

Desarrollo Experimental De Compuestos A Base De Yeso, Ceniza De Bagazo De Caña Y PET

Alejandra Nuñez Choque¹, Cesar Fabiano Fioriti²

¹Universidad Católica Boliviana San Pablo, Sede Santa Cruz De La Sierra, Bolivia.

²Faculdade De Ciências E Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, Brazil.

Autor Correspondiente: Cesar Fabiano Fioriti

Resumen:

El presente estudio investigó el desarrollo de un material alternativo para la construcción civil a partir de yeso, ceniza de bagazo de caña y PET, con el objetivo que sea sostenible y eficiente. Se llevaron a cabo métodos experimentales que incluyeron la caracterización física de los materiales y ensayos para evaluar propiedades clave como: consistencia, densidad media, resistencia a la compresión, absorción de agua y comportamiento térmico. Se produjeron cuatro compuestos distintos mediante una mezcla manual de yeso calcinado, PET en formato 'flakes' y ceniza de bagazo, seguido de un curado natural durante siete días. Los resultados indicaron que la incorporación de estos residuos impactó significativamente las propiedades físicas del material. Los compuestos desarrollados cumplieron con los estándares técnicos establecidos. Los compuestos demostraron suficiente fluidez y manejabilidad para ser utilizados en revestimientos y otros elementos constructivos. En cuanto a la densidad, el aumento en el porcentaje incorporado de ceniza de bagazo favoreció el aumento de la densidad. La absorción de agua tendió a reducirse. La resistencia a la compresión mostró un aumento sutil. Mientras que las placas de yeso tuvieron una ligera reducción de temperatura. Este estudio resaltó el potencial del uso de residuos industriales en la construcción sostenible, contribuyendo así a una economía circular y a la reducción de las emisiones en el sector. Además, promoviendo así un desarrollo más responsable al impulsar prácticas constructivas sostenibles, y permitiendo minimizar el impacto ambiental.

Palabra Clave: Material alternativo; Construcción Sostenible; Residuos Industriales.

Date of Submission: 21-01-2025

Date of Acceptance: 31-01-2025

I. Introducción

Ante la creciente preocupación el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, considerado uno de los principales organismos científicos establecido por las Naciones Unidas en colaboración con la Organización Meteorológica Mundial, destaca la urgencia de abordar el cambio climático de manera integral. Debido a la creciente preocupación, el IPCC enfatiza la necesidad de aprender nuevas prácticas a implementar que sean sostenibles y tecnologías innovadoras y que reduzcan el impacto ambiental del sector de la construcción. Además, subraya la importancia de adoptar políticas que fomenten la eficiencia energética y el uso de materiales reciclados (MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, 2023).

En este contexto, de acuerdo a los informes realizados por la IPCC, el sector de la construcción civil es responsable de aproximadamente el 39% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂), lo que lo convierte en una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial. Este dato proviene del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC, donde se analizó de manera exhaustiva la contribución de diversos sectores a las emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2021).

El informe destaca que este porcentaje incluye no solo las emisiones directas derivadas de las actividades de la construcción, sino también las emisiones indirectas asociadas a la producción de materiales clave como el cemento y el acero, que son de los más consumidos y utilizados en este sector. Esta creciente preocupación por el impacto ambiental ha llevado al sector a explorar alternativas que sean tanto sostenibles como eficientes. Hoy en día la búsqueda de soluciones sostenibles se convierte en un desafío significativo, especialmente en un mundo donde la demanda de recursos naturales y la generación de residuos continúan en aumento, lo que subraya la necesidad urgente de adoptar prácticas mucho más sostenibles en la industria de la construcción para mitigar su efecto ambiental.

Dado esto, los materiales sostenibles, que incluyen opciones recicladas, como ser; el PET (polietileno tereftalato) y renovables como la ceniza del bagazo de caña de azúcar, ofrecen soluciones efectivas para reducir

la huella de carbono asociada a la construcción, promoviendo así un desarrollo más responsable y respetuoso con el medio ambiente.

Según el Instituto de Economía Agrícola (2023) de Brasil el estado con mayor producción de caña de azúcar es São Paulo, por el cual representa más del 90% de la producción nacional. En São Paulo, se estima que se producen aproximadamente 417 millones de toneladas de caña de azúcar en la cosecha 2023/2024. Dado que se genera alrededor de 125 kilogramos de bagazo por cada tonelada de caña, esto implica que se producen aproximadamente 52,125 millones de toneladas de bagazo anualmente en el estado (INSTITUTO DE ECONOMÍA AGRÍCOLA, 2023).

Asimismo, la Asociación Brasileña de la Industria del PET considero que en los últimos años el estado de São Paulo es considerado uno de los principales centros de reciclaje, se concentra una gran parte de esta actividad, la industria recicladora de PET en Brasil ha mostrado un crecimiento significativo, con un aumento en la capacidad de reciclaje y reutilización del material.

Se estima que alrededor del 60% de las botellas PET producidas son recicladas, lo que representa aproximadamente 311,000 toneladas de PET reciclado anualmente en el país (ABIPET, 2023). La incorporación del PET reciclado no solo mejora la durabilidad y resistencia de los materiales construidos, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir la cantidad de desechos plásticos que terminan en vertederos (SEBRAE, 2023). La importancia del reciclaje del PET radica en su capacidad para transformar un problema ambiental en una solución constructiva, fomentando prácticas más sostenibles en la industria (ENVASELIA, 2023).

Por otro lado, el uso de yeso en la construcción tiene un impacto ambiental positivo, ya que este material es natural y reciclable, lo que contribuye a una economía circular. Según la Federación Europea de Fabricantes de Yeso, el yeso se puede reciclar en un ciclo cerrado, permitiendo que los residuos se reutilicen para producir nuevos productos de yeso.

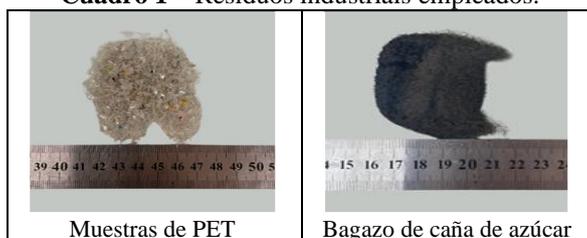
Esto no solo reduce la cantidad de desechos generados, sino que también minimiza las emisiones de gases de efecto invernadero durante su producción y procesamiento (EUROGYPSUM, 2020). En este sentido, el yeso no solo cumple con las exigencias técnicas de la construcción moderna, sino que también se alinea con las prácticas responsables que buscan minimizar el impacto ambiental de la industria.

El objetivo principal fue desarrollar un material alternativo para la construcción civil que integró el yeso, ceniza de bagazo de caña y desechos de PET. A través de ensayos de laboratorio, se evaluaron las propiedades del compuesto resultante, tales como consistencia, resistencia a la compresión, absorción de agua, densidad y comportamiento térmico. Este enfoque buscó garantizar que el material cumpla con los estándares técnicos requeridos, promoviendo un desarrollo más responsable y respetuoso con el medio ambiente.

II. Materiales Y Métodos

Se empleó yeso calcinado ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), multiuso, cuya caracterización física presentó una masa específica absoluta de $1,35 \text{ g/cm}^3$, masa unitaria de $0,69 \text{ g/cm}^3$, tiempo de fraguado: inicio (6 min) y fin (17 min), respectivamente, conforme a la ABNT NBR 13207 (2017). El agua utilizada en los compuestos era agua potable. La muestra de residuos de polietileno tereftalato – PET empleada es en formato de 'flakes' (Cuadro 1a), proporcionada por la empresa Global PET SA, donde la caracterización presentó una masa específica absoluta de $1,35 \text{ g/cm}^3$ (Método del Frasco Picnómetro), masa unitaria de $0,43 \text{ g/cm}^3$ (ABNT NBR 16916, 2021), absorción de agua del 0,10%, dimensión máxima de 2,36 mm y módulo de finura de 3,79 (ABNT NBR 17054, 2022). La ceniza del bagazo de caña de azúcar – CBC empleada (Cuadro 1b) provino de la empresa COCAMAR Cooperativa Agroindustrial, que según Altoé (2012) las temperaturas de combustión que originaron la CBC fueron de 600 a 650°C, con una fase cristalina en forma de cuarzo (SiO_2), clasificado como material inerte – no peligroso (ABNT NBR 10004, 2004).

Cuadro 1 – Resíduos industriais empregados.



Inicialmente, la muestra fue seca en estufa y colocada en un mortero para desmenuzamiento, presentando en su caracterización una masa específica absoluta de $2,66 \text{ g/cm}^3$ (ABNT NBR 6458, 2016), contenido de humedad del 0,24%, con clasificación similar a las arenas medias (ABNT NBR 6502, 2022) – valor de uniformidad igual a 2,22 y coeficiente de distribución granulométrica cercano a 1,00.

Por lo tanto, se produce 4 compuestos distintos (Tabla 1), en los que la medición de las masas de los materiales empleados se realiza en una balanza de precisión digital (Figura 1). El proceso de mezcla de los materiales fue manual, realizado en un recipiente plástico del tipo mezclador (con ayuda de espátulas), en el que inicialmente se añadió el yeso, luego el PET y la CBC, y por último el agua.

Tabla 1 – Materiales empleados.

Compuestos	Yeso (kg)	Resíduos (%)	PET (kg)	CBC (kg)	Relación a/g (masa)	Relación agua/materiales secos (masa)
C ₀	1,00	—	—	—	0,80	0,80
C ₅	1,00	5%	0,025	0,025	0,80	0,76
C ₁₀	1,00	10%	0,050	0,050	0,80	0,73
C ₁₅	1,00	15%	0,075	0,075	0,80	0,70

Figura 1 –Proceso de mezcla.



Posteriormente, se moldearon 10 cuerpos de prueba (Figura 2) – CP's cúbicos de 5 x 5 x 5 cm (Figura 6) y uno en formato de placa de 30 x 30 x 1,5 cm, para cada compuesto de yeso producido. El apisonamiento empleado en el moldeado de los CP's fue manual y el proceso de curado adoptado se realizó en un ambiente natural (sin inclemencias) durante 7 días.

Figura 2 – Algunos cuerpos de prueba.



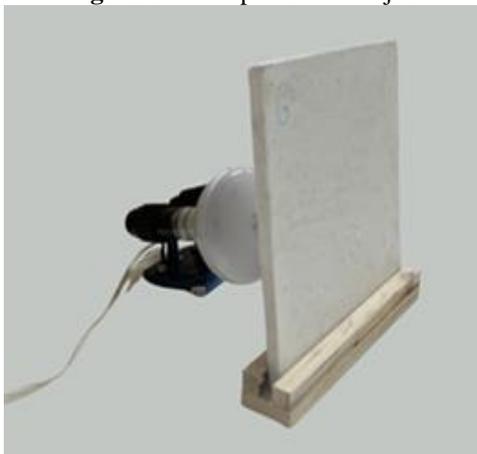
El programa experimental de ensayos involucró los siguientes procedimientos en laboratorio: (i) consistencia (mini-slump) en la, que permitió constatar la trabajabilidad a través de su fluidez/plasticidad (Kantro, 1980), en el que se midieron dos dimensiones ortogonales por compuesto. Producido; (ii) densidad de masa en estado endurecido (ABNT NBR 13278, 2005); (iii) absorción de agua por inmersión total (NBR 14715-2, 2021); (iv) resistencia a la compresión (NBR 13207-3, 2023); (v) análisis térmico (termografía infrarroja). Cabe informar que en los ensayos en estado endurecido se utilizaron 5 CP's por compuesto producido (con edad > 7 días), con excepción del ensayo de termografía infrarroja que utilizó 1 CP por compuesto. El Cuadro 2 ilustra los ensayos presentados.

Cuadro 2 – Ensayos experimentales.



Referente al ensayo de análisis térmico mediante termografía infrarroja (Figura 3), la imagen térmica se realizó de manera activa – en el lado opuesto de la placa al de obtención de las termo gramas – mediante un aparato que contiene dos lámparas infrarrojas (potencia de 250W cada una) durante un período total de 80 minutos.

Figura 3 – Lámparas infrarrojas.



Cada placa de yeso fue posicionada sobre una base de madera, a una distancia de 1,5 m del equipo termovisor Flir E40 (fijado con la ayuda de un trípode fotográfico de aluminio), lo que garantizó un cuadro total para la obtención de las termo gramas.

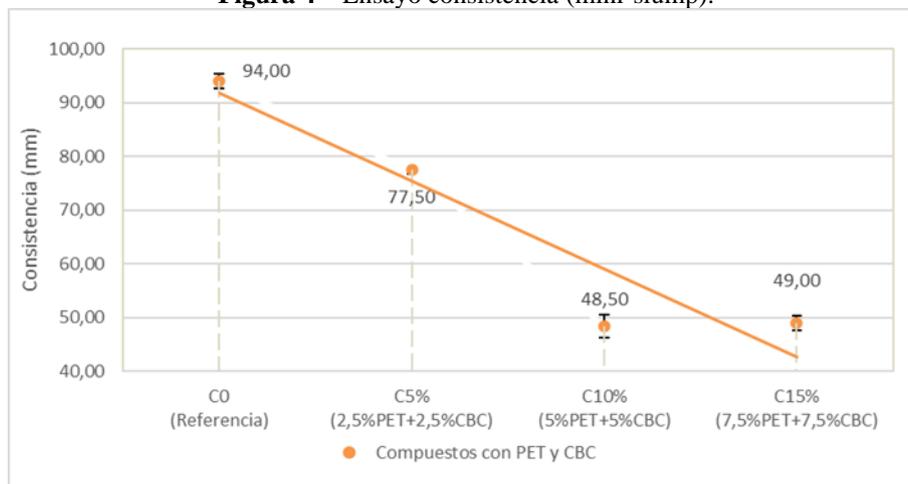
Las condiciones de emisividad fueron ajustadas conforme a la recomendación del fabricante (Flir, 2019). Los tiempos de ensayo para la obtención de las termo gramas, para todas las placas producidas, fueron: 0, 5, 10, 20, 50 y 80 minutos.

III. Resultados Y Discusión

Análisis ensayo de la consistencia

El análisis de la fluidez y plasticidad de los materiales fue fundamental en la evaluación de su trabajabilidad. En este estudio, Figura 4, se presentarán los resultados de los ensayos realizados con diferentes compuestos, destacando la incorporación de ceniza de bagazo, PET y el yeso puro.

Figura 4 – Ensayo consistencia (mini-slump).



Al analizar los resultados obtenidos en los ensayos, Figura 4, se observaron tendencias claras al comparar las mezclas con diferentes proporciones de ceniza de bagazo y PET. Por ejemplo, al comparar solo el yeso con la incorporación del 5% de residuos se observó un aumento del 17,55% en la consistencia respecto al yeso puro, indicando que pequeñas cantidades llegaron a mejorar ciertas propiedades físicas iniciales. Sin embargo, al aumentar la proporción a un 10% de residuo, el espesor entre estos intervalos se incrementó a 37,42%, lo que indicó una mejora notable en la trabajabilidad.

Posteriormente, al incorporar un 15% de residuo, el cambio entre el intervalo del 10% y el 15% mostró solo un 1,03%, lo cual no fue una diferencia significativa. Finalmente, al comparar el compuesto con un 15% de residuo y el yeso puro, se observó una diferencia del 91.84%, lo que resaltó cómo incluso pequeñas cantidades pudieron tener un impacto considerable con relación al yeso puro.

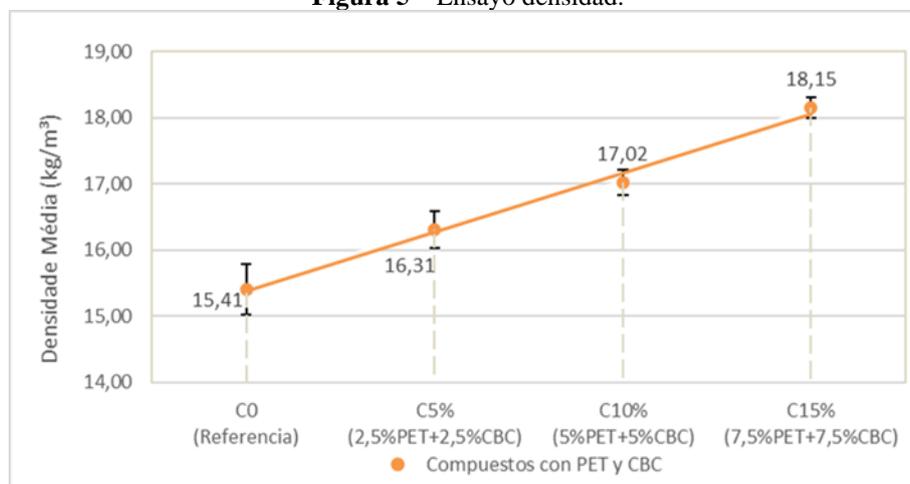
Los resultados finales indicaron que la incorporación de ceniza de bagazo y PET presentaron variaciones significativas en comparación con el yeso puro. Se observó que a medida que se aumentaba la proporción de ceniza de bagazo, la consistencia tendió a disminuir. Esto se debió a la naturaleza más pesada y fibrosa del bagazo, que actuó como un material de relleno. Por otra parte, la incorporación de PET en mezclas de yeso presenta un efecto contraproducente: si bien mejora algunas propiedades mecánicas, su uso excesivo compromete la trabajabilidad del material.

Análisis ensayo de la densidad

En el presente análisis, Figura 5, se examinaron las propiedades físicas de los compuestos desarrollados a partir de yeso, ceniza de bagazo y PET, enfocándose particularmente en su densidad.

Los resultados obtenidos a través de la Figura 5 sobre la densidad de los compuestos a base de yeso, ceniza de bagazo de caña y PET revelaron que, a medida que se incrementó la proporción de los residuos, la densidad del compuesto tendió a aumentar. Este fenómeno se explicó por las características intrínsecas del bagazo, este al ser un material ligero y fibroso, y el incorporándose cantidades significativas, contribuyendo a un aumento en el peso total del compuesto. El aumento en la masa del material se debió a que el bagazo ocupó menos volumen por unidad de peso en comparación con otros materiales. Cuando se incorporó bagazo a la mezcla, se añadió un peso más al total, lo que provocó un incremento en la masa general del material; a mayor densidad del bagazo, mayor incrementó el peso de la mezcla.

Figura 5 – Ensayo densidad.



Los resultados obtenidos en los ensayos resultaron que los compuestos que contenía solo yeso puro presentaron una densidad baja. Al incorporar un 5% de residuo de bagazo, se observó un aumento en la densidad con una diferencia porcentual entre intervalos del 5.84%. Al aumentar la proporción a un 10% de residuo, la diferencia entre intervalos disminuyó al 4.35%. Sin embargo, al compararlo con el yeso puro con un 15% de residuo, se registró una diferencia del 15.11%. Estos resultados indicaron que, al aumentar el porcentaje de residuo, la densidad del compuesto tendió a aumentar.

En el estudio, de GONZÁLES, A., PÉREZ, J., Y RAMÍREZ, L. (2020), la reducción de la densidad explica, que se debió, al usar un 30% de ceniza volante en el concreto, y esta tendió a disminuir, debido a que la ceniza volante es considerada un material de subproducto de la combustión del carbón con una densidad aparente más baja en comparación con el cemento Portland. Por lo tanto, al reemplazar parte del cemento con la ceniza volante, se redujo la densidad total del concreto. El volante de la ceniza no solo afectó la densidad, sino que también mejoraron las propiedades como la resistencia a la compresión y la durabilidad del concreto. Esto explicó específicamente a la capacidad de como reaccionó químicamente con el agua y los componentes del cemento, formando compuestos que llenaron los poros y mejoraron la estructura del material.

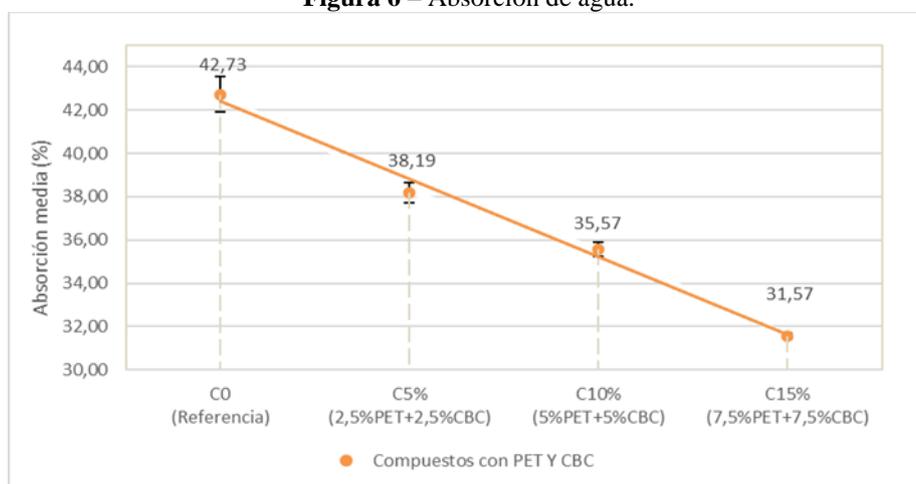
La comparación entre ambos estudios reveló que, aunque ambos trabajan con materiales residuales, sus enfoques son distintos. Los ensayos sobre la mezcla de ceniza de bagazo, yeso y PET demostraron que, si bien la incorporación de ceniza de bagazo incrementó la densidad del material, no se observaron mejoras significativas en sus propiedades mecánicas. En contraste, el artículo sobre cenizas volantes destacó su capacidad para mejorar las características del concreto convencional. Ambos estudios sugieren aplicaciones valiosas en la construcción

sostenible. La diferencia clave radicó en las características intrínsecas de los materiales utilizados: mientras que el bagazo actuó principalmente como un relleno ligero que aumentó la masa total sin mejorar las propiedades mecánicas, a diferencia que, las cenizas volantes ofrecieron beneficios adicionales gracias a su reactividad química y propiedades puzolánicas.

Análisis ensayo de absorción de agua por inmersión

En el ensayo sobre absorción de agua por inmersión, Figura 6, se presentaron resultados a través de un indicador esencial que permitió evaluar la durabilidad y resistencia al agua del material.

Figura 6 – Absorción de agua.



Se revelaron patrones interesantes en relación con la incorporación de residuos, Figura 6, con un 5% de residuo, se observó un porcentaje de absorción del 19.63%, lo que indicó que, al introducir el residuo, la capacidad del compuesto para retener agua siguió siendo considerable. Este nivel de absorción se consideró aceptable en aplicaciones donde se requiere cierta permeabilidad. Al aumentar la proporción de residuo al 10%, el intervalo entre ambos porcentajes se redujo a 6.86%, es evidente que el porcentaje de absorción fue disminuyéndose, lo que se consideró como una amenaza y llegó a tener un efecto negativo en la reducción de la absorción de agua, así mismo se interpretó como una no mejora en la densidad y cohesión del material.

Entre el 10% y el 15% de incorporación de residuo, se registró un intervalo de 11.25%. Este intervalo indicó que, a medida que se incrementaba la cantidad de residuo, el material tendía a absorber menos agua. Finalmente, al comparar un 15% de residuo con solo yeso puro, se observó un intervalo porcentual significativo del 35.36%.

Este fenómeno es relevante porque una menor absorción de agua generalmente se correlaciona con una mayor durabilidad y resistencia al deterioro en condiciones húmedas. Esto se interpretó de tal manera que, los residuos debilitarían las propiedades mecánicas, su efecto sobre la reducción de la absorción de agua contribuiría a una mejora en la resistencia del material en ambientes húmedos. La interpretación de este efecto se explica de la siguiente manera como este actuó con sus propiedades durante su aplicación: la ceniza de bagazo influyó en la interacción con el agua, debido a su composición fibrosa, ya que parte del agua que normalmente afecta la trabajabilidad del yeso se retiene en el bagazo, esta retención de agua impacta negativamente en la consistencia y aplicabilidad del compuesto, dificultando su manipulación durante el proceso de mezcla y aplicación. Por otra parte, el PET, tiende a formar una estructura que atrapa agua y otros componentes en la mezcla, lo que resulta una mezcla menos homogénea y más difícil de aplicar.

En el estudio de ceniza de bagazo y PET afectó negativamente la resistencia a la humedad, ya que un mayor porcentaje de residuo, se presentó una menor absorción de agua. Esto contrasta con el enfoque del estudio de Estudio de GONZÁLES, A., PÉREZ, J., Y RAMÍREZ, L. (2020), donde examinó mezclas de concreto que contenían un 30% de cenizas volantes, donde la absorción de agua en estas mezclas midió para evaluar su durabilidad, ya que una menor absorción indicó una mayor resistencia y aumento en su densidad, sino que también mejoraron notablemente las propiedades mecánicas del concreto.

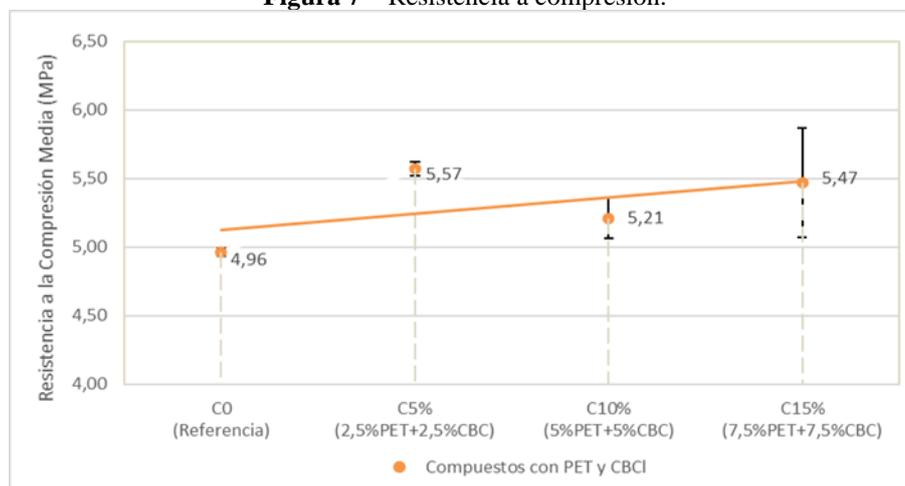
La comparación entre ambos estudios: en el ensayo de incorporación de residuo de bagazo y PET, la absorción de agua por inmersión, los resultados iniciales mostraron que con un 5% de residuo se logró una absorción aceptable. Esto indicó que existe un potencial para utilizar residuos en mezclas donde la permeabilidad sea controlada sea aceptable. Ambos estudios subrayan cómo los diferentes materiales interactuaron con el agua, en el caso del ensayo de bagazo y PET tendió a atrapar el agua, lo que dificultó la homogeneidad de la mezcla;

mientras que las cenizas volantes mejoraron considerablemente la distribución del agua, su rendimiento durabilidad y características mecánicas del concreto.

Análisis ensayo de resistencia a compresión

En los ensayos realizados sobre la resistencia mecánica de los compuestos desarrollados, Figura 7, los resultados indicaron que, al observar únicamente tres cuerpos de prueba con los valores más bajos de absorción de agua, se evidenciaron que todos ellos presentaron un aumento en la resistencia a la compresión. A pesar de las pequeñas variaciones en los resultados, los valores fueron cercanos entre sí, lo que sugirieron que la resistencia no dependió significativamente del porcentaje del residuo incorporado.

Figura 7 – Resistencia a compresión.



En particular, los compuestos que contenían un 5% de ceniza de bagazo mostraron una mejora notable en comparación con aquellos que solo contenían yeso puro. Esta tendencia observada en los resultados indicó que incluso pequeñas cantidades de ceniza de bagazo y PET tuvieron un efecto positivo en la resistencia del compuesto. La mejora en la resistencia a compresión se atribuyó a la capacidad del bagazo que actúa como un material de refuerzo, mejorando la cohesión interna del compuesto y contribuyendo a una estructura más densa.

Los datos finales de la Figura 5 de compresión reflejaron las variaciones porcentuales entre los diferentes intervalos, entre el yeso puro a la incorporación 5% de ceniza de bagazo resultó un aumento notable en la resistencia a compresión, lo que indicó que pequeñas cantidades de este residuo podría tener un efecto positivo significativo. Este incremento fue del 12.29% en comparación con el yeso puro, lo que sugiere que el bagazo actúa como un material de refuerzo, mejorando la cohesión interna del compuesto y contribuyendo a una estructura más densa. Entre 5% y 10% de residuo, el porcentaje entre intervalos fue del 6,46%. Entre el 10% y el 15% de residuo, se registró un porcentaje del 4,99%.

Finalmente, entre 15% de residuo y yeso puro, el porcentaje entre intervalos fue del 9,31%. Estos resultados destacaron cómo el incremento en el contenido de ceniza de bagazo y PET influyó en la resistencia a compresión del compuesto. A medida que se fueron incrementando la proporción de residuo al 10% y 15%, se registraron aumentos en la resistencia a compresión (6.46% y 4.99%, respectivamente), estos incrementos fueron menores, lo que indica que existe un punto óptimo en la proporción de ceniza de bagazo donde su incorporación maximiza las propiedades mecánicas sin comprometer la cohesión del material.

Es posible que exista un punto óptimo en la proporción de la ceniza de bagazo donde su incorporación maximiza de las propiedades mecánicas sin comprometer la cohesión del material. Desde ese punto, el aumento adicional del contenido haya beneficios significativos. El aumento en la resistencia a la compresión, esto resultó porque al estar relacionado con las propiedades físicas intrínsecas del bagazo, su naturaleza fibrosa contribuyó a una mejor distribución de tensiones dentro del compuesto, lo que resultó una mayor capacidad para soportar cargas.

Por otro lado, en el estudio de GONZÁLES, A., PÉREZ, J., Y RAMÍREZ, L. (2020), se centró en como las cenizas volantes, al considerarse un subproducto del carbón, mejoran las propiedades mecánicas del concreto convencional.

La comparación entre ambos ensayos resaltó diversas propiedades mecánicas. Las cenizas volantes tendieron a mejorar de manera más efectiva la resistencia a la compresión y sus características mecánicas, gracias a su composición química y su capacidad para reaccionar con el agua y el hidróxido de calcio presentes en el cemento. Debido a esta reacción química permitió la formación de nuevos compuestos que refuerzan la estructura

del concreto, lo que la convirtió a las cenizas volantes más adecuadas para aplicaciones que requieren alta resistencia estructural.

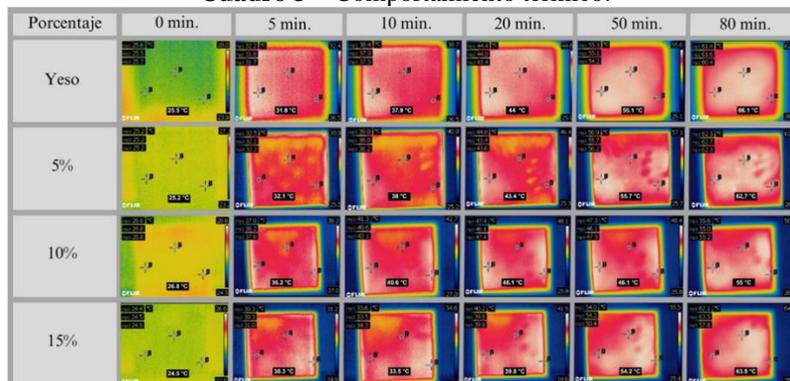
Por otro lado, la incorporación del 5% de ceniza de bagazo resultó en un aumento notable de la resistencia a la compresión, lo cual fue beneficioso para la cohesión del material. Sin embargo, al aumentar estas proporciones más allá de un cierto límite, su efectividad disminuyó debido a factores como la interferencia en la estructura del compuesto y cambios en las propiedades físicas. En contraste cuando se añadieron pequeñas cantidades de ceniza de bagazo o PET al compuesto, se observó que el bagazo, al ser una estructura fibrosa, ayudó a mejorar la cohesión interna del material.

En la determinación del punto óptimo en la proporción de residuos, se interpretó que existió una cantidad específica en la que los beneficios son máximos. Más allá de este punto, el aumento adicional se interpretó que llevó a una reducción en las propiedades mecánicas. Por ejemplo, en el ensayo se observó que, al incorporar una cantidad excesiva de bagazo y PET, había menos espacio entre las partículas de yeso, lo que impedía que se unieran adecuadamente, por lo que atribuyó y afectó negativamente tanto a la densidad como a la resistencia del material. La interacción de los residuos con el resto del material mostró que, en bajas cantidades, el bagazo y el PET contribuían a una mejor distribución dentro del compuesto. Sin embargo, al aumentar su proporción, estas interacciones se volvieron menos efectivas, resultando en una integración deficiente con otros componentes del material y generando una mezcla menos homogénea y más débil.

Análisis ensayo comportamiento térmico

La termografía, como técnica de ensayo no destructivo, permitió analizar la temperatura de los materiales sin necesidad del contacto directo, lo que resultó una evaluación más segura y eficiente. Este método se basa en la detección de radiaciones infrarrojas emitidas por los objetos, transformándolas esta información en imágenes térmicas (Cuadro 3) que reflejan la distribución de temperaturas en la superficie del material.

Cuadro 3 – Comportamiento térmico.



Los resultados obtenidos, Cuadro 3, mostraron variaciones significativas en la temperatura del yeso en función de la cantidad de residuos incorporados. En el ensayo con solo yeso puro, se registró un notable aumento de temperatura del 144%, alcanzando los 61°C. Al añadir un 5% de residuos, el aumento fue aún más pronunciado, con un incremento del 148%, alcanzando 62°C. Sin embargo, al incorporar un 10% de residuos, se observó una disminución de la temperatura, con un descenso equivalente a aproximadamente 111.54%, bajando a 55°C. Finalmente, al añadir un 15% de residuos, la temperatura volvió a aumentar, aunque en menor medida, con un incremento del 134.62%, llegando a 61°C.

Estos resultados evidencian cómo la cantidad de residuos influyeron en la capacidad del yeso para absorber calor, lo atribuyó implicaciones importantes en su uso y aplicación en diferentes contextos. Los resultados destacaron significativamente la cantidad de residuos en la capacidad del yeso para absorber calor. Mientras que el yeso puro y las mezclas con un 5% y un 15% de residuos mostraron incrementos notables en la temperatura, alcanzando aumentos del 144% y 148% respectivamente, el ensayo con un 10% de residuos reveló un comportamiento contrario, con una disminución de aproximadamente 111.54%. A medida que se aumentaba la proporción de residuos, se introducían componentes posibles que afectaron la estructura del yeso, sino que también la capacidad para retener calor.

En el caso, de la incorporación de 10% de residuos interfirió con la formación de enlaces térmicos eficientes dentro del yeso, resultando en una menor absorción de calor y, por ende, en una temperatura final más baja tras el mismo periodo de tiempo. Específicamente, los compuestos con mayor contenido de ceniza de bagazo y PET tendieron a absorber más calor, debido su capacidad aislante superior. Esto se atribuyó a las propiedades físicas y químicas de los residuos utilizados, que permitieron una mejor retención del calor y una mayor resistencia a las transferencias térmicas.

En comparación con el artículo de MAYOR P., BUSTAMANTE, R., RANGEL, C., Y HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. (2008), el cual estudia las propiedades térmicas, acústicas y mecánicas de placas de morteros yeso-caucho, el cual analizó cómo la incorporación de caucho en mezclas de yeso mejoró sus características térmicas, lo que resultó un material más eficiente para aplicaciones donde el aislamiento térmico es crucial.

En el ensayo de termografía reveló que al aumentar el contenido de caucho en las placas de yeso, la conductividad térmica disminuyó, lo que mejoró el aislamiento térmico y permitió mantener temperaturas más estables en espacios cerrados, crucial para la eficiencia energética en la construcción; Además que, las placas con mayor contenido de caucho mostraron una notable reducción en la temperatura del recinto receptor en comparación con aquellas sin caucho, gracias a la capacidad aislante del material.

En comparación en el ensayo de la incorporación de ceniza de bagazo y PET, también presentaron mejoras térmicas, según las proporciones de residuos y los resultados obtenidos mostraron variaciones significativas en la temperatura del yeso en función de la cantidad de residuos incorporados. El comportamiento térmico es fundamental para entender cómo los diferentes componentes afectan las propiedades del material. La termografía permitió visualizar cambios en tiempo real y proporcionar información valiosa sobre la eficiencia energética y el rendimiento del material en condiciones prácticas.

La comparación entre el ensayo de ceniza de bagazo y PET y el estudio sobre yeso-caucho, ambos estudios utilizaron métodos para evaluar estas propiedades, siendo la termografía utilizada en el ensayo de la incorporación de bagazo y PET, para obtener datos en tiempo real sobre temperatura, mientras que el estudio de yeso-caucho se enfoca más en propiedades mecánicas y térmicas generales.

En el ensayo de bagazo PET, se observó que un aumento moderado de residuos mejoró la absorción de calor, pero al llegar al 10%, se produjo una disminución significativa en la capacidad térmica. Por otro lado, el aumento del contenido de caucho en el yeso mostró mejoras constantes en sus propiedades térmicas. Ambos estudios enfatizan la necesidad de gestionar adecuadamente el comportamiento térmico en la construcción, lo que puede contribuir a una mayor eficiencia energética y confort ambiental.

IV. Ideas Para Aplicaciones Constructivas

A través del análisis detallado de las propiedades del compuesto se reveló el potencial para aplicaciones en diversas ideas constructivas, desde revestimientos interiores y exteriores que aprovecharían sus propiedades térmicas y resistencia a la humedad, hasta bloques ecológicos ideales para muros no estructurales. Además, su uso en paneles prefabricados facilitaría el transporte e instalación, así mismo su integración de sistemas de aislamiento térmico mejoraría la eficiencia energética de las edificaciones.

A continuación, se presentan diversas ideas en que podrían ser aplicadas en el sector de la construcción, destacando la innovación, y el potencial para transformar la industria de la construcción hacia un futuro más sostenible (Figuras 7 a 12).

Figura 8 – Revestimientos de paredes: utilizar el compuesto para revestimientos interiores y exteriores, aprovechando sus propiedades térmicas y resistencia a la humedad.

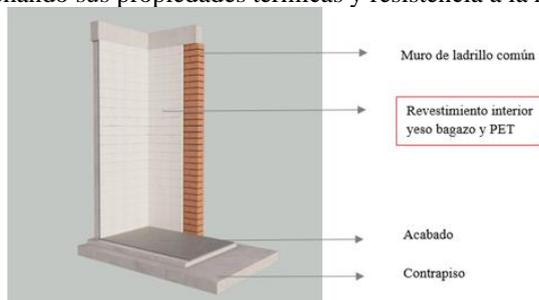


Figura 9 – Bloques de construcción: desarrollar bloques ecológicos ideales para muros no estructurales o divisiones interiores.

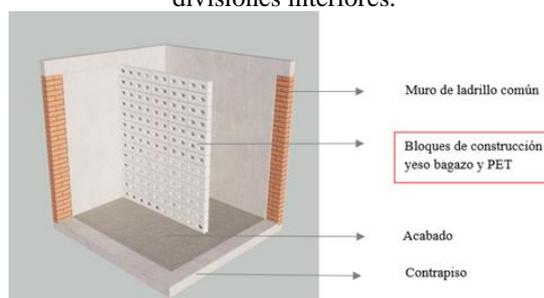


Figura 10 – Paneles prefabricados: crear paneles ligeros y eficientes térmicamente para facilitar el transporte e instalación.

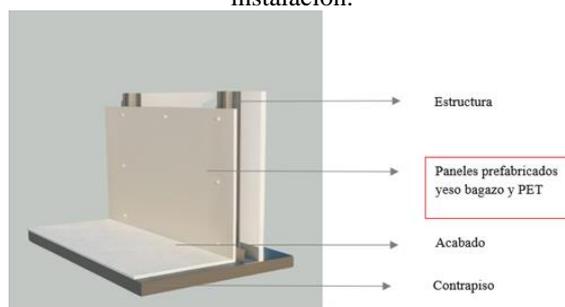


Figura 11 – Sistemas de aislamiento térmico: integrar el compuesto en sistemas de aislamiento térmico, mejorando la eficiencia energética.

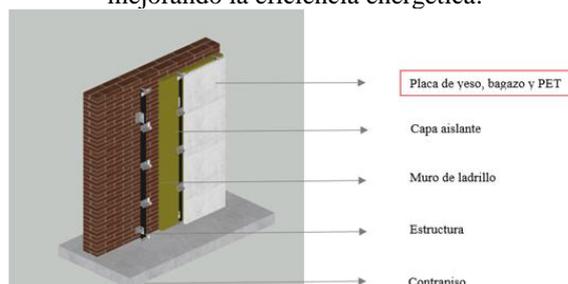


Figura 12 – Mobiliario urbano: fabricar mobiliario urbano utilizando este material para promover un enfoque sostenible.



V. Conclusiones

La investigación realizada ha tenido por finalidad el desarrollo de un compuesto a base de yeso, ceniza de bagazo de caña y PET, por lo que ha demostrado ser un avance significativo hacia la sostenibilidad en la construcción. Los resultados indicaron que la incorporación de residuos industriales mejoró las propiedades mecánicas del yeso, así mismo también ofrecieron una alternativa viable para reducir el impacto ambiental de la industria de la construcción.

El análisis de la consistencia y fluidez del compuesto mostró que pequeñas proporciones de aditivos mejoraron la trabajabilidad, a diferencia de su uso excesivo comprometió a sus propiedades. En los ensayos de mini-slump, con un 5% de residuos incrementó la consistencia en un 17.55%, mientras que al aumentar al 10% y 15%, se registró una disminución en la absorción, lo cual fue favorable para aplicaciones que requirieron durabilidad en condiciones húmedas.

Respecto a la densidad, se observó que, al incrementar el porcentaje de ceniza de bagazo y PET, también aumentó la densidad del compuesto. Este fenómeno se atribuyó a las características ligeras y fibrosas del bagazo, que incrementa el peso total sin necesariamente mejorar las propiedades mecánicas.

En el análisis de absorción de agua por inmersión, con un 5% de residuo se mantuvo una capacidad aceptable para retener un 19,63%. Al incorporar 10% y 15%, se registró una disminución en la absorción, favoreciendo aplicaciones que requirieron durabilidad en condiciones húmedas.

En la resistencia a compresión mostró que con pequeñas cantidades de residuos mejoraron significativamente la resistencia del material. Con un 5% de ceniza de bagazo, en particular, resultó un notable aumento de la resistencia a la compresión, beneficiando la cohesión del compuesto. Sin embargo, estas proporciones más allá de un límite específico, la efectividad disminuyó debido a interferencias en la estructura del material y cambios en sus propiedades físicas. En bajas cantidades, tanto el bagazo como el PET contribuyeron a una mejor distribución dentro del compuesto.

El comportamiento térmico analizado mediante la termografía infrarroja mostró que el yeso puro presentó un aumento significativo en temperatura del 144%, mientras que al incorporar un 10% de residuos, se observó una notable disminución en la temperatura.

Los compuestos desarrollados cumplieron con los estándares técnicos requeridos y presentaron características constructivas sostenibles. Según los resultados, si bien no lograron mantener una trabajabilidad óptima, demostraron suficiente fluidez y manejabilidad para ser considerados como candidatos viables para su uso en revestimientos y otros elementos constructivos.

La implementación de estos compuestos contribuiría significativamente a la reducción de las emisiones del sector de la construcción y fomentaría un desarrollo más responsable y respetuoso con el medio ambiente, promoviendo así una economía circular y minimizando el impacto ambiental.

Referencias

- [1]. Asociación Brasileña De La Industria Del Pet (Abipet 2023). Informe De Reciclaje De Pet 2023. Recuperado De [Http://Www.Abipet.Org.Br/Relatorio2023](http://www.abipet.org.br/relatorio2023).
- [2]. Asociación Brasileña De Normas Técnicas – Abnt. (2004). Nbr 10004: Residuos Sólidos – Clasificación. Río De Janeiro, 2004.
- [3]. Asociación Brasileña De Normas Técnicas – Abnt. (2005). Nbr 13278: Mortero Para Colocación Y Revestimiento De Paredes Y Techos – Determinación De La Densidad De Masa Y Contenido De Aire Incorporado. Río De Janeiro, 2005.
- [4]. Asociación Brasileña De Normas Técnicas – Abnt. (2016). Nbr 6458: Granos De Gravilla Retenidos En El Tamiz De Apertura De 4,8 Mm – Determinación De La Masa Específica, De La Masa Específica Aparente Y De La Absorción De Agua. Río De Janeiro, 2016.
- [5]. Asociación Brasileña De Normas Técnicas – Abnt. (2017). Nbr 13207-3: Yeso Para Construcción Civil. Parte 3: Determinación De Las Propiedades Mecánicas. Río De Janeiro, 2023.
- [6]. And Related Disorders. 2009;7(3):221-230.
- [7]. Asociación Brasileña De Normas Técnicas – Abnt. (2021). Nbr 14715-2: Placas De Yeso Para Drywall – Parte 2: Métodos De Ensayo. Río De Janeiro, 2021.
- [8]. Asociación Brasileña De Normas Técnicas – Abnt. (2021). Nbr 16916: Agregado Fino – Determinación De La Densidad Y De La Absorción De Agua. Río De Janeiro, 2021.
- [9]. Asociación Brasileña De Normas Técnicas – Abnt. (2022). Nbr 17054: Agregados – Determinación De La Composición Granulométrica - Método De Ensayo. Río De Janeiro, 2022.
- [10]. Asociación Brasileña De Normas Técnicas – Abnt. (2022). Nbr 6502: Suelos Y Rocas – Terminología. Río De Janeiro, 2022.
- [11]. Envaselia (2023). Tereftalato De Polietileno: ¿Qué Es?, Usos Y Propiedades. Recuperado De [Https://Www.Envaselia.Com/Blog/Tereftalato-De-Polietileno-Id12.Htm](https://www.ensavelia.com/blog/tereftalato-de-polietileno-id12.htm).
- [12]. (Eurogypsum 2020). Recycling Gypsum. Recuperado De [Https://Www.Eurogypsum.Org/Recycling-Gypsum](https://www.eurogypsum.org/recycling-gypsum).
- [13]. Flir. (2019). Manual Del Usuario De La Serie Flir Ex. Sistemas Flir. 58p.
- [14]. González, A., Pérez, J., & Ramírez, L. (2020). Caracterización Físicoquímica De Concretos Con Contenidos Del 30% De Ceniza Volante. Recuperado De [Https://Imt.Mx/Archivos/Publicaciones/Publicaciontecnica/Pt618.Pdf](https://imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt618.pdf).
- [15]. Instituto De Economía Agrícola (Iea 2023). La Producción Paulista De Caña De Azúcar Debe Subir Para 78,5 T Por Hectárea En 2023. Recuperado De Revista Cultivar [Https://Revistacultivar-Es.Com/Noticias/Producao-Paulista-De-Cana-De-Acucar-Deve-Subir-Para-785-T-Por-Hectare-Em-2023-Estima-Iea](https://revistacultivar-es.com/noticias/producao-paulista-de-cana-de-acucar-deve-subir-para-785-t-por-hectare-em-2023-estima-iea).
- [16]. Kantro, DI (1980). Influencia De Los Aditivos Reductores De Agua En Las Propiedades De La Pasta De Cemento: Una Prueba De Asentamiento En Miniatura. Cemento, Concreto Y Agregados, V.2, N.2, 1980.
- [17]. Mayor P., Bustamante, R., Rangel, C., Y Hernández-Olivares, F. (2008). Propiedades Térmicas, Acústicas Y Mecánicas De Placas De Morteros Yeso-Caucho. Recuperado De [Https://Oa.Upm.Es/4611/1/Inve_Mem_2008_61846.Pdf](https://oa.upm.es/4611/1/Inve_Mem_2008_61846.pdf).
- [18]. Ministerio Para La Transición Ecológica Y El Reto Demográfico (2023). El Sector De La Construcción Civil Y Su Impacto En Las Emisiones De Co2: Desafíos Y Soluciones Sostenibles. Recuperado De [Https://Www.Miteco.Gob.Es/Es/Cambio-Climatico/](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/).
- [19]. Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático (Ippc 2021). El Cambio Climático 2021: La Base Científica. Informe De Evaluación Del Ippc, Grupo De Trabajo I. Recuperado De [Https://Www.Ippc.Ch/Report/Ar6/Wg1/](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/).
- [20]. Sabrae (2023). Reciclaje De Garrafas Pet En Construcción Civil. Recuperado De [Https://Sebrae.Com.Br/Sites/Portalsebrae/Artigos/Reciclagem-De-Garrafas-Pet-Na-Construcao-Civil,B42904406b622810vgnvcm100000d701210arcrd](https://sebrae.com.br/sites/portalsebrae/artigos/reciclagem-de-garrafas-pet-na-construcao-civil,B42904406b622810vgnvcm100000d701210arcrd).