








Reducción del Impacto Ambiental con Desechos Industriales en Pavimentos por Análisis del California Bearing Ratio

Torres-Hoyer, Roberto^{1,2*} ; Peña, Jackeline¹ ; Millalén, Fernanda¹ ; Picón, Ricardo^{1,3} ;
Barreto, Wilmer^{1,3} ; Peña, Oswaldo^{1,4} ; Torres-Hoyer, Jesús^{1,2} 

¹Universidad Católica de Temuco, Departamento de Obras Civiles y Geología, Temuco, Chile

²Universidad de Los Andes, Grupo de Investigación de Geología Aplicada, GIGA, Mérida, Venezuela

³Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Departamento de Estructuras, Barquisimeto, Venezuela

⁴Universidad Politécnica Territorial del Estado Trujillo, Facultad de Ingeniería, Trujillo, Venezuela

Resumen: La sub-base del pavimento requiere materiales adecuados para el soporte necesario. Tradicionalmente, se ha utilizado material de préstamo, lo que genera un impacto ambiental. Este estudio analizó el potencial de reutilizar cenizas de desecho industrial depositadas en vertederos. Se realizaron ensayos de laboratorio mezclando el suelo con diferentes proporciones de cenizas. Se determinó la relación entre humedad y peso seco del suelo, se realizó el ensayo C.B.R. (California Bearing Ratio) y se calculó el espesor de pavimentos, con un mismo espesor de sub-base. A medida que aumenta el porcentaje de cenizas, la calidad del suelo disminuye, pero sigue cumpliendo los requisitos para ser utilizado como sub-base. Se recomienda considerar las cenizas de desecho industrial como un material de reciclaje viable en la construcción de pavimentos, lo que reduciría el impacto ambiental asociado a su disposición en vertederos.

Palabras clave: Economía Circular, Reciclado, Pavimentos, Base, Proctor

Environmental Impact Reduction with Industrial Waste in Pavements by California Bearing Ratio Analysis

Abstract: The pavement sub-base requires suitable materials for the necessary support. Traditionally, borrow material has been used, this generates environmental impact. This study analyzed the potential for reusing industrial waste ashes deposited in landfills. Laboratory tests were conducted by mixing the soil with different proportions of ashes. The relationship between soil moisture and dry weight was determined, and the C.B.R. (California Bearing Ratio) test was performed. The pavement thickness was calculated, keeping the same sub-base thickness. As the percentage of ashes increased, the soil quality decreased, but it still met the requirements for use as a sub-base. It is recommended to consider industrial waste ashes as a viable recycling material in pavement construction, which would reduce the environmental impact associated with their disposal in landfills.

Keywords: Circular Economy, Recycling, Pavements, Base, Proctor

1. INTRODUCCIÓN

Según la Organización de Naciones Unidas de acuerdo a la exposición de motivo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (O.D.S.), se tiene que la mitad de la humanidad, 3500 millones de personas, vive hoy en día en las ciudades y se prevé que esta cifra aumentará a 5000 millones para el año 2030.

Por otra parte, se espera un 95 % de expansión de los terrenos urbanos en las próximas décadas en el mundo en desarrollo.

Actualmente, 883 millones de personas viven en barrios marginales y la mayoría se encuentran en Asia oriental y sudoriental (Ganesan y Rajendra, 2018).

Parte esencial es la rápida urbanización que está ejerciendo presión sobre los suministros de agua dulce, aguas residuales, el entorno de vida y la salud pública. De aquí al 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, es preponderante, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo (Chandra et al., 2019). De igual manera, se debería proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros,

*rtorres@uct.cl

Recibido: 19/09/2023

Aceptado: 28/03/2024

Publicado en línea: 31/05/2024

10.33333/tp.vol53n2.04

CC 4.0

asequibles, accesibles y sostenibles para todos para mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, y prestar especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y adultos mayores. También es cierto que existe una demanda cada vez mayor de recursos naturales escasos, lo cual representa uno de los principales desafíos que tiene la industria global de pavimentos asfálticos en la construcción y mantenimiento de los mismos a nivel mundial (Lingyun et al., 2022).

El proceso de diseño, junto con los materiales, son parte esencial para la duración de un pavimento. Resulta fundamental mantener los caminos pavimentados en buenas condiciones, acordes al tránsito vehicular y sin complicaciones para los conductores. Cuando un camino no está en óptimas condiciones para ser transitado, se generan retrasos en las rutas o accidentes vehiculares, aumentando la polución y generación de gases de efecto invernadero, lo cual provoca una mala calidad de vida para las personas que viven y transitan por el lugar. Pero también es cierto que es importante disminuir el impacto del ser humano, tanto en sus actividades del día a día, como en la construcción para beneficio propio, que genera al medio ambiente.

Se comprende que, con el tiempo y el tránsito diario en un pavimento, se generan considerables daños. La falla más común es la formación de baches y grietas en el camino, pequeños desniveles producidos por hundimiento o pérdida de la capa superficial, lo que se debe principalmente al descenso del suelo bajo el pavimento, que generalmente se debe a la mala compactación de las capas que se encuentran bajo la capa de asfalto, o bien a la calidad del material granular empleado para soportar el pavimento, donde a pesar de ser incómodo para el conductor pasar por uno de ellos, provoca que el pavimento siga en descenso si no es arreglado.

Existen normativas que regulan las propiedades mecánicas que debe tener el suelo para ser utilizado como sub-base como las del MOP (2008), la presente investigación se enfocará en desarrollar mejoras a un material granular que se pretende utilizar para este fin, como lo indica Pradeep et al. (2018) que propone el uso de materiales reciclados en diversas capas del pavimento, subrayando su eficiencia en la gestión de residuos, reducción de costos y demanda de materiales convencionales, así como, en los Emiratos Árabes Unidos (EAU), están evaluando la reutilización de estos materiales en lugar de arrojarlos a vertederos (Abu-Abdo y Jung, 2019).

La ceniza es un material generado por las empresas forestales, luego de la combustión de sus calderas, se forma una ceniza oscura y fina, la cual es, en su mayoría, desechada en vertederos, En la actualidad, se han realizado estudios a la ceniza como aditivo en hormigones (Barra, 2019) donde se ha observado que la ceniza presenta expansión al hidratarse, lo que podría favorecer su uso como posible material de mejoramiento de suelos, y así aumentar su resistencia, con la compactación, y generar que el pavimento tenga mayor vida útil.

Para mejorar el suelo bajo un pavimento (sub-base), se debe lograr que éste cumpla con lo establecido en el manual de carreteras de Chile, MOP (2008). Para esto, se mezcló un suelo control obtenido de un pozo lastre de la comuna de Pitrufquén, con un material de desecho (cenizas) de la Forestal Andes. La ceniza se caracteriza por su contenido de cal y alto contenido de sílice, que normalmente se utilizan para estabilizar el suelo.

2. ANTECEDENTES

Santos et al. (2012) define que la ceniza volante tiene el potencial de ser utilizada de manera beneficiosa en la construcción de carreteras, incluyendo terraplenes y capas estructurales del pavimento, como capas base/sub-base, hombros, concreto asfáltico y concreto de cemento Portland, con el fin de crear una infraestructura más duradera y sostenible. El artículo describe un estudio sobre la optimización de la mezcla de suelo y ceniza volante para la construcción de terraplenes en carreteras. La ceniza volante fue recolectada de una planta de energía en Mississippi. Se realizaron pruebas en suelos y mezclas de ceniza volante y suelo preparadas con el contenido óptimo de agua, incluyendo compactación, permeabilidad y resistencia a la compresión no confinada (qu). La adición de ceniza volante al suelo resultó en aumentos apreciables en la qu del suelo inorgánico. Después de 14 días de curado, la qu de las muestras compactadas a partir de las mezclas de ceniza volante/suelo osciló entre 900 kN/m² y 9300 kN/m², mientras que el suelo solo tenía una carga última de 1 a 200 kN/m². Se discutió el efecto de la relación de mezcla y el contenido de agua de compactación en las propiedades geotécnicas de las mezclas de ceniza volante/suelo.

Huan et al. (2022), concluyen que, entre las seis técnicas de gestión de residuos plásticos analizadas (vertederos, reciclaje, pirólisis, licuefacción, construcción de carreteras y producción de alquitrán y concreto), la construcción de carreteras y la producción de alquitrán y concreto son las dos estrategias más efectivas. Esto se debe a beneficios significativos como la facilidad de localización, la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y el aumento de la durabilidad y sostenibilidad de los materiales fabricados, las estructuras y las carreteras.

Yaghoubi et al. (2017) mezcló áridos con plásticos de polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE) y realizó una variedad de pruebas geotécnicas, como la relación de carga de California (CBR).

Elshaboury et al. (2021) discute sobre el tratamiento de los residuos de construcción y demolición, y examina sistemáticamente la literatura de investigación sobre la gestión de residuos utilizando un enfoque de mapeo científico. El estudio utiliza análisis bibliométricos y cientométricos para identificar las revistas, autores, publicaciones, palabras clave y países más relevantes en este campo y determinar temas emergentes de investigación como estimación y cuantificación, análisis y evaluación integral, impactos ambientales, pruebas de rendimiento y comportamiento, plan de gestión, prácticas de desvío y tecnologías emergentes. Para analizar las brechas en la investigación y proponer un marco

para futuros estudios, se realizó un análisis cualitativo en profundidad. Este estudio sirve como una referencia multidisciplinaria para investigadores y profesionales, ayudándoles a relacionar las áreas de estudio actuales con las tendencias futuras al presentar una visión general de las últimas investigaciones en este campo.

Ganasen et al. (2023) destaca la importancia de encontrar formas innovadoras de utilizar los residuos agrícolas, no solo como sustitutos de materiales convencionales, sino también como materiales de refuerzo.

Esto muestra el potencial para transformar los desechos en recursos útiles, lo que puede conducir a la creación de soluciones más sostenibles en la industria de la construcción. Este enfoque nos muestra aspectos prometedores para abordar los desafíos actuales de sostenibilidad y gestión de residuos de igual forma pueden contribuir a la reducción de residuos, la conservación de recursos naturales y la creación de infraestructuras más sostenibles en el futuro.

3. METODOLOGÍA

En este apartado, se da a conocer la metodología empleada que consiste en la manipulación de una (o más) variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o causa que produce una situación o acontecimiento particular. El experimento provocado por el investigador, le permite introducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas (Arena, 1993). De acuerdo con Arena (1993), se le asignó a la ceniza como el parámetro variable dentro de la investigación y se verificaron los resultados con relación al valor control, que sería suelo sin ceniza ya que no hay estudios que comprueben que la ceniza de forestal ayuda al mejoramiento de suelo y los resultados eran inciertos.

Es importante recalcar que cada país tiene normas y especificaciones para un material a utilizar en la construcción de pavimentos. Cualquier material reciclado que se utilice para fines de construcción debe someterse a pruebas de propiedades similares a las del material convencional (Pradeep et al., 2018).

Por consiguiente, para investigar el potencial beneficio de la ceniza en la mejora del suelo, se realizó el ensayo de laboratorio California Bearing Ratio (C.B.R.) (índice de soporte californiano), que permite medir la capacidad de soporte del suelo. La variable de estudio fue el porcentaje de ceniza incorporado al suelo, pero para ello se debe establecer el suelo control en conformidad a las normativas ASTM, al INN (2008) y INN (1981) pertinentes, entre las cuales se pueden mencionar:

ASTM D2487: norma que establece el procedimiento para la clasificación de suelos utilizando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

ASTM D3282: Esta norma proporciona pautas para la clasificación de suelos y mezclas de suelo-árido utilizados en la construcción de carreteras.

ASTM D4318: norma que describe los métodos de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.

ASTM D6913: Esta norma detalla el método de análisis por tamizado para determinar la distribución de tamaños de partículas de suelos.

ASTM D1883: La norma que explica detalladamente el ensayo de California Bearing Ratio, para suelos compactados.

ASTM D1557: Métodos estándar para pruebas de laboratorio en compactación de suelo usando el método modificado de Effort (56,000 ft-lbf/ft³ or 2,700 kN-m/m³)

El análisis comenzó con la definición de porcentaje de ceniza a utilizar en las muestras de ensayo, y así se estableció una varianza entre puntos de 0 %, 2 % 4 % 6 % y 8 %, lo cual facilitó su análisis. Posteriormente, se mezclaron las muestras y se llevaron a cabo ensayos de laboratorio de proctor y California Bearing Ratio (C.B.R.) Con los valores obtenidos, se procede a constatar los datos obtenidos, así como el impacto de los resultados y lo que éstos representan para la investigación.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En primer lugar, se inicia con la clasificación de la Base o suelo control por medio de la clasificación según la SUCS y la AASHTO descritas en MOP (2008), donde se utilizaron los resultados obtenidos en la granulometría y en los límites de consistencia.

De acuerdo con la granulometría (Tabla 1), se observó que el material que pasa por el tamiz N° 200 es inferior a 35 %, por lo tanto, con ese valor se define granular y de acuerdo con Clasificación De Suelos AASHTO, y en función del IG de 0 en función de lo obtenido en el laboratorio del como LL clasificando el suelo control como un A-1-a (0).

Tabla 1. Granulometría Suelo Control

Tamiz	mm	Retenido (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pasa
3"	80	0	0.0	0.0	100.0
2 1/2 "	63	0	0.0	0.0	100.0
2"	50	0	0.0	0.0	100.0
1 1/2 "	40	0	0.0	0.0	100.0
1"	25	1 617	7.6	7.6	92.4
3/4"	20	978	4.6	12.3	87.7
3/8"	10	2 929	13.9	26.1	73.9
N° 4	5	2 428	11.5	37.6	62.4
N° 10	2	2 642	12.5	50.1	49.9
N° 40	0.5	8 309	39.3	89.4	10.6
N° 200	0.08	1 881	8.9	98.3	1.7
Base		359	1.7	100.0	0
Total		21 143	100.0		

Luego se decidió realizar la clasificación por el método SUCS. En primer lugar, el resultado de la granulometría, tenemos que se observa el porcentaje de material que pasa por el tamiz N° 200 es inferior a 50 % por lo tanto se trata de un suelo grueso, por el tamiz N° 4 pasa una cantidad superior al 50 %, por ende, se trata de arenas, y como la parte fina del material es inferior a 5 % se debe calcular los coeficientes de acuerdo con la Tabla

2, donde los valores de d_{10} , d_{30} y d_{60} se calcularon por la interpolación de los valores en la Tabla 1 y se obtiene:

Tabla 2. Clasificación S.U.C.S. Coeficientes

D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	Cu	Cc
0.47	1.24	4.43	9.38	0.74

Con los valores se clasifica el suelo según el método SUCS la clasificación del suelo es SP (Arena pobremente gradada).

Granulometría

4.1 Ensayo de Proctor Modificado ASTM D1557

Se lo utiliza para obtener la densidad máxima seca y el contenido de humedad óptimo de un suelo en condiciones de compactación controladas. En la Tabla 3 se tienen los valores calculados al realizar el ensayo proctor modificado a las muestras de suelo con y sin cenizas (en función a su porcentaje), la humedad y densidad.

Tabla 3. Resultados ensayo proctor modificado

Cenizas en el Suelo (%)	Humedad óptima (%)	Densidad Maxima Seca (g/cm^3)
0	8.0	2.163
2	9.1	2.132
4	9.3	2.111
6	9.5	2.067
8	9.7	2.050

4.2 Ensayo California Bearing Ratio (C.B.R.) ASTM D1883

Para realizar el ensayo California Bearing Ratio (C.B.R.) se utilizó el Manual de carreteras de Chile Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control del MOP (2008) y la norma NCh1852 Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio según INN (1981). En la Figura 1 se pueden observar las gráficas correspondientes al ensayo del California Bearing Ratio (C.B.R.) de un suelo control.

Así mismo, en las Figuras 2, 3, 4 y 5 se pueden apreciar las gráficas del California Bearing Ratio (C.B.R.) con porcentaje adicionado del 2 %, 4 %, 6 % y 8 % respectivamente.

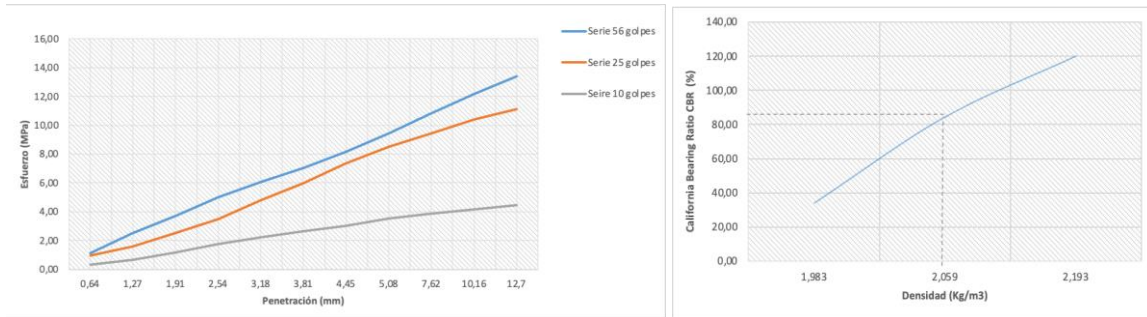


Figura 1. Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (gris) 25 golpes (naranja) 56 golpes (azul) y gráfica de California Bearing Ratio C.B.R. suelo sin cenizas

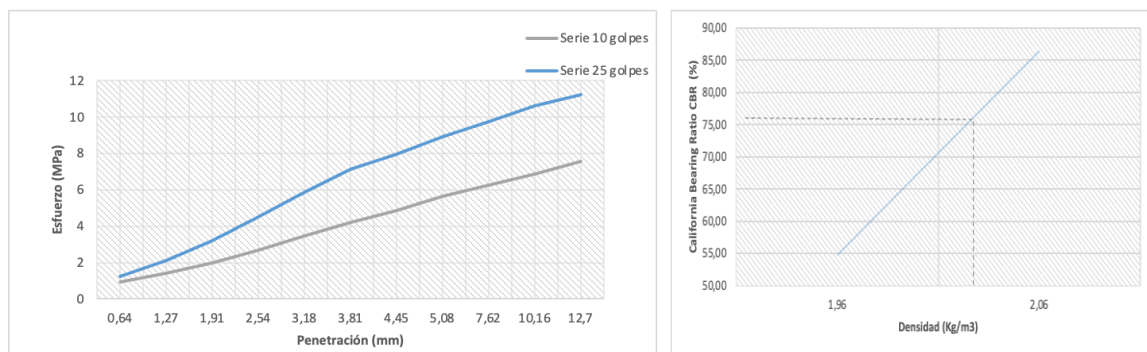


Figura 2. Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (verde) 25 golpes (azul) y gráfica de California Bearing Ratio C.B.R. suelo 2 % cenizas. En este caso, la serie de 56 golpes presenta un comportamiento anómalo y no se graficó, ya que la densidad máxima seca compactada al 95 % se encuentra entre la serie de 10 a 25 golpes

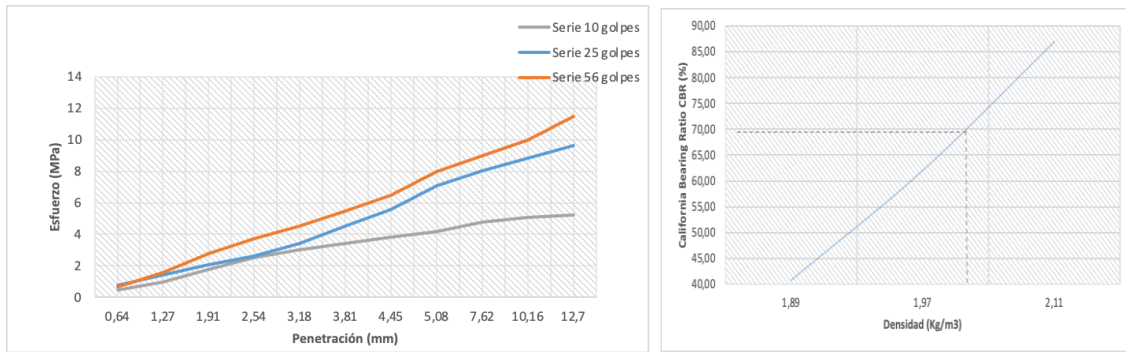


Figura 3. Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (verde) 25 golpes (azul) 56 golpes (naranja) y gráfica de California Bearing Ratio C.B.R. suelo 4 % cenizas

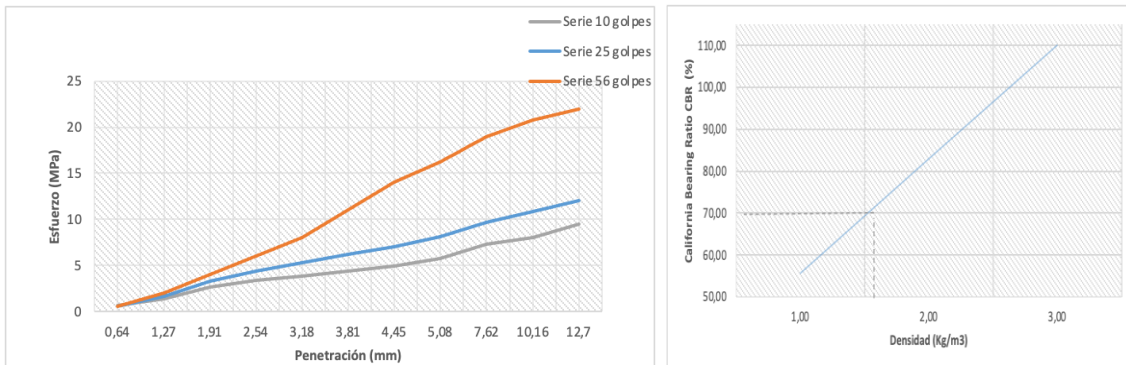


Figura 4. Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (verde) 25 golpes (azul) 56 golpes (naranja) y gráfica de California Bearing Ratio C.B.R. suelo 6 % cenizas

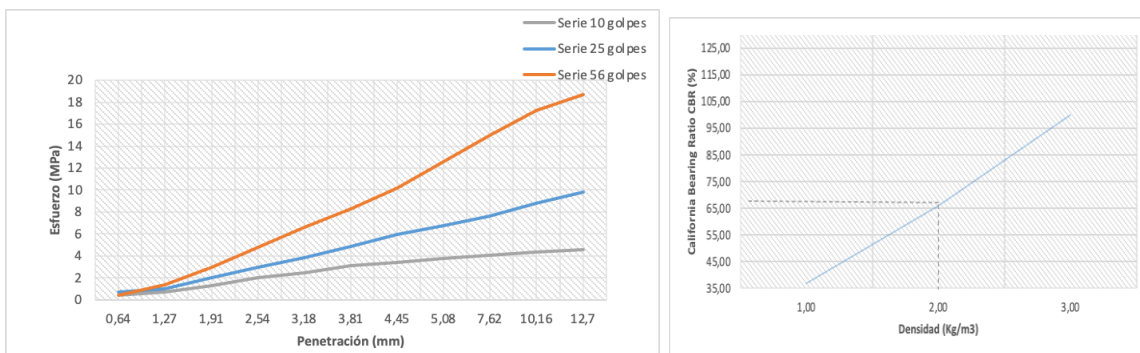


Figura 5. Gráfica esfuerzo/penetración, 10 golpes (verde) 25 golpes (azul) 56 golpes (naranja) y gráfica CBR suelo 8 % cenizas

Con los resultados del California Bearing Ratio (C.B.R.) se realizó una gráfica California Bearing Ratio (C.B.R.)/porcentaje de ceniza, como se muestra en la Figura 6 donde se observa la tendencia que tuvo el suelo, desde el punto control sin cenizas hasta tener un 8 % de estas. El resultado del ensayo de California Bearing Ratio (C.B.R.) del suelo fue disminuyendo cada vez que se le adiciona ceniza hasta un punto de un posible equilibrio, esto destaca que el material seguía cumpliendo con las solicitudes exigidas por la norma para ser utilizado como sub-base, con la particularidad que se establece un punto de inflexión asociada a la cantidad de agua que puede absorber las cenizas, lo cual genera debate sobre la calidad o no de la sub-base.

Con las ecuaciones básicas de diseño establecidas en el Manual de carreteras de Chile, Volumen 8, se pudo calcular los espesores de pavimento rígido (MOP, 2008), en función de los resultados de California Bearing Ratio (C.B.R.) y con las demás variables independientes iguales,

considerando una longitud de losa de 4 metros y un mismo espesor de base de 240 mm.

Para analizar el impacto de la disminución del (C.B.R.) en función a la adición de cenizas, se presenta la Tabla 4.

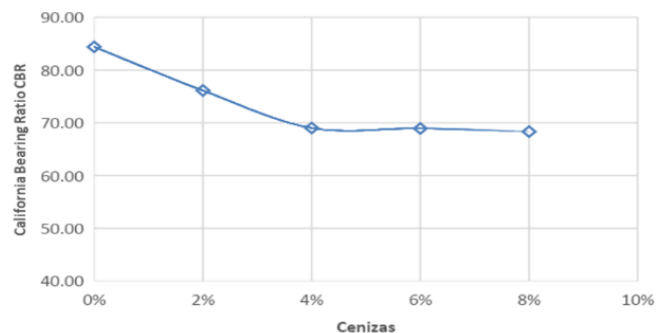


Figura 6. Relación California Bearing Ratio C.B.R. / % de cenizas

La variación del porcentaje de California Bearing Ratio (C.B.R.) de un ensayo a otro fue representativa porcentualmente, pero al momento de analizar la variación de los espesores de pavimentos da una diferencia de 2 mm, tal como se muestra en la Tabla 4. Por otra parte, la ceniza no aportó a la resistencia, lo que la convierte en un material inerte interesante para ser reutilizado como parte del árido. De acuerdo con los resultados, con el porcentaje de cenizas 2 %, 4 %, 6 % y 8 % el suelo sigue cumpliendo con lo establecido en el Manual de Carreteras de Chile, que exige un California Bearing Ratio (C.B.R.) superior o igual a 40 %, por lo tanto, es un material que se puede utilizar, como árido en capas base/subbase, tal como lo señala Yaghoubi et al. (2017).

Tabla 4. Resultados ensayo California Bearing Ratio (C.B.R.) y espesor de Pavimento

Cenizas (%)	Humedad óptima (%)	Expansión (%)	Densidad máxima seca (Proctor 95%) (Kg/m ³)	CBR (%)	Espesor pavimento (mm)
0	8.0	0.0	2.059	84	204
2	9.1	0.0	2.026	76	205
4	9.3	0.0	2.006	69	206
6	9.5	0.0	1.963	69	206
8	9.7	0.0	1.946	68	206

5. CONCLUSIONES

Este estudio destaca la importancia de la economía circular en el campo de la construcción de pavimentos. La investigación demuestra que la utilización de cenizas de desecho industrial en lugar de desecho en vertederos puede contribuir a la economía circular.

Al aprovechar las cenizas de desecho industrial y utilizarlas como material en la construcción de pavimentos, se logra cerrar el ciclo de vida de estos residuos. En lugar de considerarlos como un problema de disposición y generadores de costos, se les da un nuevo propósito y se les agrega valor al convertirlos en un recurso útil, ya que la densidad máxima y el valor de California Bearing Ratio (C.B.R.) disminuyeron conforme se aumentaba el porcentaje de cenizas, pero la gráfica muestra que, la adición parece tener un efecto menor y se estabiliza sobre lo exigido por la normativa vigente.

El estudio muestra el potencial para transformar los desechos en recursos, lo que puede conducir a la creación de soluciones más sostenibles en la industria de la construcción. Este enfoque muestra aspectos prometedores para abordar los desafíos actuales de sostenibilidad y gestión de residuos. De esta forma se contribuye a la reducción de residuos, la conservación de recursos naturales y la creación de infraestructuras más sostenibles en el futuro, cumpliendo la normativa vigente y las solicitudes necesarias para el uso correcto de la vialidad a diseñar.

Se resalta, además, la posibilidad de reciclar desechos industriales, en particular cenizas en la construcción de pavimentos. Si bien el Manual de carreteras de Chile no establece valores específicos para el ensayo Proctor, se tomó precaución para asegurar que el suelo, con sus distintos contenidos de humedad, formara la típica curva parabólica característica del ensayo.

Al utilizar las cenizas como un sustituto de los materiales tradicionales, se puede reducir la dependencia de recursos naturales limitados y costosos, como los agregados y el cemento. Esto puede tener un impacto positivo en los costos de construcción, al tiempo que se promueve la sostenibilidad y se reduce el impacto ambiental.

Es importante destacar que la ceniza, al ser un material aparentemente fino, no se mezcló adecuadamente con el agua. Como resultado, el tiempo necesario para agitar la muestra fue mayor en comparación con el suelo sin cenizas. Durante los ensayos, se observó que el suelo presentaba un grado de sequedad inicial, pero a medida que se incrementa la cantidad de agua, se saturaba rápidamente. En algunos casos, fue necesario realizar más de 5 muestras, ya que solo con un pequeño incremento en el contenido de agua, la muestra lograba la saturación. Por lo tanto, se trabajó con valores de humedad más precisos, utilizando decimales en lugar de números enteros, punto a tener en consideración para nuevos estudios y análisis en campo.

También se observó que, al golpear el suelo mezclado con ceniza, expulsaba agua debajo del molde de Proctor, incluso cuando la muestra no estaba saturada. Esto provocó que la ceniza se compactara fácilmente, pero debe ser motivo de nuevos estudios, analizar la relación de vacíos presente en suelos con cenizas de éste tipo.

Sin embargo, se esperaba que a medida que aumentaba el porcentaje de cenizas, el contenido de humedad también aumentara. Esto no ocurrió, ya que la ceniza no se comportó como un "suelo fino" y absorbía agua, que fácilmente la expulsaba, por lo que no presentaba límite líquido. Los resultados mostraron que la densidad disminuye gradualmente, lo que indica que la ceniza generaba un suelo con mayor relación de vacíos y una buena capacidad de drenaje, habilidades importantes para un suelo de sub-base.

Los moldes utilizados en los ensayos se mantuvieron prácticamente iguales antes y después de ser sumergidos en agua. De esto se deduce que la compactación de los moldes fue adecuada y el suelo resultante tiene capacidad de drenaje.

6. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en la utilización de cenizas de desecho industrial en la construcción de pavimentos. Es importante seguir explorando y refinando estos métodos de reciclaje de materiales para lograr una infraestructura más sostenible y

reducir el impacto ambiental de la industria, de igual manera se debe ahondar respecto al comportamiento de la ceniza ante la presencia de agua.

Se recomienda llevar a cabo los ensayos realizados en este estudio para determinar hasta qué porcentaje de ceniza se mantiene el valor del California Bearing Ratio (C.B.R.) dentro del límite establecido por las Normativas Vigentes. Esto permitirá verificar si la mezcla de ceniza con el suelo sigue siendo un material adecuado para ser utilizado como sub-base en pavimentos. Además, se invita a continuar el análisis del suelo sin ceniza y con ceniza mediante otros ensayos especificados en los Manuales de Carreteras, con el fin de confirmar la idoneidad tanto del suelo como de la ceniza como materiales reciclados en sub-bases u otras áreas de la ingeniería.

Además, se recomienda llevar a cabo un estudio sobre el costo asociado con el reciclado de cenizas. Al mezclar la ceniza con el suelo, se requeriría una menor cantidad de material granular, y la ceniza es un material abundante que se proporciona de forma gratuita, al menos por la empresa forestal Andes. Por lo tanto, se sugiere analizar esta situación para evaluar la viabilidad económica de utilizar cenizas como material reciclado en la construcción de sub-bases.

Es necesario saber que cada diseño de pavimento es único y dependerá de la estructura completa, que incluye a la rasante, y que no se puede recomendar un porcentaje único de cenizas. Es cierto que el CBR disminuye a medida que aumenta el porcentaje de cenizas por lo que el porcentaje a utilizar, dependerá del criterio del diseñador y de cuanto está dispuesto a asumir en la disminución del CBR de la Base o Subbase.

Estas recomendaciones buscan promover una mayor investigación y aplicación del reciclado de desechos industriales, específicamente la ceniza, en la ingeniería civil. Al continuar explorando las propiedades y beneficios de estos materiales reciclados, se puede avanzar hacia prácticas más sostenibles y amigables con el medio ambiente en la construcción de infraestructuras viales y en otros proyectos de ingeniería.

Se recomienda realizar una modelación con elementos finitos como la implementada por Chaparro y Pradena (2019), la cual analiza el estado tensional de losas cortas bajo solicitaciones de pisos industriales para generar recomendaciones de diseño, y corroborar el diseño de los espesores en función de las solicitudes por el paso vehicular. Por otro lado, se debe analizar el impacto que tiene la ceniza a la granulometría, ya que, si bien cumple la norma, es importante analizar la variabilidad de los porcentajes asignados al comportamiento de la Base o Subbase.

REFERENCIAS

- Abu-Abdo, A. & Jung, S. (2019). Investigation of reinforcing flexible pavements with waste plastic fibers in Ras Al Khaimah, UAE. *Road Materials and Pavement Design*, 21(6), 1753 – 1762. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1566086>
- Arena, Z. (1993). *Introducción a la metodología de la investigación*. México DF, México. Editorial Cal y Arena.
- Barra, D. (2019). *Estudio de la resistencia mecánica de diferentes mezclas de hormigón H25 con adición de un material de reemplazo obtenido de un desecho de biomasa*. [Proyecto de Título Universidad Católica de Temuco].
- Chandra, S., Ravi, A., Bindhu-Abraham, K. & John, A. (2019). Utilization of Industrial Wastes in Road Construction: A Review; *International Journal of Emerging Technologies and Innovate Research*, 6(3), 197-201. <https://www.jetir.org/papers/JETIR1903133.pdf>
- Chaparro, B. & Pradena, M. (2019). Análisis estructural de pavimentos de hormigón: Losas cortas en pisos industriales. *Revista Politécnica*, 43(2), 45–50. <https://doi.org/10.33333/rp.vol43n2.989>
- Elshaboury, N., Al-Sakkaf, A., Mohammed, E. & Alfalah, G. (2021). Construction and Demolition Waste Management Research: A Science Mapping Analysis. *Resources Conservation and Recycling* 173(11):105745 <https://doi.org/10.3390/ijerph19084496>
- Ganesan, A. & Rajendra, S. (2018). Recycling of industrial wastes for road construction: A review. *Construction and Building Materials*, 172, 358-371.
- Ganasen, N., Bahrami, A. & Loganathan, K. (2023) A Scientometric Analysis Review on Agricultural Wastes Used as Building Materials. *Buildings*, 13, 426. <https://doi.org/10.3390/buildings13020426>
- Huan, S., Wang, H., Ahmad, W., Ahmad, A., Ivanovich, N., Mustafa, A., Farouk, A. & Mehmood, I. (2022). Plastic Waste Management Strategies and Their Environmental Aspects: A Scientometric Analysis and Comprehensive. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19(8), 4556. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>
- Instituto Nacional de Normalización. (1981). *Mecánica de suelos – Determinación de la razón de soporte de suelos compactados en laboratorio*. NCh 1852. Chile
- Instituto Nacional de Normalización. (2008). *Mecánica de suelos – Relaciones humedad/densidad –Parte 2: Métodos de compactación con pisón de 4,5 kg y 457 mm de caída*. NCh 1543/2. Chile
- Lingyun, Y., Zhengwu, L., Zhanping, Y., Dongdong, G., Xu, Y, Fu Xu, Mohammad, H. & Aboelkasim, D., (2022). Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials. *Journal of Traffic and*

Transportation Engineering, 9(5), 742-764,
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.07.002>

- MOP. (2008). *Manual de Carreteras, Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*. Volumen N°8. Chile.
- Pradeep, G., Pawan, K., Ajay, J., Rahul, A. & Harshwardhan, S. (2018). Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. *Construction and Building Materials*, 180, 239 – 253.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.067>.
- Santos, F., Li, L., Li, Y., Shao, W., Zhao, Q. & Amini, F. (2012) Evaluation of Fly Ash and Soil Mixtures for Use in Highway Embankments. *GeoCongress*.
<https://doi.org/10.1061/9780784412121.376>
- Yaghoubi, E., Arulrajah, A., Wong, C. & Horpibulsuk, S. (2017) Stiffness Properties of Recycled Concrete Aggregate with Polyethylene Plastic Granules in Unbound Pavement Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(4)
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001821](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001821)



Millalén, Fernanda, Ingeniera Civil en Obras Civiles Universidad Católica de Temuco.



Picón, Ricardo, Ingeniero Civil Instituto Universitario Politécnico de las Fuerzas Armadas Nacionales, Caracas, Venezuela. Doctor en Ciencias de Aplicadas, Académico de las Universidades Lisandro Alvarado (Venezuela) Profesor Titular y Universidad Católica de Temuco (Chile) Profesor Asociado.

BIOGRAFÍAS

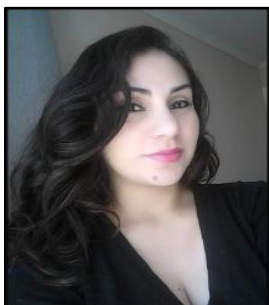


Torres-Hoyer, Roberto, Ingeniero Geólogo ULA - Venezuela y M.Sc. en Ingeniería Vial, ULA - Venezuela Profesor Adjunto Universidad Católica de Temuco, Director de Relaciones Internacionales y Jefe de Carrera de Ingeniería Civil en Obras Civiles UCT-Chile y Director de Escuela

de Ingeniería Geológica ULA-Venezuela, Jefe de Proyectos del IVT.



Barreto, Wilmer, Ingeniero Civil Universidad “Lisandro Alvarado” Barquisimeto, Venezuela. M.Sc. en Hidroinformática (UNESCO-IHE, Países Bajos). Doctor Universidad Tecnológica de Delft Países Bajos. Académico de las Universidades Lisandro Alvarado (Venezuela) y Universidad Católica de Temuco (Chile).



Peña, Jackeline, Ingeniera Geóloga ULA -Venezuela M.Sc. en Desarrollo de los Recursos Aguas y Tierras Mención Planificación y Desarrollo de los Recursos Hidráulicos CIDIAT-ULA-Venezuela, Planta Adjunta, Universidad Católica de Temuco, Chile.



Peña Oswaldo, Ingeniero Civil ULA – Venezuela, M.Sc. en Obras Hidráulicas ULA – Venezuela Dr. en Ciencias Gerenciales URBE - Venezuela Profesor Agregado Universidad Politécnica Territorial de Trujillo Venezuela. Profesor UCT, Chile y Universidad Santo Tomás, Chile



Torres-Hoyer, Jesús,
Ingeniero Geólogo ULA -
Venezuela M.Sc. en
Matemáticas Aplicadas a la
Ingeniería - ULA, Director
de Calidad en Docencia
UCT-Chile, Jefe de Carrera
de Ingeniería Civil
Geológica, Jefe de Carrera
de Geología, UCT Chile y
Director de Escuela de

Ingeniería Geológica ULA Venezuela.

