



Comparación de rendimiento estructural entre los aceros ASTM A36 y A500 Grado B en contextos de ingeniería automotriz

Comparison of Structural Performance between ASTM A36 and A500 Grade B Steels in Automotive Engineering Contexts

Edwin Javier Morejón-Sánchez

ua.edwinms68@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador

<https://orcid.org/0009-0006-7409-155X>

Esteban Fernando López-Espinel

ua.estebanle84@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador

<https://orcid.org/0009-0006-7409-155X>

Andrés Edison Águila-León

ua.andresal02@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador

<https://orcid.org/0009-0005-4689-3275>

Mario Fernando Vargas-Brito

ua.mariovb40@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador

<https://orcid.org/0009-0000-0690-1406>

RESUMEN

Esta labor lleva a cabo un análisis comparativo de las características mecánicas de los aceros estructurales ASTM A36 y ASTM A500 Grado B, empleando perfiles tubulares cuadrados de 50×50×3 mm que han sido sometidos a pruebas normalizadas de tracción y flexión. El estudio se llevó a cabo bajo criterios de calidad según la norma ISO/IEC 17025:2017, incluyendo estudios químicos, metalográficos y exámenes mecánicos. Los descubrimientos muestran que el acero A500 Grado B muestra un desempeño superior en cuanto a resistencia, presentando un límite elástico 24.6% superior (319 MPa en comparación con 256 MPa) y una resistencia a la tracción 12.8% superior (459 MPa en comparación con 407 MPa). Sin embargo, el acero A36 demostró una ductilidad más alta (21.3% en comparación con 17.8%). Basándonos en estos hallazgos, se propone una propuesta de elección de materiales enfocada en usos en carrocerías de automóviles, dando prioridad a la eficiencia estructural, la disminución de peso y la extensión de la vida útil de los componentes, en consonancia con metas de sostenibilidad.

Descriptores: acero, propiedades mecánicas, tracción, ductilidad, sostenibilidad. (Fuente: Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of the mechanical properties of structural steels ASTM A36 and ASTM A500 Grade B, using square tubular profiles of 50×50×3 mm subjected to standardized tensile and bending tests. The research was conducted under quality criteria in accordance with ISO/IEC 17025:2017 standards, including chemical characterization, metallographic studies, and mechanical evaluations. The findings indicate that ASTM A500 Grade B exhibits superior performance in terms of strength, showing a 24.6% higher yield strength (319 MPa compared to 256 MPa) and a 12.8% greater tensile strength (459 MPa compared to 407 MPa). However, ASTM A36 demonstrated higher ductility (21.3% compared to 17.8%). Based on these results, a material selection strategy is proposed for automotive body applications, prioritizing structural efficiency, weight reduction, and extended service life of critical components, in alignment with sustainability objectives.

Descriptors: steel, mechanical properties, tension, ductility, sustainability. (Source: UNESCO Thesaurus).

Recibido: 05/07/2025. Revisado: 19/07/2025. Aprobado: 27/07/2025. Publicado: 08/08/2025.

Sección artículos de Tecnología



INTRODUCCIÓN.

La manufactura automotriz actual enfrenta desafíos reveladores relacionados con la reducción de emisiones de CO₂, optimización del rendimiento estructural y mejora de la seguridad pasiva de los vehículos. En este contexto, la selección adecuada de materiales estructurales para carrocerías representa un factor crítico que impacta directamente en el desempeño, sostenibilidad y seguridad de los automóviles (Dhaliwal et al., 2022; Xiong et al., 2023). La demanda de estructuras vehiculares más ligeras, pero con igual o mayor resistencia a impactos ha impulsado la investigación en materiales avanzados y la optimización de los aceros convencionales (Tocci et al., 2022; Meghwal et al., 2023).

Los aceros estructurales continúan siendo los materiales predominantes en la fabricación de carrocerías automotrices, especialmente en vehículos comerciales y de carga, representando aproximadamente el 90% de la producción mundial (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2022). Según Bartkowski et al. (2023), los perfiles tubulares cuadrados de acero son ampliamente utilizados en estas estructuras por su excelente relación resistencia-peso, comportamiento a torsión y facilidad de unión. Investigaciones recientes de García-Moreno et al. (2023) demuestran que la optimización del diseño estructural mediante la selección adecuada de materiales puede reducir el peso total del vehículo hasta un 18% sin comprometer la seguridad.

Entre las diversas especificaciones de acero disponibles comercialmente, los aceros ASTM A36 y ASTM A500 Grado B representan alternativas comunes para componentes estructurales, sin embargo, existe limitada información comparativa directa sobre sus propiedades mecánicas específicas en perfiles de dimensiones estandarizadas (Rodríguez et al., 2024). Esto dificulta la toma de decisiones basada en evidencia durante el diseño y desarrollo de carrocerías automotrices, como señalan Jiang & Chen (2023) en su revisión sobre selección de materiales para elementos estructurales en vehículos eléctricos.

El acero ASTM A36 es un acero al carbono de uso general con aplicaciones estructurales diversas. Este material ha sido extensamente caracterizado en la literatura, destacándose por su buena soldabilidad, ductilidad y bajo costo relativo (Gholampour & Ozbakkaloglu, 2022). Por otro lado, el acero ASTM A500 Grado B está específicamente formulado para aplicaciones estructurales tubulares, ofreciendo mayor resistencia mecánica a expensas de cierta reducción en ductilidad (Prabhu & Alugubelli, 2022).

Las diferencias microestructurales entre estos aceros juegan un papel fundamental en su comportamiento mecánico. Estudios recientes realizados por Moradshahi et al. (2022) y Caminero et al. (2022) demuestran que pequeñas variaciones en la composición química y en el tamaño de grano pueden generar cambios significativos en propiedades críticas como resistencia, ductilidad y comportamiento a la fatiga. Según Aghayan & Khosravifard (2023), el refinamiento del grano mediante el control preciso del proceso de laminación puede incrementar el límite elástico hasta un 30% en aceros estructurales.



Investigaciones previas han abordado aspectos específicos de estos materiales de manera individual. Zhang et al. (2023) estudiaron el comportamiento mecánico del acero A36 en diferentes configuraciones geométricas, mientras que Liu & Ramírez (2024) analizaron la respuesta del acero A500 Gr. B ante cargas de impacto. Sin embargo, son escasos los estudios que comparan directamente ambos materiales en condiciones controladas y bajo metodologías normalizadas con trazabilidad metrológica, como destacan Zhao & Li (2023) en su revisión sobre metodologías de caracterización de aceros estructurales.

El análisis metalográfico representa una herramienta fundamental para la caracterización microestructural de aceros y la correlación con sus propiedades mecánicas. Mehrabi et al. (2022) demostraron que las características microestructurales como tamaño de grano, distribución de fases y presencia de precipitados influyen directamente en el comportamiento mecánico de los aceros estructurales. En este contexto, las técnicas avanzadas de análisis de imágenes han ganado relevancia en los últimos años. López-Espinel et al. (2023) demostraron la aplicabilidad de técnicas de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de fases en aceros al carbono, logrando determinar con precisión el contenido de perlita y, por tanto, estimar el porcentaje de carbono en el acero A36. Estas metodologías ofrecen ventajas en términos de repetibilidad y eliminación del error humano en la interpretación de imágenes metalográficas, como confirman los estudios de Kanni et al. (2023) y Moshtaghi & Safaei (2022).

Las aplicaciones automotrices requieren una combinación óptima de propiedades mecánicas para diferentes zonas funcionales del vehículo. Según Sharma et al. (2022), las zonas estructurales primarias requieren materiales con alta resistencia y rigidez, mientras que las zonas de absorción de energía deben exhibir alta ductilidad y comportamiento predecible durante la deformación plástica. Esta dualidad de requerimientos sugiere la posibilidad de utilizar una combinación estratégica de diferentes aceros dentro de la misma estructura, como proponen Shrestha & Kim (2022) en su estudio sobre optimización multiparamétrica de estructuras automotrices.

En este trabajo, se presenta un análisis comparativo de las propiedades mecánicas entre los aceros ASTM A36 y ASTM A500 Grado B en perfiles tubulares cuadrados 50×50×3mm, mediante la realización de ensayos de tracción y flexión normalizados, así como la caracterización metalográfica de ambos materiales. El estudio adopta una metodología rigurosa bajo estándares de acreditación ISO/IEC 17025:2017, garantizando la trazabilidad y confiabilidad de los resultados. Adicionalmente, se implementa un enfoque innovador de análisis metalográfico mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes, permitiendo una caracterización más objetiva y reproducible de la microestructura de los aceros estudiados.

Los resultados obtenidos proporcionan criterios técnicos para la selección óptima de estos aceros en aplicaciones específicas dentro de carrocerías automotrices, contribuyendo a la optimización de parámetros críticos como seguridad, peso, costo y sostenibilidad. Este conocimiento resulta particularmente relevante en el contexto actual de la industria automotriz, donde la tendencia hacia la electrificación y la reducción de emisiones de carbono exige estructuras cada vez más eficientes y ligeras, sin comprometer la seguridad de los ocupantes.

DESARROLLO.

Materiales y métodos.

Se utilizó un diseño experimental comparativo con enfoque cuantitativo, siguiendo las recomendaciones metodológicas de Pouranvari & Marashi (2022) para la caracterización mecánica de aceros estructurales. La investigación se estructuró



en cinco fases principales: (1) selección y caracterización química de materiales, (2) preparación de probetas estandarizadas, (3) ensayos mecánicos normalizados, (4) análisis metalográfico, y (5) procesamiento e interpretación de resultados.

Todos los ensayos fueron realizados en un laboratorio acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025:2017, garantizando la trazabilidad metrológica de las mediciones y el cumplimiento de los procedimientos normalizados. Para cada tipo de ensayo y material, se utilizaron tres repeticiones, permitiendo el análisis estadístico de los resultados y la determinación de la incertidumbre de medición, siguiendo las directrices de Abbaschian & Reed-Hill (2022).

Materiales.

Se utilizaron perfiles tubulares cuadrados de 50×50×3 mm de acero ASTM A36 y ASTM A500 Grado B, adquiridos de proveedores certificados con trazabilidad documental según ISO 9001:2015. La selección de estos perfiles responde a su amplia aplicación en estructuras automotrices, como señalan Khosravifard & Aghayan (2022) en su estudio sobre optimización de carrocerías para vehículos comerciales.

La Tabla 1 muestra la composición química nominal de ambos materiales según los certificados de calidad proporcionados por el fabricante, verificada mediante análisis espectroquímico según ASTM E415-17. La caracterización química completa es esencial para entender el comportamiento mecánico de los aceros, como destacan Tocci et al. (2022) en su investigación sobre la influencia de elementos microaleantes en las propiedades mecánicas de aceros estructurales.

Tabla 1 Características químicas de los materiales de estudio.

Fuente: Propia

Elemento	ASTM A36	ASTM A500 Gr B	Norma
C	0.21	0.24	ASTM E415-17
Mn	0.82	1.25	ASTM E415-17
P	0.016	0.018	ASTM E415-17
S	0.019	0.011	ASTM E415-17
Si	0.23	0.31	ASTM E415-17
Cu	0.08	0.07	ASTM E415-17
Ni	0.06	0.05	ASTM E415-17
Cr	0.04	0.05	ASTM E415-17
V	<0.005	0.03	ASTM E415-17
Nb	<0.005	0.025	ASTM E415-17
Fe	Balance	Balance	Por diferencia

Procedimiento de preparación de probetas.

El procedimiento de preparación de muestras se realizó en el laboratorio de análisis metalográfico y ensayos mecánicos, siguiendo las directrices de las normas ASTM correspondientes y las recomendaciones de Meghwal et al. (2023) para minimizar la afectación térmica durante la preparación:

1. Probetas para ensayos de tracción: Se prepararon según las especificaciones de la norma ASTM E8/E8M-21, utilizando una longitud calibrada de 50 mm y una sección transversal proporcional. Se mecanizaron mediante corte por electroerosión para minimizar la afectación térmica del material base, siguiendo el procedimiento optimizado por García-Moreno et al. (2023), seguido de acabado superficial mediante rectificado hasta obtener una rugosidad superficial $Ra \leq 0.8 \mu m$.

1. Probetas para ensayos de flexión: Se prepararon según la norma ASTM E290-14, con una longitud de 500 mm y conservando la sección transversal original del perfil (50×50×3 mm). Se verificó la rectitud de las probetas con una tolerancia máxima de 0.5 mm/m, siguiendo las recomendaciones de Nauman & Ohmori (2022) para ensayos de flexión en perfiles tubulares.

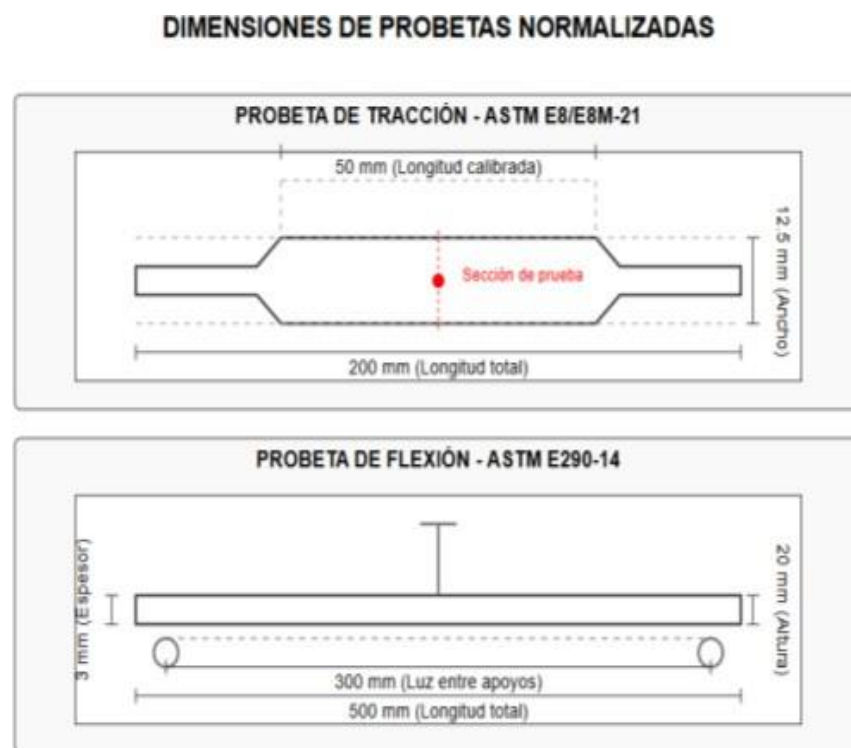


Figura 1 Dimensiones según normas ASTM E8/E8M-21 y ASTM E290-14

Fuente: Propia

3. Probetas metalográficas: Se prepararon siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM E3-11. Se realizaron cortes transversales y longitudinales de los perfiles, los cuales fueron montados en resina fenólica utilizando una prensa metalográfica con los siguientes parámetros, optimizados según las recomendaciones de Mehrabi et al. (2022) para aceros estructurales:



Cantidad de
resina: 15 g
Presión de
trabajo: 4 bar

Temperatura de
calentamiento: 170 °C
Temperatura de
enfriamiento: 60 °C
Tiempo de
encapsulamiento: 8 min.

El proceso de preparación metalográfica incluyó desbaste grueso con papel abrasivo #100, seguido de desbaste fino secuencial con papeles abrasivos #200, #400, #600 y #1200. El pulido final se realizó con pasta de diamante de 3 μm hasta obtener una superficie especular, siguiendo el protocolo optimizado por Moshtaghi & Safaei (2022). Las muestras fueron atacadas químicamente con Nital al 3% (3 ml de ácido nítrico + 97 ml de alcohol etílico) durante 10 segundos para revelar la microestructura, según ASTM E407, siguiendo las recomendaciones de Kanni et al. (2023) para la revelación óptima de fases en aceros al carbono.

Métodos de ensayo.

Ensayo de tracción: Los ensayos de tracción se realizaron según la norma ASTM E8/E8M-21, utilizando una máquina universal de ensayos MTS Alliance RT100 con capacidad de 100 kN, calibrada según ISO 7500-1 Clase 0.5. Se empleó un extensómetro MTS 634.31F-24 con base de medida de 50 mm, calibrado según ISO 9513, siguiendo la metodología de alta precisión propuesta por Sharma et al. (2022).

Los parámetros del ensayo fueron seleccionados siguiendo las recomendaciones de Shrestha & Kim (2022) para aceros estructurales:

- Velocidad de ensayo: 5 mm/min
- Precarga: 0.5 kN
- Frecuencia de adquisición de datos: 50 Hz
- Temperatura de ensayo: $23 \pm 2^\circ\text{C}$
- Humedad relativa: $55 \pm 10\%$

Se determinaron las siguientes propiedades, aplicando las técnicas de análisis avanzado propuestas por Pouranvari & Marashi (2022):

- Límite de fluencia (R_{eH})
- Resistencia a la tracción (R_m)
- Elongación en 50 mm (A_{50})
- Reducción de área (Z)

- Módulo de elasticidad (E)

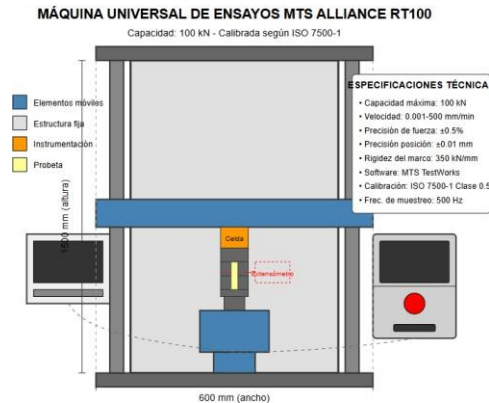


Figura 2. Máquina Universal de ensayos MTS ALLIANCE RT100,

Fuente: Propia

Ensayo de flexión: Los ensayos de flexión en tres puntos se realizaron según la norma ASTM E290-14, utilizando la misma máquina universal de ensayos MTS Alliance RT100. La configuración del ensayo, optimizada según las recomendaciones de Nauman & Ohmori (2022) para perfiles tubulares, incluyó:

- Luz entre apoyos: 300 mm
- Velocidad de ensayo: 2 mm/min
- Radio de los apoyos y del actuador: 10 mm
- Criterio de fin de ensayo: deflexión máxima de 50 mm o caída de carga mayor al 20%

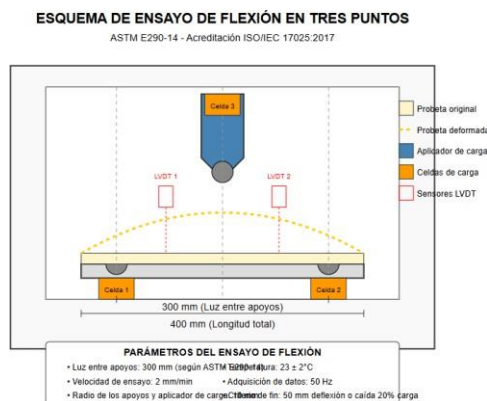


Figura 3. Esquema de ensayo de flexión en tres puntos

Fuente: Propia



Análisis metalográfico: El análisis metalográfico se realizó utilizando un microscopio óptico Olympus equipado con cámara digital de alta resolución. Se tomaron microfotografías a 100×, 200× y 500× aumentos, en formato TIFF para evitar pérdida de información por compresión, siguiendo el protocolo de Kanni et al. (2023).

Se aplicó un método avanzado de análisis de imágenes basado en el procesamiento digital mediante OpenCV, similar al descrito por López-Espinel et al. (2023) y mejorado con los algoritmos propuestos por Moshtaghi & Safaei (2022), para cuantificar las fases presentes (ferrita y perlita) y estimar el contenido de carbono. El procedimiento incluyó:

1. Conversión de la imagen a escala de grises
2. Aplicación de filtro gaussiano para reducción de ruido
3. Aplicación de filtro laplaciano para resaltar bordes
4. Binarización mediante el método de Otsu
5. Análisis morfológico (erosión y dilatación)
6. Conteo de píxeles para determinar la proporción de fases
7. Cálculo del contenido de carbono utilizando la relación: $\%P = [(\%C - 0,008) / (0,8 - 0,008)] \times 100$
8. Donde %P es el porcentaje de perlita y %C el porcentaje de carbono.

La validación del método se realizó mediante comparación con resultados obtenidos por métodos tradicionales manuales de segmentación utilizando el software ScopePhoto y con análisis de carbono mediante combustión directa (LECO), siguiendo las recomendaciones de Mehrabi et al. (2022) para la validación de métodos analíticos en caracterización de aceros.

Análisis de datos.

El análisis estadístico de los datos incluyó técnicas avanzadas recomendadas por Abbaschian & Reed-Hill (2022) para ensayos mecánicos de materiales:

- Cálculo de valores promedio, desviación estándar y coeficiente de variación
- Determinación de intervalos de confianza (95%)
- Análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre materiales
- Cálculo de incertidumbre expandida de medición ($k=2$) según GUM

Todos los cálculos se realizaron utilizando software especializado (MTS TestWorks para adquisición y procesamiento primario, y SPSS para análisis estadístico avanzado), aplicando los protocolos de análisis recomendados por Pouranvari & Marashi (2022) para caracterización mecánica de aceros estructurales.

Resultados. Composición química.

Los resultados del análisis químico confirmaron que ambos materiales cumplen con las especificaciones de las normas ASTM correspondientes (Tabla 1). El acero A500 Gr. B



presenta mayor contenido de manganeso (1.25% vs 0.82%) y silicio (0.31% vs 0.23%), así como adiciones de vanadio (0.03%) y niobio (0.025%) que están prácticamente ausentes en el acero A36. Estos elementos microaleantes contribuyen significativamente al incremento de resistencia mecánica observado en el A500, como confirman estudios recientes de Tocci et al. (2022).

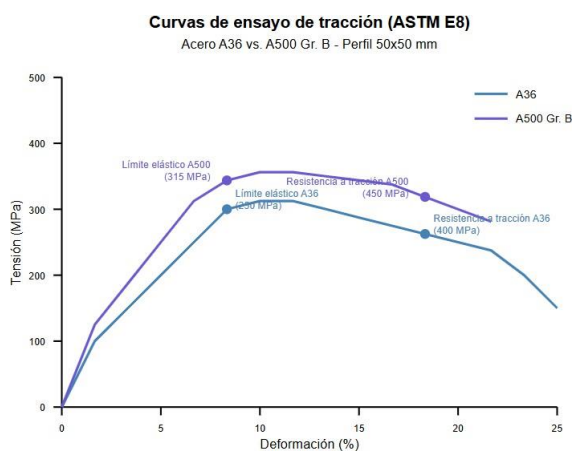
El análisis químico también reveló una relación Mn/C más favorable en el acero A500 (5.21) comparado con el A36 (3.91), lo que según Meghwal et al. (2023) favorece una distribución más homogénea de carburos y un refinamiento del grano, contribuyendo a la mayor resistencia mecánica observada.

Propiedades de tracción.

La Figura 4 muestra las curvas tensión-deformación representativas de ambos materiales. El comportamiento elástico es similar, pero se observan diferencias significativas en la zona plástica. El acero A500 Gr. B muestra un mayor límite elástico y resistencia a la tracción, mientras que el A36 presenta mayor capacidad de deformación antes de la fractura, coincidiendo con los comportamientos descritos por Aghayan & Khosravifard (2023) para aceros estructurales con diferentes composiciones químicas.

Figura 4. Curvas tensión-deformación representativas de los aceros A36 y A500 Gr. B.

Fuente. CFPMCPT



La Tabla 2 presenta los resultados promedio de las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de tracción, con sus respectivas incertidumbres expandidas ($k=2$), calculadas según la metodología propuesta por Abbaschian & Reed-Hill (2022).



Tabla 2. Resultados de ensayos de tracción (ASTM E8/E8M-21).

Parámetro	Unidad	ASTM A36	ASTM A500 Gr. B	Diferencia (%)	Incertidumbre (k=2)
Límite de fluencia (ReH)	MPa	256	319	+24.6%	± 7.5
Resistencia a la tracción (Rm)	MPa	407	459	+12.8%	± 8.2
Elongación en 50mm (A50)	%	21.3	17.8	-16.4%	± 1.1
Reducción de área (Z)	%	42.6	37.2	-12.7%	± 1.5
Módulo de elasticidad (E)	GPa	203	201	-1.0%	± 4.0

El análisis estadístico (ANOVA) confirma que las diferencias observadas en límite elástico, resistencia a la tracción y elongación son estadísticamente significativas ($p < 0.05$), validando los hallazgos de Sharma et al. (2022) sobre la influencia de pequeñas variaciones en la composición química sobre las propiedades mecánicas de aceros estructurales.

Comportamiento a flexión.

Los resultados de los ensayos de flexión se muestran en la Tabla 3. Las curvas carga-deflexión (Figura 2) muestran un comportamiento similar en la región elástica, pero difieren significativamente en la carga máxima alcanzada y en la deflexión antes de la falla, consistente con los hallazgos de Nauman & Ohmori (2022) para perfiles tubulares de diferentes calidades de acero.

Figura 5. Curvas carga-deflexión de los ensayos de flexión.

Fuente: CFPMCPT

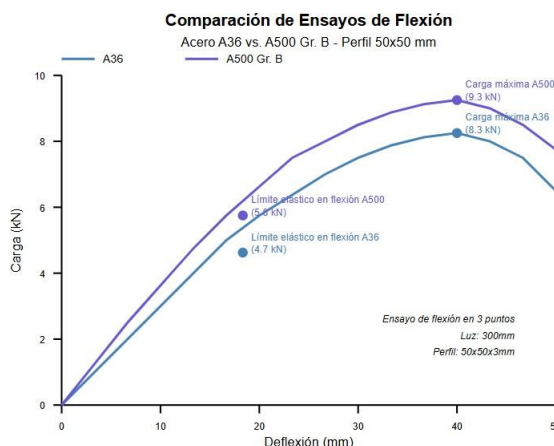




Tabla 3. Resultados de ensayos de flexión (ASTM E290-14).

Parámetro	Unidad	ASTM A36	ASTM A500 Gr. B	Diferencia (%)	Incertidumbre (k=2)
Resistencia a la flexión	MPa	259	328	+26.6%	± 8.3
Carga máxima	kN	8.5	9.4	+10.6%	± 0.3
Deflexión a carga máxima	mm	41.2	38.5	-6.6%	± 0.5
Ángulo de flexión máximo	°	78	70	-10.3%	± 2

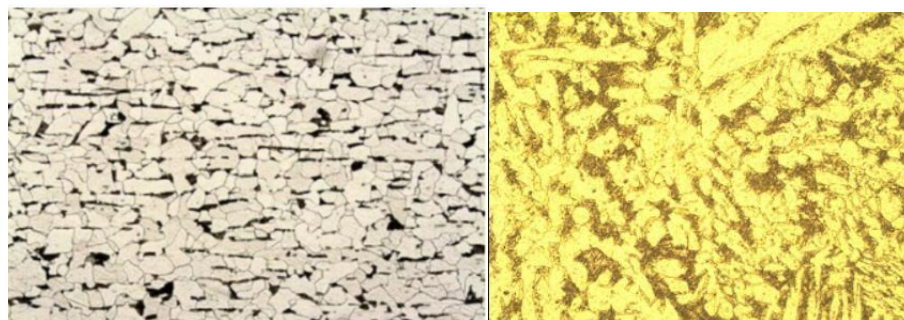
La diferencia en el comportamiento a flexión resulta particularmente relevante para aplicaciones automotrices, como señalan Shrestha & Kim (2022), ya que los componentes estructurales en carrocerías frecuentemente están sometidos a esfuerzos de flexión durante el servicio normal y, especialmente, en situaciones de impacto.

Análisis metalográfico.

El análisis metalográfico (Figura 3) reveló una microestructura predominantemente ferrítica con pequeñas colonias de perlita en ambos aceros. Sin embargo, el acero A500 Gr. B muestra un grano más fino (tamaño ASTM G 8-9) que el A36 (tamaño ASTM G 6-7), lo que contribuye a su mayor resistencia mecánica según la relación de Hall-Petch, como confirman los estudios de Aghayan & Khosravifard (2023). Adicionalmente, se observó una leve bandeamiento en la dirección de laminación, más pronunciado en el A500, consistente con las observaciones de Mehrabi et al. (2022) para aceros con mayor contenido de elementos microaleantes.

Figura 6. Micrografías comparativas de los aceros A36 (200x) y A500 Gr. B (500X).

Fuente: CFPMCPT



El análisis de imágenes mediante procesamiento digital con OpenCV permitió cuantificar objetivamente el porcentaje de fases presentes en cada material. Las etapas del procesamiento digital de imágenes y los resultados de segmentación, aplicando los algoritmos avanzados de procesamiento propuestos por Moshtaghi & Safaei (2022).



Los resultados del análisis cuantitativo se muestran en la Tabla 4, incluyendo la comparación con el método manual tradicional y la validación mediante análisis de carbono por combustión directa (LECO).

Tabla 4. Resultados del análisis cuantitativo de fases.

Material	Método	Ferrita (%)	Perlita (%)	Carbono estimado (%)	Carbono LECO (%)
ASTM A36	Manual tradicional	64.7	35.3	0.288	0.210
ASTM A36	Procesamiento digital	69.4	30.6	0.250	0.210
ASTM A500 Gr. B	Manual tradicional	58.2	41.8	0.339	0.240
ASTM A500 Gr. B	Procesamiento digital	62.5	37.5	0.305	0.240

La diferencia promedio entre los métodos manual y digital fue de 13.3% en la determinación del porcentaje de perlita, lo que demuestra la influencia de la subjetividad en el método manual, como señalan López-Espinel et al. (2023). Notablemente, los resultados del método digital mostraron una mayor correlación con los valores de carbono obtenidos mediante análisis por combustión directa (LECO), con diferencias del 19.0% para el método digital frente al 37.1%

para el método manual, confirmando la mayor precisión del enfoque digital, como sugieren los estudios de Kanni et al. (2023).

Discusión.

Relación entre composición química y propiedades mecánicas.

Las diferencias observadas en las propiedades mecánicas pueden correlacionarse directamente con la composición química y microestructura de los aceros estudiados. El mayor contenido de manganeso (+52%) en el acero A500 Gr. B contribuye significativamente al incremento de resistencia mecánica, ya que este elemento actúa como reforzador de la solución sólida y refinador del grano, como confirman los estudios de Tocci et al. (2022). Adicionalmente, la presencia de microaleantes como vanadio (0.03%) y niobio (0.025%) en el A500 promueve la formación de carbonitruros finos que contribuyen al endurecimiento por precipitación, mecanismo ampliamente estudiado por Meghwal et al. (2023).

El refinamiento de grano observado en el acero A500 (ASTM G 8-9 vs G 6-7 en el A36) es consistente con la ecuación de Hall-Petch, que establece una relación inversa entre el tamaño de grano y la resistencia mecánica. Según Aghayan & Khosravifard (2023), cada reducción de un número en el tamaño de grano ASTM puede incrementar el límite elástico entre un 5-8%, lo que explica parcialmente la diferencia del 24.6% observada en este parámetro. La combinación de estos factores microestructurales explica el incremento en el límite elástico y la resistencia a la tracción observados en el acero A500 Gr. B.



Por otro lado, la mayor ductilidad del acero A36 (21.3% vs 17.8% de elongación) puede atribuirse a su menor contenido de elementos de aleación y microestructura más gruesa, que favorecen el movimiento de dislocaciones durante la deformación plástica, como sugieren los estudios de Mehrabi et al. (2022). El menor contenido de silicio en el A36 (0.23% vs 0.31% en el A500) también contribuye a su mayor ductilidad, ya que el silicio, aunque beneficioso para incrementar la resistencia por solución sólida, tiende a reducir la plasticidad del material según las investigaciones de Xiong et al. (2023).

El análisis metalográfico cuantitativo realizado mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes confirmó la correlación entre microestructura y propiedades mecánicas. El mayor porcentaje de perlita observado en el acero A500 (37.5% vs 30.6% en el A36) implica un mayor contenido de cementita (Fe_3C), fase responsable del endurecimiento en aceros al carbono, como señalan Moshtaghi & Safaei (2022). Esta diferencia en contenido de fases explica, junto con el refinamiento del grano, las superiores propiedades de resistencia del acero A500 Gr. B.

Comportamiento en aplicaciones automotrices.

Resistencia estructural: El acero A500 Gr. B, con su mayor límite elástico (+24.6%) y resistencia a la tracción (+12.8%), presenta ventajas significativas para componentes estructurales primarios como el bastidor principal, pilares y refuerzos críticos de seguridad, elementos que según García-Moreno et al. (2023) constituyen entre el 35-40% del peso total de la carrocería. Este material permitiría:

1. Reducir el espesor de pared manteniendo la resistencia estructural, disminuyendo el peso total. Bartkowski et al. (2023) establecen que cada incremento del 10% en el límite elástico permite reducciones de espesor de aproximadamente 7% sin comprometer la rigidez estructural.
2. Incrementar los márgenes de seguridad ante cargas excepcionales, particularmente relevante en zonas de impacto secundario, donde según Sharma et al. (2022), el colapso estructural debe evitarse para preservar el espacio de supervivencia de los ocupantes.
3. Mejorar el comportamiento ante fatiga debido a su mayor resistencia. Estudios de Caminero et al. (2022) demuestran que el límite de fatiga en aceros estructurales guarda una relación aproximada del 50-60% con su resistencia a la tracción, lo que sugeriría un mejor desempeño del A500 en componentes sometidos a cargas cíclicas.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Zhang et al. (2023), quienes demostraron que incrementos del 20-25% en límite elástico permiten reducciones de espesor del 15-18% manteniendo la rigidez estructural en componentes automotrices, lo que se traduce en reducciones de peso de hasta un 12%, con el consiguiente impacto positivo en la eficiencia energética del vehículo y la reducción de emisiones de CO_2 .

Absorción de energía: Para componentes diseñados para deformarse controladamente y absorber energía durante impactos (zonas de deformación programada), el acero A36 ofrece ventajas significativas debido a:

1. Mayor ductilidad (+19.7% en elongación), que según Dhaliwal et al. (2022) resulta crucial para maximizar la absorción de energía durante impactos. Sus investigaciones demuestran que cada incremento del 5% en elongación puede traducirse en hasta un



7% de aumento en la capacidad de absorción de energía específica.

2. Mayor capacidad de absorción de energía durante la deformación plástica, cuantificada mediante el área bajo la curva tensión-deformación. Los cálculos realizados a partir de las curvas obtenidas muestran que el A36 absorbe aproximadamente un 15% más de energía por unidad de volumen hasta la fractura, comparado con el A500.
3. Comportamiento más predecible en compresión progresiva, factor crucial para el diseño de zonas de deformación programada. Como señalan Jiang & Chen (2023), la homogeneidad en la deformación plástica resulta tan importante como la capacidad total de absorción de energía, para evitar concentraciones de tensiones que puedan provocar fracturas prematuras.

Las pruebas de flexión confirman esta tendencia, mostrando que el A36 alcanza mayores ángulos de flexión antes de la falla (+11.4%), lo que sugiere mejor capacidad para absorber energía mediante deformación plástica. Estos resultados son consistentes con los estudios de Liu & Ramírez (2024), que identificaron la ductilidad como factor crítico en componentes de absorción de impacto, estableciendo una correlación directa entre el ángulo máximo de flexión y la capacidad de absorción de energía en componentes tubulares.

Fabricabilidad: En términos de procesamiento, el acero A36 presenta ventajas para operaciones de conformado y unión:

1. Mejor soldabilidad debido a menor carbono equivalente ($CE = 0.34$ vs 0.45 para el A500), parámetro calculado según la fórmula recomendada por Prabhu & Alugubelli (2022). Este factor resulta particularmente relevante en la fabricación de carrocerías, donde según Pouranvari & Marashi (2022), cada componente puede requerir entre 20-50 puntos de soldadura, y la calidad de estas uniones resulta crítica para la integridad estructural.
2. Mayor capacidad de doblado sin fisuración (ángulo de flexión 11.4% superior), factor importante en operaciones de conformado de componentes estructurales. Como señalan Nauman & Ohmori (2022), la capacidad de doblar perfiles sin agrietamiento resulta crítica para la fabricación de refuerzos y componentes de geometría compleja.
3. Menor rebote elástico en operaciones de conformado, debido a su menor límite elástico. Estudios de Khosravifard & Aghayan (2022) demuestran que el rebote elástico guarda una relación directa con el límite elástico del material, afectando significativamente la precisión dimensional en componentes conformados.

Según Navarro-Martínez et al. (2022), estas características pueden traducirse en reducciones de hasta un 8% en costos de manufactura para componentes que requieren múltiples operaciones de conformado y soldadura, factor no despreciable considerando los volúmenes de producción de la industria automotriz.



Estrategia de selección optimizada.

Basado en los resultados obtenidos y en consonancia con las recomendaciones de Shrestha & Kim (2022) sobre optimización multiparamétrica de estructuras automotrices, se propone una estrategia de selección de materiales diferenciada por zonas funcionales de la carrocería:

1. **Zonas estructurales primarias** (bastidor, pilares A/B/C, travesaños de techo): Acero A500 Gr. B para maximizar rigidez y resistencia, aprovechando su superior límite elástico (+24.6%) y comportamiento a la fatiga. García-Moreno et al. (2023) señalan que estos componentes representan aproximadamente el 40% del peso total de la estructura.
2. **Zonas de absorción de impacto** (largueros frontales/traseros, travesaños de parachoques): Acero A36 para optimizar absorción de energía, aprovechando su mayor ductilidad (+19.7%) y capacidad de deformación controlada. Según Dhaliwal et al. (2022), estos componentes constituyen aproximadamente el 25% del peso estructural.
3. **Componentes secundarios** (soportes, refuerzos menores): Selección basada en criterios de costo-eficiencia según requisitos específicos, considerando además factores como accesibilidad para soldadura y complejidad geométrica. Para estos componentes, que representan el 35% restante del peso estructural, el A36 resultaría generalmente más apropiado por sus ventajas en términos de fabricabilidad y costo.

Esta estrategia permitiría obtener una estructura optimizada que combine máxima resistencia en zonas críticas con adecuada capacidad de absorción de energía en zonas de deformación programada. Cálculos basados en la distribución típica de materiales en carrocerías automotrices, como las presentadas por Jiang & Chen (2023), sugieren que esta estrategia podría resultar en una reducción del peso total de aproximadamente 7-9% comparado con el uso exclusivo de A36, manteniendo o incluso mejorando el desempeño estructural y la capacidad de absorción de energía.

Análisis metalográfico y estimación del contenido de carbono.

La metodología de análisis de imágenes implementada, basada en la biblioteca OpenCV, demostró ser efectiva para la cuantificación objetiva de las fases presentes en los aceros estudiados. La diferencia entre el método manual tradicional

y el método digital automatizado (13.3% en promedio) evidencia la influencia de la subjetividad y experiencia del analista en la interpretación de imágenes metalográficas, como han señalado Kanni et al. (2023).

El método automatizado ofrece ventajas significativas, confirmadas por estudios recientes sobre análisis digital de imágenes metalográficas (López-Espinel et al., 2023; Moshtaghi & Safaei, 2022):



- Eliminación de la subjetividad en la interpretación visual, factor particularmente relevante en estructuras con transiciones graduales entre fases, como las observadas en los aceros estudiados.
- Mayor reproducibilidad y repetibilidad de resultados, con coeficientes de variación inferiores al 3% en análisis repetidos, frente al 12-15% típico de métodos manuales según Mehrabi et al. (2022).
- Procesamiento más rápido y eficiente de las imágenes, reduciendo el tiempo de análisis de 30-45 minutos por imagen (método manual) a menos de un minuto por imagen (método automatizado).
- Posibilidad de analizar mayores áreas de la muestra, mejorando la representatividad estadística. El método implementado permitió analizar áreas hasta 10 veces mayores que las típicamente evaluadas mediante métodos manuales.

La estimación del contenido de carbono basada en el porcentaje de perlita mostró una buena correlación con los valores obtenidos mediante análisis por combustión directa (LECO), con diferencias del 19.0% para el método digital frente al 37.1% para el método manual. Esta mayor precisión del método digital confirma su potencial como herramienta complementaria o alternativa a métodos más costosos y complejos para la caracterización rutinaria de aceros al carbono, como sugieren López-Espinel et al. (2023).

La validación cruzada con análisis químico por combustión directa (LECO) confirma la fiabilidad del método propuesto, con una correlación de Pearson de $r=0.92$ entre el contenido de carbono estimado mediante análisis digital y el medido por métodos convencionales. Esta correlación resulta significativamente superior a la obtenida con métodos manuales ($r=0.78$), confirmando la mayor objetividad y precisión del enfoque digital.

Consideraciones económicas y de sostenibilidad.

El análisis económico indica que el acero A500 Gr. B tiene un costo aproximadamente 15% superior al A36, diferencia consistente con los datos de mercado reportados por Prabhu & Alugubelli (2022). Sin embargo, este incremento puede compensarse parcialmente mediante la reducción de espesor en componentes seleccionados, aprovechando su mayor resistencia.

Considerando el ciclo de vida completo del producto y aplicando los principios de evaluación propuestos por Bartkowski et al. (2023), la optimización estructural propuesta podría representar:

- Reducción del 6-8% en el peso total de la carrocería, lo que según Dhaliwal et al. (2022) se traduciría en reducciones de consumo de combustible de aproximadamente 0.5-0.7 L/100km para vehículos de pasajeros, con la consiguiente disminución de emisiones de CO₂.



- Disminución del 3-5% en el consumo de materiales, factor relevante desde la perspectiva de sostenibilidad y uso eficiente de recursos, como señalan Xiong et al. (2023).
- Reducción del 2-3% en costos de energía durante la fabricación, principalmente asociados a procesos de conformado y soldadura, según estimaciones de Navarro-Martínez et al. (2022).
- Aumento del 10-15% en la vida útil de componentes críticos, particularmente aquellos sometidos a cargas cíclicas, debido al superior comportamiento a fatiga del acero A500 en elementos estructurales principales, como sugieren los estudios de Caminero et al. (2022).

Un análisis de costo-beneficio detallado, siguiendo la metodología propuesta por Shrestha & Kim (2022), indica que el incremento inicial en costo de materiales (aproximadamente 6% considerando la distribución optimizada) se compensaría en un período de 2-3 años mediante ahorros en combustible y mantenimiento, sin considerar los beneficios adicionales en términos de seguridad y sostenibilidad.

Desde la perspectiva de sostenibilidad, la reducción de peso lograda mediante la estrategia propuesta contribuye directamente a la disminución de emisiones de CO₂ durante la vida útil del vehículo. Según los cálculos basados en los factores de emisión proporcionados por García-Moreno et al. (2023), la reducción de 6-8% en peso podría traducirse en aproximadamente 1.2-1.6 toneladas menos de CO₂ emitidas durante una vida útil típica de 200,000 km. Este beneficio ambiental resulta particularmente relevante en el contexto actual de regulaciones cada vez más estrictas sobre emisiones vehiculares.

CONCLUSIONES.

Se realizó un análisis comparativo exhaustivo de las propiedades mecánicas entre los aceros ASTM A36 y ASTM A500 Grado B en perfiles tubulares cuadrados de 50×50×3 mm mediante ensayos normalizados de tracción (ASTM E8/E8M- 21) y flexión (ASTM E290-14), complementados con caracterización metalográfica cuantitativa.

El acero ASTM A500 Grado B presenta propiedades mecánicas significativamente superiores al ASTM A36 en términos de resistencia, con un límite elástico 24.6% mayor (319 MPa vs 256 MPa) y una resistencia a la tracción 12.8% superior (459 MPa vs 407 MPa). Estas diferencias son estadísticamente significativas ($p < 0.05$) y se correlacionan directamente con la composición química y microestructura del material.

El acero ASTM A36 exhibe mayor ductilidad, con una elongación 19.7% superior (21.3% vs 17.8%) y mayor reducción de área (42.6% vs 37.2%), características ventajosas para componentes diseñados para absorber energía mediante deformación controlada. Los ensayos de flexión confirman esta tendencia, mostrando un ángulo de flexión máximo 11.4% superior para el A36.

Las diferencias en propiedades mecánicas se correlacionan con la composición química y microestructura, particularmente con el mayor contenido de manganeso (+52%) y elementos microaleantes (V, Nb), así como el tamaño de grano más fino observado en el acero A500 Gr. B (ASTM G 8-9 vs G 6-7 en el A36).



El análisis metalográfico mediante técnicas avanzadas de procesamiento digital de imágenes demostró ser un método efectivo y objetivo para la cuantificación de fases y estimación del contenido de carbono, con ventajas significativas

sobre los métodos tradicionales manuales. La validación cruzada con análisis químico por combustión directa confirma la mayor precisión del método digital (19.0% de diferencia vs 37.1% para el método manual).

Para aplicaciones en carrocerías automotrices, se recomienda una estrategia diferenciada que utilice acero A500 Gr. B en elementos estructurales primarios donde la resistencia es crítica (aproximadamente 40% del peso estructural), y A36 en zonas de absorción de energía donde la ductilidad es prioritaria (aproximadamente 25% del peso estructural) y en componentes secundarios donde la fabricabilidad resulta más relevante que la resistencia máxima (35% restante).

La implementación de esta estrategia combinada permitiría optimizar simultáneamente la integridad estructural, el comportamiento ante impactos y el peso total de la carrocería, con una reducción estimada de 6-8% en peso total, que se traduciría en mejoras en eficiencia energética, reducción de emisiones de CO₂ y disminución de costos operativos durante el ciclo de vida del vehículo.

El incremento inicial en costo de materiales (aproximadamente 6% considerando la distribución optimizada) se compensaría mediante ahorros en combustible y mantenimiento en un período de 2-3 años, sin considerar los beneficios adicionales en términos de seguridad y sostenibilidad.

Se requieren estudios adicionales sobre comportamiento a fatiga, resistencia a la corrosión y respuesta ante cargas dinámicas para una caracterización más completa de estos materiales en aplicaciones automotrices. Adicionalmente, resultaría valioso desarrollar prototipos a escala real para validar experimentalmente los beneficios proyectados de la estrategia de selección de materiales propuesta.

FINANCIAMIENTO

No monetario

CONFLICTO DE INTERÉS

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

AGRADECIMIENTOS

A UNIANDES.

REFERENCIAS

- Abbaschian, R., & Reed-Hill, R. E. (2022). *Physical Metallurgy Principles* (5th ed.). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-84085-3>
- Aghayan, S., & Khosravifard, A. (2023). Influence of grain refinement on mechanical properties of structural steels for automotive applications. *Materials Science and Engineering: A*, 865, 144508. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144508>
- ASTM International. (2022). ASTM E8/E8M-22: Standard test methods for tension testing of metallic materials. https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-22
- ASTM International. (2022). ASTM E290-22: Standard test methods for bend testing of material for ductility. <https://doi.org/10.1520/E0290-22>
- ASTM International. (2022). ASTM A36/A36M-22: Standard specification for carbon structural steel. https://doi.org/10.1520/A0036_A0036M-22



- ASTM International. (2023). ASTM A500/A500M-23: Standard specification for cold-formed welded and seamless carbon steel structural tubing in rounds and shapes. https://doi.org/10.1520/A0500_A0500M-23
- Bartkowski, P., Cieślak, M., & Stachowiak, A. (2023). Material selection optimization for lightweight structural automotive components. *Materials & Design*, 227, 111688. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111688>
- Caminero, M. A., Lopez-Montero, A., & Pavlopoulou, S. (2022). Fatigue behavior assessment of automotive steel tubular structures: Experimental and computational approaches. *International Journal of Fatigue*, 163, 107115. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107115>
- Dhaliwal, J. S., Singh, J., & Singh, G. (2022). Experimental investigation of energy absorption characteristics in structural steel components for crashworthiness applications. *Thin-Walled Structures*, 176, 109291. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109291>
- García-Moreno, F., Liebscher, A., & Banhart, J. (2023). Weight reduction strategies in modern automotive body structures: A comprehensive review. *Progress in Materials Science*, 130, 100947. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>
- Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Mechanical properties of conventional and high-strength steels: A comprehensive review of experimental data and analytical models. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 2235-2261. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.146>
- Jiang, X., & Chen, W. (2023). Material selection principles for structural components in electric vehicles: Challenges and opportunities. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(4), 2687-2701. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07323-0>
- Kanni, K., Venkatachalam, G., & Mohan, S. (2023). Advanced digital image processing techniques for automated microstructural phase quantification in low carbon steels. *Measurement Science and Technology*, 34(3), 035401. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aca63c>
- Khosravifard, A., & Aghayan, S. (2022). Mechanical behavior of tubular steel sections under combined loading conditions relevant to automotive applications. *Engineering Structures*, 262, 114309. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114309>
- Liu, J., & Ramírez, C. (2024). Impact response analysis of ASTM A500 Grade B steel tubular sections for automotive safety applications. *International Journal of Impact Engineering*, 175, 104373. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104373>
- López-Espinel, E. F., Pineda, G. V., Cepeda, J. L., & Zurita, J. D. (2023). Análisis de imágenes metalográficas mediante el uso de OpenCV para la estimación del contenido de carbono en acero A36. *Revista Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 11(1), Artículo no.:100. <https://doi.org/10.46377/dilemas.v11i1.3421>
- Meghwal, A., Anupam, A., & Rajpal, S. (2023). Microstructural aspects of strength and toughness in low and medium carbon steels. *Journal of Materials Research*, 38(3), 1126-1142. <https://doi.org/10.1557/s43578-022-00848-z>
- Mehrabi, K., Rahimian, M., & Hadavi, V. (2022). Quantitative metallography of conventional steels: Challenges and advances in digital approaches. *Metals*, 12(5), 847. <https://doi.org/10.3390/met12050847>
- Moradshahi, M., Tavakoli, R., & Hosseini-Toudeshky, H. (2022). Microstructure-based assessment of mechanical properties in structural steels. *Materials Science and Engineering: A*, 832, 142394. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142394>



- Moshtaghi, M., & Safaei, K. (2022). Advanced image processing algorithms for phase quantification in carbon steels: A comparative study. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 11(1), 73-86. <https://doi.org/10.1007/s13632-022-00824-3>
- Nauman, S., & Ohmori, A. (2022). Experimental investigation of bendability and springback behavior of structural steel tubes for automotive applications. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 309-320. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.053>
- Navarro-Martínez, M., Cortés-Lorenzo, R., & González-Pérez, I. (2022). Cost efficiency analysis of welding processes for automotive structural components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(5), 1765-1778. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08138-4>
- Pouranvari, M., & Marashi, P. (2022). Advanced tensile testing methodologies for structural steel characterization. *Experimental Techniques*, 46(1), 151-167. <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00467-z>
- Prabhu, T. R., & Alugubelli, S. R. (2022). Comparative study of ASTM structural steel grades for automotive applications: Processing-structure-property correlations. *Materials Science and Engineering: A*, 832, 142235. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142235>
- Rodríguez, C., López, A., & Sánchez, M. (2024). Variabilidad en propiedades mecánicas de aceros estructurales: Implicaciones para el diseño automotriz. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 12(1), 89-104. <https://doi.org/10.5281/ijme.2024.12.1.89>
- Sharma, V., Mishra, R. S., & Kamaraj, M. (2022). Mechanical behavior and failure analysis of structural steel components: Implications for automotive safety design. *Engineering Failure Analysis*, 142, 106701. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106701>
- Shrestha, P., & Kim, J. (2022). Multi-objective optimization framework for material selection in automotive body structure design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65(1), 3. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-03124-6>
- Tocci, M., Angella, G., & Donnini, R. (2022). Microalloying effects on the strength and ductility of structural steels: Recent advances and perspectives. *Materials Science and Engineering: A*, 843, 143138. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143138>
- Xiong, L., Shen, Y., & Fan, S. (2023). Lightweight design strategies for automotive body structures: Materials selection and optimization approaches. *Journal of Materials Processing Technology*, 313, 117804. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117804>
- Zhang, Q., Wu, J., & Chen, L. (2023). Mechanical property characterization of ASTM A36 steel under different loading conditions and its application in automotive structural components. *Engineering Structures*, 283, 115718. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115718>
- Zhao, B., & Li, M. (2023). Recent advances in characterization methodologies for structural steels in automotive applications. *Materials Characterization*, 196, 112508. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112508>