

Variation of the Physical – Mechanical properties of the recycled aggregate of concrete for the construction of granular bases in the pavement structure

Gianella Sharleen Martínez Ocharán, Ing.¹, Silvana Arellí Taico Lezama, Ing.², Lizbeth Milagros Merma Gallardo, Mg.³ 

^{1,2}Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú. N00027631@upn.pe, N00035005@gmail.com

³Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú. lizbeth.merma@upn.pe

Abstract– The use of recycled concrete in the construction of granular pavement bases was evaluated, following the technical specifications of the Highway Manual. Construction and demolition waste (RCD) was obtained from the sanitary landfill in the province of Cajamarca, which was processed in an aggregate crushing plant to obtain recycled concrete aggregate. Three types of materials were used: 100% recycled aggregate, 100% affirmed, and 50%/50% blended aggregate. Several tests were carried out to verify compliance with the physical and mechanical properties established in the Highway Manual, such as granulometry, % fractured particles, abrasion, plasticity index, % flat and elongated particles, Modified Proctor, sand equivalent and Relative Value. of Support (CBR). The results were favorable for the 100% recycled aggregate and the 50% combined aggregate, reaching a %CBR of 120.33% and 86.33%, respectively. These findings validated the proposed hypothesis and demonstrated an improvement in the physical-mechanical properties through the use of recycled concrete, even exceeding the values established by the Highway Manual.

Keywords: Recycled concrete aggregate, granular bases, pavement.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Variación de las propiedades físico – mecánicas del agregado reciclado de concreto para la construcción de bases granulares en la estructura de pavimentos

Gianella Sharleen Martínez Ocharán, Ing.¹, Silvana Arellí Taico Lezama, Ing.², Lizbeth Milagros Merma Gallardo, Mg.³

^{1,2}Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú. N00027631@upn.pe, N00035005@gmail.com

³Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú. lizbeth.merma@upn.pe

Resumen– Se evaluó el uso de concreto reciclado en la construcción de bases granulares de pavimentos, siguiendo las especificaciones técnicas del Manual de Carreteras. Se obtuvieron residuos de construcción y demolición (RCD) del relleno sanitario de la provincia de Cajamarca, los cuales se procesaron en una planta tritura de agregado para obtener agregado reciclado de concreto. Se utilizaron tres tipos de materiales: agregado reciclado al 100%, afirmado al 100% y agregado combinado al 50%/50%. Se realizaron varios ensayos para verificar el cumplimiento de las propiedades físicas y mecánicas establecidas en el Manual de Carreteras, como fue granulometría, %partículas fracturadas, abrasión, índice de plasticidad, % partículas chatas y alargadas, Proctor Modificado, equivalente de arena y Valor Relativo de Soporte (CBR). Los resultados fueron favorables para el agregado reciclado al 100% y el agregado combinado al 50%, alcanzando un %CBR de 120.33% y 86.33%, respectivamente. Estos hallazgos validaron la hipótesis planteada y demostraron una mejora en las propiedades físico – mecánicas mediante el uso de concreto reciclado, incluso superando los valores establecidos por el Manual de Carreteras.

Palabras clave—Agregado reciclado de concreto, bases granulares, pavimento.

I. INTRODUCCIÓN

El presente artículo se deriva de la tesis “Reciclado de concreto para la construcción de bases en la estructura de pavimentos” [1], el objetivo general del estudio es evaluar la variación de las propiedades físico – mecánicas del uso de agregado reciclado de concreto para la construcción de bases granulares de pavimentos de acuerdo al Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción” (EG 2013)), y como objetivos específicos se tiene: (1) determinar las propiedades físicas del afirmado y agregado reciclado de concreto, (2) determinar las propiedades mecánicas del afirmado, agregado reciclado de concreto y la combinación 50% agregado reciclado y 50% afirmado (agregado combinado), y (3) evaluar y comparar las propiedades físico-mecánicas del agregado reciclado con el Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción (EG 2013).

La industria de la construcción causa una gran cantidad de residuos de concreto y genera la explotación de canteras, el cual tiene un impacto ambiental significativo. Alrededor de 600 millones de toneladas de desechos de construcción se generan en todo el mundo cada año, según la EPA de Estados Unidos [2]. Además, la extracción de canteras requiere una

cantidad significativa de recursos naturales y energía, contribuyendo en gran medida a las emisiones de CO₂. Según [3], las canteras representan entre el 55.08% y el 73.68% del consumo energético y entre el 47.41% y el 71.29% de las emisiones de CO₂ equivalentes.

La producción de escombros de concreto y la explotación de canteras son un problema significativo en el sector de la construcción en el Perú. El Ministerio del Ambiente informó que en el país se generaron más de 166,000 toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD) en el año 2012. Estos datos resaltan la urgencia de abordar este problema de manera efectiva [4].

El reciclaje de residuos de construcción es una demanda global que impulsa la industria de la construcción en adoptar nuevas prácticas [5]. En ese sentido, se ha propuesto el uso de residuos de concreto en la construcción de pavimentos en la ciudad de Cajamarca, lo cual presenta importantes ventajas ambientales. Esta práctica ayuda a conservar los minerales provenientes de canteras, reduce la explotación de recursos naturales y reduce las emisiones de carbono, lo que favorece la preservación del medio ambiente, la flora y la fauna. Por lo tanto, el uso de agregado reciclado de concreto es una opción competitiva y sostenible [6].

En Brasil, un estudio examinó mediante pruebas de caracterización mecánica, la posibilidad de utilizar los residuos de construcción como material de agregado reciclado para construir pavimentos. Se determinó que el material estudiado cumple con los requisitos establecidos por las normas brasileñas para la construcción de bases granulares mediante pruebas convencionales de agregados pétreos y ensayos estándar de la estructura del pavimento, como módulo de resiliencia y CBR [7].

Por otro lado, [8] enfatizaron la necesidad de abordar el problema ambiental provocado por los residuos de concreto a nivel global. Mediante una revisión de la literatura sobre los avances en el reciclaje de concreto, concluyeron que el uso de agregados obtenidos de la demolición de concreto puede ser una solución efectiva para producir concreto reciclado, lo cual permite reducir los costos, reducir la contaminación y preservar el medio ambiente. Sin embargo, señalaron también la necesidad de investigar un diseño ideal que garantice un buen rendimiento mecánico bajo cargas dinámicas y estáticas.

Por otro lado, como investigaciones nacionales se tienen las mostradas a continuación:

[9] investigaron la problemática de los residuos de construcción y demolición que son depositados en botaderos informales y contaminan áreas extensas de suelo virgen. El objetivo de su estudio fue aumentar la eficiencia del uso de agregados reciclados en las bases y subbases de los pavimentos. Realizaron ensayos de laboratorio bajo las Normas Técnicas Peruanas y análisis estadístico utilizando cuadros y gráficos comparativos, demostraron que la combinación de Agregado Reciclado (AR) – Agregado Natural (AN) tiene buen desempeño, y que la proporción 50% AR – 50% AN mostró resultados positivos en comparación con los parámetros requeridos para un componente granular. Concluyeron que, al mejorar los agregados reciclados, estos pueden emplearse en bases y subbases de pavimentos, logrando propiedades mecánicas similares a las de los agregados convencionales.

Asimismo, [10] tuvieron como objetivo crear un concreto experimental que sea eficiente, económico y respetuoso con el medio ambiente. Utilizaron agregado de concreto reciclado de demoliciones en lugar de agregado convencional, realizaron ensayos de resistencia a la compresión y descubrieron que su diseño experimental cumplía con los requisitos de resistencia, pero no alcanzaba la resistencia del diseño convencional. Determinaron así que, el uso de agregado reciclado es factible en pavimentos rígidos de bajo tránsito, veredas, adoquines, bloquetas y estabilización de suelos, pues no observaron diferencias significativas en la resistencia entre ambos diseños. Por último, encontraron que el uso de concreto reciclado era 5.26% más económico que el uso de concreto tradicional.

Con lo antes expuesto, la investigación presenta una alternativa para reducir el uso de agregados vírgenes en la construcción y evitar la acumulación de residuos de demolición en obras viales. La relevancia de este estudio es importante debido a que propone utilizar materiales no convencionales, y se toma en consideración que existen pocas investigaciones en el país sobre el uso de agregados reciclados en pavimentos. Conjuntamente, se tiene como finalidad proporcionar una alternativa ecológica para la construcción de bases granulares, lo que contribuirá a nuevas posibilidades en el campo de la construcción de proyectos viales.

II. METODOLOGÍA

La investigación se clasifica como cuantitativa, ya que los datos se recopilan a través de ensayos de laboratorio y se analizan para verificar la hipótesis. Además, se considera experimental, [11] define que dicho diseño consiste en observar posibles cambios en la variable dependiente debido a la manipulación de una o más variables independientes. De igual forma, se caracteriza como correlacional, al examinar la relación entre dos o más variables [12], como es en esta investigación, se busca establecer la correlación de las propiedades físico-mecánicas del agregado reciclado de concreto para bases granulares.

Por otro lado, la población coincide con la muestra de esta investigación. Se utilizó un método de selección de muestra no probabilístico puesto que se desconocía la posibilidad de inclusión de cada elemento de la muestra [13]. La muestra de material se extrajo de los residuos de concreto de construcción y demolición (RCD) del relleno sanitario de la provincia de Cajamarca.

Se consideró repetir los ensayos tal y como se muestra a continuación en la Tabla 1.

TABLA 1
NÚMERO DE ENSAYOS POR TIPO DE MATERIAL

Ensayos	Muestra		
	Agregado Reciclado	Afirmado	Agregado Combinado
Granulometría	3	3	3
% de Partículas Chatas y Alargadas	3	3	-
Caras Fracturadas	3	3	-
Abrasión	3	3	-
Índice de Plasticidad	3	3	-
Equivalente de Arena	3	3	-
Proctor Modificado	3	3	3
California Bearing Ratio	6	3	3

La técnica de observación se utilizó para recopilar y analizar los datos de esta investigación. Como investigadoras, observamos y llevamos a cabo el proceso de obtención de datos para determinar las propiedades físicas y mecánicas. Se emplearon los criterios de evaluación establecidos en la Sección 403 del Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción” (EG 2013) emitido por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) para evaluar la calidad de los materiales utilizados. También, se aplicaron los métodos descritos en el Manual de Ensayos de Materiales EM edición 2016, basados en las normas ASTM y AASHTO para caracterizar las propiedades del agregado reciclado de concreto y afirmado.

Los ensayos considerados para el estudio fueron:

- Granulometría, Norma ASTM D 422.
- Clasificación AASHTO Y SUCS ASTM D 3282 y ASTM D 2487.
- Partículas con una cara fracturada ASTM D 5821.
- Partículas con dos caras fracturadas ASTM D 5821.
- Abrasión “Los Ángeles” ASTM C 130.
- Partículas chatas y alargadas ASTM D 4791.
- Índices de Plasticidad MTC E 111 y ASTM D 4318.
- Equivalente de Arena MTC E 114 y ASTM D 2419.
- Próctor Modificado, Norma ASTM D 1557.
- CBR de suelos, Norma MTC E 132 y ASTM D 4429.

A su vez, se utilizaron fichas técnicas (protocolos) detalladas de cada ensayo de laboratorio como instrumentos de investigación. El procesamiento y el análisis de datos se llevaron a cabo utilizando hojas de cálculo en Excel, donde se

calcularon los parámetros requeridos a partir de los datos obtenidos de los ensayos.

Los resultados se presentaron visualmente en forma de gráficos y tablas, lo que facilitó la interpretación y permitió observar las diferencias entre los valores obtenidos.

Por consiguiente, el ciclo de vida del concreto reciclado incluye:



Fig. 1 Ciclo de vida del concreto reciclado

Procesamiento y recolección: la muestra tiene ser netamente proveniente de concreto simple (como probetas de concreto), en buenas condiciones sin un desgaste o deterioro excesivo. Además, libre de sustancias y/o material que contaminen la muestra.

Producción de Agregado Reciclado de Concreto: implicó 2 fases de trituración: manual, para obtener piezas de 5 a 10cm, luego en planta chancadora, hasta alcanzar una gradación máxima de 1" de diámetro.

Implementación en Proyectos de Construcción: Después de haber realizado los ensayos, en base al Manual de Carreteras "Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras", se determinó que el uso de concreto en bases es viable. Esta implementación se basa en resultados sustentados por pruebas técnicas según las especificaciones del manual mencionado.

El concreto reciclado permite identificar oportunidades para mejorar la sostenibilidad de la construcción, mediante la reducción de impacto ambiental. Los resultados obtenidos contribuirán a la toma de decisiones informadas para la implementación y gestión adecuada del concreto reciclado en proyectos de infraestructura vial de esa manera puede ser empleado como agregado.

III. RESULTADOS

El resumen del análisis granulométrico del agregado reciclado de concreto, afirmado y del agregado combinado se muestra en la Tabla 2. Para su representación gráfica, se calcularon los promedios del porcentaje que pasa de cada tipo de material en tres repeticiones consecutivas.

TABLA 2
RESUMEN DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE CADA MATERIAL

Nº	TAMIZ mm	% QUE PASA Agr. Reciclado	% QUE PASA Afirmado	% QUE PASA Ag. Combinado
2"	50.80	100.00	100.00	100.00
1"	25.40	99.44	88.61	95.67
3/8"	9.50	67.37	61.21	67.81
Nº 04	4.75	45.78	46.46	46.47
Nº 10	2.00	28.67	34.57	32.18
Nº 40	0.425	14.15	21.40	18.75
Nº 200	0.075	3.33	2.75	3.55

Las curvas granulométricas de la Figura 2 muestran la distribución de tamaños de las partículas del agregado reciclado, afirmado y combinado. Estas curvas permiten visualizar como los tamaños de las partículas de cada material se comparan con los límites inferior y superior establecidos por la norma para el tipo de material de base granular Gradación B. En general, se visualiza que la mayoría de los materiales se encuentran dentro de los rangos de las franjas granulométricas.

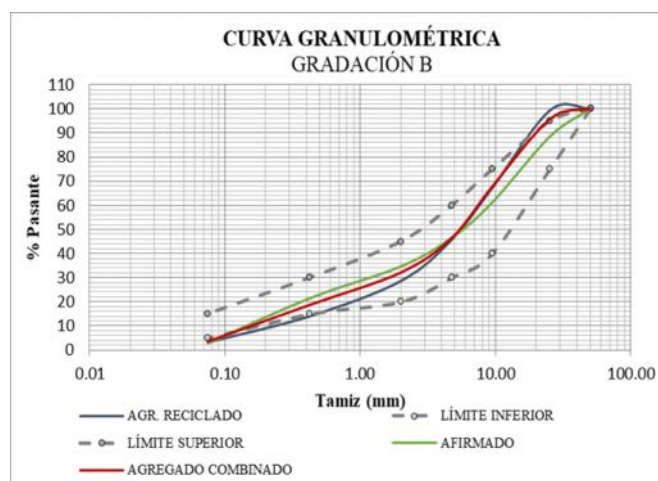


Fig. 2 Curvas granulométricas por cada tipo de material

La figura anterior muestra tres curvas que representan diferentes materiales. (1) la curva azul corresponde al agregado reciclado de concreto que se procesó en la planta trituradora de agregado, (2) la curva verde representa el material de afirmado extraído de la cantera "El Guitarrero" ubicada en el área "El Gavilán" de Cajamarca y (3) la curva roja muestra la mezcla de 50% agregado reciclado y 50% afirmado.

Adicionalmente, en la Tabla 3 se presenta un resumen de los resultados promedio de las propiedades físicas obtenidos en cada ensayo en cumplimiento de cada norma especificada. Cada ensayo fue repetido tres veces para obtener resultados más precisos y confiables.

TABLA 3
RESUMEN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO RECICLADO Y AFIRMADO

ENSAYO DE MATERIALES	Norma	MATERIAL	
		Agregado Reciclado	Afirmado
Clasificación AASHTO	ASTM D 3282	A1 - a	A1 - a
Clasificación SUCS	ASTM D 2487	GW	GW
Partículas con una cara fracturada	ASTM D 5821	96.00%	92.80%
Partículas con dos caras fracturadas	ASTM D 5821	95.30%	91.70%
Abrasión "Los Ángeles"	ASTM C 130	32.30%	59.80%
Partículas chatas y alargadas	ASTM D 4791	2.80%	5.60%
Límite Líquido	ASTM D 4318	25	18
Límite Plástico	ASTM D 4318	N.P.	N.P.
Equivalente de arena	ASTM D 2419	59.00%	17.33%

Durante el estudio, se realizó el ensayo de Proctor Modificado, repitiendo tres veces para cada tipo de material, con el objetivo de determinar las relaciones entre el contenido de agua (% humedad óptimo) y la densidad seca máxima de cada uno. La Tabla 4 contiene datos detallados sobre las características de compactación de los materiales examinados.

TABLA 4
RESULTADOS PROMEDIO DEL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO POR CADA MATERIAL

Próctor Modificado (MTC E 115)	MATERIAL		
	Agregado Reciclado	Afirmado	Agregado Combinado
Densidad Seca Máx.	2.01	2.23	2.12
Humedad Óptima (%)	10.57	5.91	7.99

El valor relativo de soporte (CBR) para los materiales en estudios se muestra en la Tabla 5 como promedio de las tres repeticiones del ensayo.

TABLA 5
RESULTADOS PROMEDIO DEL ENSAYO DE CBR POR CADA MATERIAL

California Bearing Ratio (MTC E 132)	MATERIAL		
	Agregado Reciclado	Afirmado	Agregado Combinado
95% Ds. Máx.	1.88	2.12	2.01
CBR (%)	120.33	41	86.33

Además, como se muestra en la Figura 3, dependiendo de la cantidad de agregado reciclado de concreto utilizado, la densidad seca máxima al 95% es inversamente proporcional al % CBR.

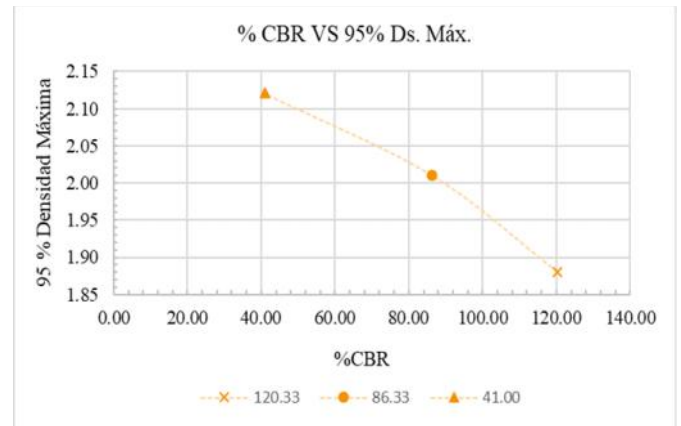


Fig. 3 Comparación del %CBR y el 95% densidad máxima de cada material

Además, para mejorar la comprensión del comportamiento del agregado reciclado de concreto, se llevó a cabo el ensayo de carga – penetración después de sumergir el material en agua durante 24 horas y 96 horas (Ensayo de Hinchamiento). Se observó que la densidad seca máxima no varió en función al tiempo de duración del ensayo de hinchamiento, no obstante, la capacidad de CBR aumentó.

TABLA 6
RESULTADOS DEL ENSAYO DE CBR A LAS 24 Y 96 HORAS

California Bearing Ratio (MTC E 132)	Agregado Reciclado	
	95% Ds. Máx.	CBR (%)
96 horas	1.88	120.33
24 horas	1.88	96.33

Por otro lado, la Figura 4 presenta un resumen de los datos para el agregado reciclado, agregado combinado y afirmado, incluyendo el % de CBR, la densidad seca máxima al 95% y el contenido de humedad óptimo. Se visualiza que existe una relación directa entre el contenido de humedad óptimo y el % CBR, empero ambos tienen una relación inversa con la densidad seca máxima.

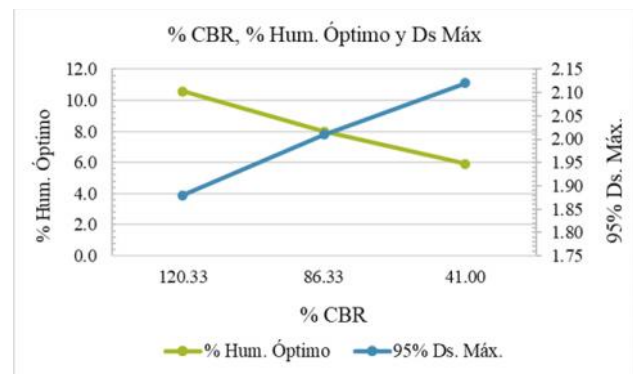


Fig. 4 Resumen del %CBR, % Hum. Ópt. y el 95% densidad máxima por cada material

Añadido a lo mencionado anteriormente, se realizó el análisis de precios unitarios del agregado reciclado de concreto y del material de afirmado.

AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO

Partida	01.01	TRANSPORTE DE MATERIAL RECICLADO				
Rendimiento	m3k/DIA	1,000.0000	EQ. 1,000.0000	Costo unitario directo por : m3k		2.80
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Equipos						
CARGADOR FRONTAL CAT-930	hm	1.0000	0.0080	150.00	1.20	
CAMION VOLQUETE DE 15 m3	hm	1.0000	0.0080	200.00	1.60	2.80
Partida	01.02	TRANSPORTE A PLANTA TRITURADORA DE AGREGADO				
Rendimiento	m3k/DIA	1,000.0000	EQ. 1,000.0000	Costo unitario directo por : m3k		2.80
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Equipos						
CARGADOR FRONTAL CAT-930	hm	1.0000	0.0080	150.00	1.20	
CAMION VOLQUETE DE 15 m3	hm	1.0000	0.0080	200.00	1.60	2.80
Partida	01.03	TRANSPORTE DE AGREGADO RECICLADO A OBRA				
Rendimiento	m3k/DIA	1,000.0000	EQ. 1,000.0000	Costo unitario directo por : m3k		2.80
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Equipos						
CARGADOR FRONTAL CAT-930	hm	1.0000	0.0080	150.00	1.20	
CAMION VOLQUETE DE 15 m3	hm	1.0000	0.0080	200.00	1.60	2.80
Partida	02.01	RECUPERACIÓN DE MATERIAL RECICLADO				
Rendimiento	m3/DIA	30.0000	EQ. 30.0000	Costo unitario directo por : m3		10.17
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Mano de Obra						
PEON	hh	2.0000	0.5333	18.51	9.87	9.87
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	9.87	0.30	0.30
Partida	02.02	TRITURACIÓN MANUAL DE MATERIAL RECICLADO				
Rendimiento	m3/DIA	20.0000	EQ. 20.0000	Costo unitario directo por : m3		15.55
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Mano de Obra						
PEON	hh	2.0000	0.8000	18.51	14.81	14.81
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	14.81	0.74	0.74

Partida	02.03	TRITURACIÓN EN PLANTA TRITURADORA DE AGREGADO				
Rendimiento	m3/DIA	30.0000	EQ. 30.0000	Costo unitario directo por : m3		55.09
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Mano de Obra						
PEON	hh	1.0000	0.2667	18.51	4.94	4.94
Materiales						
PLANTA TRITURADORA DE AGREGADO	m3		1.0000	50.00	50.00	50.00
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		3.0000	4.94	0.15	0.15
Partida	03.01	CONFORMACIÓN DE BASE GRANULAR CON AGREGADO RECICLADO				
Rendimiento	m3/DIA	300.0000	EQ. 300.0000	Costo unitario directo por : m3		11.34
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Mano de Obra						
OPERARIO OFICIAL	hh	2.0000	0.0533	26.06	1.39	1.39
PEON	hh	1.0000	0.0267	20.47	0.55	0.55
	hh	4.0000	0.1067	18.51	1.98	3.92
Materiales						
AGREGADO RECICLADO	m3		1.2000	0.01	0.01	0.01
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	3.92	0.20	0.20
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROP	hm	1.0000	0.0267	120.00	3.20	3.20
MOTONIVELADORA 130 - 135 HP	hm	1.0000	0.0267	150.00	4.01	7.41

MATERIAL DE AFIRMADO

Partida	01.01	CONFORMACIÓN DE BASE GRANULAR				
Rendimiento	m3/DIA	300.00	EQ. 300.00	Costo unitario directo por : m3		60.40
Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Mano de Obra						
OPERARIO OFICIAL	hh	2.0000	0.0533	26.06	1.39	1.39
PEON	hh	1.0000	0.0267	20.47	0.55	0.55
	hh	4.0000	0.1067	18.51	1.98	3.92
Materiales						
AFIRMADO	m3		1.2000	40.00	48.00	48.00
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	3.92	0.20	0.20
RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOPROP	hm	1.0000	0.0267	130.00	3.47	3.47
MOTONIVELADORA 130 - 135 HP	hm	1.0000	0.0267	180.00	4.81	8.48

Del análisis de precios unitarios, se estimó un aumento del 66.47% del costo por metro cúbico (m3) al comparar una base granular con material virgen con una base granular con agregado reciclado de concreto. Este incremento en el costo se debe principalmente al transporte y al proceso de trituración previa del material reciclado para su uso. Del análisis, se obtuvo que 1m3 de base granular con agregado reciclado

tendría un costo de S/100.55 y un base granular con material virgen costaría S/60.40 por m³.

Aunque no representa un beneficio económico inmediato, a largo plazo el uso de agregado reciclado de concreto ofrece ahorros significativos debido a su durabilidad y resistencia superiores en comparación con el agregado natural. Esto potencialmente reduce los costos y recursos necesarios para el mantenimiento de las bases granulares.

En cuanto a su impacto ambiental, el uso de agregado reciclado de concreto puede tener un impacto significativo en la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento. Además, ayuda a disminuir la necesidad de extraer nuevos recursos naturales y promueve una gestión más sostenible de los residuos de construcción y demolición. Para evaluar las reducciones de costos de manera precisa, se requeriría de un expediente completo que considere todos los factores del plan de mitigación ambiental.

En resumen, el análisis de costo – beneficio indica que, si bien el uso de agregado reciclado de concreto puede ser inicialmente más costoso, sigue siendo una opción económicamente viable y ambientalmente beneficiosa en comparación con los materiales tradicionales, especialmente cuando se consideran los beneficios a largo plazo y los impactos ambientales positivos.

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para reducir la contaminación y evitar la acumulación de residuos de concreto en rellenos sanitarios, la investigación propone el uso de agregado reciclado de concreto en bases granulares para pavimento. Esta opción de construcción promueve la sostenibilidad al disminuir la necesidad de extraer materiales de canteras de forma continua. Al incorporar agregado reciclado, se fomenta la reutilización de materiales y se contribuye a un enfoque de construcción más sostenible.

La limitación de la investigación radica en la escasez de investigaciones previas sobre el comportamiento y las propiedades físico – mecánicas del concreto reciclado como agregado en bases granulares de pavimentos, tanto a nivel regional como nacional. Además, se debe tener en cuenta que la muestra no incluyó concreto de demoliciones de estructuras, sino solo probetas de concreto encontradas en el relleno sanitario, limitando su aplicación en la ejecución de proyectos a gran escala. Por otro lado, la cantidad de recursos disponibles para realizar ensayos era limitada en comparación con la demanda.

Sin embargo, se encontraron estudios sobre el reciclado de áridos en pavimentos, como en el trabajo de [14], los autores emplearon escombros de construcción y agregado natural en una proporción del 50% de cada tipo para bases y subbases granulares. Sus hallazgos indicaron un CBR del 115.62%, un valor superior al obtenido en nuestra investigación, lo cual demuestra que los áridos reciclados pueden tener propiedades mecánicas similares a las del

agregado convencional y respaldando su uso como opción para la construcción de pavimentos.

Según los resultados de [15], el uso completo de residuos de construcción y demolición produce un CBR de 56% en estado húmedo y un 47% en estado seco, lo que indica que este material solo se recomienda para subbases. Además, se observó que las probetas sumergidas en agua durante cuatro días no experimentaron cambios en su expansión, pero sí en CBR. Aunque nuestros resultados difieren en cuanto al CBR, ambas investigaciones no registraron cambios en el volumen durante el ensayo de hinchamiento. Se cree que la variación en los resultados de CBR puede ser por el tipo de material utilizado en los ensayos que puede incluir en sus propiedades mecánicas.

El estudio de [16] evidenció la búsqueda de alternativas para reemplazar materiales pétreos y reducir la afectación del suelo, ya que la extracción de agregados causa deformaciones geomorfológicas. Los hallazgos están relacionados con nuestra investigación en términos de promover la necesidad de utilizar materiales de construcción de pavimentos que sean sostenibles y amigables con el medio ambiente.

Como implicancias del estudio se demuestra que el uso de concreto reciclado como agregado en la construcción de bases granulares es una alternativa sostenible. El agregado reciclado de concreto cumple con las especificaciones del Manual de Carreteras, lo que beneficia al medio ambiente al disminuir la explotación de canteras y sus efectos perjudiciales. Además, fomenta la reutilización de materiales de construcción y demolición en lugar de desecharlos, lo que mejora la gestión de los desechos.

La investigación encontró que, en comparación con los requisitos de gradación establecidos en el Manual de Carreteras, el agregado reciclado de concreto presenta una granulometría uniforme, aunque con una baja presencia de agregado grueso de 1” y una alta presencia de agregado fino. No obstante, el agregado reciclado cumplió con las propiedades físicas requeridas para agregado grueso y fino. Además, se obtuvo un CBR del 120.33%, que supero los mínimos requeridos para diferentes niveles de tráfico. Se observó que la resistencia del material aumentaba con el tiempo de inmersión, posiblemente debido a que el concreto previo al reciclaje no haya culminado su tiempo de curado requerido. En general, los resultados indican que el agregado reciclado de concreto es apto para su uso como material de base granular en pavimentos.

De igual forma, se realizó un análisis de los resultados del afirmado en relación con la normativa, y se encontró que cumple con los límites granulométricos establecidos, aunque presenta un mayor contenido de material fino en la malla N° 200. Sus propiedades físicas cumplen con los requisitos mínimos, a excepción del ensayo de equivalente de arena, que registró un valor de 17.67% inferior al mínimo debido a una mayor proporción de arcilla en comparación con la arena, además, el ensayo de abrasión mostró un aumento del 19.80% en el límite permitido, lo que indica un desgaste más rápido del material. Por otro lado, el % CBR obtenido fue de 41.00%,

el cual está por debajo de lo requerido para su uso en bases granulares.

También se evaluó el agregado combinado (50% de agregado reciclado y 50% de afirmado), se determinó que presenta una gradación adecuada que cumple con los límites granulométricos establecidos para la Gradación B. Por otro lado, las propiedades mecánicas del agregado combinado mostraron un valor de CBR del 86.33%, que superó el mínimo requerido para su uso en bases granulares.

Los resultados muestran que el uso de agregado reciclado de concreto mejora significativamente el valor relativo de soporte del afirmado, superando en un 50% el mínimo requerido por el Manual de Carreteras cuando se emplea el 100% de agregado reciclado. Sin embargo, para la aplicación de pavimentos, se recomienda una proporción de 50% agregado reciclado y 50% afirmado (o material virgen), debido a que el uso exclusivo de agregado reciclado de concreto puede generar un alto contenido de álcalis en relación a la cantidad de agregado (RAA), lo que puede generar fisuras y una reducción en la durabilidad a largo plazo, lo que podría llevar al fallo del pavimento. No obstante, se sugiere la necesidad de investigaciones adicionales para profundizar en el tema, dado que se supera los objetivos planteados para esta investigación.

Es importante destacar que las pruebas realizadas abren paso a futuros temas de estudio, como la eficacia del pavimento construido con agregado reciclado de concreto, para lo cual se requieren de pruebas que puedan determinar su vida útil a largo plazo. También, se debe considerar la ausencia de regulaciones y especificaciones para el uso de agregado reciclado de concreto en bases granulares en Perú.

V. CONCLUSIONES

-)] El uso de agregado reciclado de concreto mejora significativamente las propiedades físicas y mecánicas, incluso los parámetros establecidos por la normativa fueron superados; se destaca que el ensayo de valor relativo de soporte (%CBR) cumplió con los requisitos para ser utilizado como material de base granular en pavimentos.
-)] El afirmado y el agregado reciclado mostraron similitudes en sus propiedades físicas, como la granulometría, % partículas chatas y largadas, % de partículas fracturadas e índice de plasticidad. Sin embargo, el afirmado presentó un exceso del 19.80% en el ensayo de abrasión y los resultados del ensayo de equivalente de arena estuvieron por debajo en un 17.67% del mínimo requerido.
-)] El agregado reciclado de concreto al 100% presenta propiedades mecánicas superiores en comparación con el afirmado y el agregado combinado al 50% en un 79.33% y 34.00% en el valor relativo de soporte (CBR), respectivamente. Las muestras con agregado reciclado de concreto cumplen con las especificaciones del Manual de Carreteras.

-)] Tanto el agregado reciclado al 100% como el agregado combinado al 50% cumplieron con los requisitos en sus propiedades físicas y mecánicas, presentando un 40.33% y un 6.33% más del mínimo requerido por la normativa en sus respectivos índices de resistencia del suelo (%CBR).

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a nuestros padres, hermana y hermanos por el constante apoyo en nuestra vida universitaria y por impulsarnos a lograr una de muchas metas que están por venir.

REFERENCIAS

- [1] Martínez, G., & Taico, S. Reciclado de concreto para la construcción de bases en la estructura de pavimentos. Tesis. Junio 2023.
- [2] Agencia de Protección Ambiental de Los Estados Unidos [EPA]. (2019). Construction and Demolition Debris: Material-Specific Data. <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/construction-and-demolition-debris-material>
- [3] Wang, F., Hoff, I., Yang, F., Wu, S., Xie, J., Li, N., & Zhang, L. (2021). Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126659. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126659>
- [4] Ministerio del Ambiente. (2013). Informe anual de residuos sólidos municipales y no municipales en el Perú Gestión 2012 (p. 270). <https://redrrss.minam.gob.pe/material/20140423145035.pdf>
- [5] Camargo Najjar, C. (2019). Evaluación del uso de pavimentos rígidos demolidos como agregados reciclados en la elaboración de mezclas de concreto en la región Puno-2011. *Revista Científica Investigación Andina*, 18(1), Art. 1. [http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/2708](https://doi.org/10.35306/revArias, F. G. (2016). El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica (Séptima). Editorial Episteme.[6] Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez-García, H. L., Hernández-Barrios, H., Lara-Gómez, C., Martínez-Alonso, W., Pérez-Quiroz, J. T., Bedolla-Arroyo, J. A., & González-Valdéz, F. M. (2015). Concreto reciclado: Una revisión. <i>Revista ALCONPAT</i>, 5(3), 235-248.[7] Gómez, A., & Farias, M. (2012). Comportamiento físico-mecánico de un residuo de construcción y demolición en la estructura de pavimento. 1-8.[8] Martínez-Molina, W., Torres-Acosta, A. A., Alonso-Guzmán, E. M., Chávez-García, H. L., Hernández-Barrios, H., Lara-Gómez, C., Martínez-Alonso, W., Pérez-Quiroz, J. T., Bedolla-Arroyo, J. A., & González-Valdéz, F. M. (2015). Concreto reciclado: Una revisión. <i>Revista ALCONPAT</i>, 5(3), 235-248.[9] Contreras Quezada, K. B., & Herrera Lázaro, V. A. (2015). Mejoramiento del agregado obtenido de escombros de la construcción para bases y sub-bases de estructura de pavimento en Nuevo Chimbote – Santa—Ancash. <i>Universidad Nacional del Santa</i>. <a href=)
- [10] Gutiérrez Mendoza, R. E., & Ortiz Zoloaga, C. N. (2020). Comportamiento mecánico del concreto $f'c=210$ kg/cm² según el método de agregados globales reemplazando los agregados finos y gruesos al 100% con concreto reciclado para pavimentos rígidos de bajo tránsito. Oquendo—Callao 2020 [Universidad Privada del Norte]. https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/25069/Guti%20c3%a9rrez%20Mendoza%20Richard%20Elbio_Ortiz%20Zoloaga%20Cirilo%20Nic%20a9foro.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- [11] Kerlinger, F. N. (2002). *Investigación del comportamiento* (Cuarta). McGRAW-HILL.
- [12] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta). Mc Graw Hill Education.
- [13] Arias, F. G. (2016). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología científica* (Séptima). Editorial Episteme.
- [14] Contreras Quezada, K. B., & Herrera Lázaro, V. A. (2015). Mejoramiento del agregado obtenido de escombros de la construcción para bases y sub-

bases de estructura de pavimento en Nuevo Chimbote – Santa—Ancash.
Universidad Nacional del Santa.
<http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/2708>

[15] Flor Chávez, G. F. (2012). Aprovechamiento de hormigón reciclado en obras viales [Tesis, Universidad Nacional de La Plata].
<https://doi.org/10.35537/10915/23820>

[16] Coy González, J. J. (2019). Tecnologías alternativas para pavimentos sostenibles en Colombia.
<http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/32070>