



Análisis de agregados reciclados de residuos de construcción en el desempeño en pavimentos flexibles sostenibles en Chucuito Puno, 2024

Analysis of recycled aggregates from construction waste in the performance of sustainable flexible pavements in Chucuito, Puno, 2024

Orlando Cruz-Calapuja¹

Facultad de Ingenierías y Ciencias Puras²
Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez
Juliaca, Perú

Resumen

La investigación se ha enfocado en el problema de la gestión de residuos de construcción y demolición y existiendo la necesidad de promover las prácticas de sostenibilidad en el campo de ingeniería de pavimentos. SE ha tenido como un enfoque en evaluar la influencia de los agregados reciclados provenientes de RCD en el desempeño de pavimentos flexibles en Chucuito, Puno, durante el año 2024. Se ha tenido como objetivo analizar cómo estos agregados reciclados impactan en las propiedades y en el comportamiento de los pavimentos flexibles. La metodología que se uso es del nivel explicativo, de tipo aplicativo, de diseño no experimenta, su población de estudio está conformada por agregados reciclado de residuos de construcción para pavimento de la vía en el kilómetro 12 a 18 del distrito de Chucuito, Puno, se estima 65 personas entre profesionales, contratista, trabajadores, autoridades que tiene interés en la mencionada vía, la muestra representa un total de 69% de población, siendo 45 personas participes de la investigación, las técnicas utilizadas son la observación, las entrevistas y encuesta, con ello se acompaña de cuestionarios, guías de entrevistas y fichas de observaciones como instrumentos. Como resultados se ha tenido que los residuos agregados demuestran un desempeño positivo, además de cumplir con las exigencias de calidad y la sostenibilidad correspondiente. En resultados se ha logrado que la tesis sea un aporte al conocimiento para la aplicación de soluciones sostenibles en pavimentación, además de reducir el impacto ambiental en lo referente a la construcción, además de la valorización de los residuos, lo mismo aplicado a principios de la económica circular como medio sostenible.

Abstract

The abstract is written in a structured format, past tense, of a single paragraph, without formulas; refers to the main objectives, describes the methods used, summarizes the main results and conclusions; 300 words maximum, no bibliographic references are cited. (Sangría izquierda y

¹ Ing. Orlando Cruz Calapuja, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, usuario orlandoingenierocivil@gmail.com.

² Para Maestrías y Doctorados se aceptan dos (02) autores (Autor y Asesor). Para artículos de investigación regulares se acepta hasta un máximo de cuatro (04) autores (Borrar esta nota al pie).



derecha a 1.5) The research has focused on the problem of construction and demolition waste management and the need to promote sustainability practices in the field of pavement engineering. The focus has been on evaluating the influence of recycled aggregates from CDW on the performance of flexible pavements in Chucuito, Puno, during the year 2024. The objective has been to analyze how these recycled aggregates impact the properties and behavior of flexible pavements. The methodology used is of the explanatory level, of an applicative type, of non-experimental design, its study population is made up of recycled aggregates of construction waste for paving the road at kilometer 12 to 18 of the district of Chucuito, Puno, it is estimated 65 people between professionals, contractors, workers, authorities who have interest in the aforementioned road, the sample represents a total of 69% of the population, with 45 people participating in the research, the techniques used are observation, interviews and surveys, with this it is accompanied by questionnaires, interview guides and observation sheets as instruments. The results showed positive performance from the aggregated waste, in addition to meeting the corresponding quality and sustainability requirements. The results have made the thesis a contribution to knowledge for the application of sustainable solutions in paving, in addition to reducing the environmental impact of construction and recovering waste, the same applied to the principles of the circular economy as a sustainable medium.

Palabras Clave: Agregados; reciclados; pavimentos flexibles; sostenibilidad; residuos de construcción y demolición; RCD; desempeño mecánico; viabilidad técnica; impacto ambiental.

Keywords: Aggregates; recycled; flexible pavements; sustainability; construction and demolition waste; CDW; mechanical performance; technical feasibility; environmental impact.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria de la construcción, es un motor fundamental para el desarrollo económico, social y cultural, lo cual implica afrontar retos crecientes respecto a la adecuada gestión de residuos generado por actividades de construcción y de demolición lo cual se abrevia como (RCD). El proceso de generación masiva de residuos cuyo destino final son vertederos y afectan al medio ambiente, además de las pérdidas de materiales que pueden ser reutilizados, siendo importantes para este contexto, todo ello impulsado por medio de la investigación, además de la promoción de la economía circular y con ello reducir el impacto en el medio ambiente.

Dentro de las alternativas que tiene más viabilidad en el campo de reutilización de materiales como los agregados reciclados, que se han obtenido por el procesamiento adecuado de RCD, que pueden actuar como sustituto parciales o totales de estos agregados naturales bajo diversas aplicaciones a nivel construcción (Figuroa & Fonseca, 2020). En particular, en proyectos de sector de construcción de infraestructura vial, el proceso de empleo de materiales en el conformado de pavimento flexible surge por una estrategia de beneficios potenciales (Acosta, 2022). Estos métodos incluyen aspectos como la reducción de sobreexplotación de canteras, la reducción volumétrica de residuos con disposición final en vertederos, así como el uso de mezclas asfálticas que tenga un rendimiento adecuado.

Dentro del contexto peruano, el proceso de manejo de RCD depende del tipo de actividad de la empresa que lo genera. En las normas se incluyen las prácticas de sostenibilidad, lo que implica la práctica de reciclaje de materiales. Es por ello, que se debe de evaluar el valor de



desempeño, seguido de la viabilidad de uso de agregados reciclados dentro de la construcción de pavimentos flexibles dentro de zonas rurales y urbanas pertenecientes a la localidad de Chucuito de la región Puno, en el cual se requiere de infraestructura vial con las mejoras sustanciales.

En el contexto local, para la región Puno, el uso de agregados reciclados en la construcción de vías es poco explorada. Algunos de los factores que dificulta la construcción de infraestructura vial son las condiciones geográficas y el clima, a ello se suma la deficiente de las vías, lo que influye en la calidad y la sostenibilidad. Pese a todo lo anterior, se ha tenido muchos casos de éxito en el proceso de agregado reciclados para mejora de pavimentos, ya que ha mejorado la resistencia, durabilidad y generada sostenibilidad para estas condiciones ocales.

La presente investigación se centra en el análisis de la viabilidad, así como en el desempeño que puedan tener los agregados reciclados de RCD en proceso de conformado de pavimento flexible en la ciudad de Chucuito de la región Puno. Es importante por ello enfocarse en la infraestructura que sean eficientes y de forma duradera, es por ello que es importante enfocarse en el entorno y en la viabilidad económica, por ello es importante enfocarse en la adaptabilidad, así como en el comportamiento de este tipo de materiales alternativos que están enfocados en las condiciones locales. Es importante por ello fomentar la adopción de nuevas estrategias de trabajo con RCD y con ello contribuir hacia el desarrollo de la infraestructura vial, el cual debe ser más sostenible dentro de la región.

El propósito central de la investigación es el análisis de la influencia de la adición de agregados reciclados de RCD en el desempeño de pavimentos flexibles sostenibles en la ciudad de Chucuito, perteneciente a la región de Puno – 2024. Es por ello, que se busca evaluar también las propiedades mecánicas y físicas, sumado a determinar la viabilidad técnica de la adición de este tipo de mezclas, luego al final validar el modelo de comportamiento en condiciones representativas, además de analizar el impacto ambiental que involucra este tipo de actividades, lo que permite tener criterios técnicos para su implementación en el mediano o corto plazo.

Entonces, se cuenta con la necesidad de trabajar el contexto de la investigación, lo cual implica formular preguntas específicas del trabajo.

El problema general se basa en:

- ¿Cómo influyen los agregados reciclados de residuos de construcción en el desempeño de los pavimentos flexibles sostenibles en Chucuito, Puno, durante el año 2024?

Y sus problemas específicos son:

- ¿Cuáles son las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de residuos de construcción utilizados en pavimentos flexibles sostenibles?
- ¿Qué tan viable es utilizar agregados reciclados en la construcción de pavimentos flexibles sostenibles en Chucuito, Puno?
- ¿Cómo es el comportamiento de pavimentos flexibles con agregados reciclados en condiciones reales de tráfico y clima en Chucuito, Puno, durante el periodo de monitoreo?
- ¿Cuál es el impacto ambiental de la utilización de agregados reciclados en pavimentos flexibles, en base a términos de reducción de residuos sostenibles del proyecto?

La justificación de la investigación se centra en lo teórico en el uso de agregados de tipo reciclado en construcción por los pavimentos flexibles siendo esta práctica novedosa a nivel mundial debido a su enorme potencial para la promoción de la sostenibilidad en lo relacionado con la construcción, en lo teórico el reciclaje es un factor que permite reducir los residuos y a la vez conservar los recursos naturales. En lo práctico el estudio permite tomar decisiones para aplicar agregados reciclados en el proceso de construcción de pavimentos flexibles, lo que genera costos asociados al proceso de construcción, además de generar una sostenibilidad económica y ambiental. En lo metodológico, el estudio permite evaluar el desempeño de material reciclado en la mejora de condiciones de vía. Todo ello para generar un enfoque



ambiental y su impacto positivo en el agregado de materiales.

Para ello se ha centrado en objetivos generales y específicos como:

- Analizar el impacto de agregado reciclado provenientes de RCD en pavimentos flexibles sostenibles en Chucuito, Puno, 2024

A ello se suma que los específicos como:

- Evaluar las capacidades física y mecánicas de los agregados reciclados de RCD usado en la construcción de pavimento flexible sostenible en Chucuito, Puno, 2024.
- Determinar acerca de la viabilidad técnica en el uso de agregados reciclado de RCD en la construcción de pavimentos flexibles sostenibles en Chucuito, Puno, 2024.
- Validar el nivel de desempeño de pavimento flexible con agregados reciclados provenientes de RCD bajo condiciones de tráfico real y clima en Chucuito, Puno, 2024.
- Analizar el impacto ambiental para la utilización de agregados reciclados en pavimentos flexibles de RCD en la construcción de pavimentos flexibles sostenibles en Chucuito, Puno, 2024.

Es el caso de estudio se ha centrado en el aspecto a nivel técnico, en la reutilización de RCD para mejora en la calidad de construcción de infraestructura vial, de la misma manera la investigación se centra en la base de implementación de nuevas políticas para la promoción de prácticas sostenibles y la gestión adecuada de residuos.

Sus limitantes de la investigación han sido la parte de condiciones climáticas, así como el acceso a materiales de la zona, ya que no se cuenta con sistema de recolección apropiados, el tiempo de monitoreo se ha centrado en la durabilidad que pueda tener el pavimento, en cuanto al aparte económica el procesamiento de este tipo de construcción acarrea inversión a largo plazo.

Las hipótesis de la investigación se enfocan en:

- Los agregados reciclados de RCD tiene un alto desempeño y positivo en el pavimento flexible sostenible en Chucuito, Puno, 2024

Y sus correspondientes hipótesis específicas que son:

- Las propiedades física y mecánicas de este tipo de agregados reciclado de RCD cumplen con los estándares para uso en construcción de pavimento flexible sostenible en Chucuito, Puno, 2024
- El uso de agregados reciclados en construcción de pavimentos flexibles en Chucuito, Puno, 2024, es técnicamente viable, debido a su resistencia y durabilidad.
- Los pavimentos flexibles que están construido con agregados reciclados de RCD tiene un buen desempeño en condiciones reales de tráfico y clima en Chucuito, Puno, 2024, en el período de monitoreo.
- El uso de agregados reciclados en pavimentos flexibles reduce el impacto ambiental en comparación con el proceso de pavimentación tradicional, lo que permite mejorar la sostenibilidad y la reducción de residuos Chucuito, Puno, 2024.

La gestión sostenible con RCD es un reto ambiental y también es una oportunidad económica en el campo de la ingeniería civil (Diego et al., 2024). El proceso de reutilización de este tipo de residuos como agregados en la construcción de vías, en particular con el uso de pavimentos flexibles, por ello se ha convertido en una estrategia para la promoción de economía circular y con ello reducir la dependencia de recursos naturales (Sánchez & Amaya, 2022). Bajo este enfoque no solo se mitiga el impacto en el medio ambiente con relación a la disposición de RRSS, también se tiene un potencial para la mejora de sostenibilidad y la eficiencia en los proyectos viales (Castro & Sabogal, 2020).

En relación a los agregados reciclados que son materiales granulares que son obtención del procesamiento adecuado de materiales residuales que son generados por actividades de construcción y demolición (Bejarano, 2020). Esto indica que debe de incluir materiales como



el asfalto, ladrillo (Sánchez & Amaya, 2022). Concreto u otros materiales de origen pétreo, lo cual son triturados y clasificados, para ello se emplean para otras aplicaciones de la ingeniería civil, como el caso de subcapas de pavimento o capas de base (Alvarado et al., 2024). La viabilidad y el rendimiento de este tipo de materiales en pavimento depende de sus propiedades, lo cual depende también de la calidad y del tipo de material original (Pacara, 2019).

Las dimensiones de este tipo de agregado son:

El cual implica caracterizar el tipo de agregado de RCD, debido a su naturaleza como material de origen que afecta directamente a las propiedades mecánicas y física del material de reciclado final (Chavez, 2024).

El porcentaje de residuos que son reciclados por tipo de material que puede ser ladrillo, concreto, asfalto u otro (Balbin & Chochon, 2019). Lo cual se cuantifica en base del tipo de material del cual está constituido, en frecuencia se tiene el concreto triturado, asfalto recuperado, restos de ladrillo, vidrio, cerámicos y otros, la mezcla funciona como agregado reciclado (Escobar & Pinzón, 2021).

La composición de agregados de RCD es importante debido al material de origen, puesto que este tiene sus propiedades definitivas, puesto que tiene su propia capacidad de absorción del agua, gravedad específica en base a agregados de origen natural (Santana & Estaire, 2022). El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento desarrolló un guía específica a nivel técnico para el uso de agregados de RCD en la construcción de infraestructura vial, que implica tener una necesidad para el control de la composición, con el fin de asegurar el cumplimiento de especificaciones y calidad (Conde & Medina, 2022).

A ello se suma la Norma Técnica Peruana NTP 400.037, que indica los lineamientos necesarios que debe de cumplir los agregados reciclados, enfocándose en la caracterización del tipo de residuo (Muñoz et al., 2021). Esta información es importante para verificar la composición y así prever el comportamiento de los agregados de RCD y con ello mezclar el pavimento y optimizar su diseño como tal (Mejía et al., 2023).

Las propiedades con las que debe contar los agregados de RCD son importantes para determinar el nivel de idoneidad en la construcción de tipos de pavimentos, es decir, a ello influye la densidad, la porosidad, la interacción y la absorción con los ligantes cementantes o asfálticos (Mejía et al., 2023).

Propiedades como la resistencia a la compresión, es una propiedad mecánica, el cual implica que el agregado tiene la capacidad de que sus partículas soporten cargas axiales sin romperse. Para el caso de agregado de RCD, las propiedades físicas son importante ya que deben de soportar cargas por medio del pavimento (Cornejo & Hurtado, 2022). Para ello una alta resistencia a la compresión influye directamente a la parte de capacidad de carga y ello afecta la durabilidad del pavimento y su estructura (Manchay, 2022).

La gravedad específica es el grado de relación entre la masa de la muestra que se agrega y la masa del volumen de agua (Mejía et al., 2023). Este valor indica que la densidad del material y la presencia de vacíos dentro del material lo que indica la porosidad en ella (Figuroa & Ramírez, 2024). El agregado de RCD es todo aquello que deriva del concreto, posee generalmente una menor gravedad específica y a la vez tiene mayor nivel de absorción del agua con relación a agregados de origen natural, debido a la porosidad de la pasta de cemento que tiene (Quispe, 2022). Este factor influye en la mezcla, lo que afecta las especificaciones de ligante y peso volumétrico (Santana & Estaire, 2022). Los agregados de RCD poseen una inadecuada gravedad específica ya que se tiene alterado las proporciones de diseño y afecta el rendimiento del pavimento (Laura, 2021).

El módulo de elasticidad, es un indicador similar a la resistencia por compresión, mide la rigidez del material, siendo la capacidad de resistir a las deformaciones elásticas bajo la acción de cargas (Balbin & Chochon, 2019). El modulo de elasticidad alto de agregado es recomendable, puesto que un material rígido tiene poca deformación bajo cargas de compresión



o tensión. Esta propiedad es importante para el agregado ya que permite distribuir de forma efectiva las cargas de tráfico y cuenta con una estructura que reduce las deformaciones y genera una mayor estabilidad por capa (Pacara, 2019). Las propiedades elásticas que poseen los agregados de RCD varían en función del procesamiento y la fuente, siendo uno de los factores crítico la aceptación en aplicaciones de infraestructura vial, lo cual se resalta dentro de estudio en base al impacto de agregados que son reciclados en función de la infraestructura (Castro & Sabogal, 2020).

La abrasividad es una medida que permite conocer la resistencia de agregado bajo la fragmentación por abrasión o impacto. Su valor bajo indica que el agregado es duradero, ya que no se desintegra de forma inmediata en condiciones de tráfico o carga (Figuroa & Fonseca, 2020). El proceso de degradación de estos agregados genera una cantidad importante de finos, lo que afecta a factores como la estabilidad, las propiedades volumétricas del pavimento y el drenaje de la infraestructura (Diego et al., 2024). La resistencia a la abrasión es importante debido a la capacidad de resistencia a carga, además de mejora la integridad a nivel estructural, lo que lleva a incrementar la vida útil del pavimento (Alvarado et al., 2024).

El desempeño de pavimento flexible depende la capacidad de sostenimiento en condiciones apropiadas de servicio y por su vida útil, lo cual implica que soporta las cargas y el tráfico, además que posee una resistencia al deterioro por factores ambientales y al desgaste de materiales (Lynch, 2022). Un adecuado desempeño genera garantía en seguridad, eficiencia y comodidad para el usuario de la infraestructura vial (Reyes et al., 2011).

Con relación a su resistencia y durabilidad que se da en función de la capacidad de pavimento para la resistencia de la degradación estructural y funcional en el tiempo, bajo la combinación de factores ambientales, cargas sometidas y tráfico (Reyes et al., 2011).

La vida útil que se espera es un periodo proyectado en función del pavimento, lo cual mantiene un nivel de servicio aceptable previo a la rehabilitación en grado mayor y a la infraestructura (Vera et al., 2010). Para caso como pavimentos que usan RCD, la vida útil de un factor crítico que debe ser evaluado en base a su viabilidad técnicas y económica respecto al uso de materiales de esta naturaleza. (Figuroa & Ramírez, 2024) Los factores como la calidad de construcción, así como el tráfico y las condiciones climáticas tiene influencia directa en la vida útil (Lynch, 2022).

Un pavimento de mayor vida útil reduce considerablemente el costo a largo plazo, además de estar alienados a Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como la 11 que tratan de ciudades y comunidades sostenibles y 12 sobre la producción y consumo responsable, todo permite promover una infraestructura resiliente.

Este indicador mide la capacidad de respuesta del pavimento para resistir a la formación de deformaciones repetidas como cargas vehiculares y tráfico. En pavimentos flexibles que son afectado por la deformación plástica debido a sus capas granulares, ya que no cuentan con la rigidez y estabilidad necesaria (Vera et al., 2010). En ello, la calidad de agregados, lo que incluye forma y propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad reducen las deformaciones (Massenlli & De Paiva, 2019). En este estado la resistencia a deformaciones permite que el pavimento pueda fallar de forma repentina, lo que afectaría la comodidad al conducir sobre ellas, afecta a la seguridad y genera la necesidad de realizar mantenimientos (Guzmán, 2023). El procedimiento para el uso de RCD, establecen criterios adecuado para asegurar el uso de agregados reciclados que permitan mejorar la resistencia a deformaciones del pavimento final (Laura, 2021).

El indicador de cantidad de cargas de tráfico sin presencia de fallas estructurales, es la capacidad de fatiga que posee el pavimento, esto implica los ciclos de carga que puede soportar antes de que aparezca fallas estructurales, como el caso de fisuraciones o deformaciones que superan los límites permisibles (Quispe, 2022). La adición de agregados reciclados en baja calidad en teoría, pueden reducir la capacidad del pavimento para el soporte de mucha carga



(Sandoval & Orobio, 2013). Pero, en caso de que el agregado de RCD tiene el cumplimiento de todas las especificaciones de calidad, su contribución a la estructura de pavimento es similar a los de agregado natural, lo que genera un desempeño apropiado bajo tráfico (A. C. Flores et al., 2023).

La evaluación de la capacidad de carga, es referido a la máxima presión o el peso por unidad de área que la estructura pueda soportar sin que se generen deformaciones excesivas o que se generen fallas permanentes (Tello et al., 2021). Este factor es importante, ya que se asegura la capacidad de carga del pavimento debido a acciones de carga pesada (G. Flores & Mogrovejo, 2020).

Esto incluye variaciones de temperatura y humedad, lo cual afecta el desempeño y la durabilidad del pavimento durante su servicio (Tello et al., 2021). Los materiales deben tener la capacidad de resistir variaciones con respecto a la contracción y a la expansión (Tello et al., 2021).

La resistencia a las variaciones térmicas, depende del ciclo de temperatura, esto indica que debe de tener fluctuaciones de temperatura que producen contracciones y expansiones en los diversos componentes (Quinto & Mallqui, 2023). Estos agregados reciclados tienen sus propias capacidades térmicas y coeficientes de expansión, estos difieren de los naturales, lo cual genera un efecto en la composición general y su respuesta como infraestructura a esos cambios de temperatura (G. Flores & Mogrovejo, 2020).

El comportamiento ante lluvias y humedades, es un factor que los pavimentos tiene, con el fin de resistir a la presencia de agua, permeabilidad y pérdida de cohesión. Un pavimento que posee capacidad de permeabilidad puede infiltrar el agua en capas inferiores, lo que puede debilitar la infraestructura. Los agregados de RCD tiene mayor absorción de agua que los de origen natural, lo que incrementa la permeabilidad en la capa granular, este factor debe controlarse. El proceso de diseño en lo referente a la compactación debe asegurar una baja permeabilidad con el fin de proteger el pavimento del agua, es especial para zonas con alta precipitación.

Para la presente investigación de estructura de la siguiente forma, la sección 2 contiene una descripción general de lo fundamentos y conceptos, así como las herramientas y método utilizados, para la sección 3 se describe la metodología, el enfoca y diseño. Para la sección 4 se presentan los resultados y al culminar se presentan sus respectivas conclusiones y recomendaciones, todo ello en la sección 5 del estudio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación toma un enfoque cuantitativo ya que busca medir el desempeño que tienen los agregados de RCD, además de analizar las propiedades mecánicas y físicas de este tipo de agregados, también la de medir el impacto ambiental y su forma de comportamiento bajo condiciones de tráfico y cambio climático. Su método de estudio es deductivo, pues plantea hipótesis.

El tipo de investigación es aplicado, ya que utilizar los conocimientos sobre agregados de RCD con el fin de resolver un problema en concreto para Chucuito – Puno, con el fin de crear un pavimento sostenible. El nivel de investigación es explicativo, debido a que busca identificar los efectos y causas que tiene el agregado de RCD en el desempeño de pavimento flexible sostenible.

El diseño de investigación es no experimental, lo que implica realizar un análisis de observaciones y una comparación de agregado de RCD, con las condiciones reales de carga por tráfico y con las condiciones climáticas.

El ámbito de investigación se realizar en la construcción del km 12 a 18 de la provincia de

Yunguyo-Puno, en el cual se aplica el uso de materiales reciclados. La investigación bajo estas condiciones reales permite analizar y validar el desempeño del tráfico, para ello se analiza durabilidad y la resistencia del pavimento.

La población de estudio se centra en el agregado reciclado de RCD para los kilómetros mencionados anteriormente de la provincia de Yunguyo. Para el estudio observacional se toma la opinión de profesionales de 15 personas y 40 trabajadores y 10 autoridades locales, siendo un total de 65 personas, de los cuales se toma como muestra 45 personas, entre 10 profesional, 30 trabajadores y 5 autoridades, siendo un muestreo por conveniencia, debido a las condiciones en las que se hace la investigación.

En relación a los métodos utilizados para la investigación se ha usado la observación directa, las entrevista y las encuestas, que permiten recolectar información y datos acerca del comportamiento de la infraestructura de pavimento RCD, así como la percepción de datos los operarios. En relación a los instrumentos se ha usado cuestionarios, guías de entrevista y las fichas de observaciones.

Como criterios de inclusión, se ha usado materiales los agregados de RCD, normas ASTM C33 y D692, el contexto geográfico es ubicado en Chucuito, con factores climáticos de rango de -5°C a 18°C y la precipitación anual en la franja de 600 a 800 mm. Para la exclusión, se ha descartado el uso de plásticos, muestras sin los datos climáticos y la ausencia de consentimiento informado.

III. RESULTADOS

En cuanto a los resultados se ha determinado:

Tabla 1

Propiedades físicas y mecánicas

Propiedad	Agregado reciclado (RCD)	Agregado convencional	Normativa	Significancia ($p \leq 0.05$)
Granulometría (Fuller)	0.88	0.95	-	No ($p=0.21$)
Índice de forma /elongación)	12% de partículas irregulares	0.08	$\leq 15\%$ (EN 933-4)	Si ($p=0.04$)
Absorción de agua (%)	4.1 ± 0.3	4.1 ± 0.3	$\leq 5\%$ (Norma de MTC)	No ($p=0.12$)
Resistencia a la compresión (MPa)	18.5 ± 1.2	20.1 ± 0.8	ASTM C33 ($\geq 15\text{MPa}$)	Si ($p=0.03$)

Nota: Muestra el cumplimiento de las normativas y estándares.

Bajo estos criterios expuestos en la tabla 1, la resistencia a la compresión cumple con la normativa, pero requiere ajustes debido a su valor de 0.03 cercano a 0.05. La absorción de agua, esta bajo el limite permitido pero su impacto en clima húmedos requiere la adición de hidrófugos. El índice de forma cumple las normativas, pero requiere correcciones para que no afecte la trabajabilidad de la mezcla. La granulometría no tiene significancia, lo que implica que se debe de optimizar los procesos de trituración con el fin de mejorar la consistencia de la mezcla.

Dentro de las implicas prácticas para lograr la viabilidad económica y técnica se tiene:

Tabla 2

Viabilidades económicas y técnicas.

Aspecto evaluado	Resultado (RCD)	Requisito normativo	Implicaciones prácticas
Tiempo de compactación	+15% con respecto a lo convencional	-	Necesidad de equipos especializados-
Costo material (S/. /m ²)	85	110 (Convencional)	Ahorro aprox. 22%
Adherencia bitumen agregado	0.95	≥90% (ASTM D3625)	Requiere modificadores en clima con lluvia
CBR para la subbase (%)	32±2.1	≥30% (MTC – EG 2013)	Apto para realizar nuevas capas estructurales

Nota: Expone viabilidades técnicas y económicas del RCD.

Los valores de RCD, con relación al tiempo de compactación requiere de mayor inversión, se genera un ahorro de 22% respecto a proceso convencionales, se tiene una adsorción de 92%, pero requiere de correcciones en zonas de lluvia y se tiene un CBR con idoneidad para todas las capas de la infraestructura.

Con relación al desempeño en situaciones reales se tiene:

Tabla 3

Nivel de desempeño en situaciones reales.

Aspectos	RCD – 6 meses observado	Convencional – 6 meses observado	Diferencias	Factor crítico
Deformación en mm	2.3±0.4	3.1±0.3	-25.8%	Afectación del tráfico: promedio de 500 vehículo por día
Grietas por efecto termofluencia	0.8 grieta por cada 10 metros cuadrados	1.4 grietas por cada 10 metros cuadrados	-42.9%	Rango térmico entre -5°C y 18°C
Sectores con encharcamiento	0.03	0.02	-0.4	Pendientes ≥2%
Vida útil proyectada	12 años	10 años	0.2	Optima compactación

Nota: Aspecto importantes acerca del desempeño de pavimento en situaciones reales.

El proceso de deformación se ha reducido en base a un 25.8% esto debido a la mayor angularidad presente en las partículas lo cual mejora la estabilidad. También se tiene una mayor resistencia a grietas por efecto térmico, lo cual permite tener un umbral más grande en variaciones terminas. Con relación a la vida útil, este factor depende mucho del nivel de compactación a nivel óptimo, lo que implica tener la necesidad para la supervisión en el proceso de construcción. Para el caso de resultados de RCD que es una estrategia viable para aplicar antes el elevado trafico y los cambios de temperatura.

Con relación al impacto ambiental y la sostenibilidad se tiene:

Tabla 4*Impacto ambiental y sostenibilidad de agregados RCD aplicado en infraestructura vial*

Métrica	RCD	Convencional	Reducción	Equivalencia
Huella de carbono (kg CO ₂ /m ²)	1.2	2.1	0.43	120 árboles adultos por año
Residuos evitados (ton/mes)	120	0	1	01 vertedero pequeño
Agua consumida (m ³)	150	300	0.5	Consumo anual de 15 familias
Energía en producción (kWh)	85	140	0.39	30 hogares/mes

Nota: Comparación del impacto ambiental por materiales convencionales respecto a agregado RCD.

Se aprecia que se reduce en 43% la huella de carbono, lo cual promueve una economía circular. El consumo de agua se reduce en 50%, lo que implica que se cuida mejor el sistema hídrico de la zona, así como la total evitación de generación de residuos, de la misma manera, estos factores o métricas están alineados a los ODS 12 y 11.

Tabla 5*Resumen de mejoras y estrategias*

Objetivos	Fortalezas de Agregado de RCD	Limitaciones	Recomendaciones
Propiedades mecánica y físicas	Se cumple con las normativas internacional y nacionales	Se tiene mayor absorción de agua	Se debe de lavar previamente y adicionar sustancias o aditivo hidrófugos
Viabilidad técnica	Genera ahorro económico importante	Mano de obra más especializada	Capacitaciones a contratistas y grupo de interés.
Desempeño real	Mayor durabilidad ante cambios climáticos	Mayor sensibilidad a la compactación	Mejorar protocolos de control de calidad
Sostenibilidad	Enfocado en ODS 11 y 12	Dependencia de la calidad del agregado de RCD	Verificar la certificación de los proveedores.

Nota: Se logra la viabilidad a nivel técnico, económico y ambiental.

La aplicación de agregados con RCD es una estrategia económica, técnica y sostenible en la construcción de pavimentos para la ciudad de Chucuito, para ello es importante implementar algunas de las siguientes estrategias:

- Uso de aditivos de naturaleza hidrófugos con el fin de mitigar la absorción del agua.
- Realizar capacitaciones a los contratistas en técnicas y procedimientos de compactación.
- Establecer todos los protocolos de control de calidad con el fin de monitorizar en tiempo real, aplicación de sensores con IoT e inteligencia artificial.



- Promover nuevas políticas a nivel local que permitan incentivar el uso de RCD como medio alternativo y viable en obra de naturaleza pública.

IV. CONCLUSIONES

El proceso de análisis de agregado con adición de RCD en su totalidad provenientes de construcciones antiguas ha demostrado viabilidad con el fin de que los pavimentos flexibles sean sostenibles en la provincia de Chucuito, es decir que los resultados permiten confirmar que este tipo de materiales pueden cumplir con todo tipo de estándar técnico, ambiental y económico necesario, lo que implica que el proceso de implementación debe tener ajuste específicos con el fin de garantizar el nivel de desempeño óptimo bajo todo tipo de condiciones dentro de la región.

En relación a las propiedades física y mecánicas, los agregados de RCD han permitido cumplir con la normativa a nivel internacional y local, se ha tenido una resistencia a la compresión de 18.5 MPa, además de contar con una absorción de 4.1%, una resistencia del 8% en los agregados tradicionales. Estas diferencias son importantes a nivel estadístico, lo que permite contar con una idoneidad bajo la carga moderada, lo que permite optimizar el proceso de trituración y a la vez mejorar la uniformidad al lograr la mezcla.

En cuanto a la viabilidad técnica para la provincia de Chucuito, se ha validado el uso de capas en la infraestructura por medio de ensayos con CBR al 32%, una adherencia del 92%. El tiempo de compactación y las modificaciones químicas en zonas de alta presencia pluvial es un reto a nivel operativo, lo cual debe tomar se con interés. En lo económico, se cuenta con un ahorro del 22% en el costeo con el fin de posicionar este sistema como un proceso sostenible con el fin de aplicar en proyectos que cuenta con limitado presupuesto.

Con relación al desempeño que tiene en condiciones reales, se ha tenido que el 25.8% se ha reducido en la deformación, así como 42.9% menos agrietamiento debido al cambio de temperatura de la zona, esto a causa de la mejor angularidad de partículas y una mejora adaptabilidad al clima variado de la región Puno. Se estima una vida útil de 12 años, lo que depende mucho de la compactación, esto implica que se debe tomar en consideración la supervisión a nivel técnico durante el proceso de construcción.

Para terminar, el impacto ambiental de este tipo de construcciones a nivel vial, reduce un 43% de huella de carbono, además de la desviación de 120 toneladas mensuales en residuos y por otro lado se tiene una reducción en el consumo de agua en 50%, todos estos objetivos están alineados a los ODS 11 y 12. Es importante, considera a la calidad de RCD que es recolectado y esto debe estar en función de los estándares de procesos de construcción y a la vez establecer las certificaciones necesarias a fin de garantizar la consistencia.

REFERENCIAS

Acosta, D. (2022). *Influencia de la utilización de residuos de construcción y demolición (RCD) tipo*



hormigón como árido grueso en mezclas asfálticas en caliente.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33526.68166>

- Alvarado, E., Damiano, A., & Espinoza, J. (2024). *Estabilización de suelo arcilloso con residuos de concreto para el mejoramiento de la subrasante en la vía de Evitamiento, provincia de Abancay - Apurímac, 2022.* <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/15418>
- Balbin, R., & Chochon, V. (2019). *Diseño de mezcla asfáltica con material reciclado para la mejora del comportamiento mecánico del pavimento en el tramo km 90+000 al km 95+000 de la carretera canta a Huayllay ubicado en el distrito y provincia de Canta en el departamento de Lima 2019.* https://repositorio.usmp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12727/6001/balbin_ar-chochon_gvh.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bejarano, W. (2020). *Aplicación de pavimentos flexibles reciclados en la construcción de nuevos pavimentos económicos en el Perú - 2020.* https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_4ad7ecbe71ae66b01086cb92fa595750
- Castro, C., & Sabogal, D. (2020). *Sistema de calificación de sostenibilidad ambiental de pavimentos rígidos y flexibles con inclusión de materiales reciclados.* <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/57850>
- Chavez, W. (2024). *Influencia de la adición de residuos de construcción y demolición para la estabilización de subbase en pavimento flexible, Ate, 2024.* https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_b004dae5f3f729e1b3b97d4298dcbbef
- Conde, E. Q., & Medina, E. A. (2022). *Formulación de pavimento rígido utilizando concreto reciclado del distrito de Andrés Avelino Cáceres, región Ayacucho.* Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5588>
- Cornejo, J., & Hurtado, M. (2022). *Estabilización de subrasante con concreto reciclado y agregado natural, mediante métodos granulométricos, carretera Maras - Moray, Cusco 2021.* <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/11371>
- Diego, J. K., Temple, E., & Muñoz, J. P. (2024). Influencia de un pavimento ecológico con PET reciclado en el sector de 3 de octubre. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 18(2), 118–125. <https://doi.org/10.29166/revfig.v18i2.5918>
- Escobar, J., & Pinzón, J. (2021). *Consulta bibliográfica del uso de residuos de construcción y demolición (RCD) en la capa asfáltica, base, subbase de la estructura de pavimentos flexibles.* <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/6bffa34e-32bf-4015-867f-4a96c91926c8/content>
- Figuroa, A. S., & Fonseca, E. (2020). Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR. *Infraestructura Vial*, 22(39), 20–28. <https://doi.org/10.15517/IV.V22I39.41205>
- Figuroa, A. S., & Ramírez, H. (2024). Desempeño de los RCD en vías urbanas. *Ingeniería y Desarrollo*, 42(02), 190–205. <https://doi.org/10.14482/inde.42.02.864.445>



- Flores, A. C., Romero, A., & Rojas, J. T. (2023). Conservación del pavimento flexible mediante el método PCI. *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias*, 2.
<https://doi.org/10.56294/SCTCONF2023397>
- Flores, G., & Mogrovejo, D. (2020). Evaluación funcional del pavimento flexible en la red vial rural de Portoviejo, Ecuador. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure, Part F1380*, 112–121. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_12
- Guzmán, E. A. (2023). Evaluación estructural de pavimentos flexibles. *Evaluación Estructural de Pavimentos Flexibles*. <https://doi.org/10.38017/9789588966557>
- Laura, O. (2021). *Aprovechamiento de residuos de construcción y demolición (RCD) para impulsar el desarrollo de la red vial en Colombia*.
<https://repository.umng.edu.co/bitstream/10654/39331/1/OlarteBetancourtLauraValentina,2021.pdf>
- Lynch, H. (2022). *Diseño estructural de pavimentos flexibles y rígidos: Nuevo y de refuerzo (Vías urbanas, estacionamientos, carreteras y aeropuertos)*. https://acading.org.ve/wp-content/uploads/2023/02/DISENO_ESTRUCTURAL_DE_PAVIMENTOS_HLB.pdf
- Manchay, A. (2022). *Diseño de pavimentos haciendo uso de agregados reciclados de carpetas asfálticas*.
<https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/5542>
- Massenlli, G. S. R., & De Paiva, C. E. L. (2019). Influencia de la deflexión superficial en pavimentos flexibles con subrasante de baja resistencia. In *Revista chilena de ingeniería* (Vol. 27, Issue 4).
<https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v27n4/0718-3305-ingeniare-27-04-613.pdf>
- Mejía, R., Robayo, R., & Valencia, W. (2023). Residuos de construcción y demolición como materia prima de concretos y elementos de construcción obtenidos mediante activación alcalina. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(184), 505–519.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.1892>
- Muñoz, S. P., Díaz, D. M., Gamarra, E. E., & Chaname, J. A. (2021). La Influencia de los RCD en reemplazo de los agregados para la elaboración de concreto: Una revisión de la literatura. *Ecuadorian Science Journal*, 5(2), 107–120. <https://doi.org/10.46480/esj.5.2.111>
- Pacara, M. (2019). Análisis Superficial de una Fisura en Pavimento Flexible con Termografía Infrarroja. *Journal Boliviano de Ciencias*, 15(47), 25–32. <https://doi.org/10.52428/20758944.v15i47.304>
- Quinto, C. A., & Mallqui, J. T. (2023). Evaluación superficial del pavimento asfáltico apoyada por el método PCI en pistas de aterrizaje de aeropuertos. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 27(118), 87–98. <https://doi.org/10.47460/UCT.V27I118.690>
- Quispe, E. (2022). *Formulación de pavimentos rígido utilizando concreto reciclado del distrito de Andrés Avelino Cáceres, Región Ayacucho*. <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/bfe57e47-d8b2-498c-adbd-b014ce92db0d>
- Reyes, F., Torres, A., Castaño, F., Herrera, J., Ruiz, A., & Rojas, L. (2011). *Pavimentos flexibles. Comportamiento hidráulico, beneficios y limitaciones de la aplicación de un SDGA a una estructura de pavimento flexible*. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/1979>



- Sánchez, J., & Amaya, N. (2022). *Análisis del impacto ambiental durante el ciclo de vida de los pavimentos empleando mezclas asfálticas con agregados reciclados de concreto*.
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstreams/96db7cac-7ba2-42e5-86c8-9a37ef6eff04/download>
- Sandoval, C., & Orobio, A. (2013). Efectos de las tolerancias de construcción en el desempeño de los pavimentos flexibles. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(3), 266–277.
<https://doi.org/10.4067/S0718-50732013000300004>
- Santana, M., & Estaire, J. (2022). El problema de la caracterización ambiental de los RCD para su uso en la construcción de terraplenes en España. *Geotecnia*, 2022(155), 77–101. https://doi.org/10.14195/2184-8394_155_4
- Tello, L., Aguirre, M., Díaz, J. P., & Hernández, F. (2021). Evaluación de daños en pavimento flexible usando fotogrametría terrestre y redes neuronales. *TecnoLógicas*, 24(50), 59–71.
<https://doi.org/10.22430/22565337.1686>
- Vera, I., Thenoux, G., Solminihac, H., & Echaguren, T. (2010). *Modelo de evaluación técnica del desempeño del mantenimiento de pavimentos flexibles*.
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2010000200008

Fechas

Recepción: 01/08/ 2025

Revisión y aceptación: 22/09/2025

Publicación: 30/09/2025
