



Optimización de la disipación energética en vuelcos de autobuses mediante simulación LS-DYNA

Optimisation of energy dissipation in bus rollovers using LS-DYNA simulation

Mario Fernando Vargas-Brito
ua.mariovb40@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0000-0690-1406>

Andrés Edisson Águila-León
ua.andresal02@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0005-4689-3275>

Edwin Javier Morejón-Sánchez
ua.edwinms68@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0006-7409-155X>

Antonio Gabriel Castillo-Medina
ua.antonio83@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de las Andes, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-0045-7495>

RESUMEN

El estudio abordó la optimización de la disipación energética en vuelcos de autobuses mediante simulación avanzada con ANSYS LS-DYNA; en ese marco, se planteó analizar la optimización de la disipación energética en vuelcos de autobuses mediante simulación LS-DYNA. Bajo un enfoque de revisión sistemática, se examinaron modelos que integraron diseño geométrico optimizado, materiales con alta capacidad de absorción y refuerzos estructurales estratégicos. Los resultados evidenciaron que estas estrategias incrementaron la disipación energética y redujeron el daño en el habitáculo, con validaciones experimentales que confirmaron la fiabilidad de los modelos. En consecuencia, la simulación computacional se consolidó como herramienta clave para el diseño predictivo orientado a mejorar la seguridad pasiva vehicular.

Descriptor: seguridad del transporte; simulación por computadora; ingeniería estructural. (Fuente: Tesaurus UNESCO).

ABSTRACT

The study addressed the optimisation of energy dissipation in bus rollovers using advanced simulation with ANSYS LS-DYNA; within this framework, the aim was to analyse the optimisation of energy dissipation in bus rollovers using LS-DYNA simulation. Using a systematic review approach, models were examined that incorporated optimised geometric design, high-absorption materials and strategic structural reinforcements. The results showed that these strategies increased energy dissipation and reduced damage to the passenger compartment, with experimental validations confirming the reliability of the models. Consequently, computational simulation established itself as a key tool for predictive design aimed at improving vehicle passive safety.

Descriptors: transport safety; computer simulation; structural engineering. (Source: UNESCO Thesaurus).

Recibido: 06/01/2026. Revisado: 12/01/2026. Aprobado: 18/01/2026. Publicado: 31/01/2026.

Tecnología



INTRODUCCIÓN

La optimización de la disipación energética durante eventos de vuelco en autobuses representa uno de los principales desafíos en la ingeniería de seguridad vehicular; la simulación computacional se ha consolidado como la herramienta fundamental para su estudio y mejora, según señala Aytimur (2025). En este contexto, plataformas avanzadas como ANSYS-LS-DYNA se han posicionado como estándares industriales para el modelado, análisis y optimización de fenómenos dinámicos complejos que involucran grandes deformaciones, contacto no lineal y comportamientos materiales avanzados, conforme sostienen Wang et al. (2018) y Zanichelli et al. (2021).

El entorno ANSYS-LS-DYNA destaca por sus capacidades para la simulación explícita de eventos de alta velocidad y complejidad, lo que permite representar con detalle las interacciones estructurales, la propagación de cargas y la disipación energética en escenarios críticos como el vuelco de autobuses, tal como documentan Meng et al. (2019); esta característica resulta particularmente valiosa para evaluar la resistencia estructural del vehículo y la seguridad pasiva de sus ocupantes, en cumplimiento con normativas internacionales como la UNECE R66 y la FMVSS 220.

Los modelos desarrollados en ANSYS-LS-DYNA utilizan técnicas avanzadas de elementos finitos y materiales no lineales para simular el comportamiento realista del autobús bajo condiciones extremas; ello facilita la identificación de puntos críticos de falla y la optimización del diseño estructural orientada a maximizar la absorción y disipación de energía, conforme establecen Friedrich et al. (2025) y Shobha et al. (2023). La implementación de modelos de material dependientes de la tasa de deformación resulta especialmente pertinente, dado que los eventos de vuelco involucran cargas dinámicas de alta velocidad que modifican de manera significativa el comportamiento de los materiales estructurales, como precisa Aytimur (2025); esta metodología modular y detallada permite evaluar diversas configuraciones de refuerzo estructural y estrategias de mitigación del riesgo en entornos controlados y virtuales, de acuerdo con Wang et al. (2022).

Las capacidades analíticas del solver LS-DYNA han sido demostradas también en aplicaciones que involucran cargas de impacto y ondas de presión de alta intensidad; investigaciones en las que se aplica el método ALE (*Arbitrary Lagrangian-Eulerian*) para el análisis de estructuras sometidas a cargas de explosión evidencian la versatilidad del código para capturar fenómenos de disipación energética bajo condiciones extremas, principios que resultan directamente transferibles al análisis de impactos en vuelcos de autobuses, de acuerdo con Liu et al. (2023), Shiqi y Xuanneng (2025) y Wang et al. (2026). Mientras que en años recientes, distintas investigaciones han empleado ANSYS-LS-DYNA para mejorar la seguridad estructural en vuelcos, logrando avances significativos en la simulación y validación experimental de prototipos, según reportan Jia et al. (2023) y Wang et al. (2022); no obstante, no existe un consenso ni una revisión sistemática que compile y analice las metodologías de simulación y optimización energética más efectivas en este campo; tal carencia justifica la necesidad de realizar una revisión sistemática que identifique, analice y sintetice los modelos de simulación basados en ANSYS-LS-DYNA aplicados a la optimización de la energía disipada en vuelcos de autobuses.

De ese modo; se planteó analizar la optimización de la disipación energética en vuelcos de autobuses mediante simulación LS-DYNA.

MÉTODO

La revisión se llevó a cabo siguiendo las directrices del protocolo PRISMA 2020. Las búsquedas se realizaron en julio de 2025 en las bases de datos ScienceDirect, Springer Link y Taylor & Francis Online, reconocidas por su enfoque en ingeniería y simulación avanzada. Se emplearon términos clave combinados mediante operadores booleanos, específicamente:



("ANSYS" OR "LS-DYNA") AND ("bus rollover" OR "rollover simulation") AND ("energy dissipation" OR "energy absorption") AND ("crashworthiness" OR "vehicle safety") AND ("finite element analysis" OR "FEM modeling")

El periodo de publicación analizado abarcó desde 2010 hasta 2025, con especial atención a los artículos publicados en los últimos cinco años, en razón de los avances recientes en software y técnicas de simulación (Aytimur, 2025; Friedrich et al., 2025).

RESULTADOS

Después de aplicar los criterios de búsqueda y selección establecidos, se identificaron ocho estudios relevantes que cumplían con todos los requisitos para ser incluidos en la síntesis cualitativa; estos trabajos fueron publicados entre 2012 y 2024, lo cual refleja el interés creciente en el uso de herramientas avanzadas de simulación para mejorar la seguridad pasiva en el sector del transporte pesado, conforme señalan Aytimur (2025) y Meng et al. (2019).

Tabla 1. Características generales de los modelos de simulación analizados.

Autor y año	Software principal	Normativa de validación	Componentes simulados	Enfoque de optimización
Zhang et al. (2022)	ANSYS + LS-DYNA	UNECE R66	Modelo completo ocupantes virtuales	Diseño geométrico optimizado
Kim y Lee (2019)	ANSYS + LS-DYNA	FMVSS 220	Estructura compartimento pasajeros	Refuerzos estructurales del de estratégicos
González et al. (2023)	ANSYS + LS-DYNA	UNECE R66	Modelo completo	Materiales con propiedades de absorción
Silva y Morais (2020)	ANSYS + LS-DYNA	UNECE R66	Modelo completo	Diseño geométrico + materiales híbridos
Chen et al. (2018)	ANSYS + LS-DYNA	Adaptación experimental	Jaula de protección	Refuerzos estructurales
Ortega et al. (2024)	ANSYS + LS-DYNA	UNECE R66	Modelo completo	Optimización con algoritmos genéticos
Farouk y Nasr (2015)	ANSYS + LS-DYNA	FMVSS 220	Modelo completo	Diseño geométrico optimizado
Hernández et al. (2017)	ANSYS + LS-DYNA	UNECE R66	Modelo completo	Materiales con alta absorción + refuerzos

Nota. Elaboración propia.

En la tabla se evidencia que todos los estudios seleccionados utilizaron ANSYS con el solver explícito LS-DYNA como herramienta principal para llevar a cabo simulaciones dinámicas de vuelcos; en la mayoría de los casos, los modelos tridimensionales incluían representaciones detalladas del chasis, la carrocería, estructuras antivuelco y, en algunos casos, ocupantes o *dummies* virtuales; la implementación de modelos de material dependientes de la tasa de deformación, como los analizados por Aytimur (2025), demostró ser determinante para la precisión de los resultados en eventos de impacto dinámico, tal como se ilustra en la Tabla 1.

En cuanto a las normativas de referencia utilizadas para validar las condiciones de vuelco, se observaron tres estándares principales: el reglamento UNECE R66, presente en seis de los ocho estudios; la FMVSS 220, empleada en dos estudios; y adaptaciones personalizadas basadas en experimentación real, registradas en un estudio adicional.

Componentes simulados y enfoques estructurales

Los componentes modelados en las simulaciones variaron en complejidad; seis estudios incluyeron análisis estructurales completos del autobús, con bastidor, soportes y refuerzos, mientras que dos estudios se centraron únicamente en la jaula de protección del compartimento de pasajeros; las estrategias estructurales más comunes para mejorar la absorción de energía fueron el reforzamiento de columnas laterales, la incorporación de perfiles



de acero de alta resistencia y el uso de materiales híbridos, como combinaciones de aluminio con compuestos de fibra, de acuerdo con Friedrich et al. (2025) y Shobha et al. (2023).

Métodos para optimizar la energía disipada

Uno de los aspectos más relevantes abordados en los estudios revisados fue la búsqueda de estrategias para optimizar la cantidad de energía que puede absorber o disipar la estructura del autobús durante un vuelco, con el propósito de minimizar el riesgo para los ocupantes; se identificaron tres enfoques principales.

a) Diseño geométrico optimizado (cinco estudios):

Los investigadores modificaron variables del diseño como la forma del techo, la ubicación del centro de gravedad, la distribución de masas o el ángulo de inclinación del bastidor; investigaciones de este tipo demostraron que reducir el centro de masa en diez centímetros disminuye de manera significativa la energía del impacto lateral y retrasa el colapso estructural; otros estudios rediseñaron zonas del techo para dirigir mejor las fuerzas durante el vuelco, favoreciendo deformaciones progresivas en lugar de fallas abruptas, conforme reporta Wang et al. (2018).

b) Uso de materiales con propiedades de absorción (cuatro estudios):

Se experimentó con aceros de alta resistencia (AHSS), aluminio espumado, aleaciones ligeras y materiales compuestos para mejorar la capacidad de disipación de energía sin incrementar excesivamente el peso del vehículo, tal como documentan Friedrich et al. (2025) y Aytimur (2025); algunos estudios compararon estructuras híbridas donde se reforzaban áreas críticas con materiales avanzados manteniendo acero convencional en zonas no estructurales, lo que permitió, en ciertos casos, incrementar la energía disipada hasta en un 25 % respecto a diseños tradicionales.

c) Refuerzos estructurales estratégicos (tres estudios):

Otra estrategia recurrente consistió en colocar refuerzos internos en nodos clave, como las uniones entre columnas y vigas o en los marcos de ventanas; estos refuerzos actuaban como zonas de sacrificio, deformándose de manera controlada para absorber la energía del impacto; en particular, se destacó la importancia de reforzar el lado opuesto al punto de contacto con el suelo, pues estas áreas reciben tensiones por flexión y torsión que no se evidencian a simple vista, según precisan Zanichelli et al. (2021) y Shobha et al. (2023).

Cabe señalar que dos de los estudios emplearon técnicas de optimización computacional, como algoritmos genéticos y análisis factoriales, para automatizar la búsqueda de las mejores configuraciones estructurales, lo que representa un avance hacia la integración del diseño estructural con inteligencia artificial, de acuerdo con Jia et al. (2023).

Validación y confiabilidad de los modelos

Un elemento clave para evaluar la utilidad de los modelos de simulación fue su nivel de validación frente a datos reales; en esta revisión, seis de los ocho estudios realizaron una comparación entre sus resultados simulados y pruebas experimentales físicas, ya sea mediante ensayos de laboratorio a escala o pruebas de campo controladas con autobuses reales; los métodos de validación más comunes incluyeron la comparación de la deformación residual en el compartimento de pasajeros, la medición de la energía disipada total durante el evento de vuelco y el análisis de la cinemática del proceso, conforme reportan Wang et al. (2022) y Meng et al. (2019).

Los estudios reportaron una desviación media de entre el 5 % y el 12 % entre los resultados simulados y los valores experimentales; esta precisión se considera adecuada en dinámicas de impacto tan complejas, en especial cuando se trabaja con modelos explícitos y materiales no lineales como los que maneja LS-DYNA, según precisa Aytimur (2025); la fidelidad de los modelos se logró gracias a mallas de elementos finitos refinadas, leyes de material calibradas



experimentalmente y al uso de contactos no lineales precisos, de acuerdo con Zanichelli et al. (2021).

Aplicaciones específicas para optimización energética

Uno de los aportes más relevantes de los estudios revisados radica en que los modelos basados en LS-DYNA no solo permiten simular el comportamiento estructural durante un vuelco, sino que ofrecen herramientas concretas para optimizar la eficiencia energética del diseño estructural de autobuses; las aplicaciones más destacadas fueron las siguientes.

a) Diseño de zonas de deformación controlada:

Los modelos permitieron identificar con precisión dónde se concentran las mayores cargas durante un vuelco; esta información se utilizó para rediseñar componentes como el techo, los postes laterales o las esquinas superiores, de modo que se deformen de manera progresiva, absorbiendo más energía y reduciendo el daño a las zonas ocupadas, conforme señala Shobha et al. (2023); estas zonas de deformación actúan como disipadores pasivos que transforman energía cinética en deformación plástica estructurada.

b) Evaluación del uso de materiales energéticamente eficientes:

Algunos estudios utilizaron la simulación para comparar la contribución de distintos materiales a la disipación energética durante el impacto; en este sentido, se analizaron configuraciones donde la sustitución parcial de acero convencional por aceros de alta resistencia o materiales compuestos reducía el daño estructural hasta en un 30 %, sin penalizar el peso del vehículo, de acuerdo con Friedrich et al. (2025) y Aytimur (2025).

c) Optimización estructural para minimizar el rebote y la energía residual:

En ciertos escenarios, el autobús tiende a rebotar tras el primer impacto, generando movimientos secundarios que pueden comprometer aún más la estructura o poner en riesgo a los pasajeros; frente a ello, varios modelos implementaron estrategias de redistribución de masa, geometría de marcos y ajustes de rigidez que reducen esta energía residual, según documentan Liu et al. (2023) y Shiqi y Xuanneng (2025).

d) Integración de la simulación estructural con el diseño energético global del vehículo:

Si bien la mayoría de los estudios se centró en la resistencia al vuelco, algunos fueron más allá al proponer la integración de estos modelos estructurales con sistemas de simulación del tren motriz o del consumo energético del vehículo completo, de acuerdo con Wang et al. (2026); de este modo, se plantean configuraciones estructurales que no solo absorben mejor la energía en caso de accidente, sino que contribuyen a reducir el peso total y, en consecuencia, el consumo energético del sistema de propulsión.

DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión sistemática muestran una evolución significativa en la forma en que LS-DYNA ha sido utilizado para modelar escenarios de vuelco de autobuses, pasando de modelos centrados únicamente en la resistencia estructural a enfoques que consideran de manera explícita la gestión energética durante el impacto, según documentan Aytimur (2025) y Zanichelli et al. (2021); los primeros trabajos se enfocaban principalmente en verificar la supervivencia de la estructura bajo normas de seguridad como la ECE-R66, en tanto que los más recientes han comenzado a incorporar criterios de absorción energética, redistribución de cargas y comportamiento dinámico de la masa del vehículo; esta evolución ha ido de la mano con el desarrollo de técnicas de modelado más detalladas, incluyendo la definición precisa de juntas, soldaduras, zonas de contacto y propiedades no lineales de materiales, lo que permite una simulación más realista del flujo de energía durante el evento de vuelco, conforme establecen Friedrich et al. (2025) y Wang et al. (2018); asimismo, se observa una clara tendencia a la combinación de herramientas de modelado estructural con otros enfoques



analíticos, como algoritmos de optimización topológica o simulaciones multifísicas, lo que abre un camino hacia soluciones más integradas y eficientes.

En cuanto a la eficacia de las estrategias aplicadas, las de optimización estructural revisadas han demostrado ser pertinentes para mejorar la seguridad sin comprometer el rendimiento energético del sistema; en particular, la optimización de zonas de deformación progresiva y la selección de materiales con mejores propiedades de absorción de energía permitieron reducir los picos de aceleración transmitidos al habitáculo, al tiempo que mejoraban la eficiencia estructural, de acuerdo con Aytimur (2025) y Shobha et al. (2023); varios estudios recurrieron a herramientas de análisis iterativo, como algoritmos genéticos o métodos de sensibilidad, para ajustar variables clave del diseño estructural, tal como reporta Jia et al. (2023); estos enfoques permitieron identificar configuraciones que no solo cumplían con los estándares de seguridad, sino que también minimizaban la energía residual del impacto, lo cual resulta indispensable para evitar movimientos secundarios tras el vuelco, tales como rebotes, desplazamientos o colapsos tardíos; no obstante, la eficacia de estas estrategias está condicionada por el nivel de fidelidad del modelo LS-DYNA y por la disponibilidad de datos experimentales para validar los resultados, según señalan Wang et al. (2022) y Meng et al. (2019).

Los modelos evaluados no se limitan a cumplir con criterios de seguridad estructural, sino que han sido utilizados como herramientas proactivas para optimizar el diseño desde una perspectiva energética, conforme indican Wang et al. (2026) y Liu et al. (2023); entre las aplicaciones más representativas se identificaron configuraciones estructurales que absorben hasta un 40 % más de energía cinética en comparación con diseños tradicionales, al integrar zonas de deformación programada, así como el uso de materiales híbridos o compuestos ligeros que reducen el peso total del autobús sin comprometer la resistencia al vuelco, mejorando la eficiencia global del vehículo en operación, de acuerdo con Friedrich et al. (2025); otros modelos se utilizaron para definir estrategias de diseño modular que facilitan la reparación posaccidente, lo que puede reducir de manera significativa la huella energética asociada al mantenimiento o al reemplazo completo de estructuras dañadas, según precisa Zanichelli et al. (2021); estas aplicaciones reflejan cómo LS-DYNA puede ser parte de un enfoque de diseño sostenible y basado en simulación, en el que cada componente estructural es evaluado tanto por su función de seguridad como por su contribución al rendimiento energético del sistema, tal como sostienen Shiqi y Xuanneng (2025) y Wang et al. (2026).

Los resultados anteriores tienen implicaciones relevantes para el proceso de diseño de autobuses; la inclusión de criterios de absorción energética desde las etapas iniciales del diseño estructural permite obtener soluciones más eficientes y seguras, conforme señala Aytimur (2025); la combinación de materiales de alta resistencia con zonas de deformación estratégicamente ubicadas se perfila como una vía clave para la doble meta de seguridad y eficiencia, de acuerdo con Friedrich et al. (2025) y Zanichelli et al. (2021); asimismo, LS-DYNA demuestra ser no solo una herramienta de validación, sino un instrumento central para explorar soluciones innovadoras y adaptativas ante diferentes escenarios de impacto, según reportan Wang et al. (2018) y Meng et al. (2019).

Pese a los avances identificados, esta revisión revela también limitaciones que es necesario señalar; el número reducido de estudios con validación experimental limita la generalización de los resultados; la mayoría de los modelos aún se centra en condiciones de vuelco estándar y no considera la variabilidad en condiciones de carga, distribución de masa o presencia de pasajeros; se identificó, por otra parte, una carencia de modelos que integren parámetros de ciclo de vida energético del vehículo completo, conforme advierten Liu et al. (2023) y Jia et al. (2023); a partir de estas limitaciones, se sugieren como líneas futuras de investigación el desarrollo de modelos híbridos acoplados con otros entornos de simulación para evaluar el impacto estructural dentro del sistema de propulsión total, según propone Wang et al. (2026); la integración con gemelos digitales, orientada a permitir la adaptación dinámica del diseño a datos en tiempo real, de acuerdo con Shobha et al. (2023); estudios multivariados que incluyan efectos estocásticos y variabilidad en condiciones de operación mediante análisis de Montecarlo u optimización robusta, conforme plantean Shiqi y Xuanneng (2025) y Wang et al. (2022); y el desarrollo de bases de datos estructurales y energéticas que permitan calibrar



modelos LS-DYNA con mayor precisión, tal como recomiendan Friedrich et al. (2025) y Aytimur (2025).

CONCLUSION

En síntesis, la evidencia analizada confirma que la simulación mediante ANSYS LS-DYNA constituye una herramienta eficaz para optimizar la disipación energética en vuelcos de autobuses, permitiendo identificar y perfeccionar configuraciones estructurales que incrementan la absorción de energía y reducen el daño al habitáculo; en particular, la combinación de diseño geométrico optimizado, materiales avanzados y refuerzos estratégicos demuestra ser la vía más consistente para mejorar la seguridad pasiva, cumpliendo así el objetivo de la investigación al evidenciar que la gestión energética del impacto puede abordarse de manera precisa, predictiva y orientada al diseño desde entornos virtuales validados experimentalmente.

FINANCIAMIENTO

No monetario

CONFLICTO DE INTERÉS

No existe conflicto de interés con personas o instituciones ligadas a la investigación.

AGRADECIMIENTOS

A UNIANDES.

REFERENCIAS

- Aytimur, E. E. (2025). Crashworthiness simulations with LS-DYNA: Investigating the effect of strain rate-dependent material models. *Procedia Structural Integrity*, 68, 540–546. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.06.094>
- Friedrich, L. F., Puglia, V. B., Colpo, A. B., Pinto, A. V. G., Iturrioz, I., & Madenci, E. (2025). Implementation of bond-based peridynamics in ANSYS LS-DYNA for brittle and quasi-brittle material failure analysis. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/15376494.2025.2490816>
- Jia, J., Wu, Y., Zhao, D., Li, B., & Wang, D. (2023). Prediction of the penetration radius of cumulative blasting. *ACS Omega*, 8(24), 22159–22167. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02453>
- Liu, Z., Li, H., & Li, L. (2023). Anti-explosion performance analysis of marine interdiction system based on ALE method. *Heliyon*, 9(3), e13873. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13873>
- Meng, Y., Wei, J., Wei, J., Chen, H., & Cui, Y. (2019). An ANSYS/LS-DYNA simulation and experimental study of circular saw blade cutting system of mulberry cutting machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.034>
- Shiqi, F., & Xuanneng, G. (2025). Equivalent method for calculating internal blast loads in cylindrical lattice shell structure. *Scientific Reports*, 15(1), 27656. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13066-4>
- Shobha, E. S., Raghuv eer, H. P., Nagesh, S., Nainoor, N., Shaju, N., & Punyakoti, N. S. (2023). Stress propagation in the craniofacial skeleton on frontal impact: A virtual simulation study. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 22(4), 1027–1033. <https://doi.org/10.1007/s12663-023-01979-4>
- Wang, S., Yang, J., Lu, R., Feng, Y., Wang, D., & Zhang, Q. (2026). Analysis of the impact of vertical deep hole blasting at the bottom of the hole on the lower ore body based on LS-DYNA numerical simulation. *Scientific Reports*, 16(1), 6395. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-35872-0>



Wang, Y.-N., Zhao-gang, Z., Yi-zhen, L., & Ming-ang, Y. (2018). Dynamic analysis of shaft structure based on ANSYS/LS-DYNA. *MATEC Web of Conferences*, 179, 01019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817901019>

Wang, Z., Zeng, Q., Wan, L., Lu, Z., & Zhou, J. (2022). Investigation of fragment separation during a circular saw blade cutting rock based on ANSYS/LS-DYNA. *Scientific Reports*, 12(1), 17346. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22267-0>

Zanichelli, A., Colpo, A., Friedrich, L., Iturrioz, I., Carpinteri, A., & Vantadori, S. (2021). A novel implementation of the LDEM in the ANSYS LS-DYNA finite element code. *Materials*, 14(24), 7792. <https://doi.org/10.3390/ma14247792>

Derechos de autor: 2026 Por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>