

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE LOS ENSAYOS ROPS Y FOPS APLICADOS A LA CABINA DE UNA PALA CARGADORA

Beltramo, Emmanuel^{a,b}; Pérez Segura, Martín Eduardo^{a,b}; Novillo, Narciso^b

^a*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología – Conicet, idit@fcefyn.edu.ar*

^b*Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba, depestructuras@fcefyn.edu.ar*

Palabras clave: simulación numérica, FOPS, ROPS, pala cargadora.

RESUMEN

Las maquinarias empleadas en la industria minera están diseñadas para trabajar en entornos de alto riesgo, donde pueden producirse eventos tales como la caída de objetos pesados o el vuelco del equipo. Debido a estas condiciones de operación, la protección del operario constituye un requisito fundamental del diseño estructural. En este contexto, las normas ISO 3471 e ISO 3449 definen los procedimientos y los criterios de aceptación asociados a los ensayos destructivos ROPS (Rollover Protective Structure) y FOPS (Falling Object Protective Structure), respectivamente, los cuales permiten evaluar la resistencia de las estructuras de protección. En este trabajo, se desarrolló un modelo numérico basado en el método de elementos finitos con el objetivo de reproducir computacionalmente estos ensayos sobre la cabina modificada de una pala cargadora. Se implementaron dos estrategias de análisis diferentes en función de la naturaleza de cada ensayo: i) un análisis estático no lineal para el ensayo ROPS, y ii) un análisis dinámico explícito para el ensayo FOPS. Los resultados permiten verificar el cumplimiento de los criterios normativos, asegurando que la cabina modificada satisface los requisitos establecidos por las normas y garantiza condiciones adecuadas de seguridad para el operador.

ABSTRACT

The machinery used in the mining industry operates in high-risk environments, where accidents such as heavy falling objects or machines roll-over may occur. Operator protection is therefore a fundamental requirement of structural design. The ISO 3449 and ISO 3471 standards define the procedures and acceptance criteria for the destructive ROPS (Rollover Protective Structure) and FOPS (Falling Object Protective Structure) tests, respectively, which assess the performance of protective structures. In this work, a numerical model based on the finite element model was developed to computationally reproduce these tests on the modified cabin of a wheel loader. Two analysis strategies were applied according to the test type: i) nonlinear static analysis for ROPS, and ii) explicit dynamic analysis for FOPS. The results demonstrate compliance with the normative criteria, confirming that the modified cabin satisfies the standard requirements and ensures adequate operator safety.

1. Introducción

Las operaciones con maquinaria pesada destinadas a movimiento de suelos y obras civiles implican riesgos significativos para la seguridad humana, particularmente debido a accidentes asociados al vuelco de equipos y/o a la caída de objetos de masa considerable. Con el objetivo de mitigar estos riesgos, organismos internacionales establecen requisitos normativos para la resistencia estructural de los habitáculos de protección mediante ensayos destructivos estandarizados. En este contexto, la norma ISO 3471¹ establece los requisitos para las estructuras ROPS (*Rollover Protective Structures*), mientras que la ISO 3449² establece los criterios aplicables a los sistemas FOPS (*Falling Object Protective Structures*).

Debido a los elevados costos asociados a la fabricación y ensayos reales, la simulación computacional, a partir del método de elementos finitos, se ha consolidado como una herramienta estándar y confiable para la validación preliminar de diseños estructurales en ingeniería.

El presente trabajo expone el desarrollo metodológico y los resultados de la verificación numérica de una estructura de seguridad reforzada instalada sobre la cabina original de una pala cargadora comercial XCMG ZL50GN³. La incorporación de refuerzos estructurales se debe a que la estructura de seguridad original no satisface los requisitos establecidos por las normas ISO 3471 e ISO 3449. En este marco, la simulación computacional permite respaldar técnicamente la aptitud estructural de la cabina modificada conforme a los criterios definidos por dichas normas.

2. Modelo Numérico

2.1. Geometría de la cabina modificada

La configuración geométrica analizada se compone de dos componentes principales: la geometría base de la cabina original de la pala cargadora, desarrollada a partir de un relevamiento de campo, y un conjunto de refuerzos estructurales perimetrales externos. Estos refuerzos están conformados por perfiles de chapa plegada y por caños estructurales de sección rectangular con diferentes espesores. La geometría de la cabina original y reforzada se presenta en la Figura 1.

Con el objetivo de verificar el cumplimiento de las mencionadas normas, se incorporó al modelo el espacio ocupado por el operario (DVL⁴, *Deflection-Limiting Volume*).

2.2. Propiedades mecánicas del material

La estructura completa fue modelada utilizando acero estructural convencional ASTM A36. Para considerar fenómenos de grandes deflexiones y deformaciones plásticas presentes en ensayos destructivos, se adoptó un modelo constitutivo bilineal isotrópico con endurecimiento por deformación. En la Tabla 1 se presentan las propiedades mecánicas de este material.

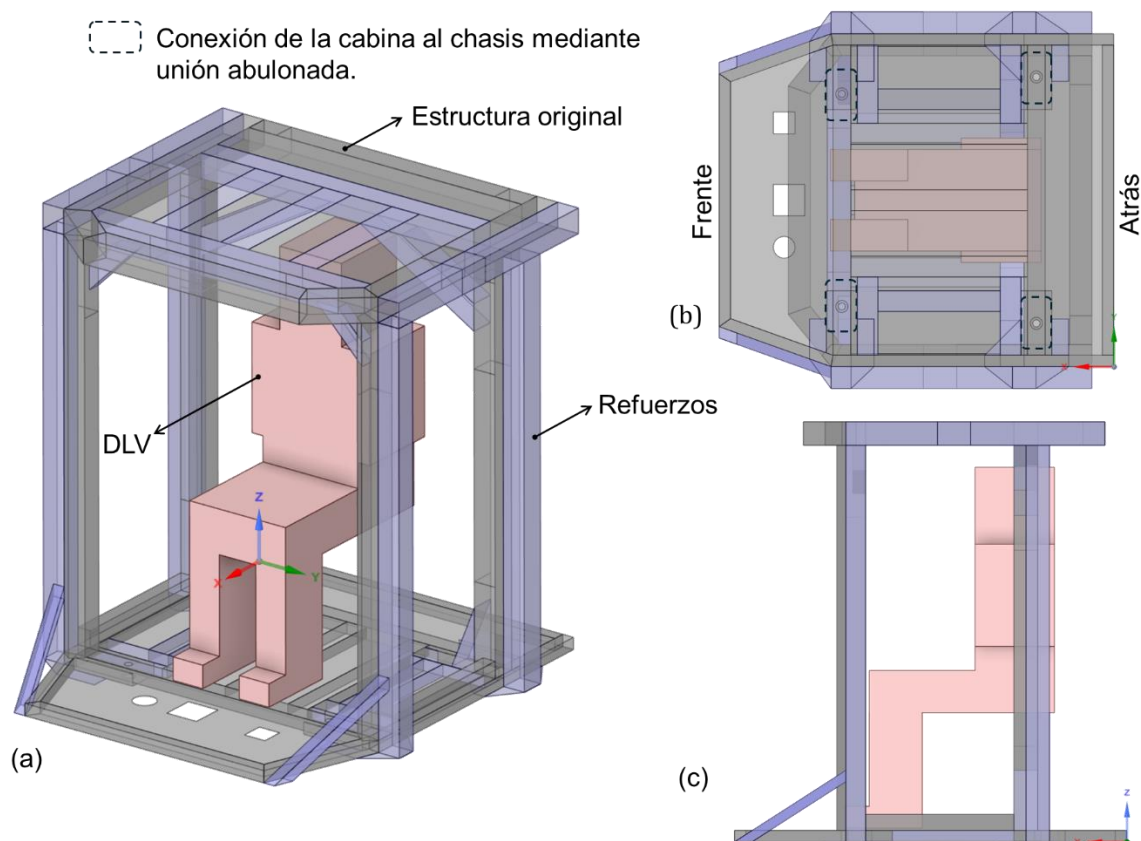


Figura 1. Visualización de la geometría de la cabina reforzada: (a) vista isométrica, (b) vista inferior y (c) vista lateral.

Material: Acero ASTM A36		
Propiedad	Magnitud	Unidad
Tensión de fluencia σ_f	250	MPa
Tensión de rotura σ_r	460	MPa
Módulo de elasticidad lineal E_l	205	GPa
Módulo de elasticidad tangente plástico E_t	1.45	GPa
Coeficiente de Poisson ν	0.3	-
Densidad ρ	7850	Kg/m ³

Tabla 1. Propiedades mecánicas para el acero ASTM A36.

2.3. Condiciones de carga

2.3.1. Ensayo ROPS

La norma ISO 3471 establece la aplicación consecutiva, pero no simultánea, de tres cargas: lateral, vertical y longitudinal. La magnitud de tales cargas se calcula conforme a las expresiones indicada por la norma, las cuales dependen del tipo de máquina y de su masa total. Además, la norma exige que bajo la acción de la fuerza lateral la estructura absorba un mínimo de energía. La magnitud de cada una de estas cargas como el valor mínimo de energía se presenta en la Tabla 2.

Máquina para movimiento de tierra sobre ruedas: cargadora, excavadora, colocadora de tuberías, compactadora, mini cargadora, retro excavadora, zanjadoras ¹ .				
Masa m [kg]	Fuerza lateral F_y [N]	Energía de carga lateral E [J]	Fuerza vertical F_z [N]	Fuerza longitudinal F_x [N]
$10000 \leq m \leq 128600$	$60000(m/10000)^{1.2}$	$12500(m/10000)^{1.25}$	$19.61m$	$48000(m/10000)^{1.2}$
18000	121472.6	26061.6	352980.0	97178.06

Tabla 2. Magnitud de las cargas que se deben aplicar sobre la estructura ROPS de acuerdo con lo especificado por la norma ISO 3471.

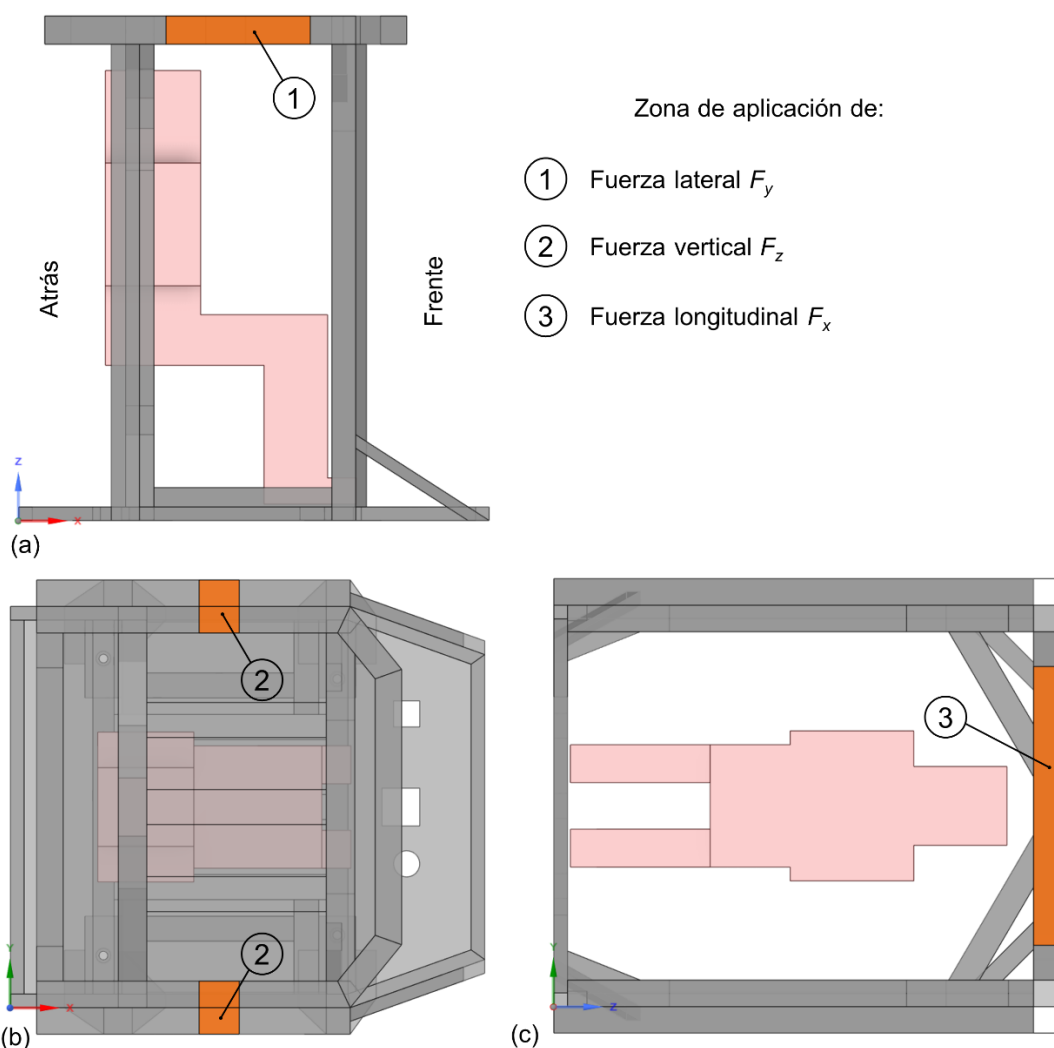


Figura 2. Región de aplicación de la fuerza: (a) lateral (b) vertical y (c) longitudinal para el ensayo destructivo especificado en ISO 3471.

Según lo establecido por la norma, las cargas se aplican en las ubicaciones indicadas

en la Figura 2.

2.3.2. Ensayo FOPS

De acuerdo con la clasificación operativa de la máquina (transporte de pétreos), la estructura debe satisfacer los requerimientos correspondientes al nivel II de protección contra impactos. En este sentido, según la ISO 3449, la estructura debe ser capaz de absorber 11600 J de energía sin colapsar ni dañar la integridad física del operario. Para este propósito, se deja caer sobre diferentes puntos del techo de la cabina un objeto de prueba de 227 kg desde una altura de 5.22 m. Se consideran tres puntos de impacto (A, B y C), tal como se indica en la Figura 3. La geometría del objeto de prueba se especifica en la subsección 5.1.1 de ISO 3449.

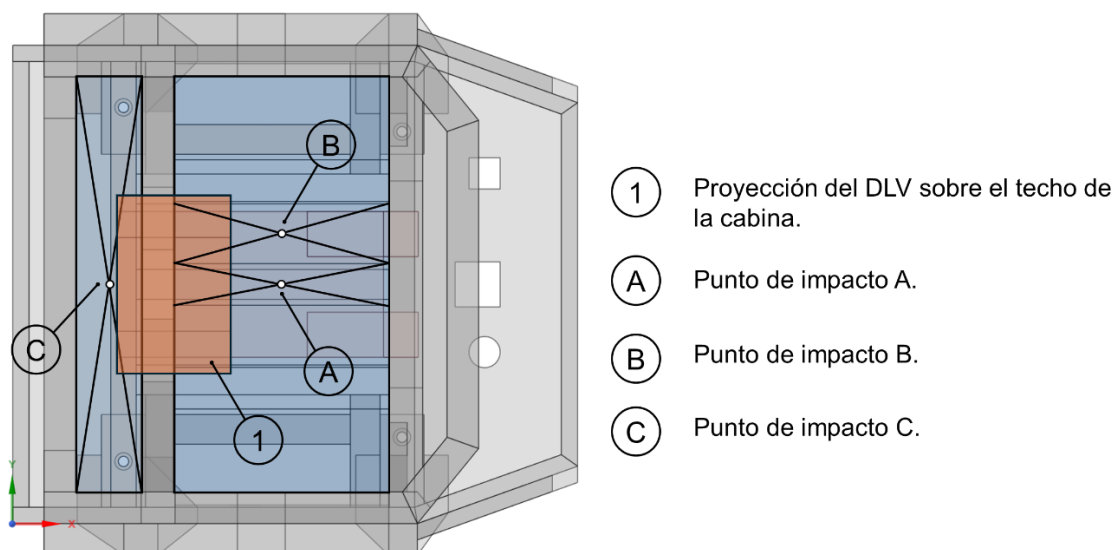


Figura 3. Ubicación de los puntos de impacto del objeto de prueba sobre el techo de la cabina según ISO 3449.

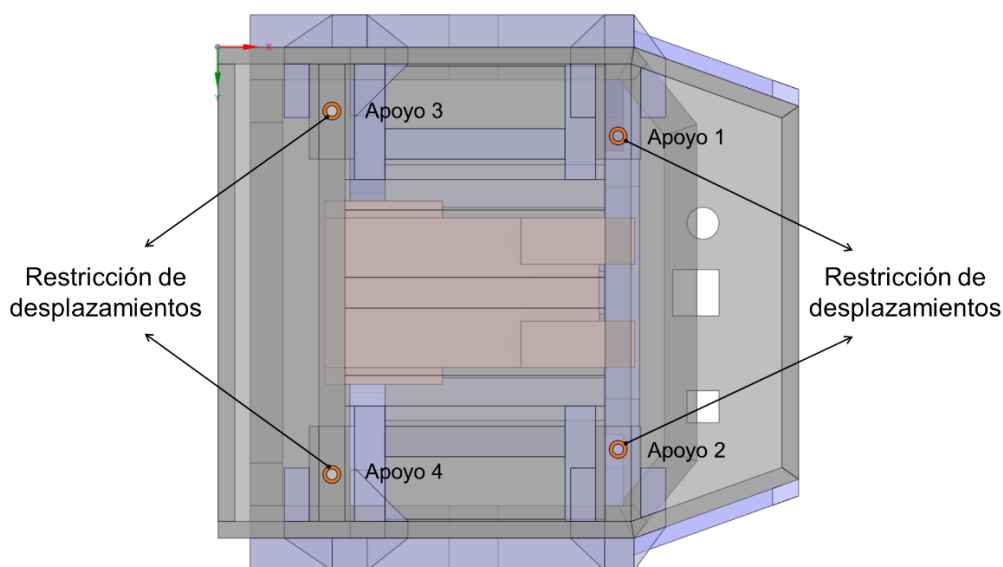


Figura 4. Condiciones de apoyo sobre la cabina.

Organiza:

2.4. Condiciones de apoyo

Las condiciones de apoyo son idénticas para ambos ensayos (ROPS y FOPS). Dado que la cabina se vincula al chasis por medio de bulones, se restringen los desplazamientos en las tres direcciones ortogonales sobre las superficies indicadas en color naranja en la Figura 4, las cuales representan la proyección de las zonas de apoyo.

2.5. Mallado

La estructura de la cabina está principalmente mallada por elementos de lámina de orden cuadrático, con un tamaño de elemento promedio de 20 mm. Un detalle de las estadísticas de la malla se presenta en la Tabla 3, mientras que sus métricas (Jacobiano en los puntos de Gauss) se muestran en la Figura 5a. Una visualización general de la malla final se expone en la Figura 5b. Esta versión final ha sido obtenida luego de un proceso de convergencia que, por razones de simplicidad, no se detalla aquí.

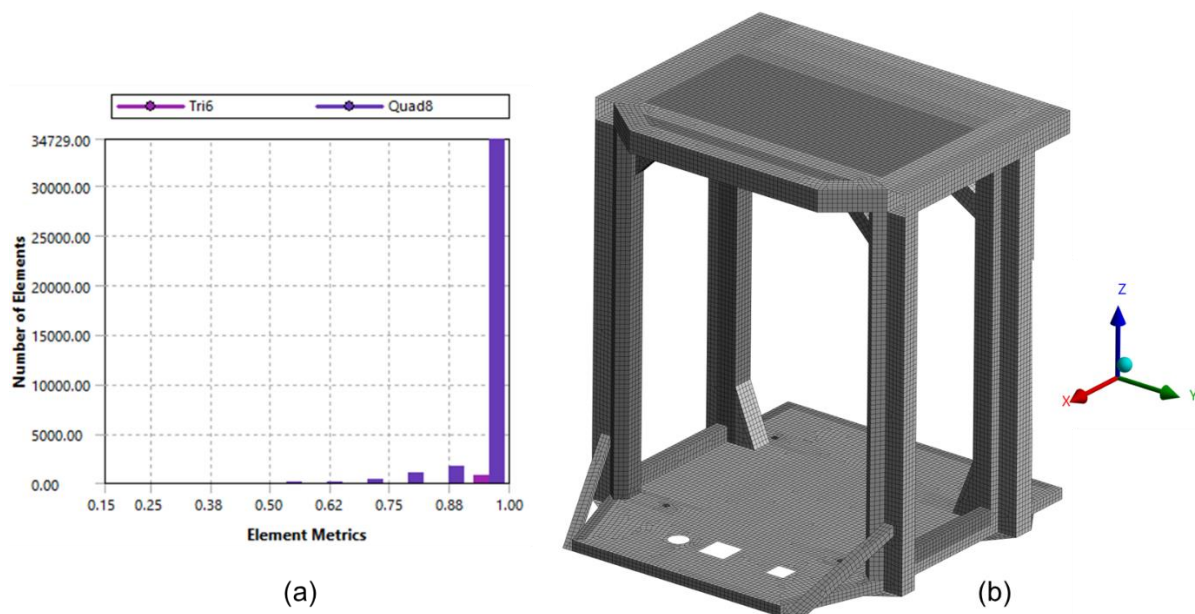


Figura 5. (a) Histograma del jacobiano en los puntos de Gauss para los elementos de la malla; (b) versión final de la malla utilizada.

Estadísticas de la malla		
Tipo de elemento	Orden	Cantidad
Tri6	Cuadrático	774 (1.98 %)
Quad8	Cuadrático	38174 (98.02 %)
Total		38948

Tabla 3. Detalle de la malla utilizada.

3. Criterios de aceptación

3.1. Ensayo ROPS

Los criterios de aceptación establecidos por la norma ISO 3471 pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Los requisitos de fuerza lateral y energía absorbida no requieren alcanzarse simultáneamente; uno de ellos puede exceder el valor normativo antes de que el otro alcance el nivel mínimo exigido.
- Ningún componente de la estructura ROPS debe invadir el DLV durante la aplicación de las cargas lateral, vertical o longitudinal.
- Durante la aplicación de la carga lateral, se admite una rotación lateral máxima del DLV de hasta 15° alrededor del SIP (*Seat Index Point*), conforme a lo establecido por la norma ISO 3164. De manera análoga, durante la aplicación de la carga longitudinal, se permite una rotación máxima de 15° en la dirección de avance de la máquina.

3.2. Ensayo FOPS

Los criterios de aceptación establecidos por la norma ISO 3449 pueden resumirse en los siguientes puntos:

- La estructura de protección debe ser capaz de absorber la energía de impacto sin experimentar colapso estructural global.
- La estructura de protección no tiene que invadir el espacio ocupado por el DLV durante el primer impacto y los subsiguientes.
- Si el objeto de prueba atraviesa la estructura de protección se considera que la prueba falló.

4. Procedimiento de análisis

Debido a la naturaleza disímil de las solicitaciones involucradas en los ensayos ROPS y FOPS, se implementaron dos estrategias numéricas independientes. La verificación ROPS se llevó a cabo mediante un análisis estático no lineal de múltiples pasos de carga, permitiendo representar la aplicación secuencial de las cargas lateral, vertical y longitudinal establecidas por la norma, así como las deformaciones plásticas permanentes desarrolladas entre etapas consecutivas. Por su parte, la verificación FOPS se realizó mediante un análisis dinámico explícito, adecuado para reproducir los efectos asociados al impacto del objeto de prueba sobre el techo de la cabina. Para ambos casos se consideraron plasticidad del material y grandes desplazamientos geométricos.

5. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para ambos ensayos.

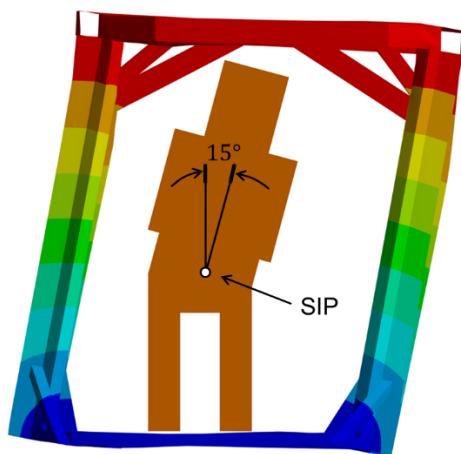
5.1. Ensayo ROPS

La Figura 6 muestra la configuración deformada de la estructura al finalizar cada etapa de carga. En todos los casos se verificó que la estructura deformada no interfiere al

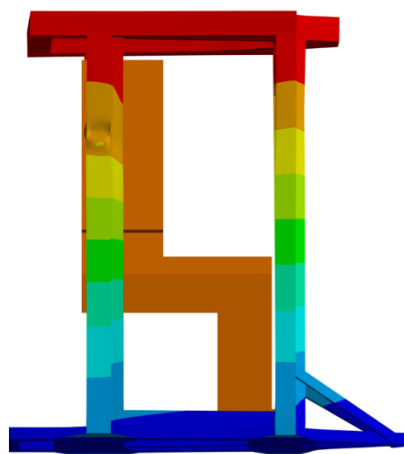
DLV, preservando el espacio mínimo de supervivencia del operador.

I: Prueba ROPS
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1 s
04/11/2025 3:13:34 PM

296.13 Max
263.22
230.32
197.42
164.51
131.61
98.709
65.806
32.903
0 Min

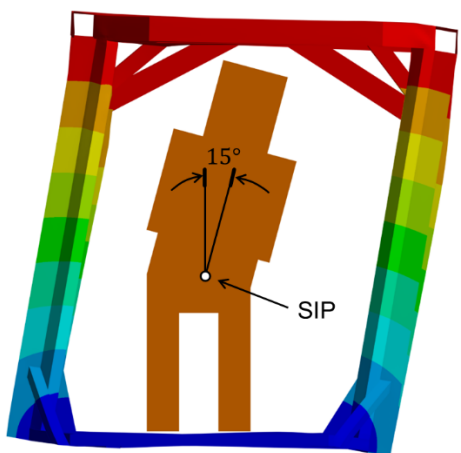


(a)

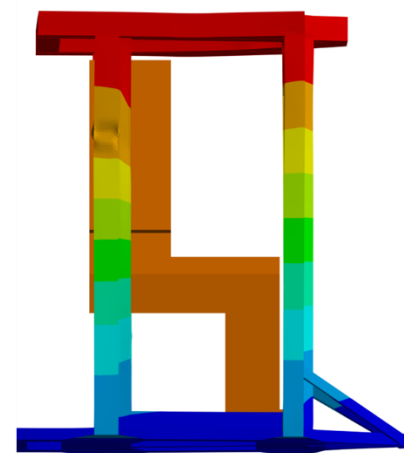


I: Prueba ROPS
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 2.5 s
04/11/2025 3:16:37 PM

277.86 Max
246.99
216.11
185.24
154.37
123.49
92.62
61.746
30.873
0 Min

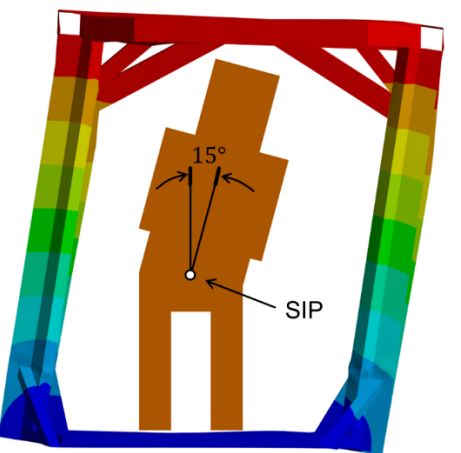


(b)

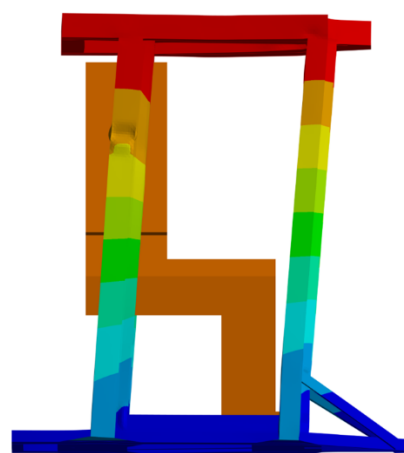


I: Prueba ROPS
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 4.5 s
04/11/2025 3:22:26 PM

276.88 Max
246.12
215.35
184.59
153.82
123.06
92.293
61.529
30.764
0 Min



(c)



Vista Frontal

Vista Lateral

Figura 6. Desplazamiento máximo luego de la aplicación de la carga: (a) lateral, (b) vertical y (c) longitudinal. SIP: seat index point⁴.

La capacidad de absorción de energía de la estructura se evaluó a partir de la curva fuerza desplazamiento mostrada en la Figura 7, obtenida durante la aplicación de la carga lateral. Se observa que la fuerza lateral alcanzada al final del ensayo coincide con el valor requerido por la norma y especificado en la Tabla 2. Por su parte, la energía absorbida, calculada de acuerdo con el procedimiento establecido en la subsección 6.2.7 de la norma ISO 3471, resultó igual a 30145.6 J, superando el valor mínimo exigido indicado en la Tabla 2.

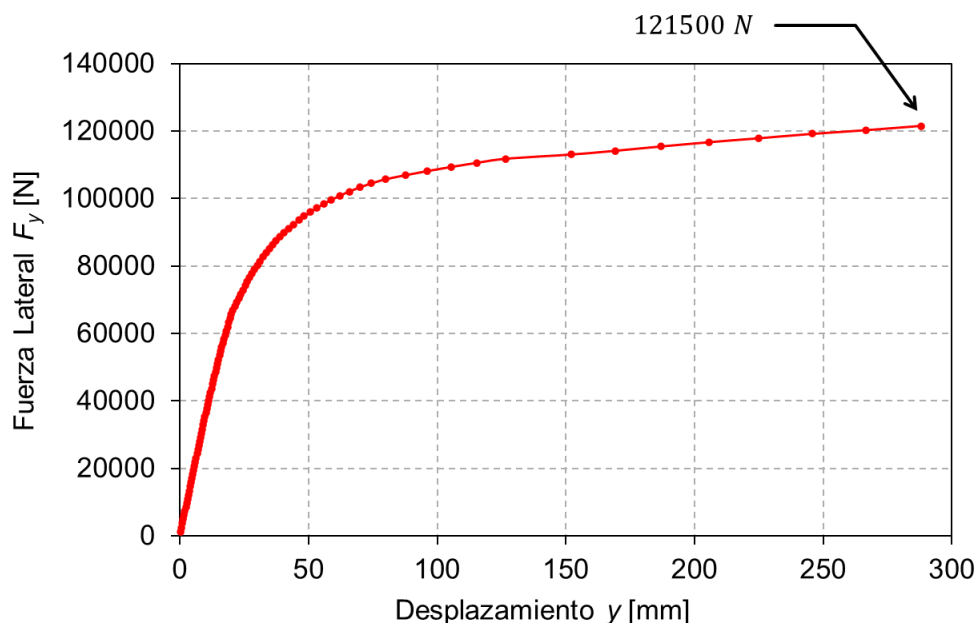


Figura 7. Fuerza lateral aplicada en función del desplazamiento en dirección y del punto de aplicación de la carga.

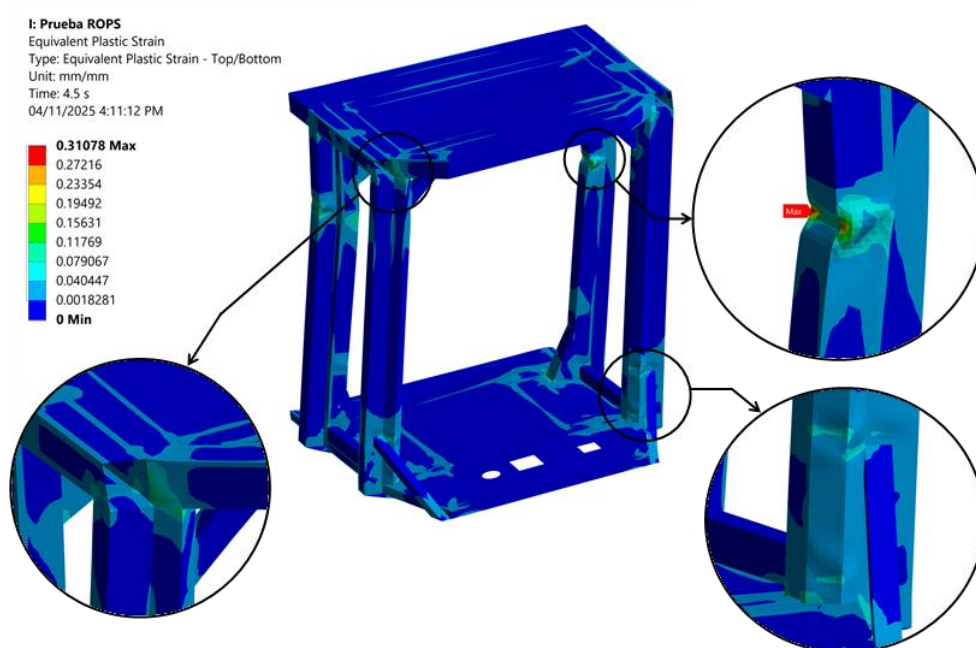


Figura 8. Deformación plástica equivalente remanente sobre la estructura obtenida al finalizar el ensayo.

La Figura 8 presenta la distribución de deformaciones plásticas equivalentes remanentes al finalizar el ensayo. Se observa la presencia de deformaciones permanentes localizadas en regiones específicas de la estructura, con los mayores valores concentrados en la zona superior de la cabina, particularmente en las uniones entre las columnas y la estructura del techo donde se encuentran los refuerzos estructurales.

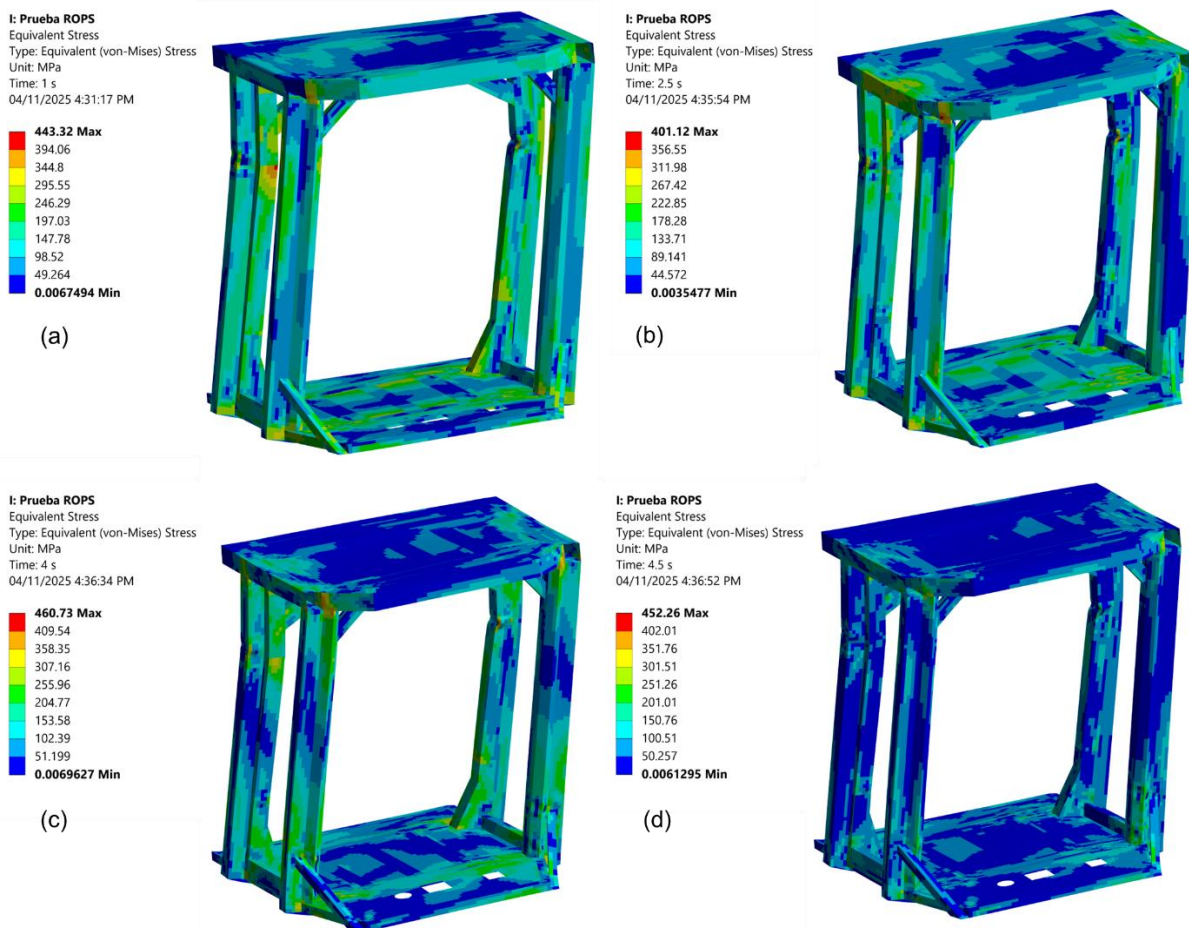


Figura 9. Distribución de tensiones de Von Mises luego de aplicar la carga: (a) lateral, (b) vertical y (c) longitudinal. (d) Muestra las tensiones remanentes de Von Mises al finalizar el ensayo.

La Figura 9 presenta la distribución de tensiones de Von Mises al finalizar la aplicación de cada carga, así como el estado residual de tensiones al término del ensayo. En general, las tensiones permanecen por debajo del límite de rotura del material. Únicamente al finalizar la aplicación de la fuerza longitudinal se presentan tensiones que alcanzan dicho valor. Sin embargo, éstas se localizan en una región donde existe una singularidad numérica asociada a las penalidades del modelo de láminas. En consecuencia, este resultado no evidencia riesgo de colapso estructural. Por otro lado, la Figura 10 muestra las regiones de la estructura cuyas tensiones equivalentes de Von Mises se encuentran comprendidas entre los límites de fluencia y de rotura al finalizar la aplicación de la carga longitudinal. Se observa que estas zonas son localizadas y se concentran principalmente en la parte superior de la cabina, mientras que el resto de la estructura permanece por debajo del límite de fluencia.

I: Prueba ROPS
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 4 s
05/11/2025 10:23:46 AM

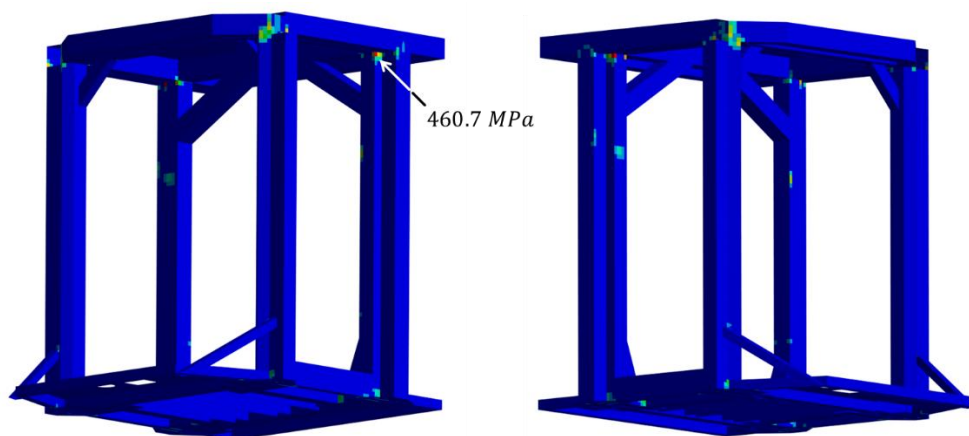
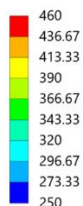
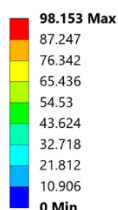


Figura 10. Regiones de la estructura con tensiones superiores a la de fluencia e inferiores a la de rotura al finalizar la aplicación de la fuerza longitudinal.

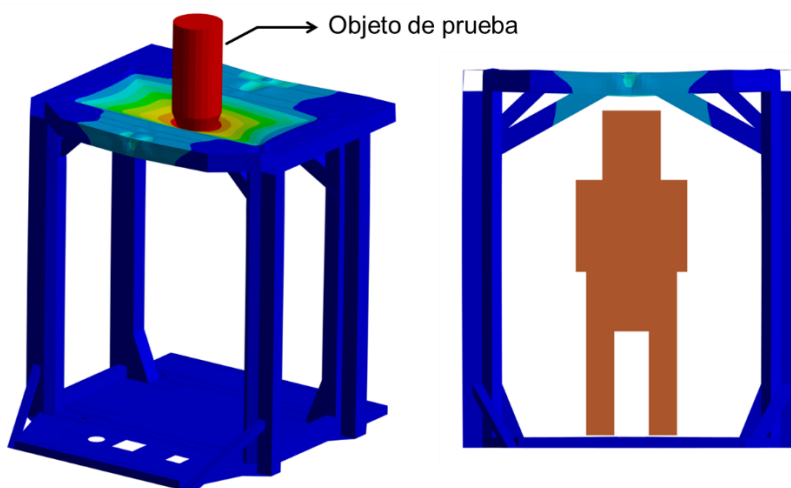
5.2. Ensayo FOPS

La Figura 11a muestra la configuración deformada de la cabina correspondiente al instante de máxima deflexión durante el impacto del objeto de prueba. El desplazamiento máximo alcanzado fue de 98.1 mm y ocurrió a los 0.015 s de iniciada la simulación. En tal situación, la estructura no interfiere con el DLV.

D: FOPS - Punto A
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1.5e-002 s
05/11/2025 11:33:05 AM



(a)



(b)

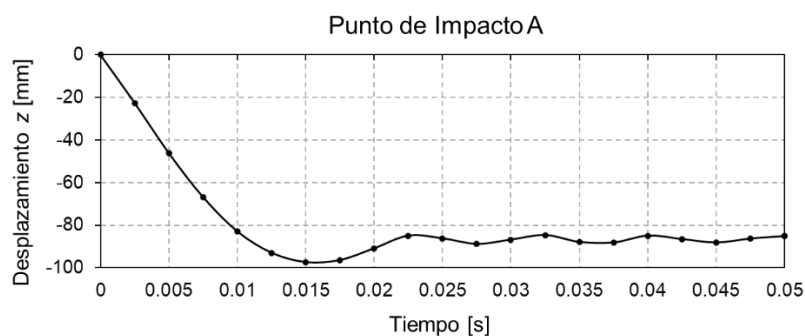


Figura 11. (a) Desplazamiento máximo producido por el impacto del objeto de prueba en el punto A. (b) Desplazamiento en dirección z en función del tiempo medido sobre el punto A.

Por su parte, en la Figura 11b se grafica el desplazamiento (en dirección z, según el sistema de referencia de la Figura 5) en función del tiempo medido sobre el punto de impacto. Se observa cierta oscilación previo a estabilizarse en la configuración deformada final.

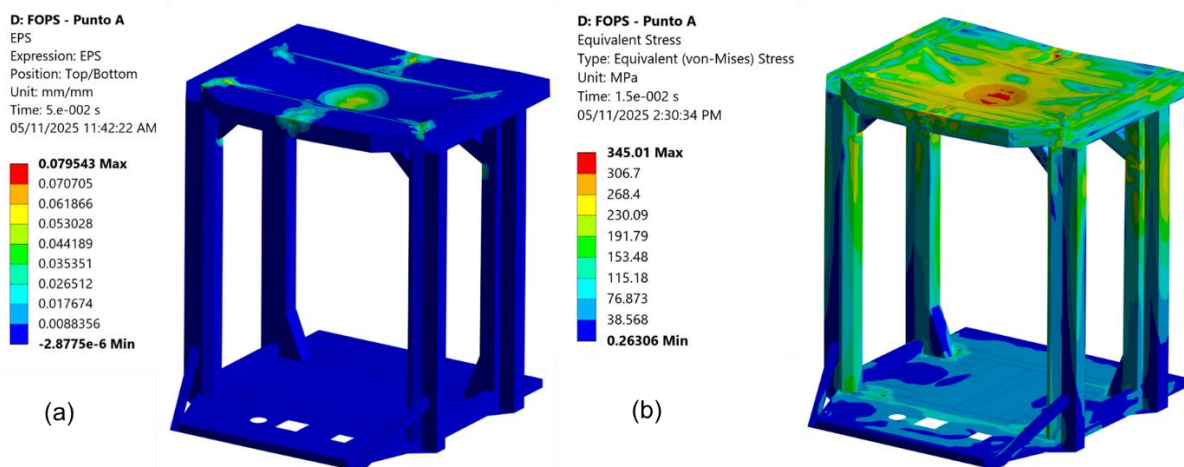


Figura 12. (a) Deformación plástica remanente sobre la estructura de la cabina luego del impacto del objeto de prueba. (b) Distribución de las tensiones máximas de Von Mises desarrolladas sobre la estructura de la cabina.

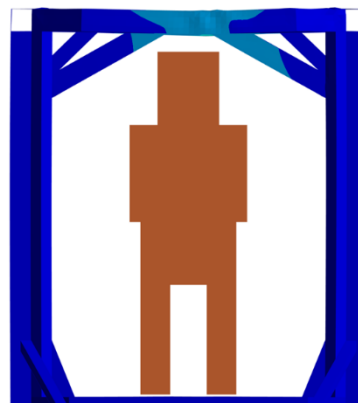
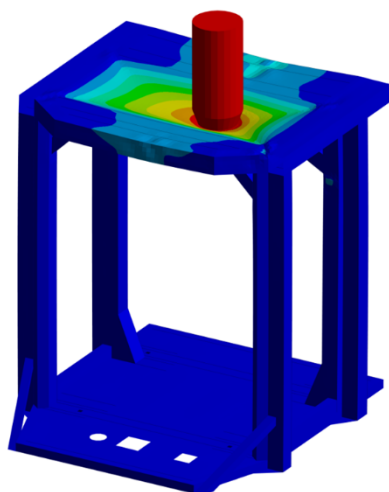
La deformación plástica remanente obtenida luego del impacto se muestra en la Figura 12a, mientras que la Figura 12b presenta las tensiones máximas de Von Mises que experimenta la estructura. Si bien las tensiones superan localmente el límite de fluencia del material, en ningún caso alcanzan la tensión de rotura. Además, los valores máximos de tensión se registran en el instante en que la cabina alcanza su máxima deflexión.

De manera análoga, la Figura 13 y la Figura 15 muestran la configuración deformada de la cabina correspondiente a los impactos aplicados en los puntos B y C, respectivamente. Los desplazamientos máximos obtenidos fueron de 96.4 mm para el punto B y de 95.1 mm para el punto C. En ambos casos, la estructura deformada no interfiere con el DLV. Asimismo, la evolución temporal del desplazamiento presenta un comportamiento similar al observado para el impacto en el punto A.

Por su parte, la Figura 14 y la Figura 16 presentan las distribuciones de deformación plástica remanente y de tensiones máximas equivalentes de Von Mises correspondientes a cada caso. Los resultados muestran que, si bien se desarrollan zonas localizadas con tensiones superiores al límite de fluencia, en ningún momento se alcanza la tensión de rotura del material.

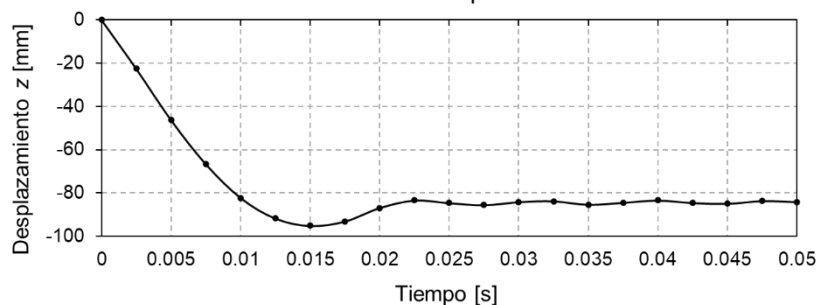
J: FOPS - Punto B
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1.4999e-002 s
05/11/2025 11:57:33 AM

96.437 Max
85.722
75.007
64.291
53.576
42.861
32.146
21.43
10.715
0 Min



(a)

Punto de Impacto B

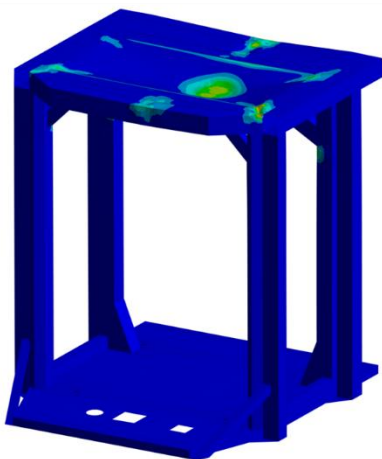


(b)

Figura 13. (a) Desplazamiento máximo producido por el impacto del objeto de prueba en el punto B. (b) Desplazamiento en dirección z en función del tiempo medido sobre el punto B.

J: FOPS - Punto B
EPS
Expression: EPS
Position: Top/Bottom
Unit: mm/mm
Time: 5.0001e-002 s
05/11/2025 12:00:50 PM

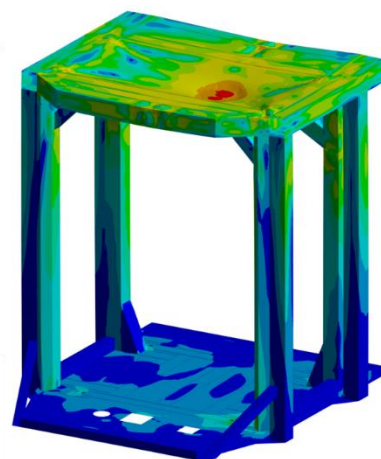
0.084797 Max
0.075375
0.065953
0.05653
0.047108
0.037686
0.028263
0.018841
0.0094185
-3.8367e-6 Min



(a)

J: FOPS - Punto B
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1.2499e-002 s
05/11/2025 12:00:19 PM

358.98 Max
319.12
279.27
239.41
199.56
159.7
119.85
79.992
40.137
0.28157 Min

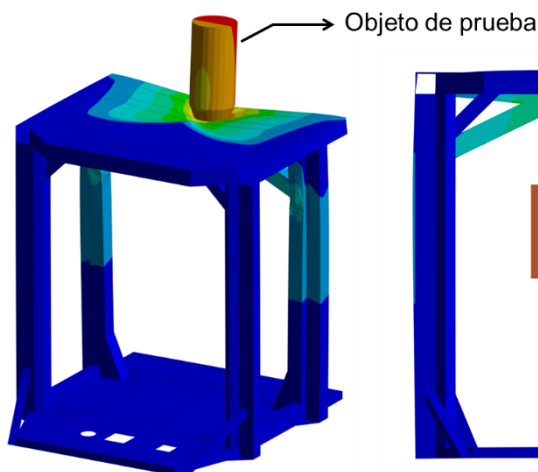


(b)

Figura 14. (a) Deformación plástica remanente sobre la estructura de la cabina luego del impacto del objeto de prueba. (b) Distribución de las tensiones máximas de Von Mises desarrolladas sobre la estructura de la cabina.

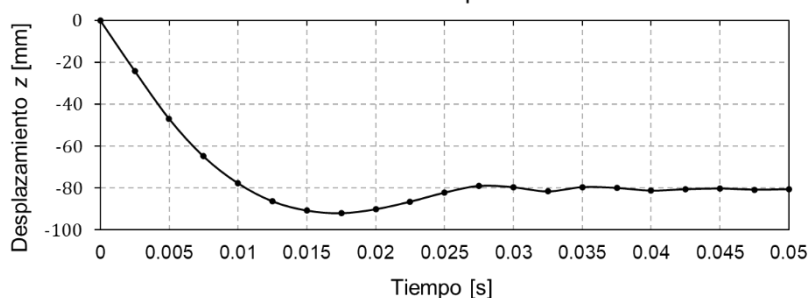
M: FOPS - Punto C
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1.4999e-002 s
05/11/2025 1:51:31 PM

95.19 Max
84.613
74.036
63.46
52.883
42.307
31.73
21.153
10.577
0 Min



(a)

Punto de Impacto C

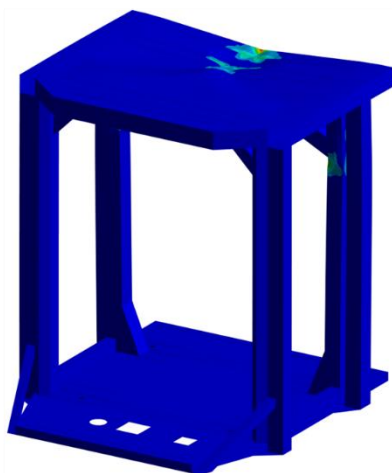


(b)

Figura 15. (a) Desplazamiento máximo producido por el impacto del objeto de prueba en el punto C. (b) Desplazamiento en dirección z en función del tiempo medido sobre el punto C.

M: FOPS - Punto C
EPS
Expression: EPS
Position: Top/Bottom
Unit: mm/mm
Time: 5.0001e-002 s
05/11/2025 1:57:44 PM

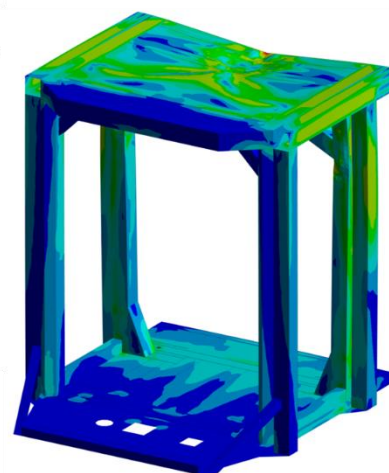
0.1233 Max
0.1096
0.095899
0.082198
0.068498
0.054798
0.041098
0.027398
0.013698
-2.3124e-6 Min



(a)

M: FOPS - Punto C
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1.4999e-002 s
05/11/2025 2:36:43 PM

403.2 Max
358.42
313.64
268.86
224.09
179.31
134.53
89.752
44.974
0.19653 Min



(b)

Figura 16. (a) Deformación plástica remanente sobre la estructura de la cabina luego del impacto del objeto de prueba. (b) Distribución de las tensiones máximas de Von Mises desarrolladas sobre la estructura de la cabina.

6. Conclusiones

En este trabajo se realizó la verificación numérica de la estructura de seguridad reforzada de la cabina de una pala cargadora XCMG ZL50GN mediante la reproducción computacional de los ensayos especificados en las normas ISO 3471 e ISO 3449. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de los refuerzos estructurales propuestos permite que la cabina satisfaga los criterios de aceptación establecidos por ambas normas. Durante los ensayos ROPS y FOPS no se observó interferencia entre la estructura deformada y el DLV, preservándose en todo momento el espacio de supervivencia definido para el operador.

7. Referencias

[1] Earth-Moving Machinery: Roll-Over Protective Structures. Laboratory Tests and Performance Requirements. ISO 3471:2008.

[2] Earth-Moving Machinery: Falling Object Protective Structures. Laboratory Tests and Performance Requirements. ISO 3449:2008.

[3] Especificaciones técnicas XCMG ZL50GN, https://xcmg.cl/ficha_producto/ZL50GN.pdf

[4] Earth-Moving Machinery - Laboratory Evaluations of Protective Structures - Specifications for Deflection-Limiting Volume. ISO 3164:2013.