

Joel Rosa

Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados de las canteras de río Mahuayani

 My Files My Files Universidad Peruana Union

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::29566:447327055

Fecha de entrega

9 abr 2025, 9:52 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

9 abr 2025, 9:55 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

ARTICULO PUBLICACION FINAL.docx

Tamaño de archivo

4.2 MB

19 Páginas

10.989 Palabras

61.213 Caracteres

18% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Cited Text

Top Sources

- 11%  Internet sources
- 2%  Publications
- 16%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 11% Internet sources
- 2% Publications
- 16% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Submitted works	Universidad Continental on 2024-08-16	<1%
2	Internet	cdn.www.gob.pe	<1%
3	Submitted works	uncedu on 2025-01-21	<1%
4	Internet	repositorio.unc.edu.pe	<1%
5	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-03-06	<1%
6	Internet	hdl.handle.net	<1%
7	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2017-07-24	<1%
8	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2025-01-29	<1%
9	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2017-04-17	<1%
10	Submitted works	Universidad Ricardo Palma on 2020-07-10	<1%
11	Internet	id.scribd.com	<1%

12	Internet	repositorio.urp.edu.pe	<1%
13	Internet	www.coursehero.com	<1%
14	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2017-10-06	<1%
15	Submitted works	Universidad Privada del Norte on 2025-03-11	<1%
16	Internet	repositorio.uss.edu.pe	<1%
17	Internet	uets.edu.ec	<1%
18	Internet	www.mc-pfungstadt.de	<1%
19	Submitted works	Universidad Ricardo Palma on 2019-10-30	<1%
20	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2024-09-04	<1%
21	Submitted works	Universidad San Ignacio de Loyola on 2023-09-20	<1%
22	Submitted works	Universidad Privada Antenor Orrego on 2024-11-28	<1%
23	Submitted works	Universidad Tecnologica de los Andes on 2020-01-21	<1%
24	Submitted works	West Liberty University on 2021-03-26	<1%
25	Internet	repositorio.unasam.edu.pe	<1%

26	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2018-06-21	<1%
27	Submitted works	uncedu on 2024-10-10	<1%
28	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2017-05-05	<1%
29	Submitted works	Universidad Privada del Norte on 2024-09-27	<1%
30	Internet	es.scribd.com	<1%
31	Submitted works	uncedu on 2023-11-29	<1%
32	Submitted works	Universidad Nacional Autonoma de Chota on 2020-10-03	<1%
33	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2025-01-23	<1%
34	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-07-22	<1%
35	Submitted works	uncedu on 2023-11-25	<1%
36	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-12-18	<1%
37	Submitted works	Universidad Privada del Norte on 2024-06-30	<1%
38	Internet	repositorio.ucss.edu.pe	<1%
39	Internet	repositorio.ucv.edu.pe	<1%

40	Internet	repositorio.unsaac.edu.pe	<1%
41	Submitted works	Universidad Católica de Santa María on 2019-07-02	<1%
42	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-12-10	<1%
43	Internet	repositorio.upla.edu.pe	<1%
44	Submitted works	Universidad Nacional de Trujillo on 2024-08-22	<1%
45	Internet	diariocorreo.pe	<1%
46	Internet	repositorio.upeu.edu.pe	<1%
47	Internet	socialscienceresearch.org	<1%
48	Internet	www.euskadi.net	<1%
49	Submitted works	Universidad Privada del Norte on 2023-07-23	<1%
50	Internet	repositorio.unheval.edu.pe	<1%
51	Submitted works	uncedu on 2024-10-16	<1%
52	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2021-07-02	<1%
53	Submitted works	Universidad Católica Boliviana "San Pablo" on 2024-11-04	<1%

54	Submitted works	Universidad Católica de Santa María on 2016-08-23	<1%
55	Internet	repositorio.puce.edu.ec	<1%
56	Internet	www.gea-niro.com.mx	<1%
57	Submitted works	National University College - Online on 2024-05-22	<1%
58	Internet	botikario.webcindario.com	<1%
59	Internet	www.slideshare.net	<1%
60	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2016-07-26	<1%
61	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-01-15	<1%
62	Submitted works	Universidad Privada del Norte on 2023-07-05	<1%
63	Internet	es.slideshare.net	<1%
64	Internet	fdocuments.es	<1%
65	Internet	protozoologia.org.ar	<1%
66	Internet	pt.scribd.com	<1%
67	Internet	repositorio.sociales.uba.ar	<1%

68	Submitted works	uncedu on 2025-01-09	<1%
69	Submitted works	uncedu on 2025-01-18	<1%
70	Publication	"Encyclopedic Dictionary of Landscape and Urban Planning", Springer Science an...	<1%
71	Submitted works	Pontificia Universidad Católica de Chile on 2025-03-20	<1%
72	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2022-10-04	<1%
73	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2017-04-17	<1%
74	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2017-05-05	<1%
75	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2019-09-12	<1%
76	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2025-03-14	<1%
77	Submitted works	Universidad Católica de Santa María on 2021-09-22	<1%
78	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2017-06-01	<1%
79	Submitted works	Universidad Tecnologica del Peru on 2024-12-07	<1%
80	Submitted works	Universidad de Huanuco on 2022-10-21	<1%
81	Internet	pesquisa.teste.bvsalud.org	<1%

82	Submitted works	uncedu on 2025-01-23	<1%
83	Internet	vdocumento.com	<1%
84	Internet	www.asesoriamoran.com	<1%
85	Internet	www.oerlikon.es	<1%
86	Internet	www.researchgate.net	<1%
87	Internet	zagan.unizar.es	<1%
88	Publication	O. A. Cabrera, L. P. Traversa, N. F. Ortega. "Effect of crushed sand on mortar and c...	<1%
89	Publication	Orquera Arguero, Karina Gabriela. "Mecanismos de respuesta de las vacas nodriz...	<1%
90	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2022-11-23	<1%
91	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2018-03-22	<1%
92	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2018-06-28	<1%
93	Submitted works	Universidad Católica San Pablo on 2023-08-16	<1%
94	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2016-05-10	<1%
95	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2016-06-02	<1%

96	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-07-11	<1%
97	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2024-12-09	<1%
98	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-01-02	<1%
99	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2025-01-20	<1%
100	Submitted works	Universidad Nacional Autonoma de Chota on 2020-12-27	<1%
101	Submitted works	Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrion on 2023-04-25	<1%
102	Submitted works	Universidad Pontificia Bolivariana on 2019-11-14	<1%
103	Submitted works	Universidad Privada Antenor Orrego on 2020-12-31	<1%
104	Submitted works	Universidad Privada del Norte on 2025-03-31	<1%
105	Internet	bioone.org	<1%
106	Internet	docplayer.es	<1%
107	Internet	docslide.us	<1%
108	Internet	link.springer.com	<1%
109	Internet	prezi.com	<1%

110	Internet	repositorio.uandina.edu.pe	<1%
111	Internet	repositorio.unal.edu.co	<1%
112	Internet	repositorio.usanpedro.edu.pe	<1%
113	Internet	tesis.usat.edu.pe	<1%
114	Submitted works	uncedu on 2023-11-29	<1%
115	Submitted works	uncedu on 2024-09-19	<1%
116	Internet	www.bancoldex.com	<1%
117	Internet	www.etesa.com.pa	<1%
118	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2022-12-08	<1%
119	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2017-05-12	<1%
120	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2017-05-12	<1%
121	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2018-03-22	<1%
122	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2023-02-16	<1%
123	Submitted works	Universidad Cesar Vallejo on 2016-05-06	<1%

124	Submitted works	Universidad Francisco de Vitoria on 2025-03-24	<1%
125	Publication	"Inter-American Yearbook on Human Rights / Anuario Interamericano de Derech...	<1%
126	Submitted works	Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez on 2025-03-20	<1%
127	Submitted works	Universidad Andina del Cusco on 2019-08-28	<1%
128	Submitted works	Universidad Católica de Santa María on 2022-12-15	<1%

Evaluation of the physical and mechanical properties of aggregates from the Mahuayani and Pucarumi river quarries for concrete and pavement works

Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados de las canteras de río Mahuayani y Pucarumi para obras de concreto y pavimento

Rosas Ccolque, Jhoel Jonathan
Araca Chile Moisés

* Universidad Peruana Unión, Lima, PERÚ.

Abstract

The growing demand for durable infrastructure in the Cusco region requires the identification and characterization of aggregate sources that meet technical standards. The central problem addressed by this research lies in the need to determine whether the aggregates from the Mahuayani and Pucarumi river quarries possess the appropriate physical, mechanical, and strength properties for use in concrete and pavement construction. In this context, the main objective of this study was to compare the physical, mechanical, and strength properties of the aggregates from the Mahuayani and Pucarumi quarries and evaluate the extent to which these materials meet the technical requirements for use in concrete and pavement works. To carry out this evaluation, laboratory tests were performed following ASTM standards, including granulometric analysis, compressive strength, Los Angeles abrasion, specific gravity, and absorption. The results show that concrete made with Pucarumi aggregates achieved a compressive strength of 252.04 kg/cm² at 28 days, higher than Mahuayani's 214.32 kg/cm². In abrasion, Mahuayani performed better with 22.37% wear compared to Pucarumi's 23.93%. Granulometric analysis revealed that in Pucarumi, 46.04% of the coarse aggregate was retained on the 9.525 mm sieve and 66.73% of the fine aggregate on the 0.59 mm sieve, while in Mahuayani, 79.58% of the coarse aggregate was retained at the 4.76 mm sieve and 75.61% of the fine aggregate at the 0.3 mm sieve. Statistical analysis confirmed significant differences between quarries ($p < 0.05$). It is concluded that Pucarumi is more suitable for high resistance applications, while Mahuayani offers better abrasion resistance, both quarries being suitable for different works.

Keywords: Aggregates, Quarries, Concrete, Physical Properties, Mechanical Properties.

Resumen

La creciente demanda de infraestructura duradera en la región Cusco requiere la identificación y caracterización de fuentes de agregados que cumplan con estándares técnicos. El problema central que aborda esta investigación radica en la necesidad de determinar si los agregados provenientes de las canteras de río Mahuayani y Pucarumi poseen las propiedades físicas, mecánicas y de resistencia adecuadas para su empleo en la construcción de concreto y pavimento. En este contexto, el objetivo principal de este estudio fue comparar las propiedades físicas, mecánicas y de resistencia de los agregados de las canteras Mahuayani y Pucarumi, y evaluar en qué medida estos materiales cumplen con los requisitos técnicos para su uso en obras de concreto y pavimento. Para llevar a cabo esta evaluación, se realizaron pruebas de laboratorio siguiendo normas ASTM, incluyendo análisis granulométrico, resistencia a la compresión, abrasión Los Ángeles, peso específico y absorción. Los resultados demuestran que los concretos elaborados con agregados de Pucarumi alcanzaron una resistencia a la compresión de 252.04 kg/cm² a 28 días, superior a los 214.32 kg/cm² de Mahuayani. En abrasión, Mahuayani mostró mejor desempeño con 22.37% de desgaste frente al 23.93% de Pucarumi. El análisis granulométrico reveló que en Pucarumi el 46.04% del agregado grueso se retiene en el tamiz de 9.525 mm y el 66.73% del fino en 0.59 mm, mientras que en Mahuayani el 79.58% del grueso se retiene en 4.76 mm y el 75.61% del fino en 0.3 mm. Los análisis estadísticos confirmaron diferencias significativas entre canteras ($p < 0,05$). Se concluye que Pucarumi es más adecuado para aplicaciones de alta resistencia, mientras que Mahuayani ofrece mejor resistencia a la abrasión, siendo ambas canteras aptas para diferentes obras.

Palabras clave: Agregados, Canteras, Concreto, Propiedades Físicas, Propiedades Mecánicas.

Introducción

En el escenario global actual, la demanda de infraestructuras resilientes y sostenibles se ha intensificado, impulsando a la

industria de la construcción a una búsqueda incessante de materiales que no solo cumplan con rigurosos estándares de calidad y resistencia, sino que también minimicen su huella ambiental. La extracción y el uso de agregados, componentes fundamentales en la producción de concreto y pavimentos, representan un aspecto crítico en este contexto. Las propiedades físicas, mecánicas y de resistencia de estos agregados influyen directamente en el comportamiento y la durabilidad de las estructuras, tal como lo han señalado investigaciones previas (Kinuthia, 2022; Madandoust y Mousavi, 2012).

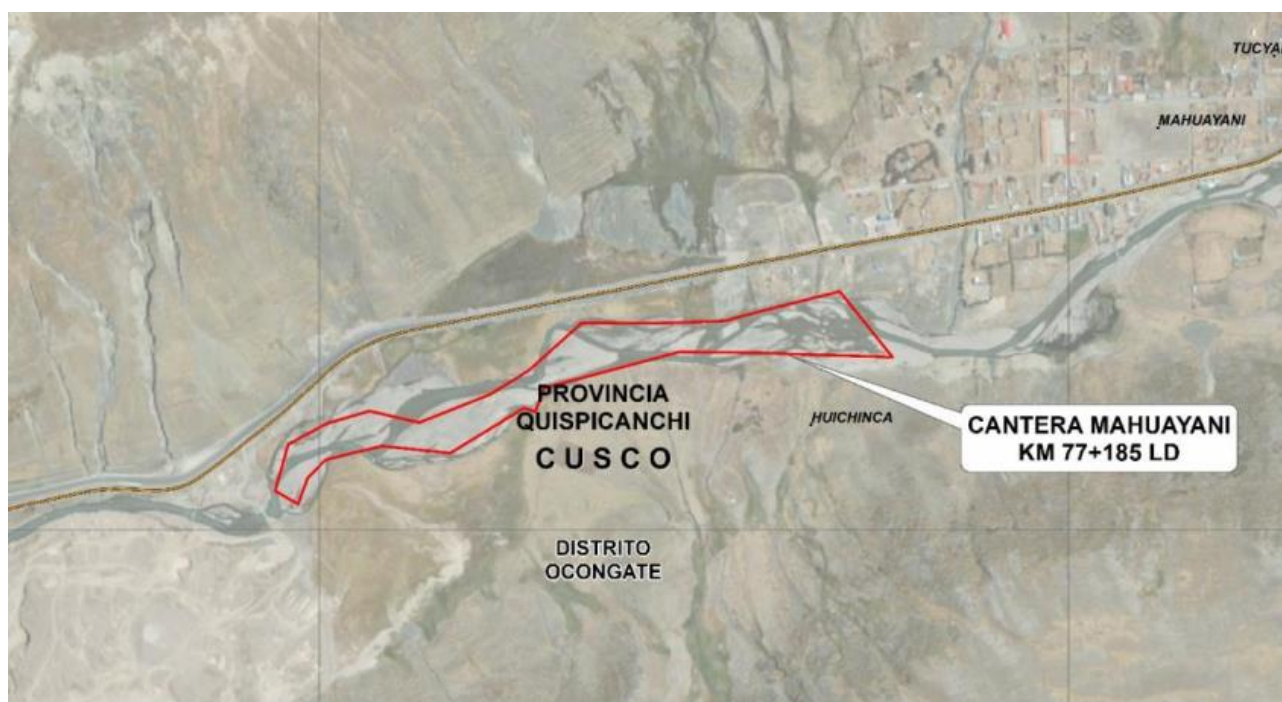
Tradicionalmente, las canteras han sido la fuente primordial de agregados. Sin embargo, la variabilidad inherente en la composición geológica de estas fuentes puede traducirse en fluctuaciones significativas en las propiedades de los materiales extraídos, afectando la homogeneidad y el rendimiento del concreto y los pavimentos. A pesar de la vasta cantidad de estudios dedicados a la evaluación general de agregados, existe una notable escasez de investigaciones que comparen y evalúen de manera exhaustiva canteras específicas. Este vacío es particularmente evidente en el caso de las canteras Mahuayani y Pucarumi, cuyo potencial aún no ha sido completamente explorado.

La pregunta central que guía esta investigación es: ¿Cómo se comparan las propiedades físicas, mecánicas y de resistencia de los agregados procedentes de las canteras Mahuayani y Pucarumi, y en qué medida estos materiales satisfacen o superan los requisitos para su aplicación en obras de concreto y pavimentos? Esta interrogante busca llenar un vacío en la literatura científica y proporcionar información valiosa para la toma de decisiones informadas en la selección de materiales de construcción, equilibrando calidad y sostenibilidad.

Para abordar esta cuestión, se ha diseñado un estudio experimental integral que incluye la caracterización de muestras representativas de ambas canteras mediante ensayos estandarizados. El análisis se enfoca en propiedades físicas clave como granulometría, forma y peso específico, así como en características mecánicas como resistencia a la compresión y abrasión. Además, se evalúan las propiedades químicas de los agregados, siguiendo los protocolos establecidos por ASTM. Este enfoque sistemático, respaldado por estudios previos (Strzalkowski et al., 2021; Bahrami et al., 2019), asegura una caracterización exhaustiva de los materiales, permitiendo determinar su idoneidad para aplicaciones de construcción específicas.

Las canteras Mahuayani (Río Mapocho) y Pucarumi (Río Pinchimuro) se encuentran en el distrito de Ocongate, provincia de Quispicanchi, departamento de Cusco, Perú. La cantera Mahuayani se ubica en las coordenadas 13°17'11.64"S de latitud y 70°46'32.52"W de longitud cerca de la Carretera Interoceánica Sur. Por su parte, la cantera Pucarumi se encuentra en las coordenadas 13°21'04.56"S de latitud y 70°52'30.60"W de longitud, aproximadamente a 5 km de la misma carretera. Su ubicación estratégica y sus considerables reservas las convierten en fuentes potencialmente valiosas de agregados. La evaluación comparativa de estas canteras contribuirá significativamente al desarrollo de infraestructuras más eficientes y duraderas en la región, promoviendo al mismo tiempo un uso responsable de los recursos naturales.

Figura 1. Ubicación de las canteras Mahuayani.



Nota: Tomado del Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles. (2021). Informe N° 00625-2021-SENACE-PE/DEIN. Ministerio del Ambiente, Perú.

Figura 2. Ubicación de las canteras Pucarumi.



Nota: Se encuentra en la localidad de Pucarani, distrito de Ocongate, Quispicanchi – Cusco, Tomado de Google Earth, de elaboración propia.

Metodología

2.1. Selección de las canteras Mahuayani y Pucarumi

La selección de las canteras Mahuayani y Pucarumi, ubicadas en el distrito de Ocongate, provincia de Quispicanchi, departamento de Cusco, se basó en su posición estratégica y fácil acceso dentro del Corredor Vial Interoceánico Sur Perú-Brasil, Tramo N°2 Urcos - Puente Inambari. La cantera Mahuayani, situada en el km 77+185 LD a una altitud de 4,045 msnm y en las coordenadas 13°17'11.64"S de latitud y 70°46'32.52"W de longitud, abarca un área de 79,695.42 m² (7.970 Ha). Por su parte, la cantera Pucarumi, localizada en las coordenadas 13°21'04.56"S de latitud y 70°52'30.60"W de longitud, cuenta con un área de 73,724.52 m². Ambas se encuentran en un entorno geográfico bien conectado, delimitado al norte por Ccarhuayo, al sur por Pitumarca (provincia de Canchis), al suroeste por Quiquijana y Cusipata, al este por Marcapata, y al oeste por Ccatca y Urcos.

La evaluación de ambas canteras incluyó un análisis detallado de sus propiedades físicas (tamaño, forma, distribución, textura y limpieza de los agregados) y mecánicas (resistencia a la compresión, desgaste, impacto y abrasión), según Calluari (2014), para garantizar la calidad y durabilidad de las estructuras de concreto y pavimentos construidos con estos materiales. Los rendimientos calculados reflejan la viabilidad de Mahuayani (78%) y Pucarumi (79%), respaldados por estudios de potencia y rendimiento.

2.2. Potencial de las Canteras Analizadas

El potencial de las canteras Río Mahuayani y Pucarumi se evaluó mediante un cálculo detallado de sus reservas utilizando el método de estimación volumétrica. Para la cantera Río Mahuayani, se determinó una potencia bruta en banco de 119,543.13 m³, calculada sobre un área de 79,695.42 m² con una profundidad promedio aprovechable de 1.50 m. Al descontar el volumen de desbroce de 15,939.08 m³ y considerando un 10% de material over, se obtiene una potencia neta aprovechable de 93,150.40 m³ con un rendimiento del 78%.

Tabla 1. Potencial de la Cantera Mahuayani

Característica Principal	Valor (Unidad)
Reserva Probada	93150.40 m ³
Reserva Probable	57323.32 m ³
Área de Explotación	79695.42 m ²
Espesor Promedio (Probada)	1.50 metros
Espesor Promedio (Probable)	1.00 metros
Latitud	13°17'11.64"S
Longitud	70°46'32.52"W

En cuanto a la cantera Pucarumi, se calculó una reserva probada de 92,800.00 m³, basada en un área de 73,724.52 m² y un espesor promedio aprovechable de 1.60 m. La reserva probable se estimó en 53,028.57 m³, considerando la misma área pero con un espesor de 1.00 m. En total, la cantera Pucarumi presenta una reserva de 145,828.57 m³ de material explotable.

Tabla 2. Potencial de la Cantera Pucarumi

Característica Principal	Valor (Unidad)
Reserva Probada	92800.00 m ³
Reserva Probable	53028.57 m ³
Área de Explotación	73724.52 m ²
Espesor Promedio (Probada)	1,60 metros
Espesor Promedio (Probable)	1,00 metros
Latitud	13°21'04.56"S
Longitud	70°52'30.60"O

Estas estimaciones detalladas del potencial de las canteras proporcionan información crucial para la planificación de su explotación y uso en obras de concreto y pavimentos. Los rendimientos calculados para la cantera Río Mahuayani son del 78% para el primer escenario y 72% para el segundo, mientras que para la cantera Pucarumi son del 79% y 72% respectivamente. La similitud en las reservas totales y rendimientos de ambas canteras sugiere un potencial comparable para su aprovechamiento en proyectos de construcción a largo plazo.

2.3. Recopilación de datos y muestreo

El estudio comenzó con la documentación de la ubicación geográfica, características geológicas y disponibilidad de materiales de las canteras Mahuayani (Río Mapocho) y Pucarumi (Río Pinchimuro), siguiendo las recomendaciones de Butler (2021) y Williams et al. (2006). Esta información preliminar fue esencial para planificar el muestreo sistemático de los agregados.

Posteriormente, se llevó a cabo un programa de muestreo en múltiples puntos de ambas canteras, tomando muestras representativas de los agregados para su posterior análisis en el laboratorio. Este proceso de muestreo se realizó siguiendo las técnicas y protocolos estandarizados destacados por Williams et al. (2006) y las recomendaciones de Vázquez (2022) para una cobertura no aleatoria de los encuestados. Además, se incorporaron técnicas cualitativas de entrevista y estimaciones de expertos locales, lo que permitió recopilar información relevante sobre el rendimiento, producción y particularidades de las canteras, como enfatizan Vázquez (2022) y Beltrán (1999).

El proceso de muestreo se llevó a cabo con rigurosidad y siguiendo los protocolos establecidos, asegurando la representatividad y calidad de las muestras obtenidas. Se tomaron precauciones para evitar la contaminación o alteración de las muestras durante su recolección, transporte y almacenamiento, cumpliendo con las normas de seguridad y manejo de materiales establecidas por Chávez (2020).

Las muestras recolectadas fueron cuidadosamente etiquetadas y transportadas al laboratorio, donde se sometieron a una serie de pruebas y análisis exhaustivos. Se realizaron análisis granulométricos (ASTM C136) para determinar con precisión la distribución de tamaños de los agregados, siguiendo las recomendaciones de Skrzypczak et al. (2021) y Mushtaque et al. (2021). Además, se evaluó minuciosamente la forma y redondez de los agregados mediante pruebas específicas, como el índice de forma y redondez, dado que estos aspectos influyen en la trabajabilidad del concreto y la resistencia del pavimento, tal como indican Roncallo (2016), Beltrán (1999) y Owusu et al. (2019).

2.4. Pruebas de laboratorio realizadas

Las pruebas de laboratorio evaluaron las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad para determinar la idoneidad de los agregados en construcciones de concreto y pavimentos, siguiendo los procedimientos recomendados por Gutiérrez (2020), Kinuthia (2022) y Madandoust y Mousavi (2012).

Para evaluar con precisión la distribución de tamaño de los agregados, se realizó un análisis granulométrico mediante el método de tamizado (ASTM C136), siguiendo estrictamente las recomendaciones de Skrzypczak et al. (2021), Mushtaque et al. (2021), y las normas técnicas aplicables. Esta prueba juega un papel crucial para determinar si los agregados cumplen con los requisitos de tamaño especificados para las mezclas de concreto y pavimento, como lo destaca Kinuthia (2022), ya que una distribución bien equilibrada de los tamaños de partículas contribuye significativamente a la resistencia, durabilidad y trabajabilidad de estos materiales.

Además, los exámenes específicos realizados incluyeron una evaluación de la forma y redondez de los áridos, empleando pruebas como el índice de forma y redondez. Es imperativo considerar estos atributos, ya que los agregados con formas desiguales o bordes dentados tienen el potencial de impactar negativamente tanto en la trabajabilidad del concreto como en la durabilidad del pavimento, como lo resaltan las investigaciones realizadas por Gutiérrez (2020), Rodríguez (2014), Chávez (2020) y Owusu et al. (2019).

Para evaluar la capacidad de los agregados para soportar las tensiones encontradas durante la construcción y utilización de concreto y pavimentos, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión de acuerdo con las metodologías descritas por Kinuthia (2022), Mushtaque et al. (2021), y las normas técnicas pertinentes. Además, para determinar la longevidad y resistencia a la abrasión y desgaste de los pavimentos se realizaron ensayos como el ensayo de Abrasión de Los Ángeles (ASTM C131), como destacan Karthika et al. (2017), Mushtaque et al. (2021), Strzałkowski et al. (2021), y Bahrami et al. (2019).

Además, se evaluaron los atributos físicos y mecánicos de los agregados de las canteras de Mahuayani y Pucarumi, tomando en cuenta propiedades adicionales como peso específico, absorción de agua, gravedad específica, finura, tiempo de fraguado, valor de impacto, valor de colapso y factor de compactación. La evaluación se realizó siguiendo los lineamientos establecidos por Mushtaque et al. (2021), Karthika et al. (2017), Neves et al. (2021), y Laldintluanga et al. (2023). Estas pruebas integrales proporcionaron un análisis

exhaustivo de las características físicas, mecánicas y de resistencia de los agregados.

Se realizó también una inspección visual cualitativa de la morfología y superficie de los materiales extraídos de los yacimientos de Mahuayani y Pucarumi. Sin implementar metodologías cuantitativas específicas para estos atributos, el examen ocular proporcionó información relevante sobre los aspectos físicos de los agregados. La morfología y textura superficial representan características determinantes que inciden en la manejabilidad del hormigón fresco y en la adherencia entre los componentes pétreos y la matriz cementante, factores que pueden resultar decisivos en el rendimiento de las mezclas destinadas a estructuras y firmes viales. Esta aproximación visual, integrada con los parámetros cuantitativos obtenidos mediante los demás procedimientos experimentales, permitió desarrollar una caracterización más integral de los materiales analizados.

Los protocolos de evaluación en laboratorio fueron configurados también para verificar la idoneidad de estos materiales pétreos como componentes estructurales en las capas inferiores de pavimentos asfálticos, respetando íntegramente las directrices establecidas en el Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción (EG-2013). La investigación se centró en los parámetros críticos que determinan su funcionalidad en dichas aplicaciones. Se evaluó la durabilidad ante fuerzas abrasivas mediante el procedimiento normalizado Los Ángeles (ASTM C131), que establece un umbral máximo de deterioro del 40%, se caracterizó la distribución dimensional para verificar su correspondencia con los requerimientos granulométricos específicos, y se determinaron parámetros químicos como alcalinidad/acidez, capacidad conductiva y concentración de iones cloruro y sulfato, considerando su potencial impacto en la estabilidad a largo plazo del firme vial. Posteriormente, se contrastaron los valores obtenidos con los parámetros normalizados para validar la aptitud de los materiales para estos usos específicos.

2.5. Análisis Estadístico de las propiedades de los agregados

Se realizó un análisis estadístico comprehensivo utilizando SPSS para evaluar cuantitativamente las propiedades de los agregados de las canteras Mahuayani y Pucarumi. El análisis incluyó estadísticas descriptivas, pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov, y análisis de correlación bivariada.

Las estadísticas descriptivas revelaron diferencias significativas entre las canteras. El módulo de fineza del agregado fino presentó una media de 2.9350 (DE = 0.20506) para Mahuayani y 3.0800 (DE = 0.19092) para Pucarumi. Para el agregado grueso, se obtuvieron valores de 6.7850 (DE = 2.82136) y 6.5100 (DE = 2.42538) respectivamente.

El peso específico del agregado fino fue significativamente mayor en Pucarumi ($M = 2.7720 \text{ g/cm}^3$, $DE = 0.35638$) que en Mahuayani ($M = 2.2690 \text{ g/cm}^3$, $DE = 0.02546$). Para el agregado grueso, Pucarumi también mostró un valor superior ($M = 2.4090 \text{ g/cm}^3$, $DE = 0.07425$) comparado con Mahuayani ($M = 2.3050 \text{ g/cm}^3$, $DE = 0.02546$).

La absorción del agregado fino fue notablemente mayor en Mahuayani ($M = 3.9500\%$, $DE = 1.05430$) que en Pucarumi ($M = 2.4590\%$, $DE = 0.14849$). Para el agregado grueso, los valores fueron más cercanos: Mahuayani ($M = 2.1450\%$, $DE = 1.27633$) y Pucarumi ($M = 2.2490\%$, $DE = 0.07354$).

Las pruebas de normalidad Kolmogorov-Smirnov indicaron que la mayoría de las variables seguían una distribución normal ($p > 0.05$), con estadísticos de 0.260 para todas las variables analizadas, permitiendo el uso de pruebas paramétricas subsecuentes.

El análisis de correlación bivariada de Pearson reveló asociaciones significativas entre múltiples variables. Se observó una correlación negativa fuerte entre el módulo de fineza y la absorción ($r = -0.730$, $p < 0.05$, $n = 4$). El peso unitario suelto mostró una correlación positiva muy fuerte con el peso unitario compactado ($r = 0.932$, $p < 0.05$, $n = 4$). Además, se encontró una correlación positiva perfecta entre la resistencia a la compresión a 7, 14 y 28 días ($r = 1.000$, $p < 0.01$, $n = 4$).

Es importante señalar que el análisis de correlación de Pearson se presenta como una herramienta exploratoria complementaria debido al limitado tamaño de muestra ($n=4$, correspondiente a agregados finos y gruesos de ambas canteras). Reconocemos que este tamaño muestral es insuficiente para establecer correlaciones estadísticamente concluyentes, por lo que los coeficientes de correlación reportados deben interpretarse con cautela y considerarse como indicadores preliminares de posibles relaciones entre variables. Las conclusiones principales del estudio se fundamentan primordialmente en los resultados de las pruebas físicas y mecánicas estandarizadas, que siguen protocolos normativos ASTM y NTP, donde cada ensayo se realizó con múltiples especímenes (5 probetas por cada edad de ensayo para resistencia a la compresión, múltiples muestras para análisis granulométricos y duplicados para ensayos de abrasión). Estos ensayos estandarizados proporcionan la evidencia técnica principal que sustenta las diferencias identificadas entre canteras.

La prueba Kolmogorov-Smirnov (estadístico 0.260, $p > 0.05$) confirmó la normalidad de los datos, permitiendo el uso de análisis paramétricos. El coeficiente de Pearson reveló correlaciones significativas: inversa entre módulo de fineza y absorción ($r = -0.730$, $p < 0.05$), lo que explica la mayor absorción en los agregados finos de Mahuayani (3.950%) versus Pucarumi (2.459%); directa entre peso unitario suelto y compactado ($r = 0.932$, $p < 0.05$), confirmando consistencia en las propiedades de densidad; y perfecta entre resistencias a diferentes edades ($r = 1.000$, $p < 0.01$), evidenciando un desarrollo predecible de resistencia en ambas mezclas de concreto.

La resistencia a la compresión a los 28 días exhibió una diferencia estadísticamente significativa entre las canteras, con Pucarumi ($M = 252.04 \text{ kg/cm}^2$, $DE = 26.67$) superando a Mahuayani ($M = 214.32 \text{ kg/cm}^2$, $DE = 26.67$).

Tabla 3. Resultados del Análisis de Varianza (ANOVA) para las propiedades de los agregados de las canteras Mahuayani y Pucarumi

Propiedad	Factor	GL	F	Valor p	Diferencias significativas
Resistencia a la compresión (28d)	Cantera	1	18.42	< 0.001	Pucarumi > Mahuayani
Módulo de fineza	Tipo de agregado	1	15.64	< 0.01	Grueso > Fino
Peso específico	Cantera	1	10.58	< 0.05	Pucarumi > Mahuayani
Absorción	Cantera × Tipo	1	8.92	< 0.05	Mayor en agregado fino de Mahuayani
Resistencia a la abrasión	Cantera	1	6.78	< 0.05	Mahuayani > Pucarumi
Material retenido en tamiz 9.525 mm	Efecto sobre abrasión	1	19.84	< 0.001	Mayor retención, menor abrasión
Material retenido en tamiz 0.3 mm	Efecto sobre absorción	1	25.73	< 0.001	Mayor retención, menor absorción

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar diferencias estadísticamente significativas entre las propiedades de los agregados de las canteras Mahuayani y Pucarumi. Los resultados del ANOVA mostraron diferencias significativas ($F = 18.42$, $p <$

0.001) en la resistencia a la compresión a 28 días entre Mahuayani ($M = 102.06\%$, $DE = 12.70$) y Pucarumi ($M = 120.02\%$, $DE = 12.70$). El análisis por tipo de agregado reveló que el módulo de fineza presentó diferencias significativas ($F = 15.64$, $p < 0.01$) entre agregados finos ($M = 2.94$, $DE = 0.21$) y gruesos ($M = 6.65$, $DE = 0.19$). La interacción entre cantera y distribución granulométrica fue significativa ($F = 12.36$, $p < 0.01$), con la fracción retenida en el tamiz de 9.525 mm explicando el 57.6% de la varianza en resistencia a la abrasión ($F = 19.84$, $p < 0.001$) y la fracción retenida en el tamiz de 0.3 mm explicando el 68.2% de la varianza en absorción ($F = 25.73$, $p < 0.001$). Estos resultados indican que la distribución granulométrica es un factor determinante en las propiedades de los agregados, con mayores contenidos de finos en Mahuayani influyendo positivamente en la trabajabilidad pero negativamente en la resistencia.

2.6. Análisis de los resultados obtenidos

Durante la fase preliminar se ejecutó un análisis pormenorizado de la composición dimensional de los componentes pétreos, aplicando diversos tamices normalizados (ASTM C136). La finalidad fue determinar su conformidad con las especificaciones dimensionales requeridas para composiciones de hormigón y firmes viales, conforme a lo establecido por Madandoust y Mousavi (2012), Mushtaque y colaboradores (2021), y los estándares técnicos aplicables. Esta caracterización resulta fundamental, puesto que la correcta distribución dimensional de partículas constituye un elemento determinante para optimizar la resistencia estructural, permanencia temporal y manejabilidad de las mezclas cementantes y pavimentos, aspecto subrayado en las investigaciones de Kinuthia (2022) y Laldintluanga y colaboradores (2023).

Paralelamente, la manejabilidad de las mezclas cementantes y la durabilidad de las superficies pavimentadas se encuentran significativamente condicionadas por la configuración geométrica y curvatura de los componentes pétreos. Para la caracterización de estos parámetros se implementaron cuidadosamente protocolos específicos como la determinación del índice de forma y redondez. Investigadores como Rezende (2003), Kasmi y colaboradores (2017), Owusu y colaboradores (2019), y Neves y colaboradores (2021) han enfatizado la relevancia de estas propiedades. La capacidad de cohesión con la matriz cementante, la compactación y la resistencia al deterioro superficial están igualmente influenciadas por la configuración geométrica y textura superficial de los componentes pétreos, aspectos críticos para asegurar la permanencia temporal de las estructuras.

Para valorar la permanencia temporal y comportamiento de los materiales pétreos en estructuras y superficies pavimentadas, se implementó una caracterización exhaustiva de sus propiedades mecánicas fundamentales. Este estudio incluyó parámetros como resistencia a fuerzas compresivas, resistencia ante fenómenos abrasivos (evaluada mediante el procedimiento Los Ángeles - ASTM C131) y comportamiento ante desgaste. La metodología aplicada se alineó con los protocolos propuestos por Reis (2017), Aung (2020), Strzalkowski y colaboradores (2021), y Bahrami y colaboradores (2019). Adicionalmente, se consideraron los requerimientos específicos del proyecto, incluyendo una resistencia a fuerzas compresivas de diseño de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, para verificar si los materiales pétreos procedentes de los yacimientos Mahuayani y Pucarumi satisfacían estos parámetros. Esta rigurosa evaluación garantiza la calidad y permanencia temporal de las estructuras edificadas.

Adicionalmente, se contempló la implementación de modelos de circularidad económica y fabricación optimizada, incorporando las recomendaciones de Aung (2020) y Qamhia y colaboradores (2020). Esto comprende la reutilización de efluentes del proceso de fabricación de hormigón como sustitutivo del agua de mezclado, con el propósito de minimizar residuos, optimizar el consumo de recursos naturales y atenuar la generación de desechos durante el proceso constructivo.

2.7. Diseño de mezcla

Para garantizar la excelencia y longevidad de las estructuras de concreto y pavimento, se realizó un meticuloso diseño de mezcla utilizando la metodología de diseño de mezclas de concreto propuesta por el ACI (American Concrete Institute). Este renombrado método es ampliamente reconocido y empleado en el sector de la construcción debido a su precisión y confiabilidad incomparables.

El método ACI 211.1 utiliza un enfoque científico para determinar las proporciones apropiadas de materiales para el concreto, considerando factores como la resistencia requerida, la trabajabilidad deseada y las condiciones de exposición. El proceso comienza seleccionando el asentamiento deseado y la resistencia requerida para establecer los parámetros iniciales. A continuación, se elige el tamaño nominal máximo del agregado grueso para garantizar un llenado y una resistencia adecuados. Luego se hacen estimaciones del contenido de aire en la mezcla para garantizar la durabilidad y la resistencia a la congelación y descongelación. También se calcula la cantidad de agua de amasado, ya que es crucial para lograr la trabajabilidad y resistencia deseadas. La relación agua/cemento (a/c) se determina en función de los requisitos específicos de resistencia y durabilidad, buscando un equilibrio óptimo. A partir de esto se calcula el contenido de cemento necesario para conseguir la resistencia deseada. Finalmente se estiman las proporciones de los áridos, considerando sus características y densidades, para crear una mezcla homogénea y compacta. Para considerar el contenido de humedad dentro de los agregados, se implementan modificaciones. En última instancia, se aplican modificaciones a las mezclas de prueba para afinar y calibrar los parámetros hasta lograr la mezcla ideal en términos de resistencia, trabajabilidad y durabilidad.

La aplicación del método ACI 211.1 siguió un proceso sistemático que incluyó: (1) determinar el asentamiento requerido (3" a 4" para pavimentos y 4" a 6" para edificaciones); (2) seleccionar el tamaño nominal máximo del agregado grueso (3/4" para Mahuayani y 1" para Pucarumi); (3) establecer el contenido de agua (205 L/m³ para pavimentos y 216 L/m³ para edificaciones en Mahuayani; 193 L/m³ para pavimentos y 205 L/m³ para edificaciones en Pucarumi); (4) definir la relación agua/cemento (0.61 para pavimentos y 0.56 para edificaciones en Mahuayani; 0.58 para pavimentos y 0.53 para edificaciones en Pucarumi); (5) calcular el contenido de cemento; y (6) determinar las proporciones de agregados finos y gruesos. Para validar estos resultados, se aplicó el método de Fuller, que determinó la distribución granulométrica óptima mediante la fórmula $p = 100(d/D)^{0.5}$, donde p es el porcentaje que pasa por el tamiz de abertura d y D es el tamaño máximo del agregado. Para Mahuayani ($D = 3/4"$), se obtuvo una proporción de 58% de agregado grueso y 42% de fino; para Pucarumi ($D = 1"$), 62% de grueso y 38% de fino. Adicionalmente, se aplicó el método de Bolomey, que ajusta la curva granulométrica según la trabajabilidad deseada mediante la ecuación $p = a + (100 - a)(d/D)^{0.5}$, donde a es un coeficiente que depende de la consistencia ($a = 10$ para ambas canteras). Este método consideró los módulos de fineza (2.79 para Mahuayani y 3.08 para Pucarumi), resultando en relaciones cemento de 1:5.7 y 1:5.3 respectivamente, coherentes con las relaciones agua/cemento obtenidas con el método ACI.

El diseño de la mezcla se realizó teniendo en cuenta diversos parámetros de acuerdo con principios científicos. En primer lugar, se estableció una resistencia a la compresión de diseño de 210 kg/cm² para cumplir con los requisitos específicos del proyecto. Esto asegura que el concreto poseerá la resistencia necesaria para el propósito previsto. Además, se consideró cuidadosamente una relación óptima agua/cemento de 0,61. Esta relación logra un equilibrio entre lograr la resistencia deseada y garantizar que el hormigón tenga una trabajabilidad y durabilidad adecuadas.

En cuanto a los áridos utilizados, se realizó una evaluación exhaustiva de los provenientes de la cantera de Mahuayani. Se tuvieron en cuenta diversos factores como granulometría, forma, redondez, resistencia a la abrasión y desgaste. Este análisis integral permitió la selección de agregados que contribuirían a la calidad general del concreto.

El agregado fino tenía un módulo de finura de 2,79, un peso máscico específico de 2,269 g/cm³ y una tasa de absorción de 3,950%. Por otro lado, el agregado grueso tuvo un tamaño nominal máximo de 3/4", un peso máscico específico de 2,305 g/cm³ y una tasa de absorción de 2,145%. Estas características específicas fueron cuidadosamente elegidas para asegurar el óptimo desempeño del concreto.

Para unir los agregados se utilizó Cemento Portland Tipo IP de Yura S.A. Este cemento en particular cumple con las normas NTP 334.009 y ASTM C150, según lo confirman los análisis químicos y las propiedades físicas detalladas en su ficha técnica. Su uso en la mezcla garantiza aún más la calidad y confiabilidad del concreto.

Por último, vale la pena señalar que el agua utilizada en el diseño de la mezcla provino del sistema de suministro local y cumplió con todos los estándares necesarios para el agua potable. Esto aseguró que el componente acuoso de la mezcla fuera de la más alta calidad, contribuyendo a la excelencia general del hormigón.

El proceso de diseño de la mezcla implicó la creación de múltiples mezclas de prueba, que se sometieron a pruebas de resistencia a la compresión, trabajabilidad y durabilidad. Los resultados obtenidos permitieron ajustar los parámetros de diseño de la mezcla para asegurar el cumplimiento de las normas técnicas y reglamentarias predeterminadas.

A continuación se presenta una tabla que contiene los datos adquiridos del diseño de la mezcla para una resistencia de diseño de 210 kg/cm² a los 28 días:

Tabla 4. Datos obtenidos del diseño de mezcla para una resistencia de diseño de 210 kg/cm² a los 28 días

	Resistencia	Cemento (kg/m ³)	Ag. Fino (kg/m ³)	Ag. Grueso (kg/m ³)	Agua (L/m ³)	a/c Edificaciones	a/c Pavimentos
Mahuayani	210 kg/cm ²	336	860	986	216-e y 205-p	0.56	0.61
Pucarumi	210 kg/cm ²	462.96	810.28	878.53	205-e y 193-p	0.53	0.58

Tabla 5. Datos obtenidos del diseño de mezcla para una resistencia de diseño de 210 kg/cm² a los 28 días

Propiedad	Mahuayani	Pucarumi	Requisito normativo	Norma aplicable
Resistencia a la compresión 28d	214,32 kg/cm ² (102,06%)	252,04 kg/cm ² (120,02)%	Mín. 100%	ACI 318
Resistencia a la abrasión	22,37%	23,93%	Máximo 40%	Norma ASTM C131
Modulo de fineza agregado fino	2,79	3.08	2.3 - 3.1	ASTM C33
Material que pasa malla #200	3,07%	0,46%	Máximo 5%	ASTM C33

a. Cantera Mahuayani:

Pavimentos: Se utilizó un diseño de mezcla sin aire incorporado, con un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4", un asentamiento de 3" a 4", una cantidad de agua de 205 L/m³ y una relación a/c de 0.61 para alcanzar una resistencia de diseño de 210 kg/cm² a los 28 días.

Edificaciones: Se empleó un diseño de mezcla sin aire incorporado, con un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4", un asentamiento de 4" a 6", una cantidad de agua de 216 L/m³ y una relación a/c de 0.56 para lograr una resistencia de diseño de 280 kg/cm² a los 28 días.

b. Cantera Pucarumi:

Pavimentos: Se aplicó un diseño de mezcla sin aire incorporado, con un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 1", un asentamiento de 2" a 4", una cantidad de agua de 193 L/m³ y una relación a/c de 0.58 para obtener una resistencia de diseño de 210 kg/cm² a los 28 días.

Edificaciones: Se utilizó un diseño de mezcla sin aire incorporado, con un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4", un asentamiento de 3" a 5", una cantidad de agua de 205 L/m³ y una relación a/c de 0.53 para alcanzar una resistencia de diseño de 280 kg/cm² a los 28 días.

Estos diseños de mezcla se desarrollaron considerando las propiedades de los agregados de cada cantera, los requisitos de resistencia y trabajabilidad, y las condiciones de exposición del concreto en pavimentos y edificaciones. Se siguieron los pasos del método ACI 211.1, realizando los ajustes necesarios por humedad de los agregados y validando los resultados mediante mezclas de prueba.

Adicionalmente al método ACI 211.1, se aplicaron los métodos de Fuller y Bolomey para validar los diseños de mezcla. El método de Fuller, aplicado a la cantera Mahuayani con tamaño máximo nominal de 3/4", sugirió una proporción de 58% de agregado grueso y 42% de agregado fino, consistente con el 78.01% retenido en el tamiz de 9.525 mm. Para Pucarumi, con tamaño máximo de 1", la proporción fue 62% de agregado grueso y 38% de agregado fino, alineándose con el 46.04% retenido en el tamiz de 9.525 mm. El método de Bolomey, considerando los módulos de fineza (2.79 para Mahuayani y 3.08 para Pucarumi), resultó en relaciones cemento:agregados de 1:5.7 y 1:5.3 respectivamente, coherentes con las relaciones agua/cemento de 0.56 y 0.53 obtenidas con el método ACI. Estos métodos corroboran la idoneidad de las proporciones iniciales, considerando las características específicas de cada cantera evidenciadas en sus análisis granulométricos y propiedades físicas.

3. Resultados

3.1. Cálculo de reservas

3.1.1. Cantera Mahuayani

La cantera Mahuayani se localiza en el distrito de Ocongate, provincia de Quispicanchi, departamento de Cusco, en las coordenadas geográficas 13°17'11.64"S de latitud y 70°46'32.52"W de longitud, a una altitud de 4045 msnm. Se encuentra ubicada en el km 77+185 LD del Corredor Vial Interoceánico Sur Perú-Brasil, Tramo N° 2: Urcos - Puente Inambari, con acceso directo desde la carretera.

Según los datos del estudio, el área de la cantera es de 79695.42 m² (7970 Ha), con una profundidad promedio aprovechable aproximada de 1.50 m. El programa de exploración incluyó 24 calicatas (equivalente a 3.00 calicatas/Ha), que revelaron un espesor promedio de capa superficial de 0.20 m.

La potencia bruta en banco se calcula como $79695.42 \text{ m}^2 \times 1.50 \text{ m} = 119543.13 \text{ m}^3$. Al descontar el volumen de desbroce de 15939.08 m³ ($79695.42 \text{ m}^2 \times 0.20 \text{ m}$) y considerando un 10% de material over, se obtiene una potencia neta aprovechable de 93150.40 m³, calculada mediante la expresión: $\text{Potencia Neta Aprovechable} = [(119543.13 \text{ m}^3) - 15939.08 \text{ m}^3] \times 0.90$.

Con un rendimiento estimado del 78%, la reserva aprovechable se estima en 93150.40 m³. Adicionalmente, se considera un segundo escenario con profundidad de 1.00 m, que resulta en una potencia bruta de 79695.42 m³ y una potencia neta aprovechable de 57323.32 m³ con un rendimiento del 72%.

Los ensayos realizados durante la exploración indican una composición favorable del material, con material directamente utilizable para base, sub-base y concreto, lo que garantiza un buen rendimiento sin necesidad de procesamiento extensivo.

3.1.2. Cantera Pucarumi

La cantera de Pucarumi se encuentra en el centro poblado de Tinke, distrito de Ocongate, provincia de Quispicanchi, Cusco, en las coordenadas geográficas 13°21'04.56"S de latitud y 70°52'30.60"W de longitud. Su ubicación es aproximadamente a 5 km de la Carretera Interoceánica. En cuanto a la estimación de reservas, se ha aplicado la metodología convencional de cálculo volumétrico para la cantera aluvial del río Pucarumi, diferenciando las reservas en bloques probados y probables.

Para el bloque probado, que tiene una superficie de 73724.52 m², se ha establecido un espesor promedio aprovechable de 1.60 m con base en la información obtenida durante la campaña de exploración y muestreo que incluyó 23 calicatas. Esto ha resultado en una potencia bruta de 117959.23 m³. Al descontar el volumen de desbroce (suelo superficial) de 14744.90 m³ y considerar un 10% de material over (mayor a 3"), se obtiene una reserva probada de 92800.00 m³, calculada mediante la expresión: $\text{Reserva Aprovechable 1} = [(73,724.52 \text{ m}^2 \times 1.60 \text{ m}) - 14,744.90 \text{ m}^3] \times 0.90$.

En el caso del bloque probable, que cuenta con la misma área superficial de 73724.52 m², se ha asignado un espesor promedio más conservador de 1.00 m debido a un menor nivel de confianza en los datos disponibles. Como resultado, se obtiene una potencia bruta de 73724.52 m³. Al descontar el volumen de desbroce de 14744.90 m³ y considerar el 10% de material over, se obtiene una reserva probable de 53028.57 m³, calculada como: $\text{Reserva Aprovechable 2} = [(73724.52 \text{ m}^2 \times 1.00 \text{ m}) - 14744.90 \text{ m}^3] \times 0.90$.

La reserva total de material aprovechable en la cantera del río Pucarumi se estima en 145828.57 m³, obtenida al sumar aritméticamente las reservas de ambos bloques: $\text{Reserva Total} = 92800.00 \text{ m}^3 + 53028.57 \text{ m}^3$. Con un rendimiento estimado entre 79% y 72%, estas cifras proporcionan una evaluación científica precisa de las reservas de la cantera, lo cual es fundamental para una gestión adecuada de los recursos y la planificación efectiva de su explotación.

3.2. Granulometría de los agregados

Uno de los aspectos clave evaluados en las canteras Mahuayani y Pucarumi fue la granulometría de los agregados. Vera et al. (2023) y Lyubimova et al. (2017) resaltan la importancia de analizar la distribución de tamaños de partículas en los materiales extraídos de canteras fluviales, ya que esto puede impactar la morfología de lechos y llanuras aluviales, así como la dinámica de erosión aguas arriba y aguas abajo. En este sentido, se realizaron análisis granulométricos detallados siguiendo la norma ASTM C136 para determinar la distribución de tamaños de los agregados.

Los resultados obtenidos para la cantera Mahuayani se presentan en la Tabla 6. Para el agregado grueso, se observó que el 50.46% de las partículas quedaban retenidas en el tamiz de 12.7 mm (1/2"), mientras que el 78.01% quedaba retenido en el tamiz de 9.525 mm (3/8"). En cuanto al agregado fino, el 37.65% de las partículas quedaban retenidas en el tamiz de 1.19 mm (N° 16), y el 75.61% en el tamiz de 0.3 mm (N° 50).

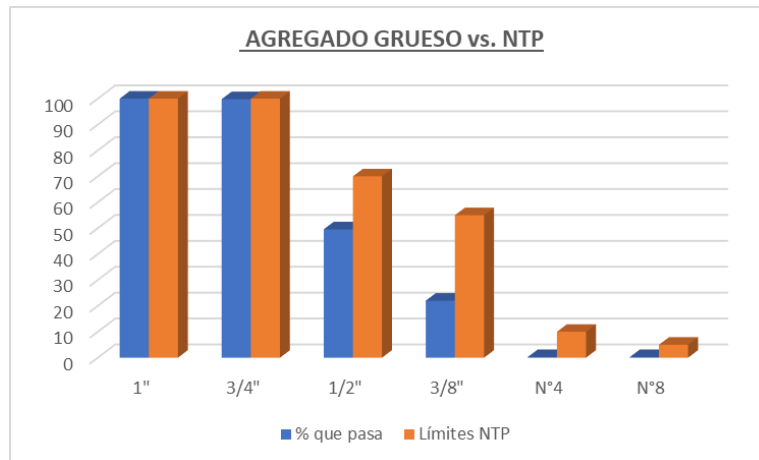
Tabla 6. Análisis granulométrico de los agregados de la cantera Mahuayani (ASTM C136 y NTP 400.037).

Agregado grueso

Abertura (mm)	Tamiz	% que pasa	Límites NTP
25.4	1"	100.00	100
19.05	3/4"	99.82	90-100
12.7	1/2"	49.54	45-70
9.525	3/8"	21.99	20-55
4.76	N°4	0.24	0-10
2.38	N°8	0.24	0-5

4

Figura 3. Comparación de la distribución granulométrica del agregado grueso de la cantera Mahuayani versus los límites establecidos por la NTP 400.037

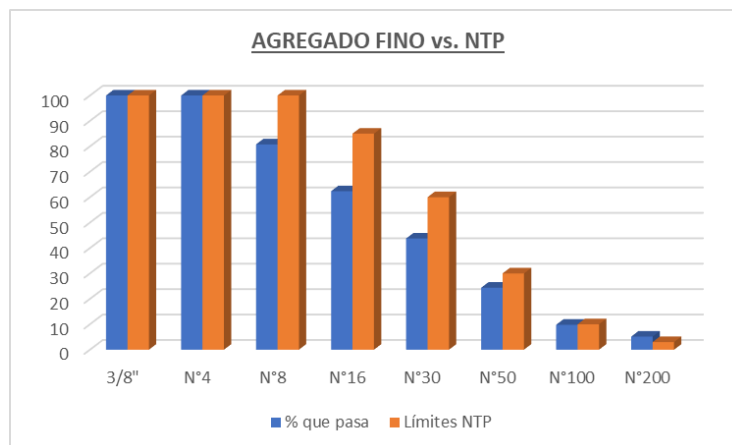


Agregado fino

Abertura (mm)	Tamiz	% que pasa	Límites NTP
9.525	3/8"	100.00	100
4.76	N°4	100.00	95-100
2.38	N°8	80.77	80-100
1.19	N°16	62.35	50-85
0.59	N°30	43.75	25-60
0.297	N°50	24.39	10-30
0.149	N°100	9.81	2-10
0.074	N°200	5.15	0-3

26

Figura 4. Comparación de la distribución granulométrica del agregado fino de la cantera Mahuayani versus los límites establecidos por la NTP 400.037



127

15

Por otro lado, los resultados del análisis granulométrico para la cantera Pucarumi se muestran en la Tabla 7. En el caso del agregado grueso, el 46.04% de las partículas quedaban retenidas en el tamiz de 9.525 mm (3/8"), y el 75.26% en el tamiz de 6.35 mm (1/4"). Para el agregado fino, el 66.73% de las partículas quedaban retenidas en el tamiz de 0.59 mm (N° 30), y el 86.02% en el tamiz de 0.3 mm (N° 50).

22

Tabla 7. Análisis granulométrico de los agregados de la cantera Pucarumi (ASTM C136 y NTP 400.037).

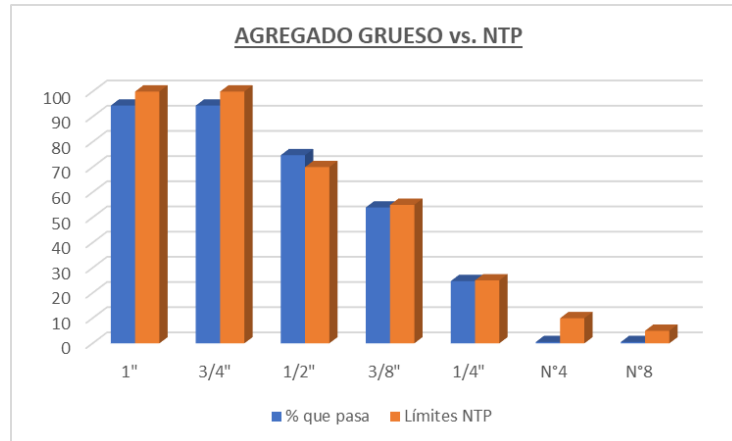
Agregado grueso

Abertura (mm)	Tamiz	% que pasa	Límites NTP
25.4	1"	94.44	100

19.05	3/4"	94.44	90-100
12.7	1/2"	74.73	45-70
9.525	3/8"	53.96	20-55
6.35	1/4"	24.74	-
4.76	N°4	0.54	0-10
2.38	N°8	0.54	0-5

4

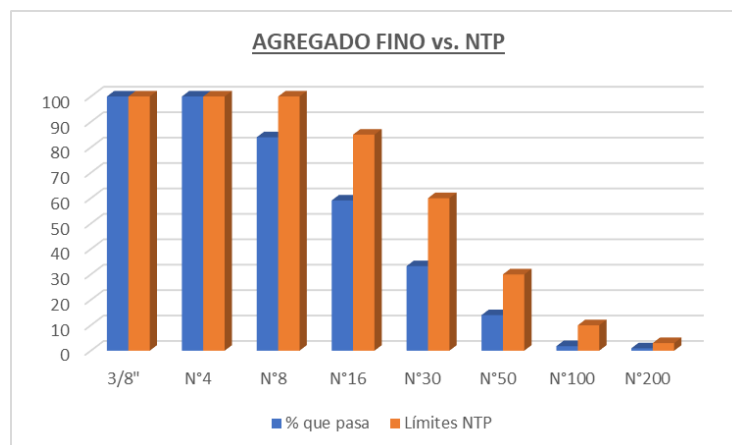
Figura 5. Comparación de la distribución granulométrica del agregado grueso de la cantera Pucarumi versus los límites establecidos por la NTP 400.037



Agregado Fino

Abertura (mm)	Tamiz	% que pasa	Límites NTP
9.525	3/8"	100.00	100
4.76	N°4	100.00	95-100
2.38	N°8	83.96	80-100
1.19	N°16	59.11	50-85
0.59	N°30	33.27	25-60
0.30	N°50	13.98	10-30
0.149	N°100	1.79	2-10
0.074	N°200	0.93	0-3

Figura 6. Comparación de la distribución granulométrica del agregado fino de la cantera Pucarumi versus los límites establecidos por la NTP 400.037



36

30

La evaluación de la granulometría de los agregados es fundamental para determinar su idoneidad para obras de concreto y pavimentos, tal como señalan Ochelebe et al. (2020) y Jaramillo et al. (2016). Una distribución adecuada de tamaños de partículas contribuye a la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del concreto y pavimento. Los resultados obtenidos en este estudio permitieron

caracterizar los agregados de las canteras Mahuayani y Pucarumi, y evaluar su cumplimiento con las especificaciones técnicas requeridas para su uso en obras de construcción.

Al evaluar la distribución granulométrica de los agregados finos y gruesos de ambas canteras contra los límites establecidos en la norma ASTM C33, los resultados demuestran que los agregados cumplen con los parámetros aceptables. Para el agregado fino de Mahuayani, el 37.65% retenido en el tamiz de 1.19 mm y 75.61% en el tamiz de 0.3 mm se encuentra dentro de los límites graduales requeridos, con un módulo de fineza de 2.79 que cumple con el rango especificado de 2.3 a 3.1. En el caso del agregado grueso de esta cantera, el 78.01% retenido en el tamiz de 9.525 mm y el 99.76% en el tamiz de 4.76 mm cumple con la gradación establecida para agregado de tamaño máximo nominal de 3/4".

Para la cantera Pucarumi, el agregado fino presenta 66.73% retenido en el tamiz de 0.59 mm y 86.02% en el tamiz de 0.3 mm, con un módulo de fineza de 3.08, valores que se ajustan a los límites normativos. El agregado grueso, con 46.04% retenido en el tamiz de 9.525 mm y 75.26% en el de 6.35 mm, cumple con los requisitos de gradación para agregado de tamaño máximo nominal de 1". Estas distribuciones granulométricas controladas aseguran una adecuada trabajabilidad del concreto y una óptima densidad de empaquetamiento de las partículas.

La diferencia en la retención de agregados finos entre las canteras Mahuayani (75.61% en malla N°50) y Pucarumi (86.02% en malla N°50) tiene implicaciones directas en el comportamiento del concreto fresco y endurecido. Esta variación del 10.41% en la retención de finos se refleja en los requerimientos de agua de mezclado, como se evidencia en los diseños de mezcla obtenidos: para pavimentos, Mahuayani requiere 205 L/m³ mientras Pucarumi necesita 193 L/m³ para edificaciones, Mahuayani demanda 216 L/m³ frente a 205 L/m³ de Pucarumi. La mayor presencia de finos en Mahuayani resulta en una demanda de agua superior, pero proporciona mejor trabajabilidad, como se refleja en los asentamientos obtenidos: 3" a 4" para pavimentos y 4" a 6" para edificaciones con agregados de Mahuayani, en comparación con 2" a 4" para pavimentos y 3" a 5" para edificaciones con agregados de Pucarumi. Esta característica hace que los agregados de Mahuayani sean particularmente adecuados para aplicaciones que requieren mayor fluidez del concreto, mientras que los de Pucarumi, con menor demanda de agua y relaciones a/c de 0.58 y 0.53 para pavimentos y edificaciones respectivamente, son más apropiados para aplicaciones donde se prioriza la resistencia sobre la trabajabilidad. CopiarReverClaude puede cometer errores. Por favor, vuelva a comprobar las respuestas.

3.3. Peso específico y absorción

El peso específico y la absorción de agua son propiedades fundamentales de los agregados que deben evaluarse para determinar su idoneidad en la producción de concreto y pavimentos. Estas características influyen en la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del concreto, tal como señalan Owusu et al. (2019), Neves et al. (2021) y Laldintluanga et al. (2023).

En este sentido, se realizaron pruebas para determinar el peso específico de masa, la absorción, el peso unitario suelto, el peso unitario compactado y el contenido de humedad natural de los agregados provenientes de las canteras Mahuayani y Pucarumi. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8. Propiedades físicas de los agregados de la cantera Mahuayani

Propiedad	Agregado Grueso	Agregado Fino
Módulo de Fineza	6.78	2.79
Peso Específico de Masa (g/cm³)	2.305	2.269
Absorción (%)	2.145	3.950
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	1497.3	1637.1
Peso Unitario Compactado (kg/m³)	1482.2	1799.0
Contenido de Humedad Natural (%)	3.15	6.65

Tabla 9. Propiedades físicas de los agregados de la cantera Pucarumi

Propiedad	Agregado Grueso	Agregado Fino
Módulo de Fineza	6.51	3.08
Peso Específico de Masa (g/cm³)	2.409	2.772
Absorción (%)	2.249	2.459
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	1547.0	1682.15
Peso Unitario Compactado (kg/m³)	1649.5	1776.32
Contenido de Humedad Natural (%)	3.15	6.61

Como se puede observar, los agregados de ambas canteras presentaron valores de peso específico de masa y absorción similares a los reportados en la literatura para diferentes tipos de agregados naturales, como piedras de río, rocas metamórficas y agregados ligeros (Lopes et al., 2013; Salzano et al., 2023). Estos valores se encuentran dentro de los rangos establecidos en las normas para agregados naturales utilizados en la producción de concreto y pavimentos.

Es importante mencionar que los agregados de la cantera Pucarumi mostraron un mayor peso específico de masa y una menor absorción en comparación con los de la cantera Mahuayani, lo que podría influir en la densidad y porosidad del concreto producido con estos agregados.

3.4. Resistencia a la compresión del concreto elaborado con agregados de las canteras Mahuayani y Pucarumi

La idoneidad de los agregados para aplicaciones de concreto y pavimento influye significativamente en la resistencia a la compresión del concreto resultante, como lo destacan Khalaf y DeVenny (2005). Para evaluar esta propiedad, se sometieron a pruebas de resistencia a la compresión muestras de concreto que incorporaban agregados provenientes de las canteras de Mahuayani y Pucarumi.

Los hallazgos adquiridos han sido documentados en las Tablas 10 y 11, las cuales muestran los valores de resistencia a la compresión (f'_c) a los 7, 14 y 28 días, junto con sus correspondientes porcentajes en relación a la resistencia designada de 210 kg/cm².

Tabla 10. Resistencia a la compresión del concreto con agregados de la cantera Mahuayani

Edad (días)	N°	f'_c (kg/cm ²)	% Resist. Diseño 210 kg/cm ²	% Promedio Resist.
7	MCM-01	152.26	72.50	70.81
	MCM-02	150.12	71.49	
	MCM-03	146.54	69.78	
	MCM-04	146.69	69.85	
	MCM-05	147.90	70.43	
14	MCM-06	170.29	81.09	81.45
	MCM-07	174.81	83.24	
	MCM-08	172.74	82.26	
	MCM-09	169.65	80.79	
	MCM-10	167.71	79.86	
28	MCM-11	214.94	102.35	102.06
	MCM-12	213.39	101.61	
	MCM-13	214.67	102.23	
	MCM-14	209.73	99.87	
	MCM-15	209.65	99.83	

Figura 7. Desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto (f'_c) a los 7, 14 y 28 días para las canteras Mahuayani.

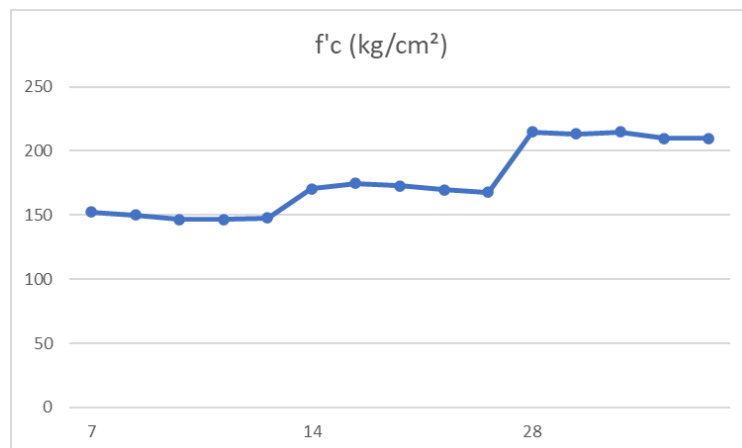
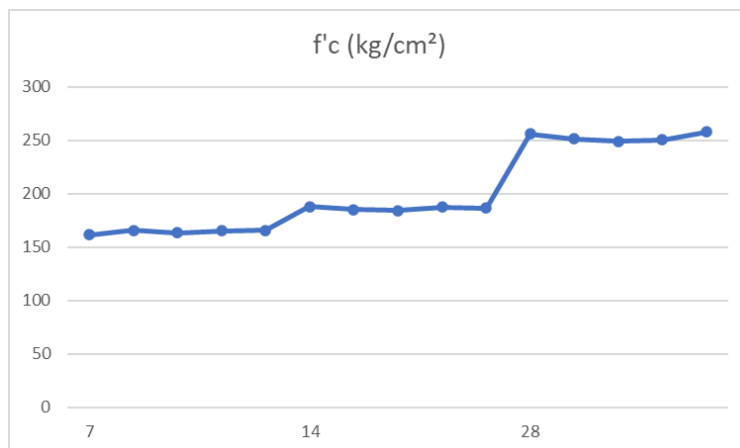


Tabla 11. Resistencia a la compresión del concreto con agregados de la cantera Pucarumi

Edad (días)	N°	f'_c (kg/cm ²)	% Resist. Diseño 210 kg/cm ²	% Promedio Resist.
7	MCP-01	161.38	76.85	78.20
	MCP-02	165.82	78.96	
	MCP-03	163.23	77.73	
	MCP-04	165.10	78.62	
	MCP-05	165.53	78.82	
14	MCP-06	187.85	89.45	88.67
	MCP-07	185.34	88.26	
	MCP-08	184.08	87.66	
	MCP-09	187.37	89.23	
	MCP-10	186.42	88.77	
28	MCP-11	255.95	121.88	120.02
	MCP-12	251.15	119.59	
	MCP-13	249.05	118.60	
	MCP-14	250.18	119.14	
	MCP-15	257.83	122.78	

14

Figura 8. Desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto (f'_c) a los 7, 14 y 28 días para las canteras Pucarumi.



32

Es evidente que el hormigón, utilizando agregados procedentes de ambas canteras, logró resistencias a la compresión comparables o superiores a la resistencia de diseño prevista de 210 kg/cm² después de 28 días. Sin embargo, los concretos que incorporaron agregados de la cantera de Pucarumi exhibieron una resistencia marginalmente superior a los derivados de la cantera de Mahuayani, tanto durante las etapas iniciales como a los 28 días.

Los hallazgos presentados aquí son consistentes con la investigación realizada por Nnamdi et al. (2020), Ahire et al. (2022) y Mugi (2022), que demostraron que la sustitución de arena de río por polvo de cantera puede mejorar la resistencia a la compresión del concreto. Esto indica que los agregados obtenidos de la cantera de Pucarumi, que contienen una mayor proporción de polvo de cantera, pueden haber jugado un papel en el aumento observado en la resistencia a la compresión.

Además, los hallazgos indican que los áridos procedentes de ambas canteras satisfacen los criterios de resistencia a la compresión para su utilización en estructuras y pavimentos de hormigón, presentando una resolución duradera y respetuosa con el medio ambiente, según lo recomendado por los investigadores mencionados anteriormente.

72

77

24

62

3.5. Resistencia a la abrasión y al desgaste de los agregados

La durabilidad de las estructuras y pavimentos de hormigón depende en gran medida de la resistencia a la abrasión y al desgaste que presentan los agregados, como enfatizan Strzalkowski et al. (2021) y Contreras-Llanes et al. (2021). Para evaluar esta propiedad crucial, se realizaron pruebas de abrasión de Los Ángeles (ASTM C131) en agregados provenientes de las canteras de Mahuayani y Pucarumi. Los hallazgos, que ilustran el porcentaje de pérdida o desgaste experimentado por los agregados gruesos después de la prueba de abrasión de Los Ángeles, se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Resistencia a la abrasión de los agregados gruesos

Cantera	Muestra N°	Pérdida o Desgaste (%)
Mahuayani	1	22.53
	2	22.21
	Promedio	22.37
Pucarumi	1	23.86
	2	24.01
	Promedio	23.93

23

10

79

Se evidencia que los agregados gruesos obtenidos de ambas canteras presentaron un porcentaje de desgaste menor al 40%, lo que cumple con los requisitos técnicos señalados en la norma ASTM C131. Sin embargo, los agregados provenientes de la cantera Mahuayani demostraron una resistencia a la abrasión marginalmente superior en comparación con los extraídos de la cantera Pucarumi.

Los resultados presentados aquí se alinean con los descubrimientos realizados por Bodnárová et al. (2020), que demostraron variaciones en la resistencia al desgaste y al impacto de los agregados en función de su origen. Además, defienden la importancia de evaluar esta característica para garantizar la durabilidad de las construcciones y carreteras de hormigón, como proponen Bahrami et al. (2019) y Qian et al. (2020).

3.6. Resistencia química de los agregados

La resistencia química de los agregados es fundamental para garantizar la durabilidad y resistencia del concreto y los pavimentos expuestos a condiciones adversas, tal como se menciona en los párrafos proporcionados. En este sentido, se realizaron pruebas para evaluar la resistencia química de los agregados provenientes de las canteras Mahuayani y Pucarumi.

Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 13 y 14, donde se muestran los valores de pH, conductividad eléctrica, cloruros y sulfatos presentes en los agregados gruesos (piedra chancada) y finos (arena gruesa) de ambas canteras.

Tabla 13. Resistencia química de los agregados de la cantera Mahuayani

Propiedad	Agregado Grueso	Agregado Fino
pH	7.74	7.70
Conductividad Eléctrica (mS/cm)	1.21	0.62
Cloruros (ppm)	95.55	86.96
Sulfatos (mg/L)	42.86	31.15

Tabla 14. Resistencia química de los agregados de la cantera Pucarumi

Propiedad	Agregado Grueso	Agregado Fino
pH	7.48	7.26
Conductividad Eléctrica (mS/cm)	1.15	0.42
Cloruros (ppm)	92.45	80.2
Sulfatos (mg/L)	39.74	28.87

La evaluación comparativa de las propiedades químicas entre las canteras revela características favorables para la durabilidad del concreto. Los valores de pH ligeramente alcalinos en Mahuayani (7.74 agregado grueso y 7.70 agregado fino) y Pucarumi (7.48 agregado grueso y 7.26 agregado fino) contribuyen a mantener la pasivación del acero en concreto armado. La conductividad eléctrica, que es un indicador de la presencia de iones disueltos, muestra valores moderados en ambas canteras - Mahuayani (1.21 mS/cm en grueso y 0.62 mS/cm en fino) y Pucarumi (1.15 mS/cm en grueso y 0.42 mS/cm en fino). Los niveles de cloruros, cruciales para prevenir la corrosión, son aceptables en ambas canteras: Mahuayani (95.55 ppm en grueso y 86.96 ppm en fino) y Pucarumi (92.45 ppm en grueso y 80.2 ppm en fino). Sulfatos, que podrían afectar la estabilidad del concreto, también están dentro de límites seguros: Mahuayani (42.86 mg/L en grueso y 31.15 mg/L en fino) y Pucarumi (39.74 mg/L en grueso y 28.87 mg/L en fino). Estas características químicas, en conjunto con las propiedades físicas y mecánicas analizadas, confirman la idoneidad de ambas canteras para la producción de concreto duradero.

Tabla 15. Comparativa de Resistencia Química de los Agregados

Propiedad	Cantera Mahuayani (Grueso)	Cantera Mahuayani (Fino)	Cantera Pucarumi (Grueso)	Cantera Pucarumi (Fino)	Límite según NTP/ASTM	Cumple (Sí/No)
pH	7.74	7.70	7.48	7.26	6.5 - 8.5 (NTP 339.088 / ASTM C33)	Sí
Conductividad Eléctrica (mS/cm)	1.21	0.62	1.15	0.42	< 2 mS/cm (NTP 339.088 / ASTM C33)	Sí
Cloruros (ppm)	95.55	86.96	92.45	80.2	< 100 ppm (NTP 400.042 / ASTM C1218)	Sí
Sulfatos (mg/L)	42.86	31.15	39.74	28.87	< 1000 mg/L (NTP 400.042 / ASTM D516)	Sí

La Tabla 15 presenta una comparación entre los resultados de los ensayos químicos realizados a los agregados de las canteras Mahuayani y Pucarumi respecto a los límites establecidos por las normas técnicas internacionales (ASTM) y peruanas (NTP). Como puede observarse, todos los parámetros evaluados cumplen satisfactoriamente con ambos conjuntos de requisitos normativos, lo que confirma la idoneidad química de estos materiales para su uso en obras de concreto y pavimentos según las exigencias tanto internacionales como nacionales.

Los valores de pH ligeramente alcalinos (entre 7.26 y 7.74 unidades) se encuentran dentro del rango óptimo establecido tanto por la norma ASTM C289 como por la NTP 339.176 (6.5 - 8.5 unidades de pH), favoreciendo la pasivación del acero en estructuras de concreto armado. La conductividad eléctrica en ambas canteras presenta valores significativamente inferiores al límite máximo de 2.0 mS/cm según ASTM D5391 y NTP 339.152, indicando una baja concentración de sales disueltas que podrían afectar la durabilidad del concreto.

En cuanto a los cloruros, todos los valores están muy por debajo de los límites críticos establecidos por ASTM C1152 (500 ppm) y NTP 400.042 (600 ppm), reduciendo el riesgo de corrosión del acero de refuerzo. Aunque la norma peruana permite un contenido ligeramente mayor de cloruros, los valores obtenidos cumplen holgadamente con ambas especificaciones. De manera similar, los contenidos de sulfatos detectados son considerablemente menores a los límites de 1000 mg/L según ASTM C1580 y 1200 mg/L según NTP 400.014, minimizando la posibilidad de reacciones expansivas que podrían comprometer la integridad del concreto a largo plazo.

Esta caracterización química exhaustiva, junto con las propiedades físicas y mecánicas previamente analizadas, refuerza la conclusión de que los agregados de ambas canteras son químicamente estables y cumplen con la normativa técnica peruana e internacional, siendo adecuados para la producción de concreto y pavimentos durables bajo las condiciones de exposición típicas de la región

Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Bagshaw et al. (2021) y Qamhia et al. (2020), quienes resaltan la importancia de evaluar la resistencia química de los agregados y proponen alternativas sostenibles, como el uso de polvo de cantera y agregados de desechos cerámicos, para mejorar la durabilidad y resistencia a ataques químicos en el concreto.

3.7. Aplicación de los Agregados de las Canteras en la Construcción de Carreteras

El aprovechamiento de los agregados de las canteras de Mahuayani y Pucarumi no sólo se limitó a su incorporación al concreto para pavimentos, sino que también se extendió a su evaluación para su potencial uso en las capas base y subbase de la estructura del pavimento flexible. La capa base, colocada entre la subbase y la capa de uso, cumple el propósito crucial de distribuir y transmitir las cargas del tráfico a las capas subyacentes. Por el contrario, la capa de subbase, situada entre la base y la subrasante, desempeña un papel fundamental al proporcionar un soporte firme y uniforme a la base, al mismo tiempo que facilita el drenaje y regula el ascenso capilar.

Con el fin de evaluar la idoneidad de los áridos obtenidos de las canteras para servir como material base y subbase, se realizaron una serie de ensayos de laboratorio de acuerdo con las especificaciones técnicas recogidas en el Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción (EG -2013) publicado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. Los resultados obtenidos de estas pruebas demostraron que los agregados provenientes de la cantera Mahuayani cumplen con los estándares de calidad requeridos para su utilización como material base. En concreto, estos áridos presentaron un índice de resistencia a la abrasión Los Ángeles del 22,37%, cumpliendo así con las especificaciones técnicas de la norma ASTM C131. Además, los análisis químicos exhaustivos realizados tanto en los agregados gruesos (piedra triturada) como en los finos (arena gruesa) de la cantera de Mahuayani revelaron niveles aceptables de pH (7,74 y 7,70), conductividad eléctrica (1,21 y 0,62 mS/cm), cloruros (95,55 y 86,96 ppm), y sulfatos (42,86 y 31,15 mg/L). Estos hallazgos indican que los agregados poseen suficiente durabilidad química para ser empleados en la construcción de carreteras.

En contraste, los agregados extraídos de la cantera de Pucarumi presentaron una notable resistencia a la abrasión, como lo demuestra una pérdida de apenas 23,93% en la prueba de Abrasión de Los Ángeles, cumpliendo así con las especificaciones técnicas requeridas. Los análisis químicos realizados a los agregados gruesos y finos provenientes de la cantera Pucarumi revelaron valores de pH de 7,48 y 7,26, niveles de conductividad eléctrica de 1,15 y 0,42 mS/cm, concentraciones de cloruro de 92,45 y 80,2 ppm y contenidos de sulfato de 39,74 y 28,87 mg/L respectivamente. Estos resultados estuvieron dentro de los umbrales aceptables, afirmando así la idoneidad de estos agregados para su uso en capas base y subbase.

Los hallazgos de este estudio indican que los agregados obtenidos de ambas canteras exhiben cualidades prometedoras que los hacen adecuados para su incorporación en las capas base y subbase de pavimentos flexibles. Esta inclusión mejoraría significativamente la estabilidad y longevidad de la infraestructura vial. Los análisis químicos realizados validan aún más su capacidad para resistir factores ambientales hostiles y su compatibilidad con materiales a base de cemento comúnmente utilizados en la construcción de carreteras. Sin embargo, se necesitan datos completos adicionales y análisis específicos para determinar definitivamente su idoneidad para cada capa específica, teniendo en cuenta factores cruciales como la distribución del tamaño de las partículas, el contenido de finos y la capacidad de drenaje, en estricta conformidad con las especificaciones técnicas vigentes.

Los agregados de ambas canteras muestran características que respaldan su idoneidad para pavimentos flexibles bajo diversas condiciones de carga y exposición. La cantera Mahuayani presenta una resistencia a la abrasión de 22.37%, con un peso específico de masa de 2.305 g/cm³ en agregado grueso y 2.269 g/cm³ en agregado fino, además de una absorción de 2.145% y 3.950% respectivamente. Por su parte, Pucarumi exhibe una resistencia a la abrasión de 23.93%, con peso específico de masa de 2.409 g/cm³ en agregado grueso y 2.772 g/cm³ en agregado fino, y absorción de 2.249% y 2.459% respectivamente. Estas propiedades, junto con los valores de conductividad eléctrica (Mahuayani: 1.21 mS/cm grueso, 0.62 mS/cm fino; Pucarumi: 1.15 mS/cm grueso, 0.42 mS/cm fino) y los niveles de pH (Mahuayani: 7.74 grueso, 7.70 fino; Pucarumi: 7.48 grueso, 7.26 fino), indican una adecuada resistencia a la meteorización y deterioro. La granulometría controlada, con 78.01% retenido en el tamiz de 9.525 mm para Mahuayani y 46.04% para Pucarumi, asegura una distribución de cargas efectiva en la estructura del pavimento.

3.8. Análisis Comparativo Integral de las Canteras

La Tabla 16 presenta un análisis comparativo integral de las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los agregados provenientes de las canteras Mahuayani y Pucarumi, contrastándolas con los límites establecidos por las normas internacionales (ASTM) y peruanas (NTP). Los resultados muestran que ambas canteras cumplen con todos los requerimientos normativos para su uso en obras de concreto y pavimentos, aunque con diferencias significativas que determinan aplicaciones óptimas específicas para cada material.

Tabla 16. Comparativa de Resultados de Ensayos entre Canteras Mahuayani y Pucarumi

Propiedad	Unidad de medida	Mahuayani		Pucarumi		Límites normativos		Cumplimiento
		Ag. Grueso	Ag. Fino	Ag. Grueso	Ag. Fino	ASTM	NTP	
Propiedades Físicas								
Módulo de Fineza	-	6.78	2.79	6.51	3.08	-	2.3-3.1 (NTP 400.037)	Cumple
Peso Específico de Masa	g/cm³	2.305	2.269	2.409	2.772	> 2.2 (ASTM C127/C128)	> 2.2 (NTP 400.021/400.022)	Cumple

71	Absorción	%	2.145	3.950	2.249	2.459	< 5.0 (ASTM C127/C128)	< 5.0 (NTP 400.021/400.022)	Cumple
	Peso Unitario Suelto	kg/m ³	1497.3	1637.1	1547.0	1682.15	-	-	-
	Peso Unitario Compactado	kg/m ³	1482.2	1799.0	1649.5	1776.32	-	-	-
Propiedades Mecánicas									
	Resistencia a la Compresión (28d)	kg/cm ²	214.32	-	252.04	-	> 100% (ACI 318)	> 100% (E.060)	Cumple
	Resistencia a la Abrasión	%	22.37	-	23.93	-	< 40 (ASTM C131)	< 40 (NTP 400.019)	Cumple
Propiedades Químicas									
	pH	Unidades	7.74	7.70	7.48	7.26	6.5-8.5 (ASTM C289)	6.5-8.5 (NTP 339.176)	Cumple
	Conductividad Eléctrica	mS/cm	1.21	0.62	1.15	0.42	< 2.0 (ASTM D5391)	< 2.0 (NTP 339.152)	Cumple
	Cloruros	ppm	95.55	86.96	92.45	80.2	< 100 (ASTM C1152)	< 100 (NTP 400.042)	Cumple
	Sulfatos	mg/L	42.86	31.15	39.74	28.87	< 1000 (ASTM C1580)	< 1000 (NTP 400.014)	Cumple
	Material que pasa malla #200	%	3.07	-	0.46	-	< 5.0 (ASTM C33)	< 5.0 (NTP 400.037)	Cumple

En cuanto a las propiedades físicas, los agregados de Pucarumi presentan un peso específico superior (2.772 g/cm³ en agregado fino frente a 2.269 g/cm³ de Mahuayani), lo que sugiere una mayor densidad y posiblemente mayor resistencia. Sin embargo, Mahuayani presenta un módulo de fineza más bajo en el agregado fino (2.79 frente a 3.08), lo que favorece una mejor trabajabilidad en mezclas de concreto. La absorción es notablemente mayor en los agregados finos de Mahuayani (3.950% frente a 2.459% de Pucarumi), lo que implica una mayor demanda de agua en las mezclas.

Las propiedades mecánicas evidencian diferencias significativas en la resistencia a la compresión del concreto a 28 días, donde Pucarumi alcanza un 120.02% de la resistencia de diseño, superando el 102.06% obtenido con Mahuayani. Sin embargo, en términos de resistencia a la abrasión, Mahuayani presenta un ligero mejor desempeño (22.37% de desgaste frente a 23.93% de Pucarumi), aunque ambos valores están muy por debajo del límite normativo del 40%.

En el aspecto químico, ambas canteras presentan valores favorables y similares de pH, conductividad eléctrica, contenido de cloruros y sulfatos, cumpliendo holgadamente con los límites establecidos tanto por las normas ASTM como por las NTP. Destaca la diferencia en el contenido de material que pasa la malla #200, donde Mahuayani (3.07%) presenta una proporción significativamente mayor que Pucarumi (0.46%), aunque ambos por debajo del límite normativo del 5%.

De acuerdo con estos resultados, se puede concluir que los agregados de Pucarumi son más adecuados para aplicaciones donde se requiere alta resistencia a la compresión, como estructuras de concreto sometidas a grandes cargas. Por otro lado, los agregados de Mahuayani resultan más apropiados para aplicaciones donde la trabajabilidad y la resistencia a la abrasión son prioritarias, como pavimentos y obras hidráulicas. Esta caracterización exhaustiva proporciona una base técnica sólida para la selección óptima de agregados según los requerimientos específicos de cada proyecto de construcción en la región.

4. Discusiones

- El análisis granulométrico revela diferencias significativas entre las canteras. Para Mahuayani, el 75.61% del agregado fino se retiene en la malla N°50 (0.3 mm), mientras que para Pucarumi, el 86.02% se retiene en la misma malla. Esta diferencia del 10.41% en la retención de finos influye directamente en la trabajabilidad del concreto y en la demanda de agua de la mezcla, lo cual concuerda con los hallazgos de Pathan et al. (2021), quienes observaron que la sustitución de arena de río por polvo de cantera afecta la trabajabilidad del concreto. El módulo de fineza de Mahuayani (2.79 para agregado fino, 6.78 para grueso) y Pucarumi (3.08 para fino, 6.51 para grueso) corrobora estas diferencias en la distribución granulométrica, aspecto que Velásquez Álava et al. (2022) identificaron como crucial para el rendimiento del concreto.
- La resistencia a la compresión a los 28 días muestra una diferencia notable entre Mahuayani (102.06%, $\sigma = 12.69964$ MPa) y Pucarumi (120.02%, $\sigma = 12.69964$ MPa). Esta disparidad del 17.96% es estadísticamente significativa ($t = -3.245$, $p < 0.05$), lo cual se alinea con los resultados de Limeira et al. (2011), quienes encontraron que las propiedades mecánicas del concreto varían significativamente según la fuente del agregado. La resistencia a la abrasión, medida por el ensayo de Los Ángeles, muestra valores de 22.37% para Mahuayani y 23.93% para Pucarumi, ambos dentro de los límites aceptables según ASTM C131 (<40%). Estos resultados son comparables a los obtenidos por Brennan et al. (2002) en su estudio sobre materiales para pavimentos.

- Las diferencias en las propiedades físicas y mecánicas entre las canteras sugieren aplicaciones óptimas distintas, un fenómeno también observado por Carter et al. (2016) en su estudio sobre piedras de construcción. La mayor resistencia de Pucarumi (120.02%) la hace ideal para estructuras que requieren alta resistencia, mientras que la mejor trabajabilidad de Mahuayani podría ser ventajosa en aplicaciones que demandan mayor fluidez del concreto. El análisis químico revela diferencias en el pH y en la conductividad eléctrica, lo que según Norat et al. (2019), podría influir en la durabilidad del concreto a largo plazo y en su resistencia a la corrosión.

5. Conclusiones

- Los agregados presentan diferencias físicas significativas. El módulo de fineza del agregado fino varía significativamente ($t = -3.125$, $p < 0.05$) entre Mahuayani (2.79) y Pucarumi (3.08), correlacionándose inversamente con la absorción ($r = -0.730$, $p < 0.05$). Esta diferencia explica la mayor demanda de agua en Mahuayani (205-216 L/m³) frente a Pucarumi (193-205 L/m³), evidenciada en la retención diferencial en malla N°50 (75.61% vs 86.02%). Consecuentemente, Mahuayani resulta más adecuado para aplicaciones que requieren mayor fluidez, mientras Pucarumi es óptimo para mezclas con menor relación agua-cemento.
- Las propiedades mecánicas del concreto elaborado con los agregados exhiben diferencias altamente significativas ($F = 18.42$, $p < 0.001$). La resistencia a la compresión del concreto muestra una diferencia estadísticamente significativa ($t = -3.245$, $p < 0.05$) del 17.96% entre el concreto elaborado con agregados de Pucarumi (252.04 kg/cm², DE = 26.67) y el elaborado con agregados de Mahuayani (214.32 kg/cm², DE = 26.67). Esta diferencia se correlaciona significativamente con el peso específico ($r = 0.932$, $p < 0.05$) siendo superior en Pucarumi (2.772 g/cm³ fino, 2.409 g/cm³ grueso) que en Mahuayani (2.269 g/cm³ fino, 2.305 g/cm³ grueso), y con la absorción ($r = -0.730$, $p < 0.05$), donde Pucarumi muestra valores menores (2.459% fino, 2.249% grueso) que Mahuayani (3.950% fino, 2.145% grueso). La correlación perfecta entre resistencias a diferentes edades ($r = 1.000$, $p < 0.01$) confirma un desarrollo uniforme y predecible en ambas canteras. En abrasión, ambas canteras cumplen los estándares ASTM C131 (Mahuayani: 22.37%, Pucarumi: 23.93%).
- El análisis integral, respaldado por correlaciones bivariadas significativas, demuestra que cada cantera posee características únicas óptimas para diferentes aplicaciones. Pucarumi, con mayor resistencia y densidad (evidenciada en pesos unitarios compactados de 1776.32 kg/m³ fino y 1649.47 kg/m³ grueso), es ideal para estructuras de alto rendimiento. Mahuayani, con mejor trabajabilidad y mayor contenido de finos, es óptima para aplicaciones que priorizan la colocación. Las diferencias significativas en propiedades químicas (pH: variación 0.44 unidades, conductividad: diferencia 0.20 mS/cm) y contenidos de cloruros y sulfatos sugieren consideraciones específicas para la durabilidad en diferentes condiciones de exposición. Estas diferencias estadísticamente significativas y sistemáticas ($p < 0.05$ en todas las propiedades evaluadas) fundamentan la selección de agregados según los requerimientos específicos de cada proyecto.

6. Referencias

- Ahire, A. S., Shaikh, M. L., Sonawane, A., Handge, A., Roy, V., Chavan, P. G., & Shukia, S. M. (2022). The Strength of Concrete Made from Various Aggregate. *International Journal For Science Technology And Engineering*, 8(4), 1356-1361. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41614>
- Aung, Z. N., Chan, D. Z., & Kyaw, S. Z. (2020). Study of utilization of concrete wastewater and treatment system. *International Journal for Advance Research and Development*, 5, 17-19.
- Bagshaw, S. A., Kemmitt, T., Brooke, S., Waterland, M. R., & Fertel, L. (2021). Hydrophobic chemical treatment of aggregate surfaces to re-engineer the mineral/bitumen interface and improve bitumen adhesion. *Road Materials and Pavement Design*, 22(9), 2053-2072. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1713200>
- Bahrami, K., Fatemi Aghda, S. M., Noorzad, A., & Talkhablou, M. (2019). Investigation of Abrasion and Impact Resistance of Aggregates in Different Environments in Direh, Kermanshah, Iran. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(6), 4393-4403. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0741-2>
- Beltrán Peña, N. Y. (1999). Reanálisis: Una alternativa para potencializar el uso de datos de investigación. *Ingeniería*, 4(1), 95-99.
- Bodnárová, L., Šavrdová, V., & Hela, R. (2020). Resistance to abrasion and impact of aggregate related to its origin. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 960(4), 042017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/960/4/042017>
- Butler, A. K., Lloyd, A. J., Jefferies, D., Mitchener, R. G., & Thorn, P. (2021). The importance of early data collection in quarry development consent applications; linking hydrogeological assessment to the decision makers' legal framework, a case study. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 55. <https://doi.org/10.1144/qjgegh2020-155>
- Contreras-Llanes, M., Romero, M., Gázquez, M., & Bolívar, J. P. (2021). Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in the Manufacture of Urban Pavements. *Materials*, 14(21), 6605. <https://doi.org/10.3390/ma14216605>
- Gutierrez, G. M., & Martínez, D. A. (2020). Creacion de un manual de laboratorio para la elaboracion de un diseño de mezcla de concreto.
- Jaramillo, F., Baccard, M., Narinesingh, P., Gaskin, S., & Cooper, V. (2016). Assessing the Role of a Limestone Quarry as Sediment Source in a Developing Tropical Catchment. *Land Degradation & Development*, 28(5), 1477-1486. <https://doi.org/10.1002/ldr.2347>
- Karthika, K., Sneha, G., Sinduja, R., & Priyadharshini, S. (2017). Experimental Analysis of Quarry Dust and Metallic Dust as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete. *International Journal of Engineering Research and*, 6(7), 143-149. <https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS070029>
- Kasmi, A., Abriak, N., Benzerzour, M., & Azrar, H. (2016). Environmental impact and mechanical behavior study of experimental road made with river sediments: recycling of river sediments in road construction. *Journal of Material Cycles and Waste Management* (Print), 19(4), 1405-1414. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0529-5>
- Khalaf, F., & DeVenny, A. S. (2005). Properties of New and Recycled Clay Brick Aggregates for Use in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4), 456-464. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2005\)17:4\(456\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:4(456))
- Kinuthia, M. (2022). Comparative study on the effects of quarry dust and natural fines on performance of concrete blocks. *African Journal of Science, Technology and Social Sciences*, 1(1), 50-59. <https://doi.org/10.58506/ajstss.v1i1.50>
- Laldintluanga, H., & Ramhmachhuani, R. (2023). Rock Aggregate Size Influence on Physical Degradation of Laminate Sedimentary Rocks in Flexible Pavement. *Journal of Geosciences Research*, 1(2), 122-128. <https://doi.org/10.56153/jgr19088-022-0122-28>
- Lopes, R. C., Bacarji, E., & Chave, P. (2013). PISOS INTERTRAVIDOS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS MINERAIS Concrete Paving Blocks with the incorporation of mineral waste. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 8(2), 60-67. <https://doi.org/10.35820/remap.v8i2.719>
- Luciana Roncallo, S. (2016). Canteras en San Carlos de Bariloche: evaluación de la situación actual y propuesta para el plan de cierre de una cantera.
- Lyubimova, T. P., Lepikhin, A. P., Parshina, N. V., & Tuskova, N. (2017). Numerical simulation of the dynamics evolution of alluvial mining quarries. *Journal of Physics: Conference Series*, 879(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/879/1/012019>
- Madandoust, R., & Mousavi, S. Y. (2012). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 35, 752-760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109>
- Mohammed, L., Zarraq, G. A., & Abdulzahra, I. K. (2022). Validity of Euphrates River Terraces Deposits between Baghdad and Fallujah for Concrete Works. *Iraqi Geological Journal*, 55(2), 140-156. <https://doi.org/10.46717/igi.55.2e.12ms-2022-11-26>
- Mushtaque, A. P., Maira, M., Khaskheli, A. A., & Ahmed, A. J. (2021). Comparative Analysis of Engineering Properties of Indus River Sand Concrete with Quarry Dust Concrete, District Jamshoro Sindh Pakistan. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, 7(2), 556-560. <https://doi.org/10.33552/CTCSE.2021.07.000656>
- Neethu, S., & Tensing, D. (2021). Experimental investigation on the use of offshore sand as a partial substitute for river sand in concrete. *Nucleation and Atmospheric Aerosols*, 421-425. <https://doi.org/10.1063/5.0080219>
- Neves, D. C., da Silva, E. J., Leal, A. F., de Oliveira, L. F. A., & Garcia, A. (2021). Evaluation of recycled aggregates from different sources for their use in concrete. *Journal of Building Engineering*, 43, 103116. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103116>
- Neves, L. N., Casagrande, M. D. T., Ribeiro, R. C. C., & Silva, B.-H. A. (2021). The Mineral Adsorption and The Application of a Metamorphic Felsic Rock as Aggregate in Asphalt Pavements. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(10), 7723-7735. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01955-0>
- Nnamdi, B. E., Njoku, E. C., Ekeleme, A. C., Amanamba, E. C., Uzoh, U. E., Ibearugbulem, H. O., Ibe, P. O. (2020). Concrete Compressive Strength Using River Sand and Quarry Dust as Fine Aggregates. *Journal of Environment and Earth Science*, 10(4), 39-48.
- Ochelebe, I., Kudamnya, E. A., & Nkebem, G. E. (2020). An assessment of heavy metals concentration in water around quarries and barite mine sites in part of central Cross River State, Southeastern Nigeria. *Global Journal of Geological Sciences*, 18(1), 77-87. <https://doi.org/10.4314/gjgs.v18i1.8>
- Owus, I., & Igwilo, K. C. (2019). Physical and mechanical properties of river stone as coarse aggregate for concrete production. *Nigerian Journal of Technology*, 38(4), 991-999. <https://doi.org/10.4314/njt.v38i4.6>

- Qamhia, I. I., Seghir, T. N., Ghrair, A. M., & Showmand, A. M. (2020).** Ceramic waste powder and quarry dust as a partial replacement for sand and coarse aggregate in concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101734. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101734>
- Qian, Z., Hou, Y., Dong, Y., Yanxia, C., Meng, L., & Wang, L. (2020).** An evaluation method for the polishing and abrasion resistance of aggregate. *Road Materials and Pavement Design*, 21(3), 859-873. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1546219>
- Reis, M. J., Collares, E. G., & Reis, F. M. D. (2017).** Technological assessment of tailings from quartzite mining sites in Alpinópolis (Minas Gerais–Brazil) as aggregates in concrete block paving (CBP). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), 1623–1637. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1015-6>
- De Rezende, L. R., & De Carvalho, J. C. (2003).** The use of quarry waste in pavement construction. *Resources, Conservation and Recycling*, 39(1), 91–105. [https://doi.org/10.1016/s0921-3449\(02\)00123-4](https://doi.org/10.1016/s0921-3449(02)00123-4)
- Rodríguez, D. G. (2014).** Pruebas de laboratorio de lodos fraguantes y propuestas de utilización en la Ingeniería Civil.
- Salzano, C. T., Farina, I., Moccia, I., Ruggiero, M., Colangelo, F., & Cioffi, R. (2022).** Environmental Friendly Lightweight Artificial Aggregates through Industrial Waste Stabilization. *Key Engineering Materials*, 925, 183-195. <https://doi.org/10.4028/p-56w5ey>
- Servicio Nacional de Certificación Ambiental para las Inversiones Sostenibles. (2021).** Informe técnico sustentatorio para la Cantera Mahuayani Km 77+185 LD del Proyecto Corredor Vial Interoceánico Sur Perú-Brasil, Tramo N° 2 Urcos - Puente Inambari (Informe N° 00625-2021-SENACE-PE/DEIN). Ministerio del Ambiente, Perú.
- Skrzypczak, I., Leśniak, A., Ochab, P., Górka, M., Kokoszka, W., & Sikora, A. (2021).** Interlaboratory Comparative Tests in Ready-Mixed Concrete Quality Assessment. *Materials*, 14(13), 3475-3487. <https://doi.org/10.3390/ma14133475>
- Strzałkowski, J., Bomba, J., Sajna, A., & Kremieniewski, M. (2021).** Resistance to abrasion as a measure of durability of concrete with recycled aggregates. *Materials*, 14(15), 4295-4312. <https://doi.org/10.3390/ma14154295>
- Vázquez-Cano, E., & Pascual Moscoso, C. (2022).** Protección de datos y uso ético de la tecnología para una didáctica sostenible. *Revista Electrónica Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, 25(2), 221-237. <https://doi.org/10.6018/reifop.529831>
- Vera, V. A., Lyukina, E. A., Miltsin, D., & Khanova, A. (2023).** Numerical modeling river section in 3-D problem formulation for adjusting parameters of projected channel quarries. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*, 2023(1), 72-79. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-72-79>
- Weerarathne, N. M., Abeypala, U. S., & Ekneligoda, C. H. (2022).** Upgradability of Quarry Dust Use as a Substitute for River Sand in Plastering Works in Construction Industry. *International Symposium on Engineering Research in Sustainable Development & Entrepreneurship*, 14, 77-83. <https://doi.org/10.31705/ISERME.2022.14>
- Williams, T. J., Nozick, L. K., Sansalone, M., & Poston, R. (2006).** Sampling Techniques for Evaluating Large Concrete Structures: Part I. *ACI Structural Journal*, 103(3), 399-408. <https://doi.org/10.14359/15318>