que se modificó en este siguiente estudio es únicamente este valor de velocidad pre impacto. En la Figura 9 se presenta el modelo configurado para simular la caída desde 500 m.

A: Workbench LS-DYNA 500 m
Velocity
19/02/2015 15:51
Velocity: 100 m/s

ANSYS
R15.0

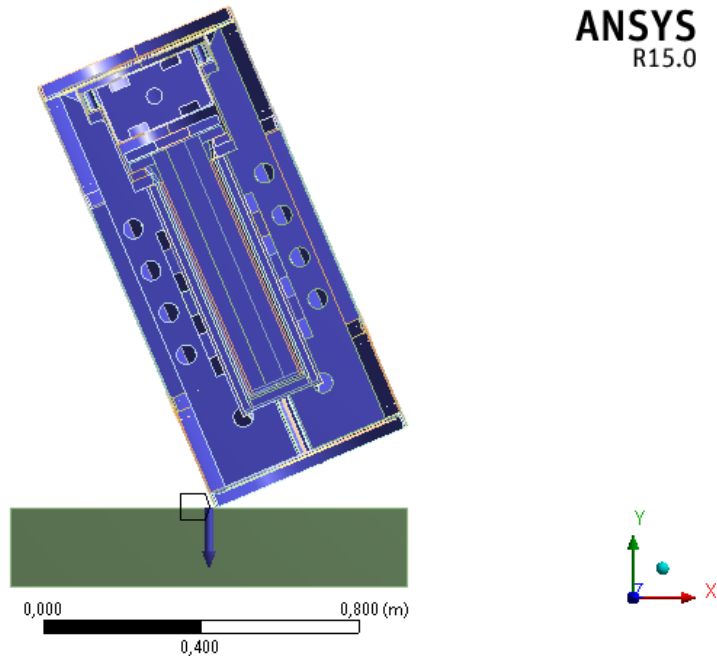
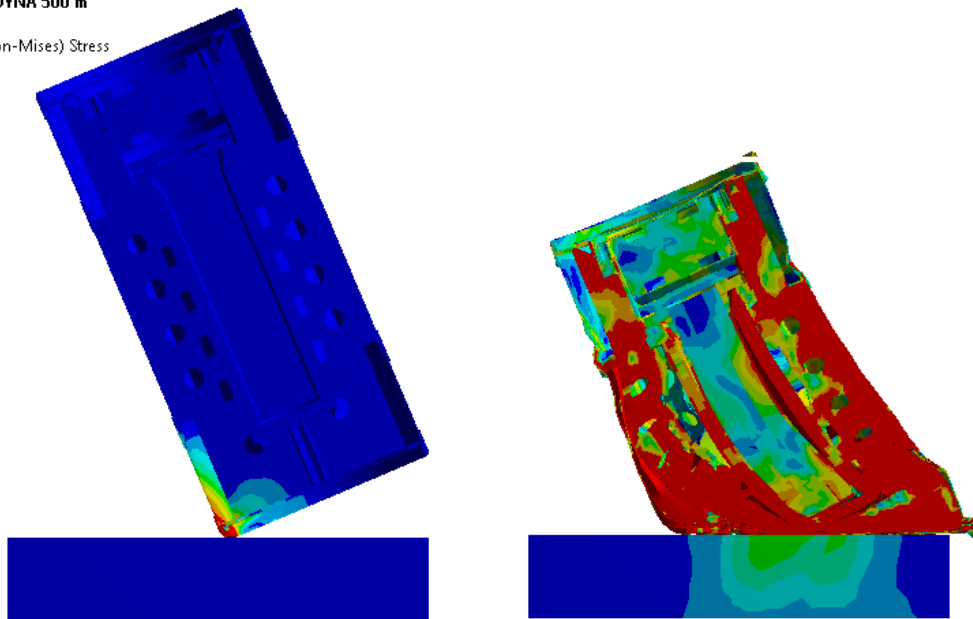


Figura 9. Modelo para simular caída de 500 m de altura (velocidad pre-impacto 100 m/s).

En la Figura 10 y Figura 11 se muestra una secuencia de imágenes del impacto mostrando las tensiones de Von Mises. La deformada se presenta en escala real.

A: Workbench LS-DYNA 500 m
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 2,e-002
19/02/2015 12:01

1686,9 Max
240
210,02
180,04
150,05
120,07
90,09
60,108
30,126
0,14384 Min



$t = 9,9e-5 \text{ s}$

$t = 4,1e-3 \text{ s}$

Figura 10. Resultados de tensiones de Von-Mises en la colisión a 500 m de altura (parte I).

A: Workbench LS-DYNA 500 m
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 2,e-002
19/02/2015 12:01

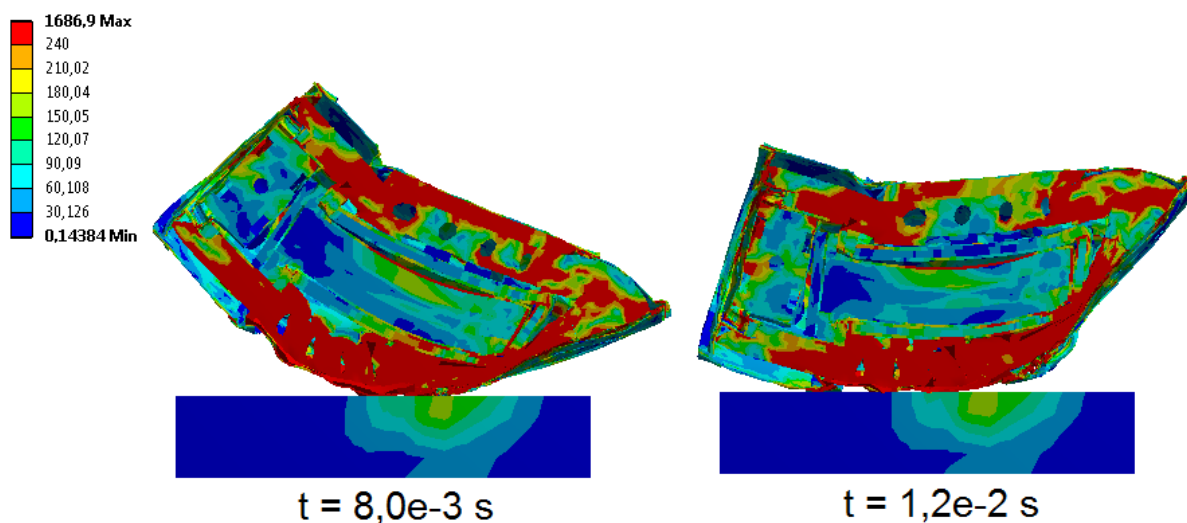


Figura 11. Resultados de tensiones de Von-Mises en la colisión a 500 m de altura (parte II).

En color rojo se observan los componentes que alcanzan el límite elástico del acero 304L (240 MPa). La simulación muestra una evidente deformación macroscópica generalizada del recipiente exterior de menor espesor. La función del contenedor exterior es absorber la energía de impacto por deformación y amortiguar de esta manera las cargas sobre el contenedor del MF evitando la rotura del mismo. Si bien el recipiente interior también sufre una deformación plástica macroscópica sobre la arista inferior dónde se produce el primer impacto, el recipiente interior no presenta desgarro o rotura que implicaría la pérdida de MF. Por lo tanto se mantiene la función de confinamiento del MF luego del impacto.

3. CONCLUSIONES

Con las condiciones especificadas, las características geométricas y las propiedades del material descritas luego de evaluar los resultados surgen las siguientes conclusiones:

Se logró validar la herramienta de simulación numérica con un ensayo a escala real a baja altura de 9 m.

Según los resultados obtenidos de la simulación de la caída libre del LEUPA desde una altura de 500 m y luego de un impacto con una velocidad previa de 100 m/s en la posición más desfavorable, las chapas externas sufren una deformación plástica generalizada presentando distorsiones macroscópicas.

El recipiente contenedor interior del MF alcanza tensiones por encima del límite elástico del material con deformación plástica macroscópica pero sin presentar un colapso o rotura mantenido su estanqueidad.

De esta manera se garantiza que mantiene la función de confinamiento del MF luego del impacto, objeto principal del LEUPA.

4. REFERENCIAS

1. ARN, AR 10.16.1 - Rev. 2. "Transporte de materiales radiactivos", Edición 2011.
2. IAEA,SSR-6, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 2012 Edition.
3. Workbench de ANSYS 15.0.7.
4. ASM International,"Atlas of Stress-Strain Curves", Second Edition 2002.