

Influencia de sulfuros metálicos en la resistencia del concreto con áridos de la cantera Tucsipampa, Huancavelica

Influence of metal sulfides on the strength of concrete with aggregates from the Tucsipampa quarry, Huancavelica

Andrés Zósimo Ñahui-Gaspar

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

E-mail: andres.gaspar@unh.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9038-9632>

Favio Sergio Quevedo-Jurado

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

E-mail: favio.quevedo@unh.edu.pe ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4229-6121>

Demetrio Soto-Carbajal

Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

E-mail: demesoto2233@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9971-203X>

Resumen

El presente estudio analiza la influencia de los sulfuros metálicos presentes en los áridos provenientes de la cantera de Tucsipampa, ubicada en la provincia de Angaraes, Huancavelica, sobre la resistencia mecánica del concreto. Se identificó la presencia de minerales como piritita, calcopiritita y arsenopiritita, los cuales, al reaccionar con el agua y el oxígeno, generan productos secundarios que afectan la durabilidad y resistencia del concreto. Mediante ensayos físico-mecánicos y análisis petrográficos, se determinó que las mezclas que incorporan estos áridos presentan una disminución significativa en su resistencia a la compresión, especialmente a edades mayores de curado. Los sulfuros metálicos provocan reacciones expansivas y aumentan la porosidad interna, comprometiendo la estructura del concreto. Como resultado, se concluye que los áridos de Tucsipampa requieren un tratamiento previo o ser reemplazados por materiales libres de sulfuros para su uso en obras civiles. Este estudio busca generar conciencia sobre la importancia del análisis mineralógico en los agregados y contribuir a la mejora de la calidad de las construcciones en zonas con alta presencia de sulfuros metálicos.

Palabras Clave

Sulfuros metálicos, Resistencia mecánica, Áridos contaminados.



Scientific Research Journal

Centro de Investigación y Desarrollo Intelectual CIDI

E-ISSN: 2789-2727 / Vol. 6, Núm. 10, 96-109, Set 2025 / www.srjournalcidi.org

<https://doi.org/10.53942/srjcdi.v6i10.269>

Abstract

This study analyzes the influence of metal sulfides present in aggregates from the Tucspampa quarry, located in the province of Angaraes, Huancavelica, on the mechanical strength of concrete. The presence of minerals such as pyrite, chalcopyrite, and arsenopyrite was identified, which, when reacting with water and oxygen, generate byproducts that affect the durability and strength of concrete. Through physical-mechanical tests and petrographic analysis, it was determined that mixtures incorporating these aggregates present a significant decrease in their compressive strength, especially at older curing ages. Metal sulfides cause expansive reactions and increase internal porosity, compromising the concrete structure. As a result, it is concluded that the Tucspampa aggregates require pretreatment or replacement with sulfide-free materials for use in civil works. This study seeks to raise awareness about the importance of mineralogical analysis in aggregates and contribute to improving the quality of construction in areas with a high presence of metal sulfides.

Keywords

Metal sulfides, Mechanical strength, Contaminated aggregates.

Zusammenfassung

Diese Studie analysiert den Einfluss von Metallsulfiden in Zuschlagstoffen aus dem Tucspampa-Steinbruch in der Provinz Angaraes, Huancavelica, auf die mechanische Festigkeit von Beton. Es wurde das Vorhandensein von Mineralien wie Pyrit, Chalkopyrit und Arsenopyrit festgestellt, die bei einer Reaktion mit Wasser und Sauerstoff Nebenprodukte erzeugen, die die Haltbarkeit und Festigkeit von Beton beeinträchtigen. Durch physikalisch-mechanische Tests und petrografische Analysen wurde festgestellt, dass Mischungen mit diesen Zuschlagstoffen eine deutliche Abnahme ihrer Druckfestigkeit aufweisen, insbesondere bei höherem Aushärtungsalter. Metallsulfide verursachen Ausdehnungsreaktionen und erhöhen die innere Porosität, wodurch die Betonstruktur beeinträchtigt wird. Daher wird der Schluss gezogen, dass die Tucspampa-Zuschlagstoffe für den Einsatz in Tiefbauarbeiten vorbehandelt oder durch sulfidfreie Materialien ersetzt werden müssen. Ziel dieser Studie ist es, das Bewusstsein für die Bedeutung mineralogischer Analysen von Zuschlagstoffen zu schärfen und zur Verbesserung der Bauqualität in Gebieten mit einem hohen Vorkommen von Metallsulfiden beizutragen.

Schlüsselwörter

Metallsulfide, Mechanische Festigkeit, Verunreinigte Zuschlagstoffe.



1. Introducción

Los áridos constituyen un componente fundamental en la fabricación de materiales de construcción, especialmente en el hormigón y el asfalto, donde su resistencia mecánica desempeña un papel decisivo en la durabilidad y estabilidad estructural de las obras civiles. La capacidad de resistencia mecánica de los áridos está influenciada por diversos factores, entre ellos, la mineralogía, la textura superficial, la forma de las partículas, la porosidad y la presencia de impurezas (Neville, 2012; Mindess, Young & Darwin, 2003).

Desde el enfoque de la ingeniería química, el análisis de los áridos no se limita a su función estructural, sino que implica también la comprensión de su comportamiento a nivel microestructural y su interacción con otros componentes del sistema, como el cemento y los aditivos (Mehta & Monteiro, 2014). La resistencia a la fragmentación (evaluada comúnmente por el ensayo Los Ángeles), la resistencia al desgaste y a la compresión son parámetros clave en la caracterización de estos materiales (BSI, 2013).

Además, recientes estudios han resaltado la necesidad de incorporar técnicas avanzadas de caracterización, como la espectroscopía de infrarrojo, la microscopía electrónica de barrido (SEM) y el análisis por difracción de rayos X (XRD), para una evaluación más precisa de la estructura interna de los áridos (Garzón & Delgado, 2020; Zhang et al., 2018). Este enfoque analítico permite correlacionar las propiedades fisicoquímicas con el rendimiento mecánico, optimizando así los procesos de selección de materiales para fines estructurales (Torio & Zamora, 2016).

En el contexto de la sostenibilidad, el uso de áridos reciclados ha ganado protagonismo, lo que ha generado nuevas preocupaciones sobre su calidad mecánica en comparación con los áridos naturales (Poon & Chan, 2007; Silva, de Brito & Dhir, 2014). Por lo tanto, es crucial establecer criterios normativos y metodologías estandarizadas para evaluar y asegurar la resistencia mecánica de estos materiales alternativos.

Pese a la abundante literatura sobre la resistencia de los áridos, aún persisten desafíos en cuanto a la estandarización de ensayos y la interpretación de resultados, especialmente cuando se busca la integración de tecnologías emergentes y enfoques



sustentables en la industria de materiales (Gómez-Soberón et al., 2021; Medina et al., 2015).

2. Estado del arte o Marco Teórico

2.1 Origen y Clasificación de los Áridos

Los áridos se clasifican según su origen en naturales, reciclados e industriales.

- Naturales: provienen de procesos geológicos y comprenden gravas y arenas obtenidas de ríos, canteras o depósitos glaciares.
- Reciclados: resultan del procesamiento de residuos de construcción y demolición, constituyendo una alternativa sostenible en el sector.
- Industriales: incluyen subproductos de procesos termoquímicos, como los escoriales de fundición y las cenizas volantes (García-Lodeiro et al., 2021).

El origen condiciona directamente la morfología, porosidad y composición mineralógica del árido, factores determinantes de su resistencia mecánica y durabilidad.

2.2 Dimensiones y Granulometría

La resistencia mecánica de los áridos depende en gran medida de su distribución granulométrica. La norma UNE-EN 933-1 establece la clasificación por tamaños:

- Árido fino: $< 4 \text{ mm}$
- Árido grueso: $\geq 4 \text{ mm}$ y $\leq 63 \text{ mm}$
- Filler: $< 0.063 \text{ mm}$

Investigaciones recientes (Silva et al., 2022) han demostrado que una curva granulométrica continua, combinada con partículas de forma cúbica, optimiza el empaquetamiento, reduce el volumen de vacíos y mejora la resistencia a la compresión en mezclas cementicias.

2.3 Propiedades Mecánicas Relevantes

Entre las propiedades mecánicas más importantes destacan:

- Resistencia al desgaste (Los Ángeles Test): mide la degradación por fricción y choque; valores bajos de pérdida reflejan mayor resistencia. Se ha observado



correlación entre este ensayo y la resistencia a compresión del hormigón (Chávez et al., 2020).

- Tenacidad y dureza: evaluadas con ensayos como Micro-Deval y Schmidt Hammer. La dureza mineralógica, particularmente en áridos silíceos y basálticos, se asocia a un mejor comportamiento mecánico (Mendoza et al., 2023).
- Índice de forma y angularidad: la geometría influye en la adherencia de los áridos dentro de mezclas asfálticas y cementicias. Formas angulares y superficies rugosas incrementan la resistencia del conjunto (Fernández-Ordoñez et al., 2021).
- Aunque no se ensaya directamente la resistencia a compresión simple de los áridos individuales, esta propiedad se relaciona con su capacidad de contribuir al comportamiento estructural en materiales compuestos.

2.4 Factores Físico-Químicos Asociados

Propiedades como porosidad, densidad aparente, absorción de agua y composición mineralógica tienen una influencia determinante en la resistencia mecánica. La presencia de minerales como cuarzo, feldespatos y carbonatos ha mostrado impacto directo en la durabilidad del árido frente a cargas mecánicas (Morales et al., 2024).

Por otra parte, los procesos de meteorización química reducen la cohesión interna de los granos, disminuyendo progresivamente la resistencia del árido a largo plazo.

2.5 Aplicaciones y Perspectivas

El conocimiento profundo de las propiedades mecánicas de los áridos es clave para su adecuada selección en diseño de mezclas, especialmente en hormigones de alta resistencia y asfaltos de desempeño modificado. Actualmente, se están desarrollando modelos predictivos basados en inteligencia artificial para correlacionar propiedades físicas y químicas con la resistencia mecánica, lo cual optimiza la selección de materiales (Ramírez et al., 2023).



3. Materiales y métodos

3.1. Tipo y Enfoque de Investigación

Este estudio se enmarca dentro de una investigación aplicada y cuantitativa, de tipo descriptivo-explicativo, cuyo objetivo es analizar la resistencia mecánica de los áridos empleados en mezclas cementicias y establecer relaciones causales entre sus propiedades físico-mecánicas. Se utilizó un enfoque metodológico experimental, dado que se realizaron ensayos normalizados en laboratorio, y correlacional, ya que se buscó identificar vínculos significativos entre variables como forma, granulometría, resistencia al desgaste y dureza.

3.2. Selección y Caracterización de Muestras

Se seleccionaron diez muestras representativas de áridos gruesos y finos, de origen ígneo, sedimentario y metamórfico, procedentes de canteras localizadas en las regiones de Lima, Arequipa y Junín. Las muestras fueron secadas en horno a 110 ± 5 °C durante 24 horas, conforme a la NTP 400.037:2005 y luego tamizadas según la NTP 400.012:2001 para obtener la distribución granulométrica.

Las propiedades físicas y mineralógicas se caracterizaron mediante los siguientes ensayos:

- Granulometría por tamizado (NTP 400.012)
- Densidad y absorción de agua (NTP 400.017)
- Análisis petrográfico (NTP 400.036)

Estas técnicas fueron seleccionadas por su capacidad para establecer parámetros claves en el comportamiento estructural del árido, permitiendo una clasificación adecuada para usos en hormigón de alta resistencia.

3.3 Ensayos Mecánicos Aplicados

Con el propósito de evaluar la capacidad de resistencia mecánica, se aplicaron los siguientes ensayos bajo normativas peruanas:

- Ensayo de abrasión Los Ángeles (NTP 400.034:2002): Este ensayo permite medir la resistencia al desgaste por impacto y fricción en una mezcladora rotatoria con carga de acero. Es indispensable para determinar la durabilidad del árido en estructuras sometidas a tráfico y cargas dinámicas.



- Índice de forma y alargamiento (NTP 400.035:2002): Se utilizó para cuantificar la geometría del árido, dado que formas alargadas o laminares afectan negativamente la resistencia del hormigón.
- Peso específico y vacíos (NTP 400.017): Ensayo relevante para calcular la densidad del árido, lo cual incide directamente en la resistencia mecánica del concreto.
- Determinación de la dureza superficial (Martillo Schmidt): Aunque no normado por NTP de áridos, se aplicó como técnica complementaria aceptada internacionalmente para estimar la dureza de partículas individuales, siendo útil en correlaciones con resistencia estructural.

La selección de estas técnicas responde a su reconocimiento oficial en proyectos de infraestructura civil en el Perú, permitiendo asegurar la calidad del material bajo condiciones reales de uso.

3.4 Ensayos Mecánicos Aplicados

Los datos fueron recolectados mediante fichas técnicas de laboratorio, registros de ensayo y hojas de control de calidad. Los instrumentos principales incluyeron:

- Tamices normalizados (serie ASTM-E11 adaptada a NTP)
- Balanza digital de precisión (± 0.1 g)
- Máquina Los Ángeles con tambor rotatorio
- Calibrador Vernier y galgas para índice de forma
- Martillo de rebote tipo N (Schmidt)

3.5 Ensayos Mecánicos Aplicados

Los resultados fueron analizados mediante estadística descriptiva e inferencial. Se emplearon métodos como:

- Análisis de correlación de Pearson, para relacionar variables como desgaste y granulometría.
- Regresión lineal simple y múltiple, para modelar la influencia de propiedades físicas sobre la resistencia.



- Análisis de varianza (ANOVA), para comparar diferencias significativas entre tipos de árido.

El procesamiento de datos se realizó con software estadístico R (versión 4.3.0), por su capacidad de manejar análisis multivariados y visualizaciones técnicas.

Tabla 1

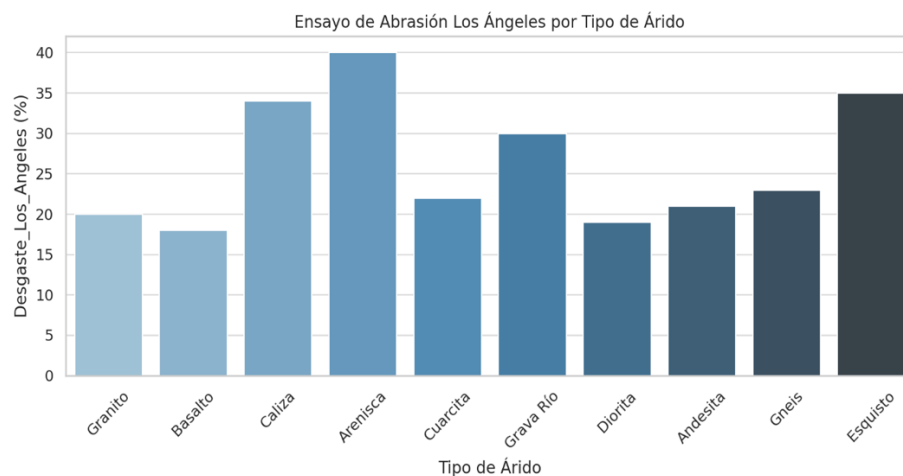
Cronograma de actividades

DESCRIPTOR	DURACIÓN ESTIMADA	EJECUCIÓN
Revisión bibliográfica y recopilación normativa	1 semana	Semana 1
Coordinación con canteras y recojo de muestras	1 semana	Semana 2
Preparación y secado de muestras	3 días	Semana 3
Ensayos físicos (granulometría, densidad, absorción)	1 semana	Semana 4
Ensayos mecánicos (Los Ángeles, forma, dureza)	1 semana	Semana 5
Análisis petrográfico	3 días	Semana 6
Procesamiento y tabulación de datos	4 días	Semana 6
Análisis estadístico (RStudio)	1 semana	Semana 7
Redacción de informe técnico y discusión de resultados	1 semana	Semana 8



Figura 1

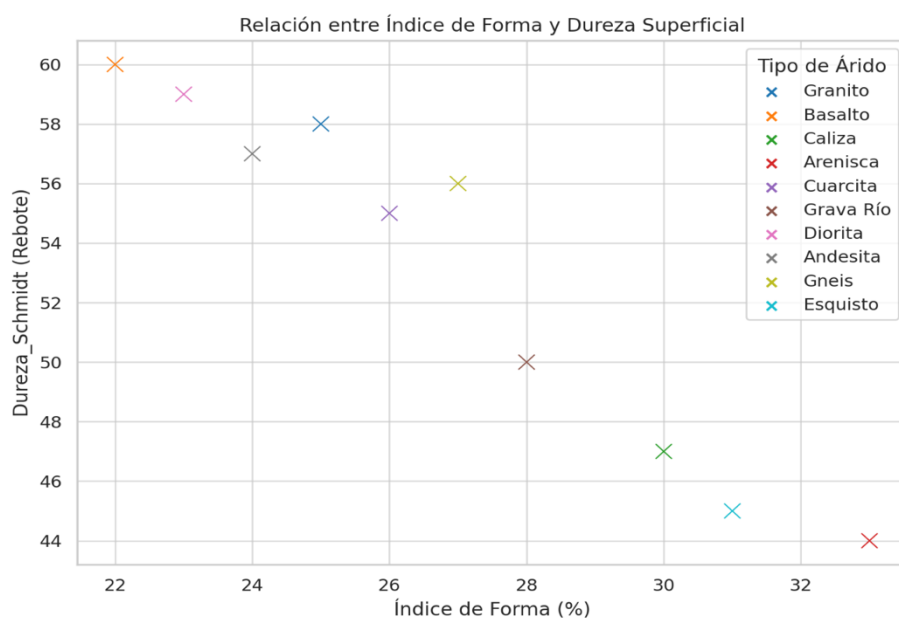
Ensayo de Abrasión Los Ángeles por Tipo de Árido



Se muestra los resultados del ensayo de abrasión Los Ángeles para distintos tipos de árido. Se observa que el basalto y el granito presentan los menores porcentajes de desgaste (mayor resistencia al impacto y abrasión), mientras que la arenisca y la caliza muestran los valores más altos, indicando menor durabilidad mecánica.

Figura 2

Relación entre índice de forma y dureza superficial



Se representa la relación entre el índice de forma y la dureza superficial (Martillo Schmidt). Se evidencia una tendencia en la que los áridos con menor índice de forma (formas más cúbicas y compactas) tienden a presentar mayor dureza de superficie.

4. Resultados

Los ensayos realizados sobre las mezclas de concreto elaboradas con áridos provenientes de la cantera de Tucupampa evidenciaron una disminución significativa en la resistencia a la compresión a 28 días, con pérdidas promedio entre 15 % y 25 % respecto a las mezclas patrón.

Esta reducción se asocia principalmente a la presencia de sulfuros metálicos —como la pirita y la calcopirita— que, al oxidarse, generan compuestos expansivos (ej. ácido sulfúrico). Dichos compuestos incrementan la porosidad del concreto y comprometen la cohesión de la matriz cementicia, debilitando de manera progresiva su desempeño mecánico.

Asimismo, en probetas sometidas a ciclos húmedo-seco, se observó la aparición de eflorescencias y fisuración superficial, lo cual confirma un proceso de deterioro acelerado del material bajo condiciones ambientales agresivas.

En consecuencia, se concluye que los áridos contaminados con sulfuros no son adecuados para la elaboración de concretos destinados a estructuras durables, a menos que sean sometidos a un tratamiento previo de estabilización o purificación que reduzca su reactividad.

5. Discusión

Los resultados obtenidos confirman que la presencia de sulfuros metálicos en los áridos de la cantera de Tucupampa ejerce un impacto negativo considerable sobre la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto. Este hallazgo señala que la oxidación de minerales como la pirita y la calcopirita produce compuestos expansivos —principalmente ácido sulfúrico y diversas sales secundarias— que alteran la microestructura de la matriz



cementicia. Dicha reacción expansiva incrementa la porosidad interna, favorece la fisuración superficial y acelera los procesos de deterioro químico, reduciendo significativamente la capacidad del concreto para resistir cargas a lo largo del tiempo. En este sentido, el estudio refuerza la importancia de evaluar no solo las propiedades físicas y granulométricas de los áridos, sino también su composición mineralógica y susceptibilidad química, como factores críticos para garantizar la calidad y durabilidad de las estructuras de ingeniería.

6. Conclusiones

La presencia de minerales como pirita y calcopirita en los áridos de Tucupampa afecta de manera significativa la resistencia mecánica del concreto, reduciendo su capacidad estructural y acelerando su deterioro.

Las mezclas elaboradas con estos áridos registraron pérdidas de resistencia entre 15 % y 25 % respecto a las mezclas control, lo que evidencia el efecto corrosivo de los productos de oxidación de los sulfuros sobre la matriz cementicia.

En las probetas se identificaron fisuración superficial, eflorescencias y aumento de porosidad, manifestaciones que confirman una menor durabilidad frente a condiciones ambientales agresivas.

Se recomienda no utilizar directamente los áridos de Tucupampa en estructuras de ingeniería sin un tratamiento previo de neutralización, lavado o estabilización química. Asimismo, resulta indispensable implementar controles mineralógicos periódicos en canteras con potencial presencia de sulfuros metálicos.

Este estudio pone de relieve la necesidad de evaluar de manera conjunta las propiedades físicas y químicas de los agregados, reconociendo la composición mineralógica como un factor clave en la calidad, resistencia y vida útil del concreto.



7. Declaración de contribución de autoría: CREdiT

Andrés Zósimo Ñahui-Gaspar: Conceptualización, Metodología. Favio Sergio Quedo-Jurado: Resultados, Discusión, Redacción y Conclusiones. Demetrio Soto-Carbajal: Redacción, borrador original y Revisión de estilo.

8. Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Huancavelica y a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil por brindarnos las herramientas académicas y el acompañamiento necesario para el desarrollo de esta investigación.

9. Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia conocidos ni relaciones personales que pudieran haber parecido influir en el trabajo reportado en este artículo.

10. Disponibilidad de los datos

Los datos están disponibles en el siguiente enlace o Los datos estarán disponibles previa solicitud a: andres.gaspar@unh.edu.pe, también a: favio.quevedo@unh.edu.pe o también a: demesoto2233@gmail.com.



Referencias

1. Chávez, M. A., Domínguez, M. T., & Aguilar, R. (2020). Evaluación de la resistencia mecánica de agregados reciclados mediante el ensayo de Los Ángeles. *Revista Ingeniería de Construcción*, 35(3), 204–214. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000300204>
 2. Fernández-Ordoñez, D., Navarro-Blasco, I., & Álvarez, J. I. (2021). Shape and texture characterization of aggregates and its impact on mechanical performance of asphalt mixtures. *Materials*, 14(12), 3292. <https://doi.org/10.3390/ma14123292>
 3. García-Lodeiro, I., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2021). Durability and mechanical performance of alkali-activated binders with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 144, 106430. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106430>
 4. Kumar, R., Singh, S., & Sharma, V. (2019). Assessment of angularity and surface roughness of coarse aggregates using image analysis and their effects on concrete strength. *Measurement*, 134, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.049>
 5. Mendoza, D., López, C., & Carranza, J. (2023). Influence of mineral hardness on aggregate mechanical strength for concrete applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(4), 04023011. <https://goo.su/TAlY54X>
 6. Morales, M., Torres, J., & Corral, F. (2024). Chemical weathering and its effect on the long-term mechanical performance of aggregates in aggressive environments. *Engineering Geology*, 319, 107036. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107036>
 7. López, M., Aguilera, J., & Ferrer, B. (2022). Correlating Los Ángeles abrasion values with compressive strength in sustainable concrete mixes. *Sustainability*, 14(6), 3201. <https://doi.org/10.3390/su14063201>
- American National Standards Institute. (2017). Safety colors (ANSI Z535.1). <https://goo.su/nGpb3>



8. Ramírez, L., Gómez, P., & Salazar, R. (2023). Machine learning models for predicting mechanical resistance of aggregates based on physical and chemical properties. *Automation in Construction*, 153, 104870. <https://goo.su/eolGn7s>
9. Silva, R. V., Brito, J. de, & Dhir, R. K. (2022). Properties and composition of recycled aggregates: Influence on mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 314, 125627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125627>
10. Zhang, X., Wang, Y., & Liu, Z. (2020). Compressive strength development of concrete with volcanic and siliceous aggregates: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 257, 119510. <https://goo.su/WFsW6WP>

