


# Miguel Nilsson

## ARTICULO FINAL PARA SUBMISIÓN UPeU.pdf

 My Files

 My Files

 Universidad Peruana Union

---

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:472786506

Fecha de entrega

9 jul 2025, 11:03 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 jul 2025, 11:11 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

ARTICULO FINAL PARA SUBMISIÓN UPeU.pdf

Tamaño de archivo

973.0 KB

19 Páginas

10.237 Palabras

54.642 Caracteres




# 10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

## Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## Fuentes principales

- 7% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 6% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	www.coursehero.com	<1%
2	Internet	hdl.handle.net	<1%
3	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%
4	Internet	repositorio.upla.edu.pe	<1%
5	Internet	es.slideshare.net	<1%
6	Trabajos entregados	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2024-11-22	<1%
7	Internet	repositorio.continental.edu.pe	<1%
8	Internet	www.researchgate.net	<1%
9	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2024-04-22	<1%
10	Trabajos entregados	Universidad Cientifica del Sur on 2024-01-22	<1%
11	Internet	patents.google.com	<1%

12	Internet	www.grafiati.com	<1%
13	Internet	repositorio.upn.edu.pe	<1%
14	Trabajos entregados	upeu on 2024-11-19	<1%
15	Internet	worldwidescience.org	<1%
16	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2022-07-15	<1%
17	Trabajos entregados	uncedu on 2024-01-03	<1%
18	Internet	cendekiawan.unmuhbabel.ac.id	<1%
19	Trabajos entregados	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2021-12-13	<1%
20	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2023-04-17	<1%
21	Internet	cebem.org	<1%
22	Trabajos entregados	Kennesaw State University on 2022-05-08	<1%
23	Publicación	Ramón Tejada Oliveros. "Optimización de las propiedades de tenacidad e impact..."	<1%
24	Internet	buscador.recolecta.fecyt.es	<1%
25	Internet	old.tyumsmu.ru	<1%

26	Internet	www.ansci.wisc.edu	<1%
27	Trabajos entregados	UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología on 2021-10-29	<1%
28	Trabajos entregados	Universidad Ricardo Palma on 2019-10-23	<1%
29	Internet	oyp.ucsc.cl	<1%
30	Internet	prezi.com	<1%
31	Internet	repositorio.unc.edu.pe	<1%
32	Internet	temoa.itesm.mx	<1%
33	Internet	trid.trb.org	<1%
34	Internet	www.ammex.org	<1%
35	Trabajos entregados	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2021-07-20	<1%
36	Trabajos entregados	Universidad San Ignacio de Loyola on 2018-07-05	<1%
37	Trabajos entregados	Universidad Santo Tomas on 2017-07-13	<1%
38	Trabajos entregados	Universidad Tecnologica del Peru on 2025-05-21	<1%
39	Trabajos entregados	Universidad de Huanuco on 2020-10-31	<1%

40	Trabajos entregados	Webster University on 2022-11-16	<1%
41	Internet	ambiental.uniandes.edu.co	<1%
42	Internet	core.ac.uk	<1%
43	Internet	docplayer.es	<1%
44	Internet	renati.sunedu.gob.pe	<1%
45	Internet	repositorio.unibague.edu.co	<1%
46	Internet	repositorio.utea.edu.pe	<1%
47	Internet	ridum.umanizales.edu.co	<1%
48	Internet	www.bymcomputer.cl	<1%
49	Internet	www.slideshare.net	<1%
50	Trabajos entregados	Grupo IOE on 2023-05-27	<1%
51	Publicación	Mamani Pancca, Milian Delfy. "Percepción ambiental y su influencia en la dispo...	<1%
52	Trabajos entregados	The University of Manchester on 2014-03-13	<1%
53	Trabajos entregados	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2022-07-21	<1%

54	Trabajos entregados	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2023-03-15	<1%
55	Trabajos entregados	Universidad Andina del Cusco on 2025-06-18	<1%
56	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2016-12-27	<1%
57	Trabajos entregados	Universidad Cesar Vallejo on 2022-12-06	<1%
58	Trabajos entregados	Universidad Ricardo Palma on 2019-10-21	<1%
59	Trabajos entregados	Universitat Politècnica de València on 2020-10-27	<1%
60	Internet	issuu.com	<1%
61	Internet	laccei.org	<1%
62	Internet	qdoc.tips	<1%
63	Internet	repositorio.unal.edu.co	<1%
64	Internet	repositorio.upao.edu.pe	<1%
65	Internet	repositorio.uss.edu.pe	<1%
66	Internet	upcommons.upc.edu	<1%
67	Internet	www.fontagro.org	<1%

68

Internet

www.scielo.org.bo

<1%

## Artículo de Investigación

Ahumada Miguel\*, Huarcaya Nilsson\*, Araca Moisés\*

# *Incidence of recycled concrete in a sustainable granular base and subbase*

## Incidencia del concreto reciclado en una base y subbase granular sostenible

**Abstract:** In recent years, the use of recycled materials in pavement construction has emerged as a crucial strategy to address the challenges associated with sustainability in road infrastructure. This study investigates the performance of granular base and subbase materials incorporating recycled concrete as a sustainable material in road infrastructure. The primary objective is to determine the impact of recycled concrete on the physical and mechanical properties of granular bases and subbases, with the main goal of promoting sustainable construction techniques. This research was conducted using a quantitative approach, with a quasi-experimental and explanatory design. The recycled concrete was processed through crushing and sieving to remove impurities and achieve the appropriate size and properties according to the standards for base and subbase mixtures. Various tests were conducted to evaluate the structural and mechanical properties of the recycled concrete when used as a substitute for conventional aggregates, such as natural quarry materials (gravels and sands). These tests were performed in compliance with the Peruvian regulation EG-2013 of the Ministry of Transport, meeting the parameters specified in the sections for granular bases and subbases. In pavement studies, particular emphasis was placed on Liquid Limit, Plasticity Index, and CBR tests, with various proportions of recycled concrete (0%, 40%, 70%, and 90%) used for granular bases and (0%, 12%, 20%, 40%) for granular subbases. The results show that the optimal mix for a granular base consists of 30% Taparachi quarry material and 70% recycled concrete (TAP.

30%+CR 70%), while for the granular subbase, the best optimal mix consists of 60% Taparachi quarry material and 40% recycled concrete (TAP 60% + CR 40%). Both

combinations fall within the standards set by the regulation, with the most relevant properties being the Plasticity Index and CBR. These results for the formation of bases and subbases provide positive environmental benefits by reducing CO2 emissions and, primarily, minimizing construction waste. Moreover, they promote sustainability in pavements by offering viable and effective options to improve resource utilization, cost analysis, and environmental impact related to road infrastructure (pavement) construction.

**Keywords:** mechanical properties, pavements, recycled concrete, structural performance and sustainability.

**Resumen:** En los últimos años, se vio que el uso de los materiales reciclados en el ámbito de la construcción de pavimentos ha escalado como una estrategia crucial para poder acercarse a los desafíos que conlleva la sostenibilidad en la infraestructura vial. Este estudio investiga la problemática sobre el desempeño de la base y subbase granular con incorporación de concreto reciclado como material sostenible en infraestructura vial. Teniendo también como objetivo principal de poder determinar cuál es la incidencia del concreto reciclado en las propiedades físicas y mecánicas en bases y subbases granulares con el propósito principal de promover técnicas de construcción sostenible. Esta investigación fue realizada mediante un enfoque cuantitativo, con un diseño cuasiexperimental y de nivel explicativo. El concreto reciclado se obtuvo mediante un proceso de trituración y tamizado con el fin de reducir impurezas y poder lograr el tamaño y las propiedades adecuadas según la normativa para mezclas de base y subbase. Para este fin, se hicieron varios ensayos para poder evaluar el uso las propiedades estructurales y mecánicas del uso porcentual del concreto reciclado como sustituto de los agregados convencionales como el material de canteras naturales (gravas y arenas), dichos ensayos están indicados en la normativa peruana EG-2013 del Ministerio de Transportes, cumpliendo con los parámetros indicados

en las secciones para bases y subbases granulares. Sin embargo, en cuestiones de pavimentos se vio con más importancia a los ensayos de Límites Líquidos, Índice de Plasticidad y CBR, donde se hizo ensayos con distintas proporciones de concreto reciclado (0%, 40, 70% y 90%) para base granular y para subbase granular (0%, 12%, 20%, 40%). Donde los resultados muestran que la dosificación óptima para una base granular es con materiales de la cantera Taparachi en un 30% y concreto reciclado con un 70% (TAP 30% + CR 70%), y en cuanto a la subbase granular la mejor dosificación óptima de material de la cantera de Taparachi en un 60% y concreto reciclado en un 40% (TAP 60% + 40%), donde ambas combinaciones están dentro de lo indicado por esta normativa y siendo las propiedades más relevantes, el Índice de Plasticidad y el CBR. Estos resultados para la conformación de bases y subbases, ayudan positivamente a nivel ambiental, por las emisiones de CO<sub>2</sub> y principalmente en la reducción de residuos provenientes de la construcción, y a su vez nos permite impulsar la sostenibilidad en pavimentos, dándonos opciones viables y efectivas para mejorar de una manera más eficiente el uso de los recursos, análisis de costos y el impacto ambiental en temas relacionados con la construcción de infraestructura vial (pavimentos).

**Palabras claves:** concreto reciclado, desempeño estructural, impacto ambiental, pavimentos, propiedades mecánicas y sostenibilidad.

## 1 Introduction

A lo largo de la historia en la industria de la construcción se vio que es uno de los mayores consumidores de recursos naturales, requiriendo grandes cantidades de agregados pétreos, agua, suelo, cal derivadas de la trituración de las rocas. Dichos materiales extraídos de recursos naturales como son las minas, canteras y bancos naturales; son muy significativos para grandes infraestructuras, como son las autopistas, puentes, presas, aeropuertos; además de proyectos de ingeniería más pequeños a nivel internacional [2]. Sin embargo, este consumo desmedido ha generado un problema creciente con alrededor de 10 mil millones de toneladas cada año, de residuos de construcción y demolición (RCD) y estos han alcanzado cifras globales [10]. Todo este volumen de residuos engloba grandes cantidades de concreto que, al ser reciclado, puede ser una alternativa sostenible y viable para la industria de la construcción [5].

En los últimos años, el concepto de gestionar de

manera sostenible estos residuos ha cobrado mayor importancia, particularmente con la reutilización de agregados de concreto reciclado (RCA) en la construcción de pavimentos. El mayor representante de los RCD, el RCA, ha sido examinado en reiterados estudios debido a su capacidad para sustituir a los agregados naturales en el ámbito de la ingeniería vial. Los hallazgos recientes indican que el RCA puede contribuir a la creación de pavimentos resistentes con un rendimiento superior [3]. Este enfoque es relevante para reducir la extracción de recursos no renovables y mitigar las consecuencias ambientales adversas de la explotación de canteras.

La exploración del uso de concreto reciclado en las capas de base y subbase de pavimentos ha obtenido lugar en diferentes escenarios. En estudio previos [1] donde se analizó sobre el potencial técnico y económico de utilizar RCD no ligados como materiales granulares en pavimentos, obteniendo resultados positivos en términos de capacidad, resistencia de carga y durabilidad. Sin embargo, continúan existiendo dificultades relacionadas con la inconsistencia en lo relacionado a las propiedades mecánicas de estos agregados reciclados y la necesidad de perfeccionar las regulaciones técnicas y los estándares en respuesta a los avances en el reciclaje de concreto.

En cuanto a la recolección y la reutilización de desechos de actividades de la construcción y la demolición disminuye la cantidad de materiales no renovables extraídos de forma constante, conllevando a la no destrucción de canteras, lo que promueve la sostenibilidad y la adecuada atención a la disposición de residuos, desafíos que los países en desarrollo y desarrollados enfrentan [5].

Las iniciativas de promoción de los RCD en una variedad de aplicaciones de construcción, a través de iniciativas como NACDMX - 007 – RNAT – 2019, impulsa la economía circular y la sostenibilidad. Esta normativa permite, por ejemplo, la aplicación del 100% de residuos de concreto como material en las bases hidráulicas de carreteras y estacionamientos. Estas nuevas regulaciones crean oportunidad para la amplia utilización de RCA en la infraestructura vial [2].

A pesar de los avances en sostenibilidad, la aplicación de concreto reciclado en proyectos de pavimentación en muchos países en vías de desarrollo, como es el Perú, sigue siendo bastante limitada. En ciudades como Juliaca, donde la generación de residuos sólidos ha aumentado considerablemente, un sistema inadecuado de disposición de RCD agrava tanto los

problemas sociales como ambientales. Estudios previos concluyen que tan solo en el 2017 la ciudad generó 75,000 toneladas de residuos sólidos anualmente, de los cuales el 72% eran materiales reciclables. Aunque estos datos hacen referencia a residuos sólidos en general, es un indicador de la creciente necesidad de sistemas adecuados de manejo para residuos específicos, como es el caso de los de construcción y demolición (RCD) [6].

Debido a la combinación de un creciente aumento poblacional y la actividad comercial en Juliaca, se debe tener en cuenta la necesidad de expandir el área urbana para atender a su creciente población. Esto implica la construcción de viviendas, centros comerciales, infraestructuras viales; entre otros, que puedan acoger esta tasa poblacional, donde esto no solo ha generado demoliciones de edificaciones antiguas, sino también en la creación y renovación de infraestructuras viales que se encuentren en estado crítico, donde este proceso incrementa la generación de RCD en especial en el concreto y otros materiales de demolición. Por ello, surge la necesidad urgente de encontrar soluciones sostenibles que consideren el uso de residuos de áridos de concreto (RCA) para la construcción de pavimentos, tanto en la base como subbase de este [2].

El presente estudio se enfoca en evaluar el desempeño de una base y subbase granular influenciada por distintas adiciones porcentuales de concreto reciclado como un material sostenible en este contexto.

El objetivo de esta investigación no solo es avanzar en el desarrollo de infraestructura vial más sostenible, sino también de llamar la atención sobre la necesidad de integrar los principios de la economía circular en la gestión de los residuos de construcción y demolición, bajo un concepto de armonía con las tendencias de sostenibilidad a nivel mundial en el sector de la construcción.

## 2 Materiales and Metodología

La presente investigación se realizó en la ciudad de Juliaca, departamento de Puno, a una altitud promedio de 3824 msnm, geográficamente se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas geográficas, Latitud 15°29'36" S y Longitud 70° 8' 8" W, el clima es frío con viento moderado a fuerte con precipitaciones más frecuentes de diciembre a marzo, lloviendo con mayor intensidad el mes de enero.

La metodología de la investigación está dividida en tres diferentes fases para alcanzar el objetivo planteado y dar solución a la problemática, siendo de tipo aplicada

debido a que se pretende dar solución a la problemática de sobreexplotación de canteras en el uso de infraestructuras viales, donde se consideró un enfoque cuantitativo ya que se realizaron cálculos numéricos, también fue de diseño cuasi - experimental donde el grupo experimental fue manipulado para determinar el efecto de los porcentajes del concreto reciclado en el desempeño de una base y subbase granular, y que perteneció a un nivel explicativo con la finalidad de conocer las propiedades y el comportamiento del concreto reciclado en estas estructuras del pavimento [11].

La población estuvo conformada por la base y subbase granular en la ciudad de Juliaca (3824 msnm), donde es importante mencionar que se seguirán los parámetros para bases y subbases que se crearán a una altura  $\geq 3000$  msnm. La muestra se conformó por materiales de las canteras Taparachi e Isla y diferentes porcentajes de material de concreto reciclado proveniente de demoliciones en su mayoría veredas (con una media de  $f'c = 140$  kg/cm<sup>2</sup>).

Se evaluaron los materiales empleados en la combinación de estos para la conformación de una base y subbase granular, se incorporó 10%, 30% y 60% de material pétreo de la cantera Taparachi; 10%, 20%, 28% y 40% de agregados de la cantera Isla; y 12%, 20%, 30%, 40%, 70% y 90% de concreto reciclado.

### 2.1 Fase Preliminar

Para el desarrollo adecuado del presente trabajo de investigación, se llevó a cabo una revisión bibliográfica que abarcó diversos antecedentes tanto nacionales como internacionales, asimismo, se realizó una revisión detallada de las normativas pertinentes para realizar correctamente las pruebas necesarias para determinar las propiedades de cada material empleado, donde están todos los parámetros para llevar a cabo de una forma correcta EG-2013 [8].

40

Tabla 1: Requerimientos granulométricos según la EG-2013.

Tamiz	Requerimientos granulométricos para subbase granular	
	Requerimientos granulométricos para subbase granular	Requerimientos granulométricos para subbase granular
	Porcentaje que pasa en peso	
	Gradación A (1)	Gradación A
50 mm (2")	100	100
25 mm (1")	-	-
9.5 mm (3/8")	30-65	30-65
4.75 mm (N° 4)	25-55	25-55
2.0 mm (N° 10)	15-40	15-40
425 µm (N° 40)	8-20	8-20
75 µm (N°200)	2-8	2-8

67

Tabla 2: Requerimientos de ensayos especiales para subbase.

Subbase Granular Requerimientos de Ensayos Especiales			
Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	≥ 3000 msnm
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	50 % máx.
CBR (1)	MTC E 132	D 1883	40 % mín.
Límite Líquido	MTC E 110	D 4318	25% máx.
Índice de Plasticidad	MTC E 111	D 4318	4% máx.
Equivalente de Arena	MTC E 114	D 2419	35% mín.
Sales Solubles	MTC E 219	-	1% máx.
Partículas Chatas y Alargadas	-	D 4791	20% máx.

2

44

Tabla 3: Requerimiento según la EG-2013 para un base granular

Base Granular			
Requerimientos agregado grueso			
Ensayo	Norma MTC	Norma ASTM	≥ 3000 msnm
Partículas con una cara fracturada	MTC E 210	D 5821	80% mín.
Partículas con dos caras fracturadas	MTC E 210	D 5821	50% mín.
Abrasión Los Ángeles	MTC E 207	C 131	40% máx.
Partículas chatas y alargadas (1)	-.-	D 4791	15% máx.
Sales solubles totales	MTC E 219	D 1888	0,5% máx.
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	C 88	18% máx.

Requerimientos agregado fino		
Índice plástico	MTC E 111	2% max.
Equivalente de arena	MTC E 114	45% mín
Sales solubles	MTC E 219	0,5% máx.
Durabilidad al sulfato de magnesio	MTC E 209	15%
Requerimiento CBR		
Valor Relativo de Soporte, CBR (1)	Tráfico en ejes equivalentes (<10*6)	Mín. 80%

## 2.2 Fase de campo

Los materiales utilizados en la conformación de la base y subbase granular fueron extraídos de las canteras mencionadas anteriormente y los residuos de concreto fueron reciclados de las demoliciones de calles y veredas de diferentes lugares de la ciudad de Juliaca.

Estos materiales fueron transportados a un laboratorio geotécnico, donde se realizaron las pruebas físicas descritas y normadas por la EG-2013 (análisis granulométrico de los agregados fino y grueso, índice de plasticidad, abrasión Los Ángeles, equivalente de arena, partículas chatas y alargadas, porcentaje de partículas fracturadas, Proctor modificado y CBR), para evaluar las características de los agregados finos y gruesos provenientes de diferentes canteras seleccionadas.



Figura 1: Obtención de materiales provenientes de la cantera Isla.



Figura 2: Obtención de materiales provenientes de la cantera Taparachi.



Figura 4: Realización del ensayo de abrasión los ángeles.



Figura 3: Obtención de materiales provenientes de residuos de concreto.



Figura 5: Realización de los ensayos granulométricos.

### 2.3 Fase de laboratorio

Se llevaron a cabo pruebas físicas y mecánicas en los agregados finos y gruesos provenientes de canteras, así como en los lugares de recolección del concreto reciclado. Además, se realizaron pruebas con distintas combinaciones de materiales con el objetivo de obtener una mezcla óptima para la conformación tanto de una base como de una subbase granular, según las especificaciones y requisitos establecidos de la normativa peruana EG-2013.

Estas pruebas se realizaron en un laboratorio geotécnico y se obtuvieron estos resultados como se muestran en las siguientes figuras y tablas.



Figura 6: Realización de los ensayos de CBR.

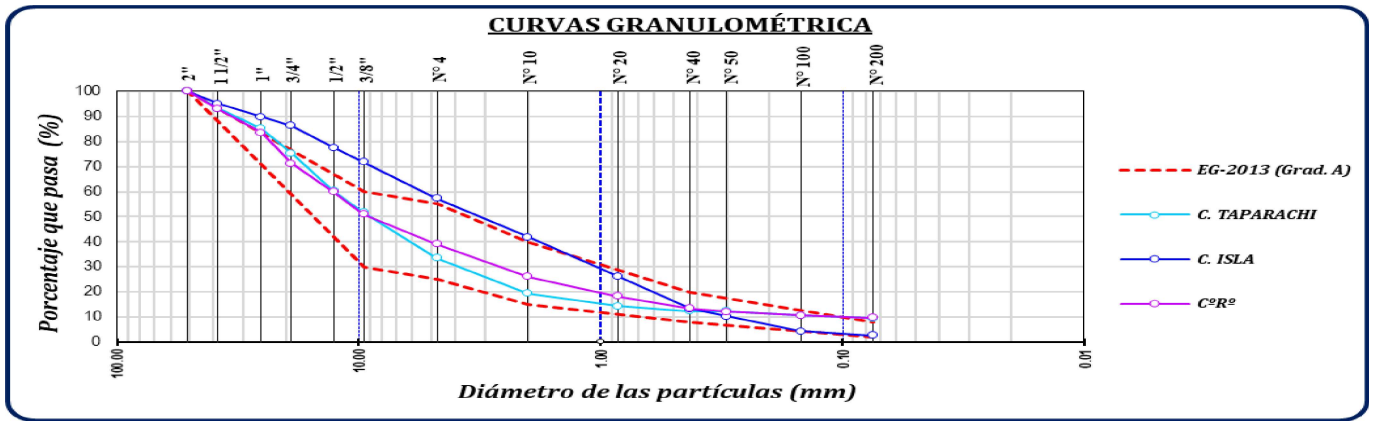


Figura 7: Curva granulométrica de agregados de las canteras Taparachi, Isla y concreto reciclado.

Tabla 4: Propiedades del material de Taparachi y sus parámetros.

Cantera Taparachi				
Ensayos	Und.	Resultados	Base granular	Sub base granular
Granulometría % Gravas	%	66.44	-	-
Granulometría % Arenas	%	24.04	-	-
Granulometría % Finos	%	9.52	-	-
Límite líquido	%	30.24	-	25% máx.
Límite plástico	%	20.99	-	-
Índice plástico	%	9.24	2% mín.	4% máx.
Equivalente de arena	%	34.10	45% mín.	35% mín.
Sales solubles A.F.	%	0.40	0.5% máx.	-
Durabilidad al sulfato de magnesio A.F.	%	4.39	15% máx.	-
Partículas 1 cara fracturada	%	98.19	80% mín.	-
Partículas 2 caras fracturadas	%	86.13	50% mín.	-
Abrasión de los Ángeles	%	19.10	50% máx.	40% máx.
Partículas chatas y alargadas	%	43.10	15% máx.	20% máx.
Sales solubles A.G.	%	0.40	0.5% máx.	1% máx.
Durabilidad al sulfato de magnesio A.G.	%	5.80	18% máx.	-
Densidad máxima seca	gr/cm³	2.101	-	-
Óptimo contenido de humedad	%	8.30	-	-
CBR al 100%	%	59.51	80% mín.	40% mín.
CBR al 95%	%	33.15	-	-

Tabla 6: Propiedades del material de Isla y sus parámetros.

Cantera Isla				
Ensayos	Und.	Resultados	Base granular	Sub base granular
Granulometría % Gravas	%	28.17	-	-
Granulometría % Arenas	%	69.26	-	-
Granulometría % Finos	%	2.57	-	-
Límite líquido	%	N.P.	-	25% máx.
Límite plástico	%	N.P.	-	-
Índice plástico	%	N.P.	2% mín.	4% máx.
Equivalente de arena	%	84.88	45% mín.	35% mín.
Sales solubles A.F.	%	0.20	0.5% máx.	-
Durabilidad al sulfato de magnesio A.F.	%	6.55	15% máx.	-
Partículas 1 cara fracturada	%	4.85	80% mín.	-
Partículas 2 caras fracturadas	%	1.86	50% mín.	-
Abrasión de los Ángeles	%	22.40	50% máx.	40% máx.
Partículas chatas y alargadas	%	11.88	15% máx.	20% máx.
Sales solubles A.G.	%	0.21	0.5% máx.	1% máx.
Durabilidad al sulfato de magnesio A.G.	%	6.44	18% máx.	-
Densidad máxima seca	gr/cm³	-	-	-
Óptimo contenido de humedad	%	-	-	-
CBR al 100%	%	-	80% mín.	40% mín.
CBR al 95%	%	-	-	-

Tabla 5: Propiedades del material del concreto reciclado y parámetros

Concreto reciclado				
Ensayos	Und.	Resultados	Base granular	Sub base granular
Granulometría % Gravas	%	49.00	-	-
Granulometría % Arenas	%	41.33	-	-
Granulometría % Finos	%	9.67	-	-
Límite líquido	%	N.P.	-	25% máx.
Límite plástico	%	N.P.	-	-
Índice plástico	%	N.P.	2% mín.	4% máx.
Equivalente de arena	%	92.83	45% mín.	35% mín.
Sales solubles A.F.	%	0.41	0.5% máx.	-
Durabilidad al sulfato de magnesio A.F.	%	38.15	15% máx.	-
Partículas 1 cara fracturada	%	83.17	80% mín.	-
Partículas 2 caras fracturadas	%	41.68	50% mín.	-
Abrasión de los Ángeles	%	31.84	50% máx.	40% máx.
Partículas chatas y alargadas	%	10.43	15% máx.	20% máx.
Sales solubles A.G.	%	0.40	0.5% máx.	1% máx.
Durabilidad al sulfato de magnesio A.G.	%	38.65	18% máx.	-
Densidad máxima seca	gr/cm³	1.911	-	-
Óptimo contenido de humedad	%	4.20	-	-

De los resultados de las tablas 4, 5 y 6 muestran que algunos ensayos, como el de Proctor, Límites y CBR, no dieron valores debido las propiedades exclusivas de los materiales utilizados, fundamentalmente los materiales de la cantera Isla y el concreto reciclado. Tanto como las partículas de mayor tamaño, estos materiales tienen baja cohesión, son rígidos y presentan una plasticidad nula. Debido a estas características que evitan que los materiales se comporten de una manera elástica o adaptable bajo cargas aplicadas como ensayos de Proctor y CBR.

Durante la etapa de laboratorio, todos estos ensayos se realizaron en base a las especificaciones técnicas establecidas en la normativa EG-2013, respaldando que cada uno de estos parámetros evaluados cumplieren con

los requisitos mínimos detallados en dicha normativa. Si bien se ve que en algunos materiales cumplen con los requisitos técnicos de forma individual como por ejemplo los ensayos de CBR, pero el objetivo de esta investigación va más allá del cumplimiento técnico. La esencia de esta investigación es la de promover de una manera sostenible el uso del concreto reciclado y así poder lograr un mejor desempeño en términos de propiedades mecánicas, durabilidad y eficiencia en el uso de recursos.

Estos materiales utilizados fueron procedentes de canteras seleccionadas, como las de Isla y Taparachi, así como de concreto reciclado que fue obtenido de varias demoliciones de veredas de obras viales urbanas dentro de la ciudad de Juliaca. Después de haber recolectado y determinado los materiales, se procedió a realizar las combinaciones de los agregados basados en un método científico para establecer la combinación ideal de agregados.

## 2.4 Fase de gabinete

Durante esta fase, se realizó un análisis detallado y cuidadoso de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, donde se utilizaron hojas de cálculo en el programa Excel. Se desarrollaron gráficos y tablas correspondientes para cada ensayo, lo que permitió realizar un estudio preciso y más comprensible de los valores obtenidos para el índice de plasticidad, Proctor modificado, CBR, entre otros.

El procesamiento de datos consistió en poder comparar las muestras elegidas, analizando los resultados del porcentaje de concreto reciclado adicionado, así como sustituto porcentual de los materiales de la cantera Isla, tanto en forma natural (para una subbase) y de forma procesada de manera mecánica como piedra chancada (base), y estos resultados fueron comparados con las muestras patrones. Dichos valores conseguidos mediante cálculo fueron revisados bajo los requisitos técnicos de la normativa EG-2013 con el fin de poder evaluar su uso para la formación de una base y subbase granular.

Este enfoque facilitó una mejor comprensión de los cambios en las propiedades físico-mecánicas de las combinaciones al adicionar concreto reciclado, donde se vio una mayor efectividad y eficiencia en comparación con los materiales de las canteras elegidas.

### 2.4.1 Obtención del agregado de cantera y concreto reciclado

El concreto reciclado u otro agregado (cantera Isla) para infraestructura vial se obtiene mediante un chancado manual o chancado mecánico, donde existe diferencias que influye en las propiedades físicas y mecánicas del material utilizado que se presentan a continuación:

#### 2.4.2 Método por chancado manual

Este método crea material de tamaños irregulares y produce más residuos de mortero, también nos da una baja eficiencia en la producción y en cuanto al concreto reciclado puede presentar una mayor absorción de agua que afecta la durabilidad.

#### 2.4.3 Método por chancado mecánico

Por este método se produce agregados con tamaños más específicos, también se obtendrá una alta capacidad y rendimiento en producción, y nos proporciona mejoras en compactación y resistencia, dando valores mayores en el CBR.

El material resultante del chancado mecánico presenta un mejor rendimiento de las propiedades estructurales a diferencia del chancado manual, especialmente en aspectos de densidad y durabilidad, donde se recomienda usar en pavimentos con altas cargas de tráfico. En cuanto al material procesado de manera manual, presentará una mayor variación en tamaños y solo puede ser usado en proyectos con bajas exigencias estructurales.

En conclusión, es preferible elegir el chancado mecánico para proyectos de infraestructura vial, debido a su eficiencia en la producción de agregados, mayor uniformidad en el tamaño de las partículas, lo que resulta en una mejor compactación y mayor resistencia de las bases y subbases. Sin embargo, en esta investigación, el chancado manual fue aplicado a los materiales de la cantera Isla y al concreto reciclado, donde este proceso consistió en varias etapas: recolección, transporte selección de materiales, trituración manual mediante el uso de herramientas como combas y clasificación a través de tamizado.

Finalmente, se realizó un control de calidad para asegurar que el material obtenido cumpliera con los requisitos de tamaño establecidos que pide la normativa

EG-2013, proporcionando así resultados útiles para poder realizar la conformación de una base y subbase granular.

En conclusión, este estudio utiliza una metodología que se basa en una base técnica para evaluar el uso de concreto reciclado en bases y subbases granulares sostenibles, especialmente en zonas de gran altitud como Juliaca. Estos materiales algunos procesados mediante chancado manual y evaluados en diferentes proporciones, demostraron su eficacia para aplicaciones en pavimentos.

### 3 Resultados y discusión

Las muestras compuestas por la combinación de materiales procedentes de canteras de Taparachi e Isla, así como concreto reciclado provenientes de demoliciones de obras viales (veredas), fueron sometidas a una serie de ensayos de características físicas y mecánicas. Estos ensayos tenían como objetivo poder determinar la viabilidad de las mezclas para la formación de una base y subbase granular para pavimentos, según lo establecido por la normativa EG-2013. Cabe recordar, que era muy importante que estos materiales puedan funcionar de manera óptima bajo condiciones de altitud explícitas, como las de la ciudad de Juliaca, provincia de San Román, departamento de Puno, que se sitúa a una altitud de 3,824 msnm.

#### 3.1 Resultados para una base granular

En la siguiente tabla 07 se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras de base granular. Estas muestras estuvieron conformadas por material pétreo de Taparachi, material de Isla (estado natural y como piedra chancada) utilizados para poder tener nuestra base patrón, y también la combinación de este material con diferentes dosificaciones de concreto reciclado, evaluando su comportamiento para la conformación de una base granular de un pavimento.

Sin embargo, en cuanto a la conformación de la base granular se optó por la piedra chancada proveniente de la cantera Isla debido a las propiedades mecánicas y a las altas exigencias de la normativa EG-2013, donde se requiere una granulometría mas uniforme, resistencia y

durabilidad para bases granulares, especificando un CBR mayor al 80%) para cumplir con los estándares de calidad. Ya que el uso solo de material de la cantera Isla en estado natural no suele llegar a los niveles de resistencia establecidos. Y debido a angularidad de este material, que fue obtenido por trituración, mejora los valores de compactación y da una mejor estabilidad estructural de las bases estructurales.

**Tabla 7:** Resultados de los ensayos realizados para una base granular con dosificaciones de concreto reciclado.

Ensayos para una subbase granular					
Ensayos	EG-2013 (≥ 3000 msnm)	Base patrón	TAP(60%) + R.C.(40%)	TAP(30%) + R.C.(70%)	TAP(10%) + R.C.(90%)
Límite líquido	-	5.96%	13.21%	0.99%	N.P.
Índice de plasticidad	2% max.	1.99%	3.97%	0.99%	N.P.
Óptimo contenido de humedad	-	8.40%	7.50%	8.60%	6.60%
Máxima densidad seca	-	2.13%	2.03%	2.02%	2.00%
CBR (100%)	80% min.	80.76%	93.59%	110.81%	87.72%

##### 3.1.1 Características de la base patrón

De acuerdo con las diferentes muestras, el comportamiento de la base granular se determinó siguiendo los parámetros de la norma EG-20113 para altitudes de más de 3000 msnm. Como se ve la primera columna, contiene material de la cantera Taparachi, material de la cantera Isla en estado natural y también como Piedra Chancada de la misma cantera: (TAP. 50% + P.C. 25% + IS. 25%), representa a nuestra base patrón sin concreto reciclado. Los ensayos realizados en esta combinación nos dieron los siguientes resultados:

El Límite Líquido obtenido fue de 5.96%, interpretando que tiene un buen comportamiento frente a la humedad.

El Índice de Plasticidad fue de 1.99%, el cual está ligeramente por debajo del límite permitido por la normativa, cumpliendo con este parámetro.

El Óptimo Contenido de Humedad resultado fue de 8.40%, lo que indica una buena compactación con un correcto nivel de humedad.

Los valores de Máxima Densidad Seca fueron de 2.13/cm<sup>3</sup> interpretando que tiene una buena compactabilidad.

En cuanto al CBR, fue del 80.76%, dándonos un valor superior al valor estándar de 80%.

Viendo todos los resultados de nuestra base patrón podemos determinar que tiene un rendimiento aceptable dentro de los parámetros probados.

### 3.1.2 Incidencia del concreto reciclado en la base granular

Se hicieron ensayos adicionales a la muestra patrón, añadiendo distintos porcentajes de concreto reciclado (C.R.), dado que la naturaleza del concreto reciclado es similar a la de la piedra chancada utilizada en la base patrón, se decidió prescindir de esta última en los ensayos con concreto reciclado. A cambio, se usaron exclusivamente los materiales de las canteras Taparachi e Isla, junto con el concreto reciclado. A continuación, se presentarán los resultados obtenidos para los ensayos de Límite Líquido, Índice de Plasticidad y CBR, ya que en proyectos viales estos resultados son los más importantes para poder evaluar el desempeño de una base granular.

En el límite líquido se puede interpretarse como la cantidad de humedad que una mezcla granular puede absorber antes de que esta pueda variar su comportamiento plástico. Cuando se utilizó la base patrón (TAP. 50% + P.C. 25% + IS. 25%), se obtuvo un valor de 5.96%, indicando una estabilidad aceptable frente a los cambios que produce la humedad. Como se ve en la Figura 04 para entender de una mejor manera que se presenta de manera gráfica los resultados, al incorporar 40% de concreto reciclado (TAP. 60% + C.R. 40%), el límite líquido incrementó de gran manera a 13.21%, lo que indica que es más susceptible a cambiar de forma en condiciones de mucha humedad. También se vio que, a mayor porcentaje de concreto reciclado, se logra una mejor estabilidad en la mezcla, porque al utilizar 70% de concreto reciclado (TAP. 70% + C.R. 30%), el límite líquido disminuyó a 0.99%, lo que nos indica una mayor resistencia al cambio plástico, y por último, en la mezcla con un 90 % de concreto reciclado (TAP. 90% + C.R. 10%), debido a la naturaleza de combinación, no presento un valor de límite líquido (N.P.), lo cual se infiere que puede estar relacionado con la baja capacidad plástica en su mayoría del concreto reciclado.

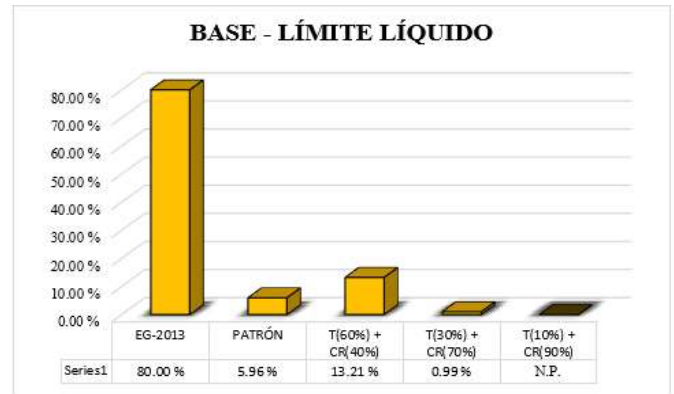


Figura 8: Límite líquido obtenidos de la base

El índice de plasticidad es un indicador de la capacidad de una mezcla para deformarse sin llegar a romperse, dependiendo totalmente del contenido de finos y del contenido de agua que presente. Donde se presentan los resultados para la base granular los siguientes; como se observó en la base patrón (TAP. 50% + P.C. 25% + IS. 25%), el índice de plasticidad fue de 1.99%, encontrándose ligeramente por debajo del valor máximo estipulado de 2%. Como se ve en la Figura 05 para entender de una mejor manera los resultados se ven que al incorporar 40% de concreto reciclado (TAP. 60% + C.R. 40%), el índice de plasticidad subió relevantemente a 3.97%, indicando un comportamiento más plástico y menos preferido. En la mezcla con 70% de concreto reciclado (TAP. 70% + C.R. 30%) donde se obtuvo un valor de 0.99 y con un 90% de concreto reciclado (TAP. 90% + C.R. 10%), no presentó índice de plasticidad (N.P.), lo que indica una mayor resistencia a la deformación de forma plástica que puede deberse a la composición del concreto reciclado.

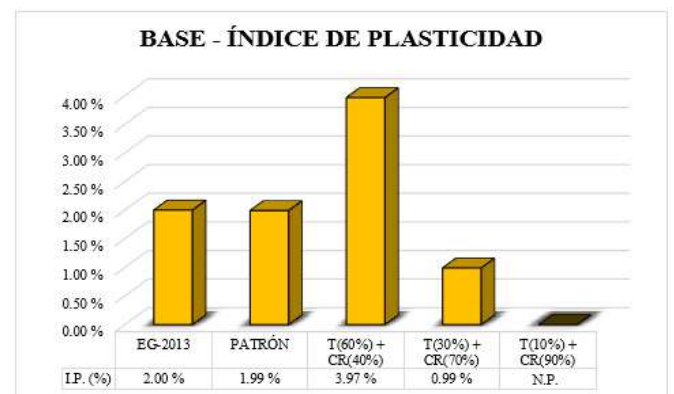


Figura 9: Índice de plasticidad obtenidos para la base

En cuanto al CBR, antes de analizar los resultados de este, previamente se debe considerar aspectos fundamentales para la conformación de una base granular. Inicialmente se vio el cumplimiento de requisitos normativos como detalla la siguiente tabla.

**Tabla 08:** Especificaciones generales según los ejes equivalentes según el manual del MTC EG-2013.

Especificaciones de CBR para el material de una base ganular		
CBR	Tráfico en ejes equivalentes (<math>10^6</math>)	Mín. 80%
	Tráfico en ejes equivalentes (>math>10^6</math>)	Mín. 100%

Teniendo estas especificaciones se realizó un estudio de tráfico en la ciudad de Juliaca (3824 msnm), tomando como lugar de proyección la avenida Andrés Avelino Cáceres (tramo Av. Ferrocarril – Av. Tupac Yupanqui). Este estudio de tráfico se llevó a cabo durante 07 días y fue realizado según los criterios establecidos en la normativa. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 9, donde se ven las características de tráfico. Según estos datos, se determinó el Número Equivalente de Ejes Simples (ESAL), siendo este un factor importante para poder calcular la capacidad estructural que se requiere para una base granular. Este cálculo se realizó para un periodo de 20 años, donde se consideró la configuración vial de dos calzadas con un separador central y dos carriles por sentido.

**Tabla 9:** Datos obtenidos para determinar el ESAL del estudio de tráfico.

Vehículos	ADTT (año de aforo)	Tasa de crecimiento	"F" Pavimento flexible	"F" IMDA Pavimento flexible
	2023	i%		
VEH. LÍGEROS	54.8	0.92%	0.260	0.356
B2	73.7	3.21%	4.504	366.406
B3-1	60.5	3.21%	2.631	176.469
B4-1	31.9	3.21%	3.562	125.331
C2	35.4	3.21%	4.504	173.300
C3	15.4	3.21%	3.285	86.668
C4	34.1	3.21%	2.774	103.676
T2S1	15.5	3.21%	7.742	144.699
T2S2	4.5	3.21%	6.523	35.857
T2S3	0	3.21%	6.210	6.827
T3S1	15.5	3.21%	6.523	7.171
T3S3	0	3.21%	4.991	5.487
C2R2	10.9	3.21%	10.980	12.072
C2R3	0	3.21%	9.761	10.732
C3R2	0	3.21%	9.761	0.000
C3R3	0	3.21%	8.542	0.000

Estos datos nos permiten estimar con mayor exactitud las cargas vehiculares que el pavimento soportará, lo que asegura que el diseño de la base granular sea el correcto para poder soportar dicho tráfico a lo largo del ciclo de vida útil del pavimento.

En la Tabla 10 podemos ver los cálculos subsecuentes de la Tabla 09, donde los valores y factores han sido verificados para su cálculo según el Manual de Carreteras MTC – Suelos, Geología y Geotecnia. Este manual define los factores que son requeridos para poder analizar y diseñar las estructuras de un pavimento.

**Tabla 10:** Procedimiento y resultado para el cálculo del ESAL.

Cálculo para pavimento flexible		
Tasa anual de crecimiento Vehículos pesados	r:	3.21%
Tiempo de vida útil del pavimento	n:	20 años
Factor "Fca" Vehículos Pesados Factor $Fca = \frac{((1+r)^n - 1)}{r}$	Fca	27.45
Nº de calzadas, sentidos y carriles por sentido		2 calzadas, 2 sentidos, 2 carriles por sentido
Factor direccional * Factor carril	Fc*Fd	0.4
Número de ejes equivalentes $\#EE = 365 * (\sum f_i \cdot IMDA_i) * Fd * Fc * Fca$	ESAL	5'030,190

Se procedió a realizar un proceso sistemático de cálculo, donde se determinó el ESAL para el diseño de un pavimento flexible, obteniendo un valor de 5'030,190 ESALs. Este resultado representó la carga acumulada que se proyectó a lo largo del periodo de diseño, y es muy importante para asegurar que la estructura de pavimento tenga la capacidad correcta para poder soportar el tráfico previsto.

Utilizando el resultado de ESAL en la Tabla 10 y haciendo referencia a la clasificación mencionada en la Tabla 08, que detalla el CBR en función del tráfico en ejes equivalentes, se adoptó el valor correcto correspondiente a un tráfico menor a  $10^6$  ESALs. Dado que este ESAL determinado en nuestro estudio de tráfico se encuentra dentro del parámetro, el CBR de diseño propuesto será el de mínimo 80%, Esto indica que este valor debe proporcionar suficiente resistencia para la base granular bajo condiciones de cargas requeridas durante la vida útil de este pavimento.

Ahora nos enfocamos en el CBR, siendo este un ensayo que nos indica el valor de resistencia de un material de base granular que está sometida bajo carga, lo que resulta en un factor muy relevante al momento de diseñar pavimentos.

En la base patrón (TAP. 50% + P.C. 25% + IS. 25%), el CBR fue de 80.76%, lo cual es un resultado por encima del mínimo establecido de 80%. Esto significa que, a excepción del concreto reciclado, la mezcla es buena en valores de trituración de los agregados siendo estos necesarios para soportar las cargas vehiculares que se espera. Para una mejor comprensión, se ve la Figura 06, donde se presenta los resultados obtenidos para las diferentes combinaciones que se evaluaron.

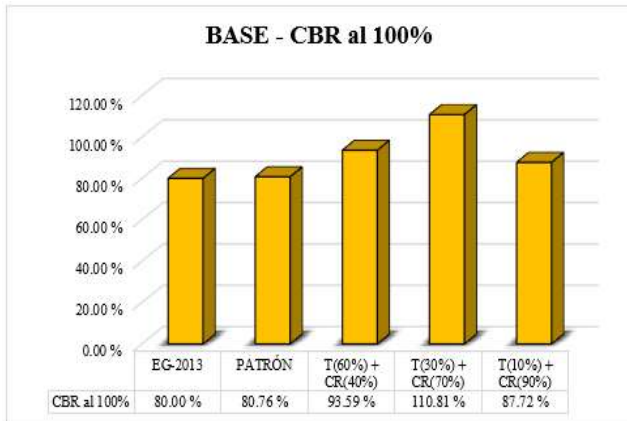


Figura 10: CBR al 100% obtenidos para la base.

Al incorporar un 40% de concreto reciclado (TAP. 60% + C.R. 40%), el CBR obtenido incrementó a los 93.59%, superando en valor mínimo establecido. Esto infiere que hubo una mejora grande en la capacidad de soporte de la base granular, con una importancia especial en la mejora de la resistencia debido a la incorporación del concreto reciclado.

En la mezcla de (TAP. 70% + C.R. 30%), se vio un valor máximo alcanzado de CBR de 110.81%, lo que revalida una buena capacidad de soporte de carga y así mismo nos asegura que es idóneo incorporar un 70% de concreto reciclado para poder lograr un rendimiento estructural máximo del material de la base granular.

Finalmente, al incorporar 90% de concreto reciclado (TAP. 90% + C.R. 10%), el valor de CBR que se obtuvo fue de 87.72%, cumpliendo con el parámetro mínimo de la normativa. Aunque podemos afirmar que la efectividad en comparación con nuestra base patrón es significativamente mayor, con valor ligeramente menor en el rendimiento en comparación con el 70% de concreto reciclado (TAP. 70% + C.R. 30%).

### 3.2 Resultados para una subbase granular

En la tabla 11 se muestra los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras de una subbase granular. Estas muestras estuvieron conformadas por material pétreo de Taparachi, material de Isla (estado natural) utilizado para poder establecer nuestra base patrón, y también la combinación de este material con diferentes dosificaciones de concreto reciclado, evaluando su comportamiento para la conformación de una subbase granular de un pavimento.

Tabla 11: Resultados de los ensayos realizados para una subbase granular con dosificaciones de concreto reciclado.

Ensayos para una subbase granular					
Ensayos	EG-2013 (≥ 3000 msnm)	Subbase patrón	TAP(60%) + R.C.(40%)	TAP(30%) + R.C.(70%)	TAP(10%) + R.C.(90%)
Límite líquido	25% máx.	6.54%	9.94%	10.81%	13.21
Índice de plasticidad	4% máx.	2.16%	3.04%	3.27%	3.96
Óptimo contenido de humedad	-	7.60%	8.00%	7.70%	7.40%
Máxima densidad seca	-	2.13%	2.07%	2.15%	2.03%
CBR (100%)	40% min.	63.41%	69.36%	71.99%	91.05%

#### 3.2.1 Características de la subbase patrón

En este estudio, se evaluó el comportamiento de una subbase granular según los parámetros de la Norma EG-2013 para una altitud superior a los 3000 msnm. Donde la primera columna, detallada como TAP (60%) + IS (40%), representa el material de subbase patrón sin añadirle concreto reciclado. Los ensayos realizados en esta mezcla arrojaron resultados que cumplen con los estándares.

El Límite Líquido obtenido fue de 6.54%, cumpliendo con el requisito mínimo de la normativa, cuyo límite máximo es de 25%, lo que muestra un buen comportamiento frente a la humedad.

El Índice de Plasticidad fue de 2.16%, lo cual no excedió dicho límite de la normativa el cual es un máx. de 4%, lo que se interpretó que el material de la subbase no es muy susceptible a la deformación plástica.

El Óptimo Contenido de Humedad resultado fue de 7.60%, lo que nos permite una buena compactación.

El valor de la Máxima Densidad Seca fue de 2.13/cm<sup>3</sup> interpretando que hay la posibilidad de alcanzar una adecuada compactación.

Por último, tenemos el valor de CBR, el cual fue de 63.41%, lo que se logró superar el requisito mínimo del 40%, infiriendo que la subbase patrón desarrollada puede soportar cargas vehiculares para la cual fue diseñada.

### 3.2.2 Incidencia del concreto reciclado en la subbase granular

Se realizaron ensayos adicionales a la subbase patrón, incorporando concreto reciclado, variando el porcentaje de Concreto Reciclado. Los materiales empleados fueron exclusivamente los provenientes de las canteras Taparachi e Isla, junto con el concreto reciclado, a excepción de una mezcla donde se obvió el material de Isla. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los ensayos de Límite líquido, Índice de Plasticidad y CBR, ya que estos parámetros son muy importantes en proyectos viales para poder evaluar el comportamiento de una subbase granular-

En el índice de plasticidad, el valor de este ensayo es un parámetro clave que calcula la cantidad de humedad que una mezcla puede absorber antes de que se comporte de manera plástica. Según la normativa EG-2013, dicho valor no debe ser mayor del 25%. Como se observa en la Figura 11, para facilitar su entendimiento mediante una representación gráfica.

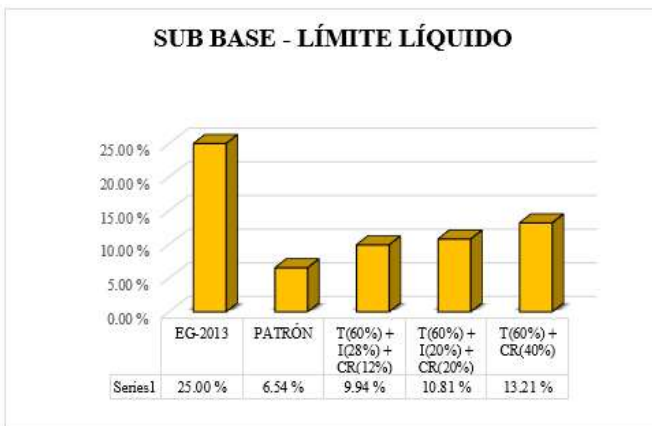


Figura 11: Límite Líquido obtenidos para la subbase.

Cuando se utilizó la subbase patrón (TAP 60% + IS 40%), se obtuvo un valor de 6.54%, lo que indica una estabilidad moderada frente a la absorción de humedad y cumpliendo con los parámetros normados. Al incorporar 12% de concreto reciclado (TAP 60% + IS

28% + C.R. 12%), el límite subió mínimamente a 9.94% en su capacidad de absorción de humedad antes de transformarse en un estado plástico. También se vio que al añadir 20% de concreto reciclado (TAP 60% + IS 20% + C.R. 20%), el límite líquido incrementó a 10.81%, lo que sugiere que la mezcla se volvió un poco vulnerable a la humedad, aunque se mantiene por debajo del límite mínimo que dice la normativa. Por último, al incorporar 40% de concreto reciclado y sin presencia de material de la cantera Isla (TAP 60% + C.R. 40%), se alcanzó un valor de 13.16%, siendo un valor máximo entre todas las combinaciones, lo cual se infiere que este material tiene una gran capacidad para la humedad.

En el índice de plasticidad, este tipo de ensayo nos ayuda a evaluar la capacidad de la mezcla para deformarse sin llegar al límite de romperse, y el valor máximo que nos permite la normativa es del 4%. Como se ve en la Figura 12, presentada de manera gráfica para que sea más comprensible, el incremento observado en cada mezcla y en el índice de plasticidad para cada uno de estas muestras evaluadas.

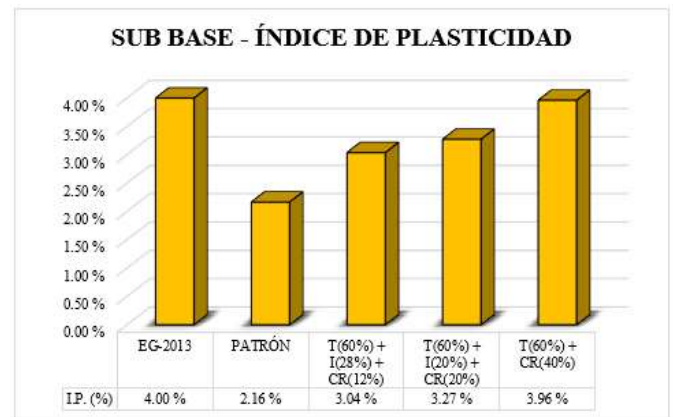


Figura 12: Índice de Plasticidad obtenidos para la subbase.

Como se vio en la subbase patrón (TAP 60% + IS 40%), el índice de plasticidad fue de 2.16%, valor aceptable dentro de los parámetros normativos. Al añadir 12% de concreto reciclado (TAP 60% + IS 28% + C.R. 12%), el índice subió a 3.04%, indicando que aumento poco la vulnerabilidad de esta mezcla al deformarse por efectos de agua, sin embargo, permanece por debajo del límite establecido. En el ensayo donde se incorporó 20% de concreto reciclado (TAP 60% + IS 20% + C.R. 20%), este valor subió a 3.27% indicando un incremento adicional en la plasticidad de la mezcla. Por último, al incorporar 40% de concreto reciclado (TAP 60% + C.R.

40%), se alcanzó el valor más alto 3.96%, pasando el valor máximo recomendado por la normativa, deduciendo que esta mezcla tiene un comportamiento más plástico y más susceptible a deformaciones de este tipo.

Y por último, en el ensayo de CBR que nos permite calcular la capacidad de soporte de la subbase granular, que mide la resistencia cuando se somete a cargas vehiculares, siendo este valor muy importante para el diseño de pavimentos. A continuación, en la Figura 13, se presentan los resultados obtenidos de forma gráfica para facilitar un mejor entendimiento.

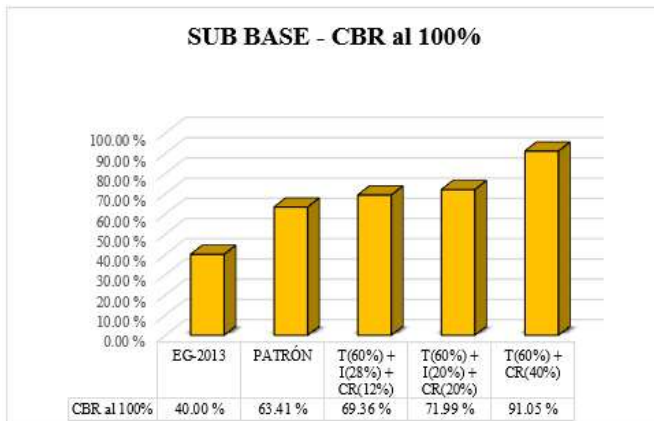


Figura 13: Valores de CBR obtenidos para la subbase.

En la subbase patrón (TAP 60% + IS 40%), el valor de CBR fue de 53.00%, superando el mínimo normativo de 40%, se puede decir que presenta margen de mejora para una subbase. Al añadir 12% de concreto reciclado (TAP 60% + IS 28% + C.R. 12%), incrementó de forma considerable logrando un resultado de 69.36%, indicando que, con una pequeña combinación de concreto reciclado, la resistencia de la subbase mejoró. En la mezcla con 20% de concreto reciclado (TAP 60% + IS 20% + C.R. 20%), el CBR siguió incrementando, teniendo un valor de 71.99%. Esta mezcla indica un comportamiento más óptimo, que es capaz de soportar mayores condiciones de cargas. Finalmente, en la mezcla de 40% de concreto reciclado (TAP 60% + C.R. 40%), se alcanzó el valor más alto de 91.05%, lo que demuestra una excelente capacidad de soporte, superando ampliamente los valores normativos de la EG-2013, que indica un valor de CBR mín. 40% para subbases granulares construidas a una altitud superior a los 3000 msnm.

### 3.3 Dosificación óptima

En función a los resultados experimentales obtenidos, durante los ensayos realizados, se pudo determinar la dosificación óptima para la base y subbase granular en función del Índice de Plasticidad y CBR, donde se buscó que nuestros resultados estén dentro de los parámetros establecidos en la normativa EG-2013.

Por otra parte, la elección de la dosificación óptima para la base y subbase granular se realizó considerando tanto el desempeño mecánico de las mezclas experimentadas con concreto reciclado como en la viabilidad económica a la hora de su implementación en proyectos de pavimentación. Es por eso que se también presentaron los resultados de los análisis comparativos entre las muestras patrones y las mezclas modificadas que contienen concreto reciclado, las cuales han mostrado resultados positivos en cuanto al CBR y el cumplimiento de los requisitos normativos.

#### 3.3.1 Dosificación óptima para base granular (TAP 30% + CR 70%)

La dosificación óptima de material de la cantera Taparachi y el Concreto Reciclado para una base granular es de (TAP 30% + CR 70%), donde se vio que esta combinación, en términos de resistencia mecánica y capacidad de carga es la más eficaz. Cumpliendo con el Índice de Plasticidad 0.99% y un valor de CBR de 110.81%, estando por encima de los parámetros de referencia, lo que asegura un rendimiento óptimo bajo condiciones de carga vehicular. Para evaluar la viabilidad económica de nuestra dosificación elegida, se realizó un análisis comparativo de los costos unitarios entre la base patrón (TAP 50% + P.C. 25% + IS 25%), y la base modificada con concreto reciclado elegida (TAP30%+CR70%).

En las tablas 12 y 13 se presenta un análisis comparativo de costos unitarios de la base patrón y la base modificada, donde esta última evidencia que la dosificación óptima elegida presenta un incremento del 12% en costos. Explicando este incremento de costos de lograr un buen rendimiento estructural del pavimento e incremento en la resistencia, además de los beneficios ambientales y sostenibles del uso de concreto reciclado. Si bien desde un punto de vista de minimizar el uso de materiales de canteras, en esta investigación se utilizó la combinación de 3 canteras (Isla, Taparachi y

Concreto Reciclado) es una respuesta a la necesidad de poder cumplir con las propiedades físicas, mecánicas y de resistencia requerida por la EG-2013, como valores de CBR. Como se vio anteriormente la obtención del concreto reciclado tiene un costo adicional, su utilización minimiza de gran manera la demanda de recursos naturales, promoviendo una solución más sostenible. Donde una combinación equilibrada entre estos tres materiales estabiliza la sostenibilidad ambiental con la calidad estructural que se busca en las bases y subbases.

Tabla 12: Análisis de costos unitarios de la base patrón.

Conformación de base granular E=0.20m C/Maquinaria						Rend: 1.552 M2/día
Descripción Insumo	Und.	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>						
PEÓN	HH	3.000	0.0155	9.62	0.15	
					<b>0.15</b>	
<b>Materiales</b>						
MATERIAL DE BASE (PUESTO EN OBRA)	M3		0.2500	59.5	14.88	
					<b>14.88</b>	
<b>Equipo</b>						
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.15	-	
MOTONIVELADORA DE 125 HP	HM	1.000	0.0052	210	1.09	
RODILLO LISO VIBR. AUTOP. 70-100 HP 7-9 T.	HM	1.000	0.0052	100	0.94	
					<b>2.03</b>	
<b>Costo unitario por M2:</b>						<b>17.06</b>

Tabla 13: Análisis de costos unitarios de la base con concreto reciclado (T30% + CR70%)

Conformación de base granular (TAP. 30%+CR. 70%) E=0.20m C/Maquinaria						Rend: 1.552 M2/día
Descripción Insumo	Und.	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>						
PEÓN	HH	3.000	0.0155	9.62	0.15	
					<b>0.15</b>	
<b>Materiales</b>						
MATERIAL DE BASE (PUESTO EN OBRA)	M3		0.2500	59.5	16.88	
					<b>16.88</b>	
<b>Equipo</b>						
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.15	-	
MOTONIVELADORA DE 125 HP	HM	1.000	0.0052	210	1.09	
RODILLO LISO VIBR. AUTOP. 70-100 HP 7-9 T.	HM	1.000	0.0052	100	0.94	
					<b>2.03</b>	
<b>Costo unitario por M2:</b>						<b>19.06</b>

### 3.3.2 Dosificación óptima para subbase granular (TAP 60% + CR 40%)

La dosificación óptima de material de la cantera Taparachi y el Concreto Reciclado para una subbase granular es (TAP 60% + CR 40%). Dicha dosificación

proporciona un buen equilibrio en términos de resistencia y capacidad de carga, permitiendo que los valores de IP (3.96%) y CBR (91.05%) se mantengan dentro de los parámetros establecidos para este tipo de material de uso en una subbase.

Al igual que en el caso anterior, se realizó un análisis comparativo de los costos unitarios entre la subbase patrón (TAP 60% + IS 40%) y la subbase modificada con concreto reciclado elegida (TAP 60% + CR 40%) para evaluar la viabilidad económica.

Tabla 14: Análisis de costos unitarios de la subbase granular.

Conformación de subbase granular E=0.20m C/Maquinaria						Rend: 1.552 M2/día
Descripción Insumo	Und.	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>						
PEÓN	HH	3.000	0.0155	9.62	0.15	
					<b>0.15</b>	
<b>Materiales</b>						
MATERIAL DE BASE (PUESTO EN OBRA)	M3		0.2500	59.5	11.25	
					<b>11.25</b>	
<b>Equipo</b>						
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.15	-	
MOTONIVELADORA DE 125 HP	HM	1.000	0.0052	210	1.09	
RODILLO LISO VIBR. AUTOP. 70-100 HP 7-9 T.	HM	1.000	0.0052	100	0.94	
					<b>2.03</b>	
<b>Costo unitario por M2:</b>						<b>13.43</b>

Tabla 15: Análisis de costos unitarios de la base con concreto reciclado (T60% + CR40%)

Conformación de subbase granular (TAP. 60% + CR. 40%) E=0.20m C/Maquinaria						Rend: 1.552 M2/día
Descripción Insumo	Und.	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
<b>Mano de Obra</b>						
PEÓN	HH	3.000	0.0155	9.62	0.15	
					<b>0.15</b>	
<b>Materiales</b>						
MATERIAL DE BASE (PUESTO EN OBRA)	M3		0.2500	59.5	13.94	
					<b>13.94</b>	
<b>Equipo</b>						
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.15	-	
MOTONIVELADORA DE 125 HP	HM	1.000	0.0052	210	1.09	
RODILLO LISO VIBR. AUTOP. 70-100 HP 7-9 T.	HM	1.000	0.0052	100	0.94	
					<b>2.03</b>	
<b>Costo unitario por M2:</b>						<b>16.12</b>

En las tablas 14 y 15 se presenta un análisis comparativo de costos unitarios de la base patrón y la base modificada, donde esta última evidencia que la dosificación óptima elegida presenta un incremento del 12% en costos. Explicando este incremento de costos de lograr un buen rendimiento estructural del pavimento e incremento en la resistencia, además de los beneficios

ambientales y sostenibles del uso de concreto reciclado.

Sin embargo, como se ve en los resultados de los ensayos la combinación patrón (TAP 60% + IS 40%) aunque cumple con los parámetros normativos, no satisfacen necesidades desde una perspectiva de sostenibilidad, como es el objetivo central de esta investigación.

### 3.4 Análisis estadístico

Para poder desarrollar el análisis estadístico de nuestra investigación que respalde la elección de los materiales utilizados, y que confirme que las variaciones encontradas son mínimas y están dentro de un parámetro aceptable. En la presente investigación se ha utilizado el ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA), ya que esta herramienta estadística nos permitió comparar algunas diferencias entre grupos, o en este caso combinaciones o mezclas de materiales y para así poder determinar si estas variaciones vistas son estadísticamente significativas o puedan deberse aleatoriamente.

Sin embargo, para este estudio se realizó un ANOVA únicamente para el concreto reciclado, debido a que su coeficiente de variación puede ser considerablemente alto en comparación con los materiales de la cantera Taparachi e Isla. Siendo estas canteras una de las más utilizadas para proyectos viales en la ciudad de Juliaca, donde se han demostrado en investigaciones anteriores una varianza mínima en sus propiedades mecánicas y físicas. Debido a que dichas variaciones de estos materiales son poco significativas, no fue necesario realizar un análisis estadístico adicional para estos.

El ANOVA se llevó a cabo solo en el “Ensayos de Granulometría” del concreto reciclado. A partir de la experiencia e investigaciones previas, se consideró que, si las variaciones que haya en la granulometría del concreto reciclado resultaban ser mínimas, los demás ensayos como límites de Atterberg, Proctor Modificado, CBR, etc., también presentarían mínimas variaciones y, en conclusión, no tendrían un impacto significativo en el desempeño de la mezcla.

Este enfoque es importante en la gestión de recursos y en la confiabilidad de los resultados porque minimiza la necesidad de realizar un análisis estadístico para cada tipo de ensayo. Se realizaron cinco ensayos granulométricos para el concreto reciclado y los resultados se observa en la Figura 14. Estos resultados obtenidos indican que las muestras cumplen con los parámetros establecidos por la normativa EG-2013.

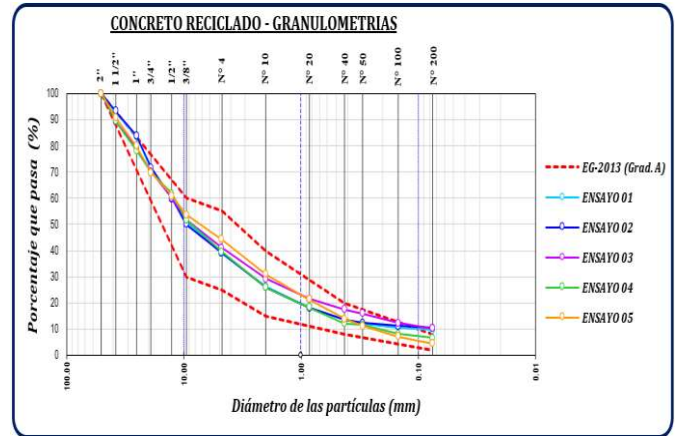


Figura 14: Curva granulométrica de los 5 ensayos de concreto reciclado.

A continuación, se muestran los resultados de cada ensayo para verificar si las variaciones encontradas son estadísticamente significativas y en ese caso podrían influir en los demás ensayos y en el desempeño del material en aplicaciones de base y subbase granular.

Tabla 15: Resultados de los 5 ensayos de granulometría.

Ensayos granulometricos del concreto reciclado							
Tamiz (mm)	Tamiz (pulg)	EG-2013 (Grad. A)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
50.8	2"	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
38.1	1 1/2"	-	92.97	93.36	89.31	89.52	90.90
25.4	1"	-	83.54	83.90	79.29	78.19	79.92
19.05	3/4"	-	71.23	71.80	70.14	69.88	69.73
12.7	1/2"	-	59.84	59.88	60.02	61.77	61.02
9.525	3/8"	30 - 60	51.00	50.02	51.87	51.84	53.77
4.75	N° 4	25 - 55	39.02	39.10	41.14	39.48	44.33
2	N° 10	15 - 40	26.05	25.98	29.24	26.02	30.85
1	N° 20	-	18.23	18.19	21.52	18.33	21.44
0.425	N° 40	8-20	13.46	13.54	17.45	12.23	13.80
0.25	N° 60	-	12.10	12.42	16.05	11.57	11.15
0.149	N° 100	-	10.61	11.17	12.43	8.22	7.27
0.075	N° 200	2-8	9.67	10.49	10.30	6.61	4.54
0	Base	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

El ANOVA de un solo factor se utiliza para poder observar diferencias entre cada malla y ver son significativas y nos dan las siguientes hipótesis a evaluar según el valor de “p” que es el nivel de significancia.

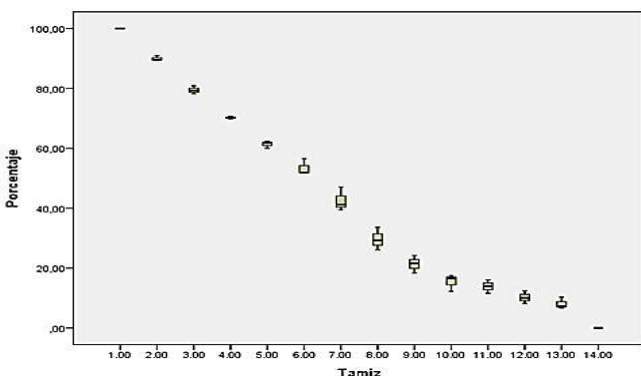
En cuanto a la Hipótesis nula (Ho) ( $p > 0.05$ ), significa que no se encontraron diferencias significativas en los porcentajes del material retenido.

Por otro lado en la Hipótesis alternativa (H1) ( $p < 0.05$ ), existen algunas diferencias significativas en los porcentajes entre los ensayos. En el cálculo del ANOVA se realizó en el programa Excel, donde se insertó todos los datos y se obtuvieron estos valores:

**Tabla 16:** Datos del ANOVA realizado en el programa Microsoft Excel.

ANÁLISIS DE VARIANZA ( $\alpha = 0.05$ )						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	23.24452208	4	6.25814	0.00508	0.99995	2.52522
Dentro de los grupos	74334.32828	60	1080.70864			
Total	74357.57281	64				

Se obtuvo un valor de “p” de 0.99995, por lo que se concluye que no existen diferencias significativas en los cinco ensayos de granulometría del concreto reciclado ( $p < 0.05$ ). Y los 5 ensayos son estadísticamente homogéneos, y el concreto reciclado utilizado tiene consistencia en su distribución granulométrica, lo cual es clave para garantizar una buena compactación, buen comportamiento mecánico y confiabilidad en su aplicación vial, siendo adecuado para su uso en mezclas de base y subbase granular según el gráfico de la Figura 15, generado en el programa SPSS para ver de una forma gráfica las variaciones entre los tamices y los porcentajes que pasan, nos indica que son mínimas junto a los valores de la desviación estándar que son relativamente bajas, podemos definir que las diferencias entre estos ensayos granulométricos no comprometen la homogeneidad del material ni su utilidad para su uso en mezclas de base y subbase granular.



**Figura 15:** Gráfico de variaciones del tamiz y los porcentajes retenidos obtenidos mediante software.

Dado el resultado del ANOVA, se observó en la Tabla 17 que la desviación estándar de los datos presenta valores mínimos y que son prácticamente insignificantes e irrelevantes. Infiriendo que, a pesar de obtener algunas diferencias estadísticas, estas variaciones se consideran mínimas y no afectan el desempeño general del material.

**Tabla 17:** Datos del ANOVA realizado en el programa Microsoft Excel.

Ensayos granulométricos del concreto reciclado								
Tamiz (mm)	Tamiz (pulg)	EG-2013 (Grad. A)	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Desviación Estándar
50.8	2"	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
38.1	1 1/2"	-	92.97	93.36	89.31	89.52	90.90	1.82
25.4	1"	-	83.54	83.90	79.29	78.19	79.92	2.09
19.05	3/4"	-	71.23	71.80	70.14	69.88	69.73	0.69
12.7	1/2"	-	59.84	59.88	60.02	61.77	61.02	0.08
9.525	3/8"	30 - 60	51.00	50.02	51.87	51.84	53.77	0.76
4.75	N° 4	25 - 55	39.02	39.10	41.14	39.48	44.33	0.98
2	N° 10	15 - 40	26.05	25.98	29.24	26.02	30.85	1.52
1	N° 20	-	18.23	18.19	21.52	18.33	21.44	1.56
0.425	N° 40	8-20	13.46	13.54	17.45	12.23	13.80	1.86
0.25	N° 60	-	12.10	12.42	16.05	11.57	11.15	1.79
0.149	N° 100	-	10.61	11.17	12.43	8.22	7.27	0.76
0.075	N° 200	2-8	9.67	10.49	10.30	6.61	4.54	0.35
0	Base	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Esta condición nos muestra que la prueba ANOVA muestra variaciones entre los ensayos, las cuales pueden ser atribuidas a la variación de los pesos retenidos en cada tamiz, sin tener un impacto importante en el rendimiento mecánico de las mezclas de concreto reciclado.

Con base en este análisis realizado, aunque el valor “p” del ANOVA fue  $< 0.05$ , el bajo nivel de variación demostrado a través de la desviación estándar confirma que las variaciones eran mínimas y aceptables. Esto ratificó la teoría de que el concreto reciclado tiene una distribución granulométrica consistente y que los resultados obtenidos no serán perjudiciales para el rendimiento de las mezclas en los diferentes ensayos realizados para la base y subbase granular.

### 3.5 Discusión de resultados

En la investigación de Arisha, se evaluó el comportamiento de una subbase granular analizando valores de resistencia como es la de Abrasión los

Ángeles y CBR, donde se tuvo como objetivo el de estudiar como residuos de construcciones y demolición (RCD) refiriéndose específicamente a concreto reciclado, como sustituto porcentual de agregados naturales, influye en la resistencia y sostenibilidad de una subbase. Para esto se compararon los resultados de una subbase patrón y tres combinaciones con reemplazo de RCD en cantidades de 15%, 25% y 40%. Donde los valores de abrasión Los Ángeles fueron de 28.56% (patrón), 29.21%, 32.10% y 36.42%, mientras que los resultados de CBR para la subbase fueron de 59.51% (patrón), 68.20%, 75.56% y 63.46%. Concluyendo así que una mayor proporción de RCD produce un comportamiento desigual en las combinaciones, donde la combinación con mezclas de 25% resultó ser la más adecuada en desempeño estructural. Sin embargo, a mayor RCD (45%), decreció en los valores de CBR, deduciéndose por una mayor cantidad de concreto reciclado, donde no se pudo lograr una mejor compactación por la naturaleza del concreto reciclado, y en disparidad con los hallazgos de Salcedo, et al. (2023), nuestra investigación utilizó combinaciones de concreto reciclado de 0%, 12%, 20% y 40%, donde se obtuvo los siguientes valores como, Abrasión Los Ángeles: 20.45%, 21.62%, 22.32% y 24.36% y CBR al 100%: 56.26%, 69.36%, 71.99% y 90.78%. Estos valores muestran una tendencia positiva con el incremento de la presencia del concreto reciclado, manteniendo a su vez los valores dentro de los parámetros técnicos de la normativa para subbases granulares. A diferencia del estudio de Arisha, en la presente investigación, el aumento de concreto reciclado en los valores de Abrasión Los Ángeles se mantuvo moderadamente, si no que a su vez mejoró los valores de CBR de una forma creciente y no irregular, infiriéndose que podría estar relacionado con propiedades específicas de los materiales utilizados. Esta variación en los resultados muestra cómo las características físicas y mecánicas de los materiales y su manejo para su obtención pueden incidir de gran manera en el comportamiento estructural de una subbase granular.

En estudios previos, la investigación de Dokic, se analizó el comportamiento del RCA en porcentajes de 15%, 30%, 45%, 60% y 100%. combinados con agregados naturales. Estos resultados mostraron un incremento progresivo en el índice de forma de 14%, 15%, 16%, 17% y 20%; resistencia a la fragmentación de 22%, 24%, 25%, 27% y 31.5%, resistencia al desgaste de 14%, 14%, 15%, 15% y 16%. Sin embargo,

también se vio un incremento en la absorción de agua de 1.1%, 1.65%, 2.0%, 2.5% y 3.7%. Sin embargo, a diferencia de este autor, al adicionar porcentajes de 0%, 40%, 70% y 90% de concreto reciclado a las muestras provenientes de las canteras Taparachi e Isla, se obtuvieron los siguientes resultados que se detallan a continuación: Límite líquido: 5.96%, 13.21%, 0.99% y NP; Índice de plasticidad: 1.99%, 3.97%, 0.99% y NP; y CBR al 100%: 80.76%, 93.59%, 110.81% y 87.72%. Estos resultados en nuestra investigación indican que al incrementar el porcentaje de concreto reciclado puede tener un impacto positivo y mejorar el comportamiento mecánico de una base granular, especialmente en términos de CBR, que supera el 80% en todas las combinaciones realizadas. Esto cumple con los parámetros técnicos de la normativa EG-2013 para bases granulares sujetas a tráfico de ejes equivalentes menores a  $10^6$  y para pavimentos que se encuentren en zonas a más de los 3000 msnm.

Por otra parte, la investigación que realizó Salcedo, se investigó los efectos al incorporar un 10% y un 15% de agregados de concreto reciclado (RCA) a una muestra patrón, donde obtuvo resultados prometedores. Se concluyó que el agregado natural GSB38 que tenía en su composición un 10% de RCA presento mejores propiedades mecánicas que el agregado natural GSB38. Incluso se observó resultados similares en otros parámetros, como en la abrasión Los Ángeles, con un valor promedio de 38.68%. Además, los valores de CBR obtenidos en esta investigación fueron de 13.20%, 52.80% y 57.70% a una penetración de 0.25 cm, y 18 %, 61.30% y 68.90% a una penetración de 0.51cm al usar un 10%, para 10, 25 y 56 golpes por capa. Sin embargo, cuando el contenido de RCA en la muestra GSB38 se incrementó al 15%, se vio una disminución en el rendimiento mecánico. La abrasión promedio subió a 45.51%, demostrando una desventaja en la resistencia en comparación con las mezclas que contenían solo un 10% de RCA. De igual manera, los valores de CBR se redujeron, reflejando que, aunque en su investigación una adición controlada del 10% de RCA puede mejorar ciertas características, un aumento en el porcentaje de RCA no favorece la resistencia ni la durabilidad de la mezcla. En nuestra investigación, se evaluaron diferentes proporciones de concreto reciclado que contenían 0%, 12%, 20% y 40% para conformar una subbase granular. Estos valores resultaron estar completamente dentro de los parámetros establecidos por la normativa EG-2013 para subbases granulares, donde las siguientes combinaciones nos dieron los

siguientes valores: Límite líquido: 6.54%, 9.94%, 10.81% y 13.21%, Índice de plasticidad: 2.16%, 3.04%, 3.27% y 3.96%; y CBR al 100%: 53.00%, 69.36%, 71.99% y 91.05%. Por lo tanto se infiere que todas las combinaciones mostradas pueden considerarse ya que cumplen con los estándares regulatorios, porque los valores observados de los índices de plasticidad son inferiores al 4%, los valores de CBR son superiores al 40%, lo que confirma la viabilidad técnica de los materiales propuestos con concreto reciclado para una subbase granular, según los parámetros técnicos de la normativa EG-2013 para bases granulares sujetas a tráfico de ejes equivalentes menores a  $10^6$  y para pavimentos que se encuentren en zonas por encima de los 3000 msnm.

Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que la adición de concreto reciclado puede mejorar ciertas propiedades estructurales de las bases y subbases granulares. Sin embargo, es necesario controlar el porcentaje de RCA en la mezcla, ya que, si bien el uso de concreto reciclado mejora el CBR y cumple con los criterios normativos, porcentajes elevados pueden afectar propiedades físicas como el índice de plasticidad y la durabilidad.

En cuanto al uso de concreto reciclado (RCA) en bases y subbases granulares mejora la sostenibilidad ambiental al reducir la extracción de materiales de canteras naturales, reutilizar materiales reciclables en la construcción y así también poder disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que se producen por el transporte y procesamiento de los materiales extraídos. Aparte, este enfoque pro ecológico apoya también la economía circular y la conservación de nuestros recursos naturales.

Analizando el concreto reciclado a partir de un punto de vista económico, nos llevará a la reducción de costos relacionados con la gestión de materiales y residuos. Además, su aplicación puede apoyar a incrementar la durabilidad de estas estructuras y, por consiguiente, podemos reducir gastos de mantenimientos futuros. Sin embargo, como se observa en esta investigación las dosificaciones elegidas con concreto reciclado para base (T 60% + CR 40%) y subbase (T30% + CR70%), presentan un costo inicial medianamente alto en comparación con las mezclas patrón, estos costos se compensan con beneficios técnicos y ambientales que ofrecen estas mezclas estudiadas. Donde estas ventajas económicas y ambientales del uso de concreto reciclado apoyan su uso en la construcción de infraestructuras viales en el Perú. Este enfoque se alinea con el

cumplimiento y la promoción de normativas vigentes, como la del Código Técnico de Construcción Sostenible, que fue aprobada mediante el Decreto Supremo N° 014-2021-VIVIENDA, que promueve el uso de materiales sostenibles, mitigando los impactos ambientales durante su vida útil y fomentando el crecimiento en el sector de gestión de residuos. Al incluir concreto reciclado en base y subbases granulares, no solo se cumple con estos principios de sostenibilidad, sino que también mejora el uso de los recursos, asegurando así la sostenibilidad ambiental y económica a futuro.

## 4 Conclusiones

En esta investigación se evalúa cuál es el desempeño de bases y subbases granulares bajo la incidencia del concreto reciclado como un material sostenible. Estos resultados obtenidos demuestran que las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas propuestas y analizadas cumplen con la normativa EG-2013 para pavimentos situados a altitudes mayores a 3000 msnm, como es el caso de la ciudad de Juliaca y sometidas a cargas con un ESAL menor a  $10^6$ .

Para una base granular, según las pruebas físicas y mecánicas realizadas en nuestras muestras de materiales de canteras de Taparachi e Isla con adiciones de concreto reciclado para la conformación de esta produjeron los siguientes resultados al añadir 0%, 40%, 70% y 90% de concreto reciclado a las muestras de las canteras Taparachi e Isla se obtuvieron los siguientes valores: Límite líquido: 5.96%, 13.21%, 0.99% y NP, encontrándose valores normales; en el Índice de Plasticidad: 1.99%, 3.97%, 0.99% y NP. Estos resultados en su mayoría cumplen con el límite máximo establecido por la normativa EG-2013, que especifica un 2% máximo para bases granulares; y por último el CBR al 100%: 81.85%, 93.59%, 111.76% y 87.75%. Estos valores también cumplen con el requisito mínimo del 80% establecido por la normativa EG-2013 para bases granulares con un tráfico de ejes equivalentes menores a  $10^6$  y satisfacen con nuestro ejemplo de estudio de tráfico (Tabla 10) realizado en la ciudad de Juliaca (3824 msnm). Estas mezclas con concreto reciclado nos aseguran un rendimiento óptimo, cumpliendo según los parámetros de la normativa EG-2013, con valores de CBR por encima del 80%, de esa manera asegurar la aplicación de las bases en proyectos

60

viales con un ESAL menor a  $10^6$  en regiones con grandes altitudes por ejemplo la ciudad de Juliaca.

2

Para una subbase granular, según los ensayos físicos y mecánicos realizados a las muestras de materiales de cantera con adiciones de concreto reciclado para la conformación de una subbase granular presentaron los siguientes resultados al añadirse 0%, 12%, 20% y 40% de concreto reciclado a las muestras procedentes de las canteras Taparachi e Isla se observaron los siguientes valores: Límite líquido: 6.54%, 9.94%, 10.81% y 13.21%; estos valores cumplen con el límite establecido por la normativa EG-2013, que especifica un máximo del 25% para subbases granulares; en el Índice de plasticidad: 2.16%, 3.04%, 3.27% y 3.96%; estos resultados también se ajustan al parámetro establecido por la EG-2013, que indica un máximo del 4%; y en el CBR al 100%: 63.41%, 69.36%, 71.99% y 91.05%; estos valores también cumplen con el requisito mínimo del 40% establecido por la normativa EG-2013 para subbases granulares, donde estas mezclas confirman un rendimiento óptimo, estando dentro de los parámetros de la normativa EG-2013, al observar valores de CBR superiores al 40%.

26

En cuanto a los costos, el análisis presentado en las tablas 12 y 13 muestra que para la construcción de una base modificada con concreto reciclado (T30% + CR70%) implicará un incremento en el costo del 12% en comparación con la construcción de una base patrón (convencional). Mientras que, en la subbase como se muestra en las tablas 14 y 15, se revela que para la construcción de esta subbase modificada con concreto reciclado (T60% + CR40%) nos implicará un incremento del 30% en comparación con la construcción de una subbase patrón (convencional). Sin embargo, estos resultados deben interpretarse desde un punto de vista de sostenibilidad ambiental. Si bien se observó que la construcción de una base y subbase convencional generalmente tiene un costo menor en comparación con aquellas modificadas con concreto reciclado, la importancia de esta investigación radica en su contribución hacia la sostenibilidad ambiental.

1

El empleo de concreto reciclado en la construcción de bases y subbases no solo disminuye la demanda de materiales vírgenes provenientes de las fuentes naturales y los residuos de construcción, sino que también promueve el uso de prácticas más responsables y ecológicas en la industria de la construcción. Por lo tanto, la incorporación de concreto reciclado en una base y subbase granular representa un cambio significativo en el camino hacia un desarrollo más

sostenible y un uso óptimo de los recursos naturales en el Perú, promoviendo beneficios ambientales y económicos importantes y alineándose con las políticas vigentes en cuanto a construcción sostenible se refiere.

## Bibliografía

- [1] Arisha, A., Gabr, A., El-Badawy, S., & Shwally, S. (2016). Using blends of construction & demolition waste materials and recycled clay masonry brick in pavement. *Procedia Engineering*, 1317 – 1324.
- [2] CICM. (2022). Generación de residuos de la construcción y normativa aplicable en la ciudad de México. *IC – Ingeniería civil*, 1–40.
- [3] Cobán, H., Cetin, B., Edil, T., & Sun, Q. (2022). Evaluation of Mechanical Degradation Characteristics of Recycled and Natural Aggregates Under Gyrotory Compaction Effort. *Transportation Geotechnics*.
- [4] Dokic, O., Radevic, A., Aleksandar, D., & Dokic, B. (2020). Potential of Natural and Recycled Concrete Aggregate Mixtures for Use in Pavement Structures. *MDPI: Web of Science*, 10(9). doi:DOI10.3390/min10090744
- [5] Hoyos, L., Puppala, A., & Ordoñez, C. (2011). Characterization of Cement–Fiber–Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates: Preliminary Investigation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(7), 977 – 989.
- [6] Huamaní, C., Tudela, J., & Huamaní, A. (2020). Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca – Puno – Perú. *Revista de investigaciones altoandinas*, 106–115.
- [7] Salcedo Fontalvo, J. E., Vega Araujo, D. L., Ariza Polo, L., Padilla Quiroz, J., & Castro Cabeza, A. (2023). Influence of Recycled Concrete Aggregates on the California Bearing Ratio (CBR) of Granular Sub-bases. *Arabian Journal for Science and Engineering*.
- [8] MTC (2013), Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para Construcción. Lima – Perú.
- [9] MTC (2016), Manual de Carreteras: Manual de Ensayo de Materiales. Lima – Perú.
- [10] Wang, J., H., W., V.M., T., & J., Z. (2019). Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. *Journal of clean production*, 206, 1004–1014.
- [11] Hernández, R. (2019), Metodología de la investigación (1ed.), México: McGraw–Hill.
- [12] MTC (2014), Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos: Sección Suelos y Pavimentos. Lima – Perú.