

Análisis Mecánico de un sistema de protección antivuelco para la cabina de tractores agrícolas categoría T1 mediante simulación FEM

Mechanical analysis of a rollover protection system for the cab of agricultural tractors category T1 by means of FEM simulation

Ariel Eduardo Ávila Romero Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, ariel.avila2015@uteq.edu.ec, ORCID: 0000-0003-4238-9862

Rodger Salazar Loor Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador, rsalazarl@uteq.edu.ec ORCID: 0000-0001-9406-9452

Resumen

En la actualidad, la tasa de accidentes por vuelco en tractores agrícolas es elevada, registrándose indicadores de lesiones y daños graves en los operarios. El objetivo principal es realizar una prueba de carga dinámica para cabinas de tractores empleando simulación de acuerdo con la norma UE 1322/2014. Para la evaluación del impacto se emplea el método de elementos finitos a la estructura de la cabina de un tractor modelo T1, considerando los requerimientos de absorción de energía de impacto en el software LS-DYNA. Se ha considerado el material ASTM A36 con espesores estándares del fabricante, además de restricciones en los puntos de contacto y movilidad del péndulo de impacto con las condiciones establecidas para el ensayo. Los resultados obtenidos en esta investigación fueron valores de esfuerzo máximo de 375,4 MPa durante el impacto y de 339 MPa de esfuerzos residuales después del impacto, alcanzándose una deformación elástica final de 58,58 manteniéndose dentro del margen admisible para el ensayo de impacto trasero. Se concluye que la simulación por el método de elementos finitos permite obtener resultados admisibles en el diseño de cabinas de tractores, siendo un recurso complementario importante en la validación y optimización de estructuras mediante ensayos físicos.

Palabras clave Tractor, Bloque pendular, Impacto trasero, Método de Elementos Finitos.

Abstract

Currently, the rate of rollover accidents in agricultural tractors is high, with indicators of injuries and serious damage to operators. The main objective is to perform a dynamic load test for tractor cabs employing simulation according to EU 1322/2014. For the impact assessment, the finite element method is employed to the cab structure of a tractor model T1, considering the impact energy absorption requirements in LS-DYNA software. ASTM A36 material with standard thicknesses from the manufacturer was considered, in addition to restrictions in the contact points and mobility of the impact pendulum with the conditions established for the test. The results obtained in this research were maximum stress values of 375, 4 MPa during the impact and 339 MPa of residual stresses after the impact, reaching a final elastic deformation of 58.58, keeping within the admissible margin for the rear impact test. It is concluded that the simulation by the finite element method allows obtaining admissible results in the design of tractor cabins, being an important complementary resource in the validation and optimization of structures by means of physical tests.

Keywords Tractor, Pendulum block, Rear impact, Finite Element Method.

Introducción

Los accidentes por vuelco de tractores representan una de las mayores causas de accidentes fatales y no fatales en el sector agrícola en las últimas décadas, debido a factores como: difíciles condiciones de trabajo, centroides de masa desbalanceados y poca estabilidad del terreno (Micheletti, 2020, p. 64) y (Chen, 2012, p. 207). En Italia se ha reportado que un 51% de los accidentes en el sector agrícola son producidos por operadores que conducían tractores (Cividino, 2018, p. 9). En Europa se ha determinado que el 40% de las lesiones graves y muertes en el sector agrícola se produjeron en tractores que no contaban con un sistema desplegado para soportar una configuración de protección de los elementos estructurales de la cabina (Ojados, 2017, p. 111).

Para mejorar las condiciones de seguridad en los tractores se han desarrollado soluciones tecnológicas eficientes en el diseño estructural, como la implementación de una estructura de protección contra el vuelco (ROPS), encargada de proporcionar una zona de protección alrededor de los operadores de tractores, de manera que garantice la integridad del operario en caso de un accidente (Tinc, 2019, p. 1257). Las lesiones causadas por el vuelco pueden limitarse instalando ROPS apropiados junto con un cinturón de seguridad fijado al asiento del conductor, consiguiendo resultados confiables de un 99% de eficacia, evitando muertes y lesiones graves (Facchinetti, 2021, p. 4536) y (Tinc, 2020, p. 1).

El diseño ROPS según la Unión Europea debe cumplir lo establecido en la normativa UE 1322/2014 para la validación de ensayos físicos y virtuales para la fabricación de tractores (Unión Europea, 2014), donde la estructura deberá ser sometida a una carga de impacto delantero y trasero mediante un ensayo de péndulo, con el fin de evaluar la intrusión de elementos estructurales en la cabina del operario ante un vuelco (Lindhorst, 2018, p. 53), la energía acumulada del impacto debe ser absorbida por los elementos laterales y verticales de

la cabina durante una secuencia de carga, resultando en valores de deflexión mínimos (Capacci, 2021, p. 6517) y (Sakthivel, 2021). Entre los parámetros que deben cumplirse para el diseño ROPS para la protección adecuada del operador se consideran: resistencia de los materiales y deflexiones permitidas para la absorción y disipación de energía; y el comportamiento elastoplástico de los materiales con el fin de reducir los momentos máximos en los soportes de montaje (Ayers, Paul D., 2016, p. 247).

La utilización del método de elementos finitos (FEM) en el área de mecánica estructural resulta ser una herramienta prometedora en la comprensión del comportamiento mecánico de elementos estructurales (Koutromanos, 2018). Se han empleado FEM para diseños experimentales ROPS bajo diversas condiciones de carga, geometría y materiales definidos para condiciones de vuelco, obteniéndose excelentes resultados convergentes a las condiciones reales en accidentes (Trojanovskaya, 2018, p. 32021) y (Gomathinayagam, 2017, p. 317). Durante el impacto los ROPS se presenta una respuesta dinámica no lineal debido a las grandes fuerzas desarrolladas, causando inestabilidad y cambios graduales en la configuración geométrica de los elementos estructurales (Bonet, 2016, p. 1), esto representa un desafío para los diseñadores en el modelado y simulación en las secciones críticas como juntas y uniones, por lo que se realizan modelos experimentales empleando diferentes materiales y espesores para optimizar el comportamiento mecánico de las ROPS (Agius, 2016, p. 1558).

El propósito de este estudio consiste en determinar el comportamiento mecánico de la estructura de la cabina de un tractor agrícola categoría T1 bajo condiciones de vuelco. Se propone realizar una verificación mediante FEM para el cálculo de deformaciones y esfuerzos aplicado a una configuración estructural según lo establecido en la normativa regulatoria UE 1322/2014 para ensayos de impacto trasero por péndulo.

Materiales y métodos

La normativa UE 1322/2014 considera realizar un ensayo de aplastamiento trasero a la estructura, empleando un bloque pendular suspendido a 6 m desde el suelo hasta su punto de pivote con el fin de proporcionar un ajuste correcto respecto a la estructura de protección de la cabina del tractor para el ensayo de impacto como se muestra en la Figura 1.

Se establece la altura del centro de gravedad del bloque pendular (H) a la que se soltara el bloque para impactar la estructura en la parte trasera del tractor, debe relacionarse con el punto de contacto del impacto formando un ángulo de 20° con respecto a la vertical, se determina mediante la Ecuación 1.

$$H = 2.165 \times 10^{-8} ML^2 \quad (1)$$

Donde:

H: altura del centro de gravedad del bloque pendular (mm)

M: masa del tractor (kg)

L: batalla del tractor (mm)

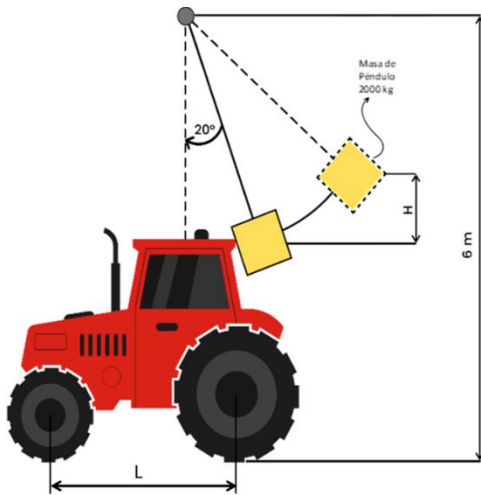


Figura 1. Altura calculada para el impacto trasero.

El resultado del impacto trasero debe producir una deformación no mayor a unos 150 mm para garantizar la seguridad del ocupante según la norma ISO 4252 (Renius, 2020). Al realizar el ensayo de impacto trasero ninguna parte deberá ingresar dentro de la zona libre o zona de seguridad, si la zona de seguridad queda fuera de la protección de la estructura se considera que estará en contacto con el suelo llano en caso de que el tractor volcase según la dirección del impacto.

Para la obtención del modelo CAD se consideró el tractor modelo T120 Valtra que cumple con los parámetros mínimos de masa, velocidad y dimensiones disponibles para el ensayo pendular (Estrada, 2016, p. 1390), (AgriDatos, 2021) y (Tractordata, 2020). Las geometrías de la cabina se realizan con elementos tipo Shell sin un alto grado de detalle, sin elementos complejos como radios de empalme, agujeros de placas, nervios, secciones pequeñas, y se realizan tratamientos en las esquinas para el cierre y unión entre elementos estructurales como se muestra en la Figura 2. Esta etapa de preparación influye en la reducción de variaciones considerables en el tamaño de los elementos de malla, lo que normalmente causa posibles fallos en el proceso de discretización de FEM.

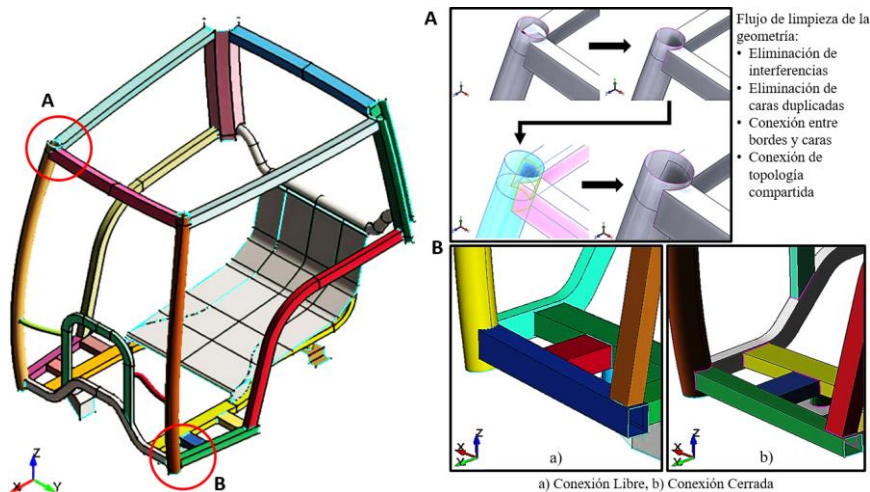


Figura 2. Limpieza y Tratamiento de superficies del modelo CAD.

El modelado del bloque pendular tiene asignado una masa de 2000 kg y dimensiones de 680 mm x 680 mm. La característica de este modelo es su comportamiento como elemento sólido rígido el cual no presenta ninguna deformación en el análisis. Para determinar el nivel de deformación elástica provocada en la estructura de protección después de ser impactada por el bloque se emplea la Ecuación 2.

$$D_T = D_p - D_e \quad (2)$$

Donde:






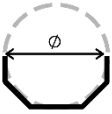
D_T : Deformación total alcanzada

D_p : Deformación permanente después del impacto

D_e : Deformación elástica alcanzada durante el impacto máximo

Diferentes estudios concuerdan que la asignación adecuada de elementos estructurales y medidas de espesor en ROPS representa un papel fundamental en el diseño experimental para la fabricación de tractores (Latorre-Biel, 2019, p. 40), (Li, 2015, p. 73) y (Ayers, Paul, 2018, p. 49). En este trabajo se considera el material ASTM A36 para la estructura y espesores de 2 a 8 mm, se indican las especificaciones de los elementos estructurales en la Tabla 1.

Tabla 1. Secciones de perfiles estructurales.

Sección estructural	Designación	Localización
Round HSS 	HSS31.8X2	Viga frontal
	HSS76.2X4	Columna frontal
	HSS63.5.2X4	Viga lateral
Rectangular HSS 	HSS50X30X3	Viga frontal
	HSS50X25X3	Columna frontal
	HSS60X40X3	Viga frontal
	HSS80X40X3	Viga longitudinal
Square HSS 	HSS80X40X4	Viga longitudinal
	HSS50X50X4	Viga lateral
	HSS60X60X4	Columna lateral
Sheet 	SHT11GA1220	Piso
	SHT6GA1220	Viga longitudinal
Floor Plate 	FPL2X2440	Viga frontal
Half octagon 	Ø139X4	Viga lateral

El programa de preprocesamiento LS-PREPOST separa las mallas de elementos finitos en partes, haciendo más fácil su identificación y asignación de propiedades de materiales en los miembros estructurales como se muestra en la Figura 3. Se utiliza un tamaño de elemento de 15 mm siendo apropiado para evitar errores en el procesamiento y generación de las mallas. Cada parte de malla comparte las mismas propiedades del material ASTM A36, los espesores asignados a dichas partes están ligados a las secciones de los miembros estructurales, cada parte de malla está conectada entre sí por medio de sus nodos comunes, facilitando la transmisibilidad de las fuerzas, deformaciones y desplazamientos.

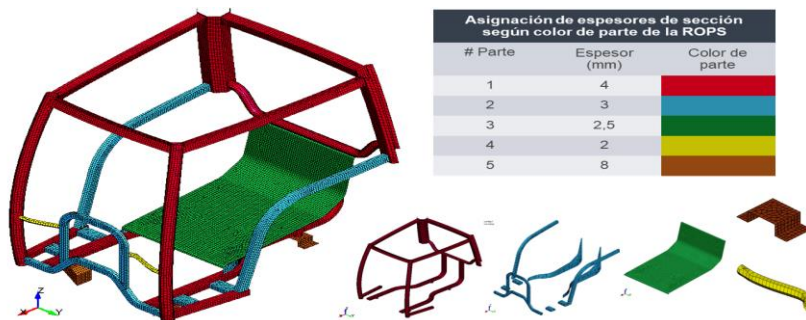


Figura 3. Asignación de espesores de las mallas de elementos finitos y miembros estructurales.

Resultados

Se realizó una revisión de la calidad de la malla para detectar los posibles elementos deformados, considerando un valor mínimo aceptable para el coeficiente jacobiano del 30% como se muestra en la Figura 4. Se determina que para el mallado de la estructura de la cabina posee 31361 elementos y 31874 nodo, la zona libre posee 1920 elementos y 1940 nodos, y el bloque pendular posee 343 elementos y 512 nodos, como se muestra en la Figura 5.

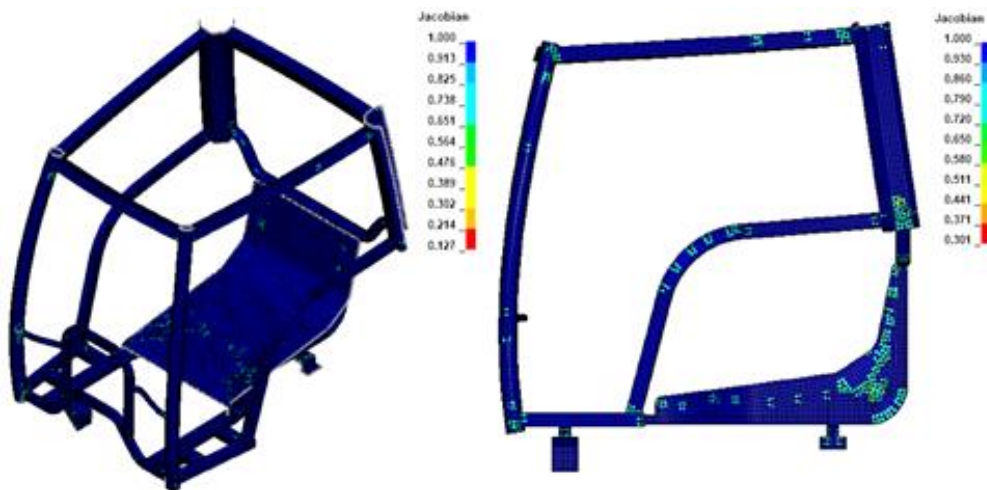


Figura 4. Comprobación del índice de calidad de la malla de elementos finitos.

Se asignan restricciones a los anillos del péndulo limitando la rotación y traslación en tres ejes, además de permitir a otros elementos mantener su posición inicial en el caso de la zona de seguridad para la verificación de la penetración de los elementos estructurales, y fijando la ubicación del punto pivote del bloque pendular. Para el posicionamiento del bloque pendular se considera una masa de 5530 kg, y una longitud de batalla de 2748 mm localizándose a una altura de 904.10 mm. Se coloca una restricción en la zona libre y en la base brindando rigidez y estabilidad a la estructura antes de que ocurra la deformación por el impacto del bloque pendular, como se muestra en la Figura 6.

ASIGNACIÓN DE ESPESORES Y TAMAÑO DE ELEMENTOS SEGÚN COLOR DE PARTE				
Descripción	# Elementos	# Nodos	Tamaño de elemento (mm)	Espesor de sección y color de parte (mm)
Zona libre	1920	1940	20	2
Anillos	354	331	20	2
Bloque	343	512	60	Solida

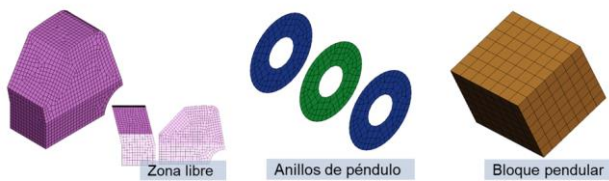


Figura 5. Asignación de espesores y elementos de malla al Bloque Pendular y Zona libre.

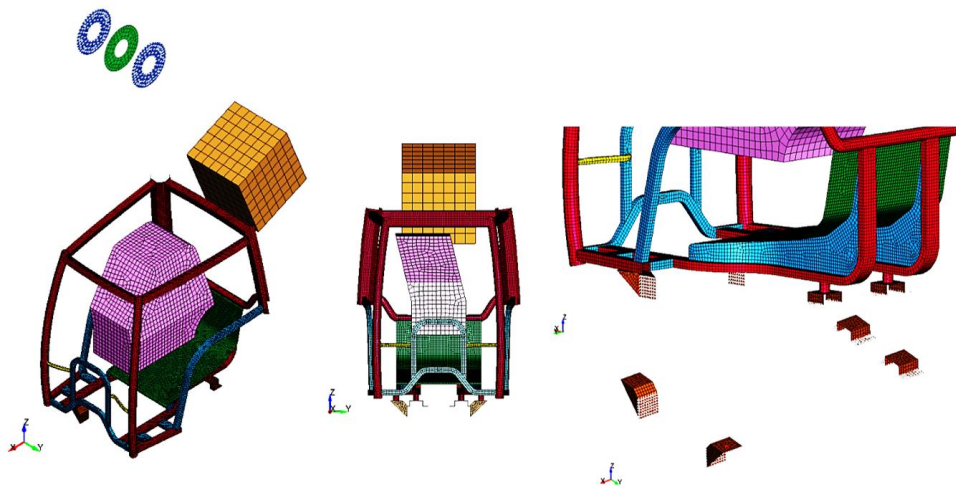


Figura 6. Asignación de restricción fija a los anillos de péndulo, zona libre y base.

Se utiliza la carta de control CONSTRAINED en LS-PREPOST para crear la función junta de péndulo, ayudando al bloque pendular a realizar el movimiento deseado para impactar la parte posterior de la estructura de protección. Para garantizar un apropiado modelo de simulación y semejanza con el fenómeno real se utilizan algunas propiedades relacionadas con el comportamiento físico y mecánico del material utilizado para la simulación. El modelo de material utilizado en LS-PREPOST para las partes que no presentaran deformación alguna como el bloque pendular los anillos de péndulo y la zona libre es el MAT 020 RIGID y un modelo de material para la estructura de protección MAT 024 PIECEWISE LINEAR PLASTICITY permitiendo observar el comportamiento plástico al ser impactada por el bloque. Se utiliza dos tipos de secciones SOLID y tipo SHELL para el bloque pendular, los anillos de péndulo, zona libre y la estructura de protección respectivamente.

Bajo las condiciones de carga de impacto se determinó que la mayoría de los esfuerzos se concentran en las conexiones de los miembros estructurales, elementos de refuerzo y segmentos laterales, alcanzado valores de esfuerzos de 375,4 MPa en las conexiones principales durante el impacto, mientras que al retirarse el bloque pendular se tienen esfuerzos residuales con un valor de 339 MPa a lo largo de los miembros estructurales y conexiones principales, como se muestra en la Figura 7.

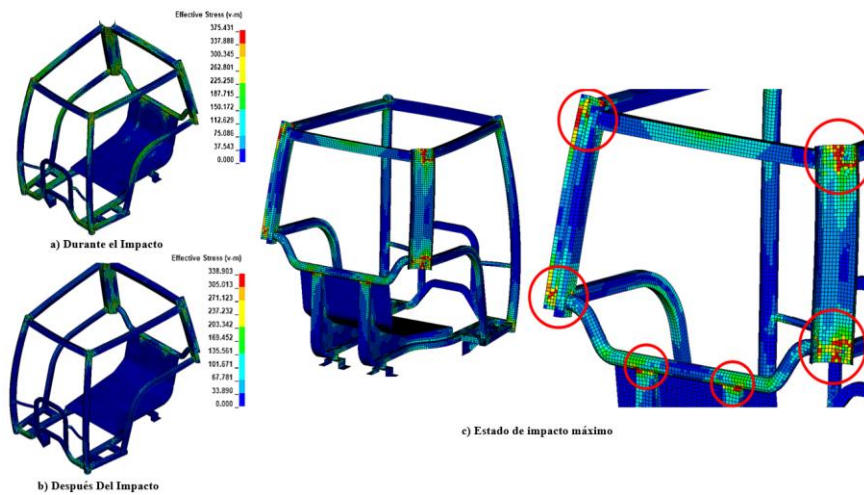


Figura 7. Esfuerzos obtenidos a) durante impacto b) después de impacto c) valores máximos.

Se determinó que el desplazamiento máximo para el estado durante el impacto es de 96,688 mm respecto a su posición inicial, mientras que en el estado después de la carga de impacto se alcanza un valor de 58,581 mm aplicados en los elementos estructurales de la parte superior del modelo, como se muestra en la Figura 8.

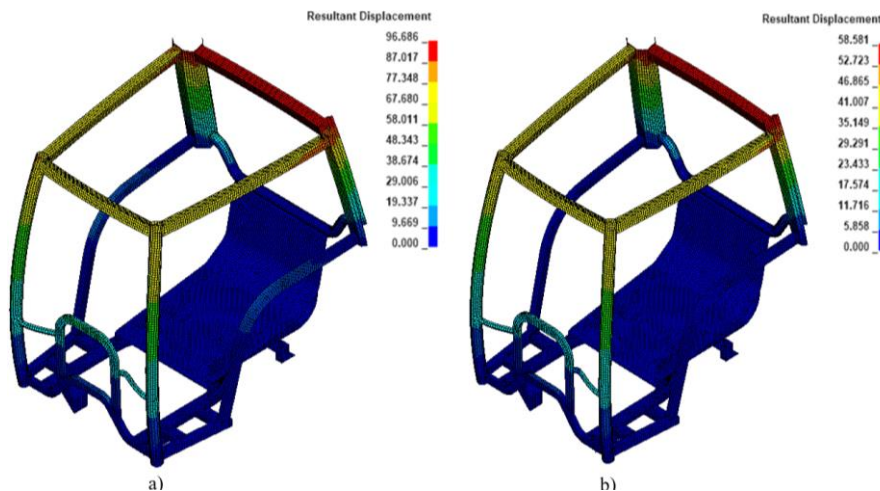


Figura 8. Desplazamientos alcanzados a) durante impacto b) después de impacto

La deformación total permite identificar la modificación de posición de nodos de su posición antes y durante el impacto, obteniéndose una deformación elástica en la estructura de 38.107 mm, como se muestra en la Figura 9.

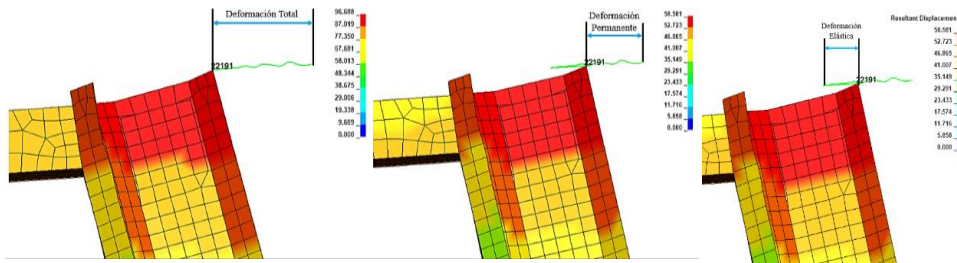


Figura 9. Ubicación de la deformación Elástica.

En la deformación plástica al retirarse la carga de impacto se presentan pequeñas deformaciones en a las conexiones de esquinas, mientras las zonas con mayor afectación son las conexiones principales entre los miembros tubulares cuadrados, redondos y octogonales, evidenciando niveles de deformación permanentes en la estructura, obteniéndose valores de porcentaje del 20,3%, como se muestra en la Figura 10.

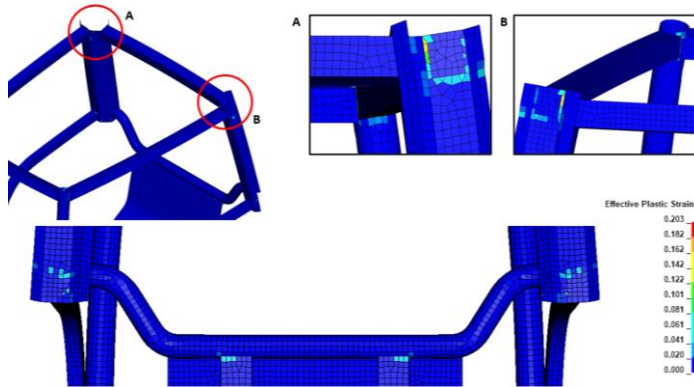


Figura 10. Distribución de deformación plástica.

Conclusiones

El método por elementos finitos en el análisis del comportamiento mecánico de estructuras resulta viable en relación con los ensayos físicos para la validación de componentes estructurales en el diseño de cabinas de tractores. La simulación muestra que la estructura de la cabina del tractor T1 supera el límite elástico del material ASTM A36 alcanzando un esfuerzo máximo de 375.4 MPa y deformación plástica del 20.3% en los elementos estructurales superiores, mientras que en el resto de la estructura se mantienen valores mínimos de deformación, cumpliendo con el requisito de la zona libre para el operario.

Referencias

- Agius, D. J., Kourousis, K. I., Takla, M., y Subic, A. (2016). Enhanced non-linear material modelling for analysis and qualification of rollover protective structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, Journal of Automobile Engineering*, 230 (11), 1558-1568.
- AgriDatos. (2021). Datos técnicos de tractores agrícolas valtra. Recuperado de <https://www.agridatos.es/tractores-agricolas/valtra/t120-t130-t140-t160-t170-t180-t190-ficha-tecnica/>
- Ayers, P. D., Khorsandi, F., John, Y., y Whitaker, G. (2016). Development and evaluation of a computer-based ROPS design program. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 22 (4), 247-260.
- Ayers, P., Khorsandi, F., Wang, X., y Araujo, G. (2018). ROPS designs to protect operators during agricultural tractor rollovers. *Journal of Terramechanics*, 75, 49-55.
- Barros-Bastidas, C., & Turpo, O. (2020). La formación en investigación y su incidencia en la producción científica del profesorado de educación de una universidad pública de Ecuador. *Publicaciones*, 50(2), 167–185. doi:10.30827/publicaciones.v50i2.13952
- Barros, C., & Turpo, O. (2017). La formación en el desarrollo del docente investigador: una revisión sistemática. *Revista Espacios*, 38(45).
- Bonet, J., Gil, & Wood. (2016). Introduction. *Nonlinear solid mechanics for finite element analysis: Statics* (pp. 1-20). Cambridge: Cambridge University Press.
- Capacci, E., Franceschetti, B., Guzzomi, A., y Rondelli, V. (2021). Energy absorption in actual tractor rollovers with different tire configurations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18 (12), 6517.
- Chen, C., Wang, G., Zhang, Y., Zhang, Y., y Si, J. (2012). Effect of lateral stiffness coefficient of loader ROPS on human injury in a lateral rollover incident. *Biosystems Engineering*, 113 (2), 207-219.
- Cividino, S., Gianfranco, P., Nicola, Z., y Rino, G. (2018). Agricultural health and safety survey in friuli venezia giulia. *Agriculture*, 8 (1), 9.
- Estrada, J. S., Schlosser, J. F., Farias, M. S. d., Martini, A. T., y Santos, G. O. d. (2016). Mass of agricultural tractors available in the brazilian market. *Ciência Rural*, 46 (8), 1390-1394.

- Facchinetti, D., Santoro, S., Galli, L. E., y Pessina, D. (2021). Agricultural tractor roll-over related fatalities in Italy: Results from a 12 years analysis. *Sustainability*, 13 (8), 4536.
- Gomathinayagam, A., Antony, P., Prabhakaran, K., y Suresh, R. (2017). Simulation of roll over protective structure testing of earth moving equipment cabin. *Research into Design for Communities*, , 317-326.
- Koutromanos, (2018). *Fundamentals of finite element analysis*. Hoboken:John Wiley & Sons
- Latorre-Biel, J., Benito-Amurrio, M., Perez-Ezcurdia, A., Arana-Navarro, I., y Alfaro-Lopez, J. R. (2019). Characterisation of mechanical energy absorbers developed to complement of roll-over protection structures in agricultural vehicles. *Biosystems Engineering*, 188, 40-56.
- Li, W., Tao, J., y Liu, M. (2015). Nonlinear analysis and uncertainty optimisation of mining dump truck's ROPS based on TPS-HDMR. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 22 (1), 73-92.
- Lindhorst, C. M., Hoy, R. M., Pitla, S. K., y Kocher, M. F. (2018). Dynamic ROPS test for tractors over 6,000 kilograms. *Transactions of the ASABE*, 61 (1), 53-62.
- Micheletti, M., Caffaro, F., Giustetto, A., Vigoroso, L., Paletto, G., y Cavallo, E. (2020). Tractor rollover protection: Is the incorrect use of foldable rollover protective structures due to human or to technical issues? *Human Factors*, 62 (1), 64-76.
- Ojados, D., Martin, B., Ibarra, I., Macian, A., Salcedo, G., y Miguel, B. (2017). Development and assessment of a tractor driving simulator with immersive virtual reality for training to avoid occupational hazards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 111-118.
- Renius, (2020). *Fundamentals of tractor design*. Cham:Springer International Publishing
- Sakthivel, M., Dhandapani, N. V., Vetrivel, V., y Arunachalam, J. (2021). Design and analysis of tractor roll over protective structure for the influence of deformation, stress distribution and strain energy. *Journal of Physics. Conference Series*, 1717 (1)
- Tinc, P. J., Sorensen, J. A., y Lindvall, K. (2020). Stakeholder experiences implementing a national ROPS rebate program: A grounded theory situational analysis. *SAGE Open*, 10 (2), 1-13.

- Tinc, P. J., Sorensen, J. A., Weinehall, L., y Lindvall, K. (2019). An exploration of rollover protective structures (ROPS) rebate program media coverage: Strategies for implementation and sustainment. *BMC Public Health*, 19 (1), 1257.
- Tractordata. (2020). Valtra T120 dimensions . Recuperado de <https://www.tractordata.com/farm-tractors/004/1/0/4109-valtra-t120-dimensions.html>
- Troyanovskaya, I. P., Serov, S. I., Kromskij, E. I., y Kozminych, D. V. (2018). Estimating safety of a tractor cab with the protective system ROPS. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 450 (3), 32021.
- Unión Europea. (2014). Reglamento delegado (UE) n ° 1322/2014. Recuperado de https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2014/1322/oj
- von Feigenblatt, Otto Federico (2007). *Japan and Human Security: 21st Century ODA Policy Apologetics and Discursive Co-optation* (2nd ed.). Delray Beach: Academic Research International.
- von Feigenblatt, Otto Federico (2009a). Anomie, Racial Wage, and Critical Aesthetics: Understanding the Negative Externalities of Japanese and Thai Social Practices. *Journal of Asia Pacific Studies*, 1(1), 69-75.