



UCSC

Facultad de
Ingeniería

Universidad Católica de la Santísima Concepción

OBRAS Y PROYECTOS

REVISTA DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN



Fabricación y evaluación de bloques prensados a partir de papel reciclado para aislamiento termoacústico

Manufacture and evaluation of pressed blocks made from recycled paper for thermoacoustic insulation

A. Nazer, R. Olivares, L. Cortés y S. Rivera

Nonlinear dynamic seismic analysis of a six-story building with hysteretic dampers using openseespy

Análisis sísmico dinámico no lineal de una edificación de seis niveles con disipadores histeréticos mediante openseespy

L. Musaja, R. Coaquira, W. Mendoza y A. Mendoza

Economía circular en contratos de la dirección de vialidad: aplicación a la demolición del puente Santa Isabel en la región de Ñuble

Circular economy in Highway Directorate contracts: application to the demolition of the Santa Isabel Bridge in the Ñuble Region

J. Díaz y M. Márquez

Impacto de la energía de activación en la estimación de la resistencia a la compresión de hormigones masivo

Impact of activation energy on the estimation of compressive strength of mass concrete

R. Guerra, C. Vargas y P. Rojas

Relaves de flotación de escoria de cobre como árido fino en morteros de cemento

Copper slag flotation tailings as fine aggregate in cement mortars

E. Olave y A. Nazer

Guía para publicar en Obras y Proyectos

1. Los artículos enviados deben ser originales y no haber sido publicados antes ni estar en proceso de revisión por otra publicación. Una vez que el artículo es recibido conforme a los puntos detallados más abajo, éste será enviado a revisores externos, expertos en los temas específicos que trata el artículo. Los autores tienen la responsabilidad de reconocer y declarar cualquier conflicto de intereses que pudiera sesgar su trabajo, por ejemplo, indicando fuentes de financiamiento y apoyo.
2. El artículo deberá tener una extensión máxima de 8000 palabras. No se exige un formato específico, pero se sugiere usar tamaño de letra 12, tipo de letra Times New Roman y espaciado doble. Se pide claridad tanto en lo escrito, o sea, buena redacción con una secuencia lógica de lo que se presenta, como en las figuras, gráficos, tablas y fotos.
3. Los artículos deberán tener en su primera página el título, el nombre y apellido del o los autores, además de la afiliación, dirección postal y electrónica de todos los autores. El título debe estar en castellano y en inglés.
4. El resumen o abstract no debe exceder las 250 palabras y debe apuntar a los aspectos claves del artículo y dar una síntesis de las aplicaciones y conclusiones más importantes que el artículo entrega. El abstract debe ser una traducción correcta del resumen al inglés. Se deben incluir palabras claves tanto en castellano como en inglés.
5. Las referencias deben estar completas y correctas. Las referencias citadas en el texto, figuras y tablas deben estar incluidas en las referencias al final del artículo y viceversa. En el texto, figuras y tablas, las referencias deben citarse como Martínez (2008) o (Goodell y Warren, 2006). Para más de dos autores deben indicarse como (Van Abeelen *et al.*, 2008). Al autor de un mismo año deben diferenciarse usando 2010a, 2010b, etc. El estilo de las referencias debe seguir los esquemas siguientes:

Moffat, R., Correia, N. and Pastén, C. (2016). Comparison of mean shear wave velocity of the top 30 m using downhole, MASW and bender elements methods. *Obras y Proyectos* **20**, 6-15

Escribano, D.E. and Nash, D.F.T. (2015). Changing anisotropy of G_0 in Hostun sand during drained monotonic and cyclic loading. *Soils and Foundations* **55**(5), 974-984

Kausel, E. (2017). *Advanced structural dynamics*. Cambridge University Press, UK

6. Las tablas y fórmulas (ecuaciones) deberán ser numeradas secuencialmente en el mismo orden en que aparecen en el texto, con números arábigos y haciendo referencia a ellas como: Tabla 1, Tabla 2; (1), (2)...etc. para fórmulas, según corresponda. En el caso de las tablas, ellas no deben duplicar los resultados presentados en gráficos y el título debe colocarse en la parte superior. El sistema de unidades a emplear será el Sistema Internacional (SI).
7. Las figuras pueden incluir gráficos, esquemas y diagramas. Las figuras deben enviarse en una condición lista para su publicación, con calidad de impresión láser. Si son fotografías, deben ser de alta calidad. Deben numerarse en forma secuencial: Figura 1, Figura 2 o Foto 1, Foto 2, etc. y su título deberá colocarse en la parte inferior. Las figuras deberán ser mencionadas dentro del texto antes de que aparezcan.
8. Las opiniones vertidas en los artículos publicados en Obras y Proyectos son de exclusiva responsabilidad del autor o los autores de los mismos y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, UCSC.
9. El envío de un artículo a la revista Obras y Proyectos implica que los autores aceptan transferir el derecho de autor de sus artículos a la UCSC siempre y cuando el artículo sea aceptado para publicación. El derecho de autor cubre los derechos exclusivos para la reproducción y distribución del artículo, incluyendo re-impresiones, reproducciones fotográficas, microfilms, escaneo de documentos o cualquier reproducción de naturaleza similar así como traducciones. Permisos para usar figuras que no son de propiedad de los autores deben ser obtenidos por el autor en forma previa al envío del artículo.

Obras y Proyectos

Revista de Ingeniería Civil

Edición 39, Primavera 2026

Revista Obras y Proyectos

Universidad Católica de la Santísima Concepción

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil

Alonso de Ribera 2850, Campus San Andrés

Casilla 297, 4090541 Concepción, Chile

Editor

Dra. María Teresa Bull Torres

Universidad Católica de la Santísima Concepción

Comité editorial

Dr. Diego Caamaño Avendaño

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción

Dr. Eduardo Núñez Castellanos

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción

Dra. María Teresa Bull Torres

Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Católica de la Santísima Concepción

Dra. Catterina Sobenes Vannekoool

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción

Dr. José Miguel Montenegro Cooper Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción

Comité Editorial Internacional

Alejandro Martínez, Ph.D., Professor, Civil and Environmental Engineering University of California Davis, 3103 Ghausi Hall, USA

Ángel Monsalve, Ph.D., Assistant Professor, College of Engineering Civil and Environmental Engineering Center for Ecohydraulics Research 875 Perimeter Drive MS 1022 | Moscow Idaho 83844-1022, USA

Shirley Merchán De las Salas, Programa de Maestría de Salud Pública, Facultad de Ciencias de la Salud y del Deporte Fundación Universitaria del Área Andina Av. Caracas No. 69 - 55, Bogotá, Colombia

Rafael Ruiz, Ph.D., Assistant Professor, College of Engineering and Computer Science - Mechanical Engineering Dearborn, University of Michigan, 500 S. State Street Ann Arbor, MI 48109, USA

Dr. Francisco Sanz, Catedrático de Universidad, Institute for Research in Sustainable Forest Management Center: Higher Technical School of Agricultural Engineering, Universidad de Valladolid, Avenida de Madrid, 57, 34004. Spain.

Diseño y diagramación

Verónica Cornejo - VCR Publicidad

vcornejo@gmail.com

56 9 88823187

Contacto y envío de artículos

oyp@ucsc.cl

www.obrasyproyectos.org

Periodicidad: semestral (edición de Otoño y Primavera)

Revista indexada y catalogada en  www.sciendo.conicyt.cl

 www.latindex.org  www.dialnet.unirioja.es

 webofscience.com

Definición de la Revista

Obras y Proyectos es una revista de Ingeniería Civil cuya misión es divulgar, promover e incentivar la investigación, aportando al intercambio del conocimiento entre los profesionales del área de la Ingeniería Civil. Para ello se consideran trabajos originales de carácter científico, además de notas técnicas principalmente orientadas a exponer y discutir relevantes obras y proyectos. También se presentan trabajos técnicos que expongan innovaciones y aplicaciones utilizadas principalmente por empresas y consultoras relacionadas con la Ingeniería Civil. De esta manera se desarrollan los temas clásicos de la Ingeniería Civil, como son: Estructuras, Hidráulica, Geotecnia, Transporte y Construcción. Además otros temas relacionados y aplicados a la Ingeniería Civil son considerados, tales como Energía, Ambiente, Geología, Minería, Informática y Tecnología. De esta forma Obras y Proyectos busca la participación de un grupo amplio que abarca desde el mundo universitario, organismos públicos y el mundo empresarial.

Revisión de artículos por pares evaluadores externos

Al recibir un artículo el editor junto con miembros del comité asesor comprueban que el artículo corresponda o esté relacionado con Ingeniería Civil. Además se verifica que el artículo esté bien escrito, que no haya sido publicado anteriormente y que constituye un aporte a la Ingeniería Civil. De no ser así el artículo es devuelto. Luego, si el artículo es aceptado para su revisión, el editor envía el artículo a al menos dos especialistas en el tema que cubre el artículo. Los especialistas son evaluadores externos al Departamento de Ingeniería Civil de la UCSC y no son miembros del comité editorial. A partir de las observaciones de los evaluadores externos, el artículo puede ser aceptado, aceptado con observaciones o rechazado. En el segundo caso se pide la incorporación de cambios que satisfagan los requerimientos planteados por los revisores externos. En cualquiera de los tres casos se informa al o los autores del resultado de la revisión y de los cambios a realizar. Los autores no saben quienes revisaron sus artículos y no hay contacto entre autores y revisores. Antes de editar la revista el comité editorial la revisa en una versión en línea. Finalmente, una vez revisada y aprobada por el editor, la versión final de la revista es publicada.

Contenidos



- 4** Fabricación y evaluación de bloques prensados a partir de papel reciclado para aislamiento termoacústico
Manufacture and evaluation of pressed blocks made from recycled paper for thermoacoustic insulation
A. Nazer, R. Olivares, L. Cortés, S. Rivera
- 16** Nonlinear dynamic seismic analysis of a six-story building with hysteretic dampers using openseespy
Análisis sísmico dinámico no lineal de una edificación de seis niveles con disipadores histeréticos mediante openseespy
L. Musaja, R. Coaquira, W. Mendoza, A. Mendoza
- 26** Economía circular en contratos de la dirección de vialidad: aplicación a la demolición del puente Santa Isabel en la región de Ñuble
Circular economy in Highway Directorate contracts: application to the demolition of the Santa Isabel Bridge in the Ñuble Region
J. Díaz y M. Márquez
- 35** Impacto de la energía de activación en la estimación de la resistencia a la compresión de hormigones masivo
Impact of activation energy on the estimation of compressive strength of mass concrete
R. Guerra, C. Vargas y P. Rojas
- 56** Relaves de flotación de escoria de cobre como árido fino en morteros de cemento
Copper slag flotation tailings as fine aggregate in cement mortars
E. Olave y A. Nazer



Fabricación y evaluación de bloques prensados a partir de papel reciclado para aislamiento termoacústico

Manufacture and evaluation of pressed blocks made from recycled paper for thermoacoustic insulation

Amin Nazer¹, Rodrigo Olivares¹, Lucas Cortés¹, Sebastián Rivera¹

¹ Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería en Construcción, Chile

amin.nazerv@userena.cl, rolivares@userena.cl, lucas.cortesp@userena.cl, sebastian.riverar@userena.cl

Este estudio desarrolla un proceso para fabricar bloques prensados sin aglutinantes a partir de papel reciclado de oficinas, evaluando preliminarmente sus propiedades termoacústicas, mecánicas y de resistencia al fuego. Utilizando papel se obtuvo pulpa mediante hidratación, trituración y prensado hidráulico, seguida de secado controlado.

Los bloques mostraron una densidad promedio de 300 kg/m³, transmitancia térmica estimada de 0,37 W/m²·K (superior a normativas chilenas para zonas térmicas, $U \leq 0,80$ W/m²·K), atenuación acústica de 33 dB, resistencia a flexotracción de 0,63 MPa y comportamiento al fuego con carbonización superficial sin propagación, colapsando tras 28 minutos de exposición directa. Estos resultados posicionan los bloques como alternativa ecológica y de bajo costo para aislamiento no estructural, promoviendo la economía circular asociada a residuos celulósicos.

Palabras clave: Papel de oficina reciclado, bloques prensados, Materiales de construcción no estructurales, aislamiento termoacústico, sostenibilidad, economía circular en construcción.

This study develops an artisanal process for manufacturing pressed blocks without binders from office recycled paper, preliminarily evaluating their thermoacoustic, mechanical, and fire resistance properties. Using paper, pulp was obtained through hydration, shredding, and hydraulic pressing, followed by controlled drying.

The blocks exhibited an average density of 300 kg/m³, an estimated thermal transmittance of 0.37 W/m²·K (superior to Chilean regulations for thermal zones, $U \leq 0.80$ W/m²·K), acoustic attenuation of 33 dB, flexural strength of 0.63 MPa, and fire behavior with superficial carbonization without propagation, collapsing after 28 minutes of direct exposure. These results position the blocks as an ecological and low-cost alternative for non-structural insulation, promoting the circular economy associated with cellulosic waste.

Keywords: Recycled office paper, Non-structural building materials, thermoacoustic insulation, sustainability, circular economy in construction

Introducción

El uso de papel de descarte y su reutilización en la producción de materiales de construcción ha ganado relevancia en los últimos años abordando desafíos en la gestión de residuos y promoviendo la sostenibilidad [1]. Se ha observado que la utilización de papel impreso desechado en las oficinas puede mejorar algunas propiedades de los materiales de construcción, lo que conlleva a interesantes beneficios ambientales y económicos [2]. Los estudios actuales se han centrado principalmente en mezclas de cemento [3] y papel descartado [4], así como también, se ha adicionado

papel tanto en la fabricación de ladrillos de arcilla cocidos [5] como en la fabricación de baldosas cerámicas [6].

Shermale & Warma (2015) [7] utilizan *papercrete*, un material compuesto que reemplaza parcialmente el cemento Pórtland con papel usado, lo que resulta en una reducción del uso de cemento, y por consiguiente, una reducción de las emisiones de CO₂. Solahuddin & Yahaya (2021a) [8], investigaron el efecto del papel usado en las propiedades mecánicas del hormigón, concluyendo que puede aumentar su resistencia al reemplazar el cemento por papel entre un 5% y el 10%. Mamta (2017) [9], igualmente estudiaron



el comportamiento del hormigón con la adición de papel, determinando que la resistencia del hormigón disminuyó con el aumento del contenido de papel, observando una correlación positiva entre la densidad y la resistencia del hormigón con la cantidad de papel usado. Solahuddin & Yahaya (2022) [10], realizaron una revisión bibliográfica que destacó la mejora de la resistencia a la compresión y a la flexión en el hormigón con papel usado, resaltando su carácter ecológico y rentable. Solahuddin & Yahaya (2021b) [11], investigaron el impacto del papel triturado en las propiedades del hormigón, observando mejoras en la resistencia y la absorción de agua. Okeyinka & Idowu (2014) [12], evaluaron la idoneidad del papel reciclado como material de ingeniería en la producción de planchas de techo. Encontraron que la mezcla de cemento y papel en proporción 1:1 mostró las mejores propiedades para la fabricación mecanizada. de Oliveira *et al.* (2023) [13], estudiaron la incorporación de residuos de la industria papelería en baldosas cerámicas, encontrando que es viable incorporar hasta un 10% de papel reciclado para obtener beneficios económicos y ambientales. Sangeetha, Divahar & Aranvid Raj (2022) [14], evaluaron ladrillos de hormigón fabricados con papel usado, encontrando que la incorporación de papel redujo la resistencia y el peso del ladrillo.

El *papercrete* también ha sido objeto de estudio en relación con sus propiedades termoacústicas. Shibib (2015) [5] evaluaron el impacto de la adición de papel usado en ladrillos cocidos, demostrando que los materiales resultantes mostraban un buen desempeño térmico y mecánico. Hospodarova *et al.* (2018) [15], investigaron la incorporación de fibras celulósicas de papel reciclado en materiales de construcción a base de cemento, encontrando que mejoran la resistencia y la conductividad térmica, mientras que el uso de superplastificante aumenta la trabajabilidad. Liuzzi *et al.* (2023) [16], desarrollaron mezclas de pulpa de papel con diferentes biomásas, evaluando sus propiedades termoacústicas y obteniendo resultados aceptables. Cardinale *et al.* (2021) [17], exploraron el reciclaje de *papercrete* para producir concreto ecológico, obteniendo mejoras en la absorción de sonido y reducción de costos, aunque a costa de una disminución en las propiedades de resistencia al aumentar el contenido de papel. Mandili *et al.* (2019) [18], exploraron un compuesto de papel residual y cal, logrando una conductividad

térmica de 0,12 W/m·K, sugiriendo un adecuado uso para aislamiento en edificios ecológicos.

En el contexto de la gestión de residuos de papel, Hong *et al.* (2021) [19] reportaron que el papel de oficina constituye aproximadamente el 60% de los residuos de papel a nivel global, con impactos ambientales significativos debido a la acumulación en vertederos y la deforestación. En Chile, los programas de reciclaje de papel a nivel institucional son limitados. La Ley 20.920 [20], también denominada Ley REP, que establece el marco para la gestión de residuos y la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje, no incluye al papel dentro de la categoría de productos prioritarios. Este vacío es particularmente pertinente dada la estimación de consumo anual de 10.000 hojas por empleado de oficina (Sha *et al.*, 2019) [21], reforzando la necesidad de estrategias innovadoras de reutilización.

Como se ha visto, los estudios demuestran el potencial del papel reciclado como material alternativo en la construcción, con beneficios que van desde la mejora de propiedades mecánicas y térmicas hasta la reducción de costos y el impacto ambiental positivo. Sin embargo, estudios sobre la fabricación de bloques prensados de papel reciclado sin adición de cemento son escasos. Robert, Etuk & Agbasi (2025) [22], investigaron el uso de placas para cielos rasos compuestos de papel reciclado sin aglutinante. Sus resultados mostraron que estos tableros, hechos de pasta de periódico y papel de escribir desechados, poseen propiedades físicas y térmicas superiores a los materiales convencionales.

El uso generalizado del papel hace que conocer su composición sea fundamental, no solo para entender sus propiedades físicas y químicas, sino también para optimizar la gestión integral de residuos y procesos de reciclaje, que se han convertido en prioridades esenciales ante la creciente preocupación ambiental global. En particular, el papel utilizado en impresoras de oficina, comúnmente conocido como papel bond o multifuncional, está compuesto principalmente por fibras de celulosa derivadas de pulpa de madera (virgen o reciclada), que representan entre el 70% y el 90% de su estructura total. La celulosa es un polímero natural que proporciona la base fibrosa y resistente del papel, aunque puede incluir trazas de lignina residual si no se procesa completamente.



Además de la celulosa, el papel de oficina incluye otros componentes químicos y aditivos para mejorar su calidad, imprimibilidad y durabilidad:

- Cargas o fillers (10-20%): Compuestos inorgánicos como carbonato de calcio (CaCO_3), arcilla (caolín) o dióxido de titanio (TiO_2), que aumentan la opacidad, el brillo y la suavidad, permitiendo una mejor absorción de tinta en impresoras láser o de inyección [23].
- Agentes de encolado (1-5%): Sustancias como almidón, resinas sintéticas (por ejemplo, resinas alquídicas) o sulfato de aluminio, que evitan que la tinta se esparza excesivamente y mejoran la resistencia al agua [24].
- Blanqueadores y aditivos ópticos (menos del 1%): Compuestos como blanqueadores libres de cloro elemental (ECF, por sus siglas en inglés) para eliminar lignina y lograr un blanco brillante, junto con agentes fluorescentes para mayor luminosidad [24].
- Agua y otros minoritarios (5-10%): Humedad residual y trazas de lignina (un compuesto orgánico que se elimina en gran medida durante el proceso químico de pulpeado para evitar amarilleo) [23].

Esta composición varía ligeramente según el gramaje (generalmente 75-90 g/m² para uso estándar en oficinas [25] y si es reciclado o virgen, pero en general, se produce mediante procesos químicos que eliminan impurezas para garantizar compatibilidad con impresoras.

El papel desechado en las oficinas posee propiedades aglutinantes debido a la fibra de celulosa que lo compone y a los adhesivos utilizados en su fabricación. Estas propiedades permiten que el papel reciclado se pueda volver a procesar y formar nuevas hojas. Además, posee baja conductividad térmica y una estructura que puede absorber y diseminar ondas sonoras [17], lo que lo considera un candidato ideal para aplicaciones de aislamiento termoacústico. Sangrutsamee *et al.* (2012) [26], incorporó pulpa de papel en mezclas de mortero. El estudio demostró que la incorporación de estos residuos de papel presentó una disminución en la conductividad térmica de las muestras.

A diferencia de los enfoques predominantes en la literatura, centrados en el uso de papel reciclado como adición parcial en matrices cementicias (papercrete) o en paneles

compuestos con aglutinantes minerales, el presente estudio explora la fabricación de bloques prensados elaborados exclusivamente a partir de pulpa de papel reciclado de oficinas, sin la incorporación de cemento, cal u otros ligantes externos.

Esta aproximación busca evaluar el potencial intrínseco de la fibra celulósica como material autoaglutinante mediante procesos físicos de hidratación, trituración y prensado, proponiendo una alternativa de bajo impacto ambiental para aplicaciones de aislamiento termoacústico no estructural.

El objetivo general de este estudio fue desarrollar y evaluar un proceso artesanal para la fabricación de bloques prensados sin aglutinante a partir de papel reciclado de oficinas. Se analizaron de manera preliminar sus propiedades térmicas, acústicas, mecánicas y su comportamiento frente a llama directa, con el fin de identificar su viabilidad potencial como material de aislamiento en aplicaciones interiores no estructurales, sin pretender establecer comparaciones normativas definitivas.

Parte Experimental

Selección y limpieza del papel

Se seleccionó papel impreso de diversos tamaños, desechado en oficinas de académicos de la Universidad de La Serena. El proceso de limpieza implicó la remoción manual de grapas, cintas adhesivas y cualquier material extraño al papel (Fig. 1a). Además, se descartaron documentos deteriorados por hongos o químicos derramados para garantizar la uniformidad de la mezcla y preservar las propiedades físicas de los bloques fabricados.

Obtención de la pulpa de papel

Posteriormente, las hojas de papel fueron a un contenedor de 50 litros aproximadamente con agua potable para su saturación durante 24 horas a temperatura ambiente. Luego, en el contenedor se procedió a la trituración del papel saturado a través del uso de un mezclador eléctrico (220 V y 2100 W), usualmente utilizado para la mezcla de morteros y hormigones, hasta obtener una densa pulpa fina homogénea y sin grumos. Para evitar salpicaduras fuera del contenedor durante el triturado, éste se cubrió con plástico como se muestra en la fig. 1c.

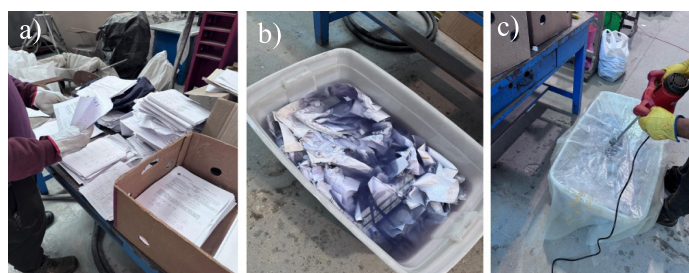


Figura 1. Obtención de la pulpa de papel. a) Selección del papel, b) hidratación, y c) triturado en húmedo.

Filtrado de la pulpa de papel

Para obtener una pulpa drenada, se fabricó un filtro prismático de madera (15x15x30 cm) con agujeros de 8 mm de diámetro distribuidos cada 2 cm en el fondo y las paredes (Fig. 2). Este dispositivo permitió el drenaje inicial, aunque requirió presión adicional; por ello, se colocó una plancha superior de madera con dimensiones 5 mm menores por arista que el molde, cargada durante 15 minutos con un bloque de acero con un peso total de 12 kg. Esta operación permitió el drenaje parcial del agua, evitó la pérdida de material sólido y modificó la textura de la pulpa antes del proceso de compactación en la prensa. Este procedimiento garantizó un contenido de humedad homogéneo para cada bloque.



Figura 2. Molde drenante de la pulpa de papel.

Moldeo de la pulpa

Para el moldeo de los bloques compactados se utilizó una prensa tipo Cimba-Ram adaptada en el laboratorio, se le agregó un sistema hidráulico que incluyó una bomba manual, un cilindro de simple efecto y un manómetro (Enerpac). Todo el sistema fue montado sobre una estructura metálica adaptada para garantizar una presión homogénea en los bloques (Fig. 3).



Figura 3. Sistema de prensado para la obtención de bloques prensados de papel reciclado. Está compuesto de prensa Cimva-Ram modificada con adaptación de bomba hidráulica manual.

La pulpa de papel drenada previamente se distribuyó dentro del molde en capas de 3 cm, distribuida manualmente para eliminar burbujas de aire hasta alcanzar el ras del molde de la prensa. Se colocó la tapa metálica al molde y se reforzó con dos prensas manuales tipo C en los extremos para evitar desviaciones y deformación del bloque de papel tras el prensado. Al accionar la palanca manualmente, se generó una presión ascendente en el cilindro que comprimió la pulpa y eliminó el exceso de agua (Fig. 4).

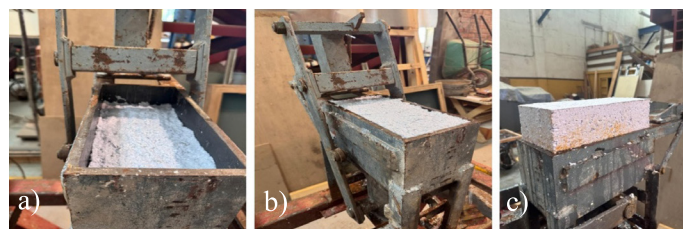


Figura 4. Moldeo y prensado de la pulpa de papel. a) llenado del molde, b) prensado, y c) expulsión del bloque prensado.

El proceso incluyó 15 bombeos iniciales, con presiones de 350 PSI aproximadamente. Posteriormente, se insertó una pieza de madera de 5 cm de altura entre el cilindro y la prensa, y se realizaron 25 bombeos adicionales en la segunda fase con el propósito de mejorar la compactación de la pulpa de papel. Una vez completado el proceso, se libera la presión, se retiran las prensas manuales y la tapa del molde. Con ayuda de la palanca de la prensa se expulsa cuidadosamente el bloque recién fabricado. El bloque de papel en estado húmedo, presentó un diseño prismático con dimensiones de 10 × 15 × 30 cm. Este procedimiento se repitió hasta obtener 30 unidades de bloques.



Secado del bloque de papel

Se procedió al secado solar de los bloques a la intemperie, sin embargo, dadas las condiciones ambientales con humedad relativa superiores a 80% en la estación de otoño, los bloques prensados no perdieron la humedad necesaria, por lo que se optó por un secado en horno eléctrico a 60°C hasta obtener una masa constante (Fig. 5). La humedad de los bloques deshidratados se verificó con un higrómetro digital para materiales (Benetech, Mod. GM620).



Figura 5. Secuencia de deshidratado de los bloques prensados de papel reciclado. a) Registro de la masa de bloque prensado, b) secado en horno a 60°C y c) verificación de la humedad final con higrómetro de materiales.

Cada bloque seco se midió en triplicado en cada una de sus caras utilizando un calibrador digital de precisión (resolución de 0,01 mm), debido a la falta de uniformidad dimensional observada. Se registraron las dimensiones de longitud, ancho y altura para calcular promedios y desviaciones estándar, lo que permitió evaluar variaciones post-secado y asegurar la consistencia en las propiedades físicas de los bloques.

Transmitancia térmica

Se aplicó un método indirecto y exploratorio de estimación del comportamiento térmico, basado en la densidad seca del material. Este enfoque no corresponde a un ensayo normalizado, sino que se fundamenta en correlaciones empíricas reportadas en la literatura entre densidad aparente y conductividad térmica en materiales porosos de baja densidad.

Una vez alcanzado el estado de peso constante seco, se procedió a la caracterización física de los bloques. Las dimensiones (largo, ancho y alto) se midieron en tres puntos por cada cara, con el propósito de reducir errores asociados a irregularidades superficiales. A partir de dichas mediciones se determinó el volumen promedio de cada bloque. La masa se registró mediante una balanza

electrónica de precisión, asegurando la estabilidad de los valores tras exposiciones prolongadas al ambiente.

Con estos datos se calculó la densidad aparente seca (ρ) aplicando la relación $\rho=m/V$. El valor promedio obtenido permitió seleccionar un material de referencia con propiedades físicas similares, necesario para estimar la conductividad térmica (λ). De acuerdo con la literatura técnica, se consideró la madera balsa como material análogo, debido a su estructura celular y rango de densidad comparable. La conductividad térmica de referencia adoptada para los cálculos fue de 0,05 W/m·K, correspondiente al valor medio reportado para dicho material.

Con el espesor promedio de los bloques determinado experimentalmente, se estimó la resistencia térmica (R) mediante la expresión $R=e/\lambda$, y posteriormente la transmitancia térmica (U) como su inverso ($U=1/R$). Este procedimiento permitió obtener una estimación referencial del comportamiento térmico de los bloques, útil para su comparación con materiales de similares características empleados en construcción.

La transmitancia térmica (U) obtenida para los bloques prensados de papel reciclado prensado se comparó con los requisitos establecidos en la actualización del artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) [27], publicada en el Diario Oficial de 2024 y con entrada en vigencia el 28 de noviembre de 2025. Esta comparación evaluó el cumplimiento de los valores límite para elementos constructivos como techumbres, muros perimetrales, pisos ventilados y puertas opacas, en términos de transmitancia térmica (U) o resistencia térmica total (R_t). Los valores aplicables se determinaron según la zona térmica de la edificación, definida en la norma chilena NCh1079 [28].

La comparación con los valores límite establecidos en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) se realiza únicamente con fines referenciales, con el objetivo de contextualizar el orden de magnitud de los valores estimados. Estos resultados no deben interpretarse como una verificación de cumplimiento normativo, ya que no provienen de ensayos térmicos instrumentales normalizados.

Evaluación del comportamiento acústico

Con el propósito de obtener una estimación preliminar del comportamiento acústico de los bloques fabricados, se diseñó un ensayo experimental simplificado bajo condiciones controladas de laboratorio. El procedimiento implementado no corresponde a un método normalizado, sino que busca identificar tendencias comparativas de atenuación sonora asociadas al uso del material.

El ensayo se efectuó en un recinto de prueba construido con siete bloques prensados de papel reciclado reciclado (Fig. 6). Dos bloques se dispusieron como base, otros dos se ubicaron verticalmente en los extremos laterales y dos más conformaron la cubierta superior. Los frentes anterior y posterior se cerraron utilizando un bloque preliminar dividido por la mitad, asegurando el sellado completo del conjunto con un adhesivo de contacto.



Figura 6. Medición de las propiedades acústicas del bloque de papel.

En el interior del recinto se instaló un parlante (Bose SoundLink Flex) como fuente emisora de sonido, mientras que las mediciones se realizaron con un sonómetro digital (Digital Sound Level Meter) con rango operativo entre 30 y 130 dB. El sistema se configuró para generar una señal acústica de alta frecuencia, manteniendo constante la potencia de salida durante todas las pruebas.

Se realizaron dos mediciones principales para determinar la atenuación sonora producida por los bloques:

- Medición a 10 cm: el parlante se ubicó en el centro del recinto, a 1,68 cm de la cara interna del bloque, y el sonómetro se posicionó al exterior, a una distancia total de 10 cm entre la fuente y el sensor.

- Medición a 20 cm: se mantuvo la posición del parlante y se alejó el sonómetro 10 cm adicionales, obteniendo una distancia total de 20 cm.

Ambas configuraciones se replicaron en un entorno abierto, sin la presencia de otros sonidos en el recinto, con el fin de registrar los niveles de presión sonora a las mismas distancias y establecer la diferencia de decibeles atribuible exclusivamente al efecto de aislamiento del material. Esta comparación permitió cuantificar la atenuación acústica de los bloques en condiciones controladas.

Si bien los resultados obtenidos muestran una reducción apreciable de los niveles de presión sonora, estos deben interpretarse exclusivamente como indicadores exploratorios del potencial acústico del material. No se establece equivalencia directa con índices de aislamiento acústico normalizados, los cuales requieren ensayos en cámaras reverberantes y condiciones controladas según normativa vigente.

Ensayos de flexotracción

Los ensayos de flexotracción se realizaron para evaluar el comportamiento mecánico de los bloques prensados de papel reciclado bajo cargas combinadas de tracción y compresión. Se utilizó la máquina universal de ensayos para hormigón.

Dado que las dimensiones y características del material no se ajustan a probetas normalizadas para hormigón, se utilizó la norma NCh1038:2009 únicamente como referencia metodológica, adaptando el esquema de carga y el cálculo de tensiones. Esta adaptación introduce incertidumbres adicionales, las cuales se reconocen como una limitación del presente estudio.

Los bloques se apoyaron en dos puntos inferiores, con la carga aplicada en el punto central superior. La carga se incrementó de forma gradual y continua hasta producirse la ruptura visible, registrando la carga máxima en kilonewtons (kN) en el momento de la falla (Ver fig. 7).

La resistencia a flexotracción (σ_f) se calculó utilizando la fórmula adaptada de la norma para probetas prismáticas: $\sigma_f = (3 \times P \times L) / (2 \times b \times h^2)$, donde P es la carga máxima de ruptura (kN), L es la distancia entre apoyos (mm), b es el ancho de la sección transversal (mm) y h es la altura de la



Figura 7. Ensayo de flexotracción de piezas de bloques prensado de papel reciclado prensado.

sección transversal (mm). Las dimensiones de cada bloque se midieron antes del ensayo para incorporar variaciones reales en los cálculos.

Se evaluaron seis bloques prensados de papel reciclado prensado y en estado seco. Todos los ensayos se llevaron a cabo en condiciones de laboratorio estándar, registrando los datos mediante la interfaz digital de la máquina. Los resultados se promediaron para evaluar consistencia.

Comportamiento al fuego

Se realizó un ensayo cualitativo para evaluar el comportamiento al fuego de los bloques prensados de papel reciclado prensado. El ensayo no siguió una norma específica debido a la naturaleza preliminar, pero se inspiró en métodos cualitativos para materiales celulósicos, priorizando la seguridad y la observación visual. Se seleccionó uno de los bloques completamente secos y se aplicó una llama directa mediante un mechero a gas Bunsen a 10 cm de la zona central de la superficie. La exposición se mantuvo por un período predefinido de 30 minutos máximo, observando la respuesta del material durante y después de la aplicación de la llama. Una cámara termográfica (Bosch-GTC 400 C, -10°C a +400°C ± 3°C, software GTC Transfer) registró imágenes térmicas durante el ensayo (Fig. 8).

Los resultados experimentales se analizaron mediante estadística descriptiva básica, reportando valores promedio y desviación estándar. Dado el tamaño reducido de muestra, los análisis estadísticos se limitan a una interpretación exploratoria, sin inferencia estadística de carácter confirmatorio.

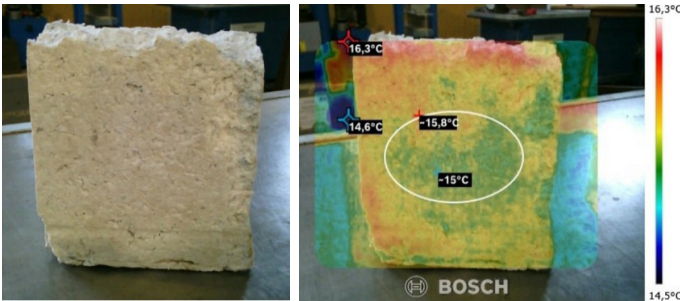


Figura 8. Imagen térmica de un bloque de papel prensado a temperatura ambiente.

Resultados

Los valores de pérdida de humedad, estabilidad dimensional y densidad aparente se reportan como promedio ± desviación estándar, permitiendo evaluar la variabilidad asociada al proceso de prensado y secado.

Pérdida de humedad por secado en horno.

Se evaluaron seis bloques prensados de papel reciclado prensado constatando que la pérdida de humedad en promedio fue $73,4\% \pm 3,2\%$.

Estabilidad dimensional

Las variaciones de las dimensiones y volumen final respecto de las iniciales de una muestra de seis bloques son mostradas en la Tabla 1. Por otra parte, la densidad promedio de los bloques prensados y secos fue de 300 kg/m^3 .

Tabla 1. Variación dimensional de los bloques prensados de papel reciclado prensado en estado seco.

Dimensión	Promedio	Variación (%)
Espesor	$9,0 \pm 0,6 \text{ (cm)}$	$-8,0 \pm 3,9$
Largo	$28,2 \pm 0,4 \text{ (cm)}$	$-4,3 \pm 1,0$
Ancho	$13,4 \pm 0,2 \text{ (cm)}$	$-4,7 \pm 1,6$
Volumen	$3.387,3 \pm 148,7 \text{ (cm}^3\text{)}$	$-16,1 \pm 2,1$

Transmitancia térmica

La transmitancia térmica estimada se presenta como un valor promedio derivado de las dimensiones y densidad seca de los bloques, reconociendo que la variabilidad dimensional influye directamente en la estimación del desempeño térmico.

La densidad de los bloques fabricados resultó comparable a la de la madera balsa ($100\text{--}300\text{ kg/m}^3$), un material de referencia en aplicaciones de aislamiento térmico. De acuerdo con la literatura técnica, la conductividad térmica promedio de la madera balsa se estima en $0,05\text{ W/m}\cdot\text{K}$, lo que sirvió de base para la aproximación indirecta de las propiedades térmicas de los bloques. Conocido el ancho del bloque dado en la Tabla 1 y la conductividad térmica de la madera balsa, se puede obtener comparativamente los valores correspondientes a la resistencia térmica (R) y la transmitancia térmica (U) del bloque de papel prensado, siendo $2,68\text{ m}^2\text{ K/W}$ y $0,37\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, respectivamente.

Para el caso de Chile, según la norma chilena NCh1079:2008 [28], la actualización del artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC, publicada en 2024 y vigente desde el 28 de noviembre de 2025) [27], establece un valor máximo de transmitancia térmica (U) para complejo de techumbre, muros perimetrales, complejo de piso ventilado y complejo de puertas opacas para zonas térmicas desde A a la I.

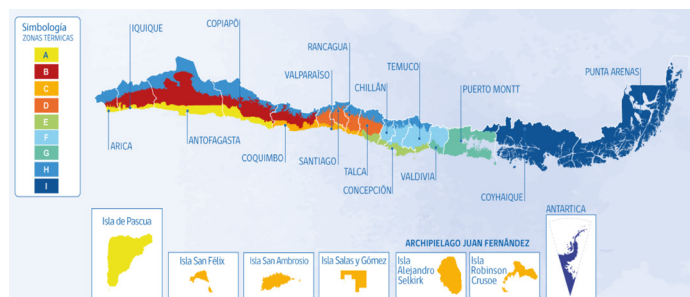


Figura 9. Zonificación térmica en Chile [31].

Tabla 2. Requisitos de transmitancia según la envolvente y cumplimiento de los bloques prensados de papel reciclado para cada zona térmica [27].

Envolvente	U máximo ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) OGUC	U bloque prensado ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$)	Bloque califica para zona térmica
Complejo de techumbre	0,47	0,37	A-B-C-D
Complejo de muros perimetrales	0,80	0,37	A-B-C-D-E-F-G
Complejo de piso ventilado	0,70	0,37	A-B-C-D-E-F-G
Complejo de puertas opacas	1,70	0,37	A-B-C-D-E-F-G-H-I

En comparación, los bloques desarrollados en este estudio presentaron una transmitancia térmica superior a los requisitos normativos para casi la totalidad de las zonas térmicas nacionales, pudiendo cumplir satisfactoriamente su uso como material aislante (ver Tabla 2).

Comportamiento acústico

La atenuación acústica debida al módulo de bloques prensados de papel reciclado se calculó como la diferencia entre los niveles de presión sonora medidos con el parlante fuera y dentro del recinto, resultando en reducciones de 32,0 dB (equivalente a una disminución relativa del 30,4%) y 33,1 dB (equivalente a una disminución relativa del 34,0%) para las distancias de 10 cm y 20 cm desde la fuente emisora, respectivamente. La disminución relativa se obtuvo mediante la fórmula $[(L_{\text{fuera}} - L_{\text{dentro}}) / L_{\text{fuera}}] \times 100$, donde L representa el nivel de presión sonora promedio en dB. Las lecturas se realizaron directamente con un sonómetro calibrado a las distancias mencionadas. A continuación, se presenta la tabla con los datos crudos y promedios obtenidos.

Las mediciones acústicas se reportan como valores promedio $\pm$ desviación estándar, lo que permite observar la dispersión de los niveles de presión sonora registrados en cada configuración experimental.

Tabla 3. Resultados de las lecturas con el sonómetro.

Configuración del ensayo	Medición 1 (dB)	Medición 2 (dB)	Medición 3 (dB)	Promedio (dB)
Parlante dentro del módulo y sonómetro a 10 cm	72,0	75,0	73,2	$73,4 \pm 1,5$
Parlante fuera del módulo y sonómetro a 10 cm	106,3	104,5	105,4	$105,4 \pm 0,9$
Parlante dentro del módulo y sonómetro a 20 cm	66,1	63,3	63,3	$64,23 \pm 1,6$
Parlante fuera del módulo y sonómetro a 20 cm	100,3	97,7	94,1	$97,37 \pm 3,1$

Estos resultados sugieren un potencial comportamiento aislante acústico del material para aplicaciones interiores



no estructurales, sin constituir una caracterización acústica definitiva ni comparable directamente con soluciones comerciales certificadas.

Análisis de correlaciones exploratorias

Con el fin de identificar relaciones preliminares entre las propiedades medidas, se realizó un análisis exploratorio de correlación entre la densidad aparente seca, la resistencia a flexotracción y la transmitancia térmica estimada de los bloques. Se observó una tendencia positiva entre densidad y resistencia a flexotracción, coherente con lo reportado en materiales porosos de base celulósica, mientras que una mayor densidad se asoció a una transmitancia térmica ligeramente superior, lo que sugiere un compromiso entre desempeño mecánico y capacidad aislante.

Estas relaciones deben interpretarse únicamente como tendencias preliminares, dada la cantidad limitada de especímenes y el carácter indirecto de la estimación térmica.

Tabla 4. Correlaciones exploratorias entre densidad, resistencia mecánica y desempeño térmico estimado.

Propiedad 1	Propiedad 2	Tendencia observada	Interpretación exploratoria
Densidad aparente seca	Resistencia a flexotracción	Positiva	Bloques con mayor densidad tienden a presentar mayor resistencia mecánica, coherente con una mayor compactación de la matriz celulósica.
Densidad aparente seca	Transmitancia térmica estimada (U)	Positiva leve	El aumento de densidad se asocia a una ligera disminución de la capacidad aislante, reflejando el compromiso entre compactación y desempeño térmico.
Resistencia a flexotracción	Transmitancia térmica estimada (U)	Indirecta	Bloques con mayor resistencia mecánica tienden a mostrar valores ligeramente superiores de transmitancia térmica, sugiriendo un balance entre rigidez y aislamiento.

Ensayo a la flexotracción

Los ensayos de flexotracción se realizaron con el objetivo de obtener una aproximación preliminar al comportamiento mecánico de los bloques prensados de papel reciclado, considerando su potencial uso en aplicaciones no estructurales. Debido a la naturaleza exploratoria del estudio y al número limitado de especímenes ensayados, los resultados obtenidos deben interpretarse como valores indicativos y no como propiedades mecánicas definitivas del material.

La resistencia promedio a flexotracción obtenida ($0,63 \pm 0,05$ MPa) sugiere que los bloques presentan una capacidad mecánica limitada, coherente con su baja densidad y composición celulósica. Estos valores confirman su uso exclusivo en aplicaciones no estructurales, sin pretender equipararlos a elementos constructivos con función resistente.

Comportamiento al fuego

Se realizó un ensayo cualitativo y exploratorio para observar el comportamiento del material frente a una fuente de llama directa, sin ajustarse a protocolos normalizados de reacción o resistencia al fuego. El objetivo del ensayo fue describir el proceso de degradación térmica del bloque y su respuesta visual y térmica, más que clasificar su desempeño según normativa vigente. Se seleccionó un bloque con un espesor de 9,5 cm. Este bloque se expuso a una llama directa constante mediante un mechero ajustado a potencia media, posicionado aproximadamente a 10 cm de la superficie.

Durante la prueba, se monitoreó la temperatura en la cara opuesta a la exposición de la llama utilizando una cámara termográfica, con el objetivo de evaluar la capacidad de aislamiento térmico del bloque ante una fuente de calor constante, verificando que no es un material inflamable. En los primeros 10 minutos de exposición, se observó un desprendimiento superficial en la cara impactada por la llama, sin fisuras visibles ni variaciones térmicas detectables en la cara opuesta, según los registros de la cámara termográfica. En este tiempo, el área afectada de la superficie se contraía, causando una reducción de aproximadamente $\frac{1}{4}$ del grosor del bloque.

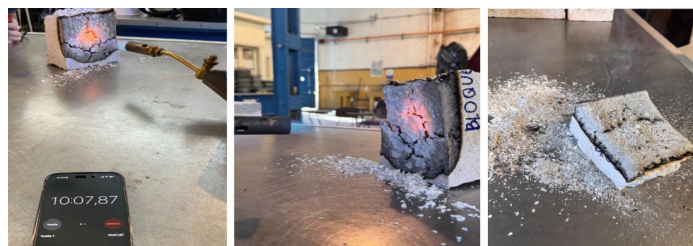


Figura 10. Bloque de papel prensado sometido a ensayo de llama directa y estado final.

A los 17 minutos, se comenzó a notar un incremento en la temperatura de la cara no expuesta, con un cambio de aproximadamente 1°C por minuto, lo que indicaba una transmisión de calor a través del material. Finalmente, tras 28 minutos de exposición ininterrumpida, el bloque colapsó, registrando un aumento en la temperatura de hasta $41,6^{\circ}\text{C}$ en la cara no expuesta a la llama ($>400^{\circ}\text{C}$ excediendo el límite de medición del equipo en la cara expuesta) y una disminución de más del 50% del espesor total del bloque (Fig. 11). Este procedimiento se llevó a cabo en condiciones de laboratorio controladas, con registro fotográfico y termográfico de las etapas.

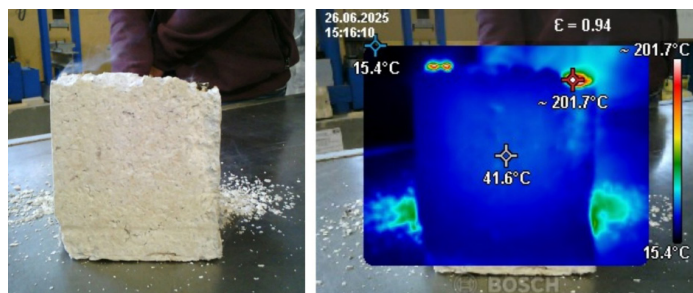


Figura 11. Imagen termográfica de la cara posterior a la llama directa del bloque al finalizar el ensayo.

Durante el ensayo se observó un proceso de carbonización superficial progresiva en la cara expuesta a la llama, acompañado de pérdida gradual de espesor y aumento retardado de temperatura en la cara opuesta. No se evidenció propagación súbita de la llama ni ignición violenta del material, registrándose un colapso estructural tras aproximadamente 28 minutos de exposición continua.

Dado el carácter no normalizado del ensayo y el uso de un único espécimen, los resultados deben interpretarse exclusivamente como una descripción cualitativa del comportamiento observado, sin permitir su clasificación en términos de resistencia o reacción al fuego conforme

a normativa técnica. Ensayos futuros deberán incorporar metodologías estandarizadas y un mayor número de muestras para una evaluación más robusta.

Discusión

Comparación con materiales aislantes comerciales y bio-basados

Desde una perspectiva comparativa, los bloques prensados de papel reciclado presentan una densidad aparente del orden de 300 kg/m^3 , significativamente superior a la de aislantes livianos convencionales como las lanas minerales ($10\text{--}80\text{ kg/m}^3$) o el poliestireno expandido ($10\text{--}30\text{ kg/m}^3$).

No obstante, estos valores resultan comparables a los reportados para materiales bio-basados densificados, tales como paneles rígidos de fibras vegetales o compuestos celulósicos prensados, cuyas densidades típicas se sitúan entre 200 y 400 kg/m^3 , dependiendo del proceso de fabricación y grado de compactación. Esta similitud posiciona al material desarrollado dentro del grupo de aislantes bio-basados de media densidad, orientados a aplicaciones interiores no estructurales.

En términos de desempeño térmico, la transmitancia térmica estimada se sitúa en un rango competitivo para aplicaciones interiores, aunque inferior al de aislantes comerciales optimizados. Sin embargo, el material destaca por su bajo impacto ambiental, ausencia de aglutinantes minerales o sintéticos y potencial de fabricación local con residuos de oficina, lo que refuerza su interés desde una perspectiva de economía circular.

Comparación acústica

En comparación con soluciones acústicas comerciales utilizadas en acondicionamiento interior, los bloques prensados de papel reciclado muestran una capacidad apreciable de atenuación sonora, atribuible a su estructura porosa y fibrosa. Si bien no alcanzan niveles certificados de aislamiento acústico, su desempeño resulta consistente con otros materiales bio-basados empleados como soluciones pasivas de control de ruido en espacios interiores.

Limitaciones del material

A pesar de los resultados favorables observados, el material presenta limitaciones relevantes que condicionan su aplicación.



La sensibilidad a la humedad constituye una de las principales restricciones, dado el carácter higroscópico de la fibra celulósica, lo que puede afectar la estabilidad dimensional y las propiedades mecánicas en ambientes no controlados.

Asimismo, la durabilidad a largo plazo del material no fue evaluada en este estudio, por lo que no es posible establecer su comportamiento frente a ciclos de humedad-secado, envejecimiento natural o exposición prolongada a agentes ambientales. La naturaleza orgánica del material implica además un riesgo potencial de ataque biológico, como hongos o microorganismos, especialmente en condiciones de alta humedad, lo que refuerza la necesidad de tratamientos superficiales o aditivos protectores en desarrollos futuros.

Conclusiones

El desarrollo de un proceso artesanal para la fabricación de bloques termoacústicos a partir de papel reciclado de oficinas demuestra la viabilidad de transformar residuos celulósicos en materiales de construcción no estructurales, sin la adición de aglutinantes externos.

Los bloques obtenidos presentan propiedades térmicas favorables, con una transmitancia térmica estimada de $0,37 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, que cumple con los requisitos normativos de la OGUC (artículo 4.1.10, 2024) para diferentes zonas térmicas en Chile, posicionándolos como una alternativa efectiva para aislamiento en revestimientos interiores. De igual manera, la atenuación acústica medida de 33 dB confirma su capacidad para reducir ruido ambiental, alineada con la norma NCh2785:2010 [29], lo que resalta su potencial en aplicaciones de control sonoro en entornos educativos o administrativos.

En términos mecánicos, los ensayos de flexotracción muestran una resistencia promedio de $0,631 \text{ MPa}$, suficiente para usos no portantes pero insuficiente para elementos estructurales, evaluando la necesidad de optimizaciones en la compactación para mejorar la durabilidad.

El comportamiento frente a la llama directa evidenció una degradación progresiva mediante carbonización superficial, sin observaciones de ignición súbita, lo que sugiere un desempeño térmico interesante desde un punto de vista exploratorio, aunque no permite establecer

clasificaciones normativas de resistencia al fuego.

El análisis estadístico descriptivo y correlacional realizado permitió identificar tendencias coherentes entre densidad, resistencia mecánica y desempeño térmico estimado, reforzando la consistencia interna de los resultados y proporcionando una base para futuras investigaciones con mayor número de muestras y ensayos normalizados.

Estos resultados contribuyen a la economía circular al reutilizar papel desechado en la fabricación de bloques, reduciendo el impacto ambiental asociado a vertederos y deforestación.

No obstante, se reconoce que el presente estudio corresponde a una etapa preliminar de investigación, por lo que los valores reportados deben interpretarse como indicativos y no como parámetros de desempeño normalizado. Estudios futuros deberán profundizar en ensayos estandarizados, durabilidad y control de humedad para una validación técnica más robusta.

Agradecimientos

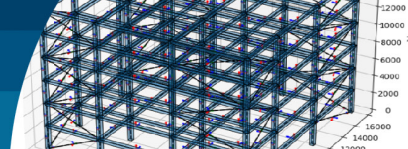
Los autores agradecen el apoyo financiero de ANID InES I+DINID230003 a través del proyecto CEIINNOV2453853 de la Universidad de La Serena, Chile.

Referencias

- [1] S. Sidabutar, *MORFAI J.* **3**, 133 (2023). <https://doi.org/10.54443/morfai.v3i1.838>
- [2] M. H. Iqbal and F. Ahmed, *IOSR J. Environ. Sci. Toxicol. Food Technol.* **9**, 10 (2015). <https://doi.org/10.9790/2402-09811017>
- [3] A. B. Al Zubaidi, S. R. Ahmedizat, and A. A. Al-Tabbakh, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **870**, 012138 (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012138>
- [4] Mamta, Anshu, and A. Singhal, *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)* **5**, (3) (2016). <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV5IS03015>
- [5] K. S. Shibib, *Heat Mass Transf.* **51**, 685 (2015). <https://doi.org/10.1007/s00231-014-1438-6>
- [6] R. Afonso *et al.*, *Green Mater: Sustain. Water Remediation Treat.* (Springer, 2018) pp. 1–10. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10383-5_30



- [7] Y. D. Shermale and M. B. Varma, *Recent Trends Civ. Eng. Technol.* **2**, 54 (2015).
- [8] B. A. Solahuddin and F. M. Yahaya, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **1092**, 012067 (2021a). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1092/1/012067>
- [9] Mamta, Anshu, and A. Singhal, *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)* **5**, (3) (2017). (ICADEMS – 2017).
- [10] B. A. Solahuddin and F. M. Yahaya, *Civ. Eng. J.* **7**, 94 (2022). <https://doi.org/10.28991/CEJ-SP2021-07-07>
- [11] A. Solahuddin and F. M. Yahaya, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **682**, 012006 (2021b). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012006>
- [12] O. M. Okeyinka and O. J. Idowu, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **4**, 724 (2014). <https://doi.org/10.48084/etasr.485>
- [13] D. M. de Oliveira *et al.*, *Polymers* **15**, 426 (2023). <https://doi.org/10.3390/polym15020426>
- [14] S. P. Sangeetha, R. Divahar, and P. S. Aravind Raj, *Trends Ind. Eng. Appl. Manuf. Process* (Springer, 2022) pp. 1–10. <https://doi.org/10.9734/bpi/tier/v1/2363b>
- [15] V. Hospodarova, N. Stevulova, J. Briancin, and K. Kostelanska, *Buildings* **8**, 43 (2018). <https://doi.org/10.3390/buildings8030043>
- [16] S. Liuzzi, C. Rubino, F. Martellotta, and P. Stefanizzi, *Appl. Sci.* **13**, 4710 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13084710>
- [17] T. Cardinale, M. D'Amato, R. Sulla, and N. Cardinale, *Appl. Sci.* **11**, 1011 (2021). <https://doi.org/10.3390/app11031011>
- [18] B. Mandili, M. Taqi, A. El Bouari, and M. Errouaiti, *Constr. Build. Mater.* **229**, 117097 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117097>
- [19] H. Hong, W. Huang, H. Zhao, X. Hong, and D. Hong, *Polymers* **13**, 3119 (2021). <https://doi.org/10.3390/polym13183119>
- [20] Biblioteca del Congreso Nacional, *Ley Chile* (2016). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>
- [21] I. A. Shah, S. Amjed, and N. A. Alkathiri, *J. Bus. Econ. Manag.* **20**, 43 (2019). <https://doi.org/10.3846/jbem.2019.6809>
- [22] U. W. Robert, S. E. Etuk, and O. E. Agbasi, *Momento* **71**, 65 (2025). <https://doi.org/10.15446/mo.n71.119616>
- [23] Grupo PCC, *PCC Group Product Portal* (2025). Recuperado 3 de octubre de 2025 de <https://www.products.pcc.eu/es/k/industria-de-pulpa-y-papel/>
- [24] AMED, *¿De qué está hecho el papel? La ciencia detrás de la producción de papel* (2025). <https://amed-us.com/es/news/de-que-esta-hecho-el-papel-la-ciencia-detras-de-la-produccion-de-papel/>
- [25] K. Dölle, *J. Eng. Res. Rep.* **23**, 39 (2022). <https://doi.org/10.9734/jerr/2022/v23i317599>
- [26] V. Sangrutsamee, P. Srichandr, and N. Poolthong, *J. Asian Archit. Build. Eng.* **11**, 147 (2012). <https://doi.org/10.3130/jaabe.11.147>
- [27] Biblioteca del Congreso Nacional, *Ley Chile* (1992). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=8201>
- [28] Instituto Nacional de Normalización (INN), *NCh1079:2019 ES. Arquitectura y construcción – Zonificación climática y térmica para el diseño de edificaciones* (2019). <https://ecommerce.inn.cl/nch10792019-es74937>
- [29] Instituto Nacional de Normalización (INN), *NCh2785:2003 ISO 140-4:1998. Acústica – Medición de aislación acústica en construcciones y elementos de construcción – Mediciones en terreno de la aislación acústica aérea entre recintos* (2003).
- [30] Instituto Nacional de Normalización (INN), *NCh1038:2009 Hormigón – Ensayo de tracción por flexión* (2009).
- [31] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, *Nueva Reglamentación Térmica* (2025). Recuperado 16 de octubre de 2025 de <https://www.minvu.gob.cl/nueva-reglamentacion-termica/>



Análisis sísmico dinámico no lineal de una edificación de seis niveles con disipadores histeréticos mediante openseespy

Nonlinear dynamic seismic analysis of a six-story building with hysteretic dampers using openseespy

Luis Musaja Chura¹, Ronny Coaquira Huanca², Wilber Mendoza Ramirez³, Arleth Mendoza Chura⁴

¹Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, luis.musaja@unjbg.edu.pe

²Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, rcoaquirah@unjbg.edu.pe

³ Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú, wmendozar@unjbg.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-8960-1835>

⁴ Universidad de Salamanca, Salamanca, España, idu069463@usal.es, <https://orcid.org/0009-0006-0997-0769>

The main objective of this study is to evaluate the seismic performance of a building through the incorporation of hysteretic dampers, using OpenSeesPy. The sample is a six-story building with a frame structural system, located in the city of Tacna. Through nonlinear time-history dynamic analysis, it was observed that the incorporation of hysteretic dampers reduced roof displacements by an average of 49% and drifts by 52%, complying with the requirements of ASCE/SEI 7-22 and Peruvian Technical Standard E.030. In conclusion, this study demonstrated that the implementation of hysteretic dampers in frame-system buildings contributes to improving their seismic performance under severe loads, but these findings should be corroborated with further seismic analysis studies using OpenSeesPy to strengthen their validation.

Keywords: Nonlinear dynamic seismic analysis, OpenSeesPy, hysteretic dampers.

El presente estudio, tiene como objetivo principal evaluar el desempeño sísmico de una edificación mediante la incorporación de disipadores histeréticos, empleando OpenSeesPy, tomando como muestra una edificación de seis niveles con sistema estructural aporticado, ubicada en la ciudad de Tacna. Mediante el análisis dinámico no lineal tipo tiempo-historia, se observó que la incorporación de disipadores histeréticos redujo en promedio un 49 % los desplazamientos de techo y un 52% las derivas, cumpliendo con lo establecido por la norma ASCE/SEI 7-22 y la Norma Técnica Peruana E.030. En conclusión, se comprobó en el presente estudio que la implementación de disipadores histeréticos en edificaciones de sistema de pórticos contribuye a mejorar su desempeño sísmico frente a solicitaciones severas, pero deben ser corroboradas con más estudios de análisis sísmicos empleando el OpenSeesPy para reforzar su validación.

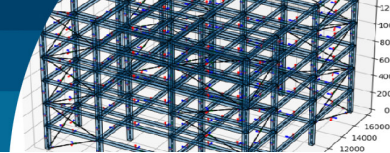
Palabras clave: Análisis sísmico dinámico no lineal, OpenSeesPy, disipadores histeréticos.

Introducción

Por su naturaleza, el Perú es un país con elevada actividad sísmica especialmente porque se encuentra en el Cinturón de Fuego del Pacífico (Tavera, 2020), el cual alberga numerosos límites de placas y zonas de subducción, lo que provoca frecuentes terremotos y erupciones volcánicas (Koketsu y Furumura, 1999), siendo responsable de aproximadamente el 90% de los terremotos en el mundo (Roqué et al. 2023).

El epicentro de la mayor cantidad de terremotos en Perú se localiza frente a la línea costera, desde Tumbes hasta Tacna, frecuentemente alcanzando magnitudes considerables que, en superficie, han provocado muerte y devastación (Tavera, 2020).

Esto en contraparte resulta de un peligro inminente, puesto que, según Goñi et al. (2019) más del 80% de las viviendas dentro del país son autoconstruidas, ocasionando diferentes errores constructivos que conllevan a que el 70% de estas



viviendas no tengan garantías para soportar un gran sismo. Debido a esto, Lewis (2003) reafirma la necesidad de mejorar el desarrollo de la construcción en los países propensos a terremotos, incluidos los edificios urbanos de varios pisos y los pequeños edificios autoconstruidos, esto acompañado de la concientización y microzonificación de riesgos.

Es por ello que, ante esa problemática resulta prudente reforzar las edificaciones mediante la aplicación de disipadores histeréticos, puesto que su aplicación en estructuras de concreto armado tienen un impacto significativo en el comportamiento sísmico.

Los estudios demuestran que los disipadores reducen considerablemente las respuestas estructurales de las edificaciones, especialmente los desplazamientos y derivas, reportando reducciones promedio del 48% en los desplazamientos y del 58% en las derivas máximas (Orocillo, 2024), esto resulta prudente puesto que dichos dispositivos actúan en el rango no lineal, previniendo daños estructurales al incursionar en el rango inelástico antes que los elementos principales (Caballero et al., 2023).

Además, se han identificado balances óptimos de rigidez que conducen a mecanismos últimos satisfactorios, donde los disipadores desarrollan su máxima ductilidad mientras el marco principal permanece elástico o con fluencias incipientes (Tena y Gama, 2017).

Metodología

Descripción del edificio analizado

El presente estudio se desarrolla en un edificio multifamiliar de seis niveles, con sistema estructural aporricado, ubicado en la ciudad de Tacna. La edificación presenta un área aproximada de 236,25 m² por planta. A partir del plano de estructuras del aligerado de la (Figura 1) se identificaron las características geométricas de los elementos más representativos: la losa aligerada cuenta con un espesor de 200 mm; las columnas poseen sección rectangular de 300 mm × 500 mm; las vigas principales presentan dimensiones de 250 mm × 550 mm; las vigas secundarias, de 250 mm × 500 mm; y las vigas de techo, de 250 mm × 350 mm.

En la (Figura 2) se observa la sección de la columna y en la (Figura 3) las secciones de las vigas, así como la

distribución de los aceros longitudinales y transversales que el primer nivel alberga, en los demás niveles superiores presentan la misma distribución típica.

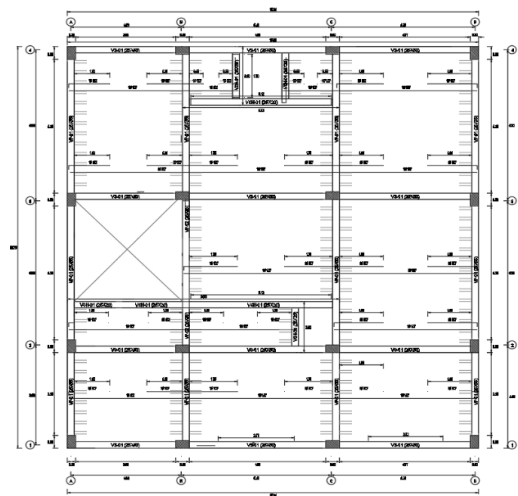


Figura 1: Plano de la Estructura.

CUADRO DE COLUMNA GENERAL

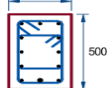
ZONA	TIPO	C-01
Nivel 1	Sección	300 X 500
	As	12 Ø 5/8"
	Graphic Scanning	
	Estrido	2 Ø 3/8" 1 @50, 6 @100, Rto @250

Figura 2: Sección Transversal de la Columna.

CUADRO DE VIGAS

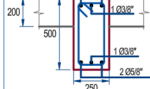
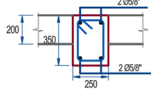
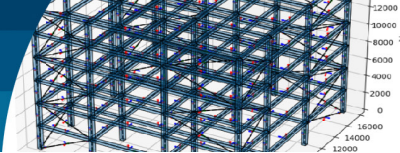
ZONA	TIPO	VP-01	VS-01	VT-01
Nivel 1	Sección	250 X 550	250 X 500	250 X 350
	Graphic Scanning			
	Estrido	Ø 1 Ø3/8" 1 @50, 10 @100, Rto @200	Ø 1 Ø3/8" 1 @50, 10 @100, Rto @200	Ø 1 Ø1/4" 1 @50, 4 @100, Rto @250

Figura 3: Sección Transversal de las Vigas.

Tratamiento de registros sísmico

Para el análisis dinámico no lineal tiempo-historia se seleccionó un conjunto de 11 registros acelerográficos del Pacific Earthquake Engineering Research Center



(PEER), esto debido a la falta de registros sísmicos de la zona de estudio, por lo cual se consideraron sismos que proporcionen un espectro de aceleración similar al espectro de diseño de la Norma E.030 de Perú, por lo tanto, los resultados serán acorde a los sismos considerados.

Siguiendo lo indicado por el artículo 16.2.3.2. de la Norma ASCE 7-22, se construyó el espectro de dirección máxima combinando los dos componentes ortogonales de cada sismo para identificar la orientación que genera la mayor demanda sobre la estructura. Esto debido a que las estructuras no siempre experimentan su mayor demanda en una de las dos direcciones ortogonales (componentes “X” y “Y”), en ese sentido, la dirección más crítica puede ser una combinación de las dos componentes, ello implica el sismo de dirección máxima.

A partir de los registros rotados se construyeron los espectros de pseudo-aceleración, los cuales se escalan para aproximarse al espectro de diseño de la Norma Técnica Peruana E.030, de acuerdo a la Tabla 1.

Tabla 1: Registros sísmicos escalados

Nº	Nombre de Terremoto	Año	Nombre de Estación	Magnitud (Mw)	PGA (mm/s2)
1	Imperial Valley-02	1940	El Centro Array #9	6.95	1747.00
2	San Fernando	1971	Pacoima Dam	6.61	6741.40
3	Managua Nicaragua-01	1972	Managua ESSO	6.24	3005.90
4	Friuli Italia-01	1976	Tolmezzo	6.50	2716.80
5	Imperial Valley-06	1979	Delta	6.53	1394.30
6	Tabas Iran	1978	Tabas	7.35	6290.90
7	Landers	1992	Coolwater	7.28	1731.20
8	Kocaeli Turkey	1999	Duzce	7.51	2023.10
9	Chi-Chi Taiwan	1999	CHY028	7.62	3367.30
10	Victoria Mexico	1980	Cerro Prieto	6.33	2868.20
11	Corinth Greece	1981	Corinth	6.60	1089.10

La Figura 4 muestra los espectros de pseudo-aceleración cumpliendo con el criterio normativo de que el promedio de los espectros escalados no sea inferior al 90 % del espectro objetivo en el rango de períodos críticos (0.12–0.93 s), los cuales se obtuvieron siguiendo el criterio dado

por el artículo 16.2.3.1. de la ASCE 7 – 22, teniendo un rango entre 0.2 y 1.5 veces el periodo fundamental, según la Tabla 2.

Tabla 2: Modos de vibración de la estructura sin disipadores

Modo	Periodo (s)	Modo	Periodo (s)	Modo	Periodo (s)
1	0.608	7	0.111	13	0.060
2	0.594	8	0.110	14	0.058
3	0.501	9	0.092	15	0.051
4	0.196	10	0.076	16	0.049
5	0.192	11	0.076	17	0.048
6	0.161	12	0.063	18	0.041

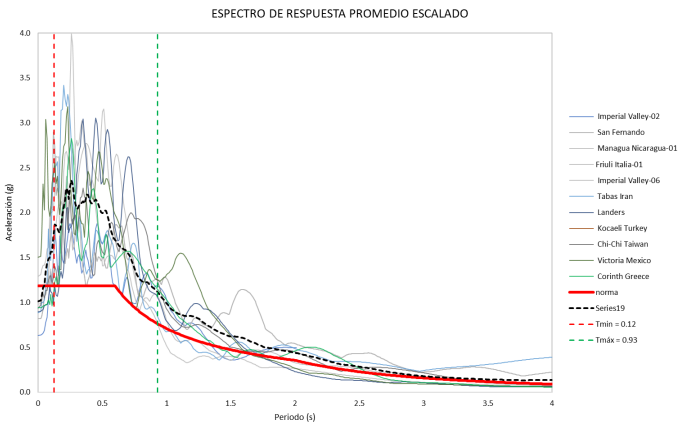


Figura 4: Espectro Compatibilizado de Pseudo-Aceleraciones.

Disipadores de barras de pandeo restringido (CRP)

Este es un dispositivo diagonal, que está expuesto tanto a cargas axiales de tracción como a las de compresión, tal como se observa en la Figura 5.

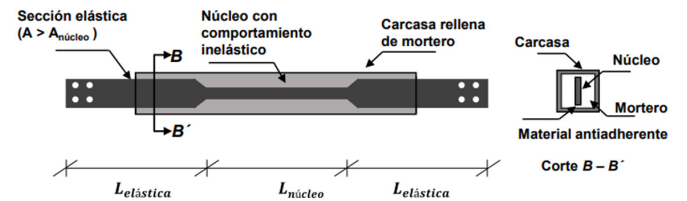
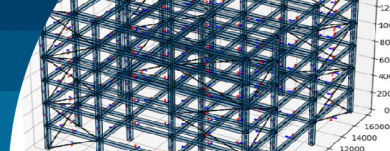


Figura 5: Esquema típico de un Disipador Tipo CRP. Extraído de Diseño Óptimo del Refuerzo Estructural, mediante Disipadores CRP, para la Adecuación del Desempeño Sísmico de Estructuras Aporticadas de Hormigón Armado (p. 6), por L. Velasco, 2021.

Cuando se le inducen cargas cíclicas, estas generan fluencia y, por ende, transforman la energía mecánica en calor, dicho mecanismo se refleja en una curva histerética,



la cual evidencia la disipación sostenida de energía, tal como se muestra en la Figura 6.

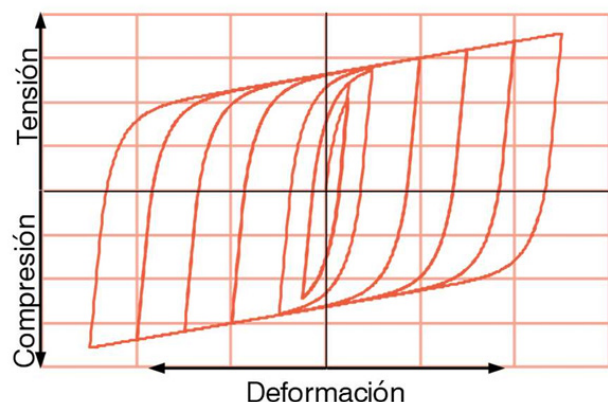


Figura 6: Curva histerética de un Disipador Tipo CRP. Extraído de Características Generales del Disipador Dampo Dual Protect por Dampo.

El dispositivo utilizado en la investigación presenta las siguientes dimensiones y características según la Figura 7.

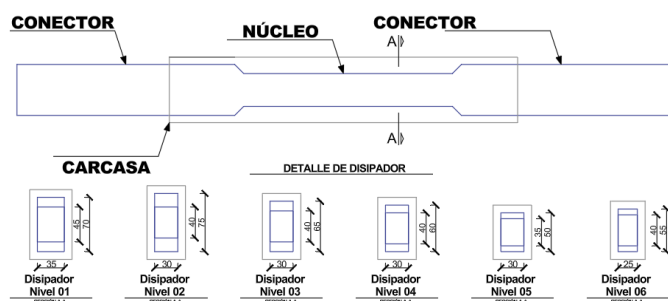


Figura 7: Sección transversal del Disipador Tipo CRP.

Modelado en OpenSeesPy

Para el análisis dinámico no lineal se empleó el software OpenSeesPy, con el objetivo de evaluar la respuesta estructural más allá del rango elástico, permitiendo que los materiales desarrollen deformaciones permanentes. El modelo numérico consideró la caracterización no lineal del concreto y del acero de refuerzo, así como la discretización mediante secciones tipo fibra y la representación de elementos estructurales con capacidad de formación de rótulas plásticas.

Asimismo, OpenSeesPy se eligió debido a su disposición de código abierto, teniendo gran cantidad de módulos para el análisis de estructuras, destacando el algoritmo “KrylovNewton”, utilizado para análisis no lineales, de

igual manera “NormDispIncr”, el cual permite ajustar las tolerancias en las iteraciones y el integrador temporal “Newmark”, para la solución de ecuaciones dinámicas.

Concreto

El comportamiento a compresión del concreto se representó utilizando el modelo hognestad con el comando Concrete02 en OpenSeesPy, lo que permite modelar la degradación de resistencia conforme aumenta la deformación a compresión (Figura 8).

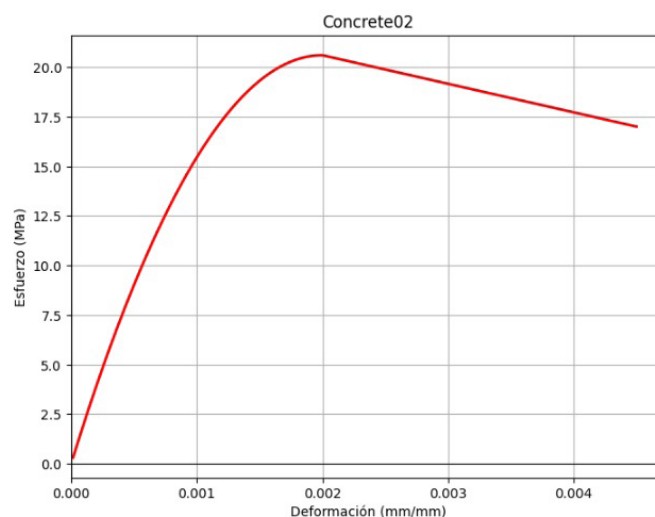


Figura 8: Diagrama Esfuerzo – Deformación del Concreto.

Acero

El acero de refuerzo se modeló mediante una relación esfuerzo-deformación bilineal, implementada en OpenSeesPy mediante el comando Steel01 (Figura 9).

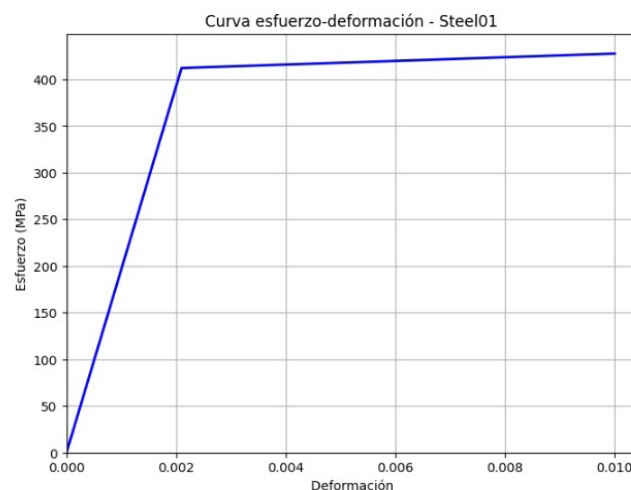
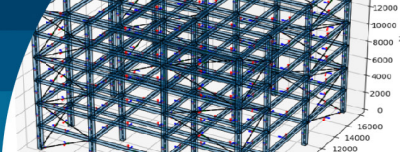


Figura 9: Diagrama Esfuerzo - Deformación del Acero.



Secciones tipo fibra

Las secciones de las columnas y vigas se discretizaron mediante el comando section ('Fiber'), utilizando parches rectangulares de concreto subdivididos en mallas de fibras para representar tanto el núcleo como el recubrimiento (Figura 10).

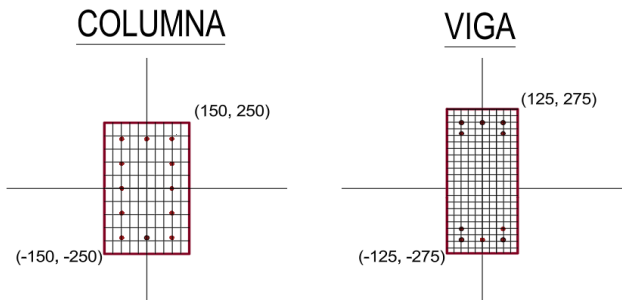


Figura 10: Secciones fibra de una columna y una viga.

El refuerzo longitudinal se definió mediante el comando layer ('straight'), distribuyendo simétricamente las fibras de acero en las zonas extremas y centrales de las secciones, con áreas equivalentes a diámetros comerciales. De forma análoga, las vigas principales se modelaron incorporando fibras de acero.

Plastificación Distribuida

Se adoptó el esquema de integración HingeRadau, concentrando la no linealidad en las zonas críticas de vigas y columnas, mientras que la zona central se mantuvo predominantemente elástica.

Modelo analizado

Modelo con disipadores: Se incorporaron dispositivos de disipación de energía tipo CRP en distintos niveles del edificio. Su comportamiento hysterético se representó en OpenSeesPy mediante materiales uniaxiales definidos. En la Figura 11 se observa el modelo con disipadores, las barras en forma de diagonales representan a los disipadores CRP.

Resultados Desplazamientos de Azotea

Los desplazamientos se monitorearon en el nodo maestro del último nivel, ubicado en el nivel superior (nivel 06) de la edificación. El análisis dinámico no lineal tiempo-historia se realizó considerando únicamente la dirección de máxima aceleración para cada registro. La Figura 12

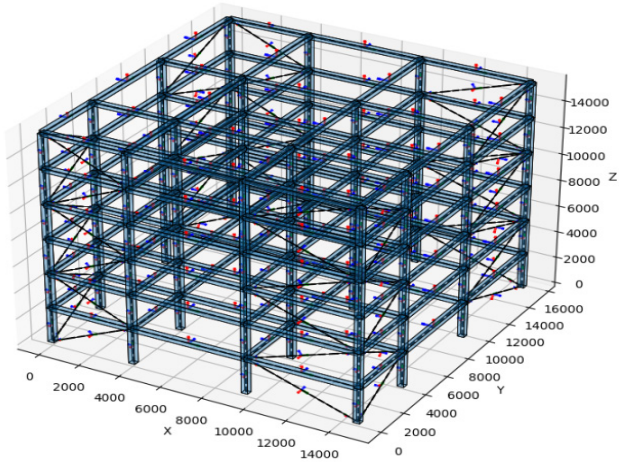


Figura 11: Modelo con disipadores hystereticos en OpenSeesPy.

muestra el historial temporal de desplazamientos del nodo maestro, comparando la respuesta estructural del edificio con y sin disipadores de energía.

Del análisis de la Figura 12, se aprecia que la estructura presenta una deformación permanente producto de su incursión en el rango no lineal, para casi todas las acciones sísmicas; no sucediendo lo mismo con la estructura con dispositivos CRP, ya que se vuelve más rígida al considerar estos dispositivos, su incursión no lineal solo se aprecia en algunos sismos, por ejemplo, el sismo 12 (Kocaeli Turkey 1999). De igual forma, se observa una reducción significativa en los desplazamientos máximos del nivel superior al incorporar disipadores de energía. Esta disminución se cuantifica de manera más clara en la Tabla 3.

Tabla 3: Reducción de Respuesta en Techo por Efecto de Disipadores

Nº	TERREMOTO	Sin Disipadores (mm)	Con Disipadores (mm)	Reducción (%)
1	Imperial Valley 02	66.3819	40.1786	39.47%
3	San Fernando	75.8437	42.2193	44.33%
4	Managua Nicaragua 01	83.5878	41.8242	49.96%
5	Friuli Italy 01	92.3606	42.0809	54.44%
6	Imperial Valley 06	82.2259	34.9918	57.44%
9	Tabas Iran	68.991	41.8796	39.30%
11	Landers	67.3393	34.1402	49.30%
12	Kocaeli Turkey	68.7106	37.8571	44.90%
13	Chi Chi Taiwan	90.9973	44.6112	50.98%
16	Victoria Mexico	85.2895	38.0662	55.37%
18	Corinth Greece	86.3408	37.5492	56.51%

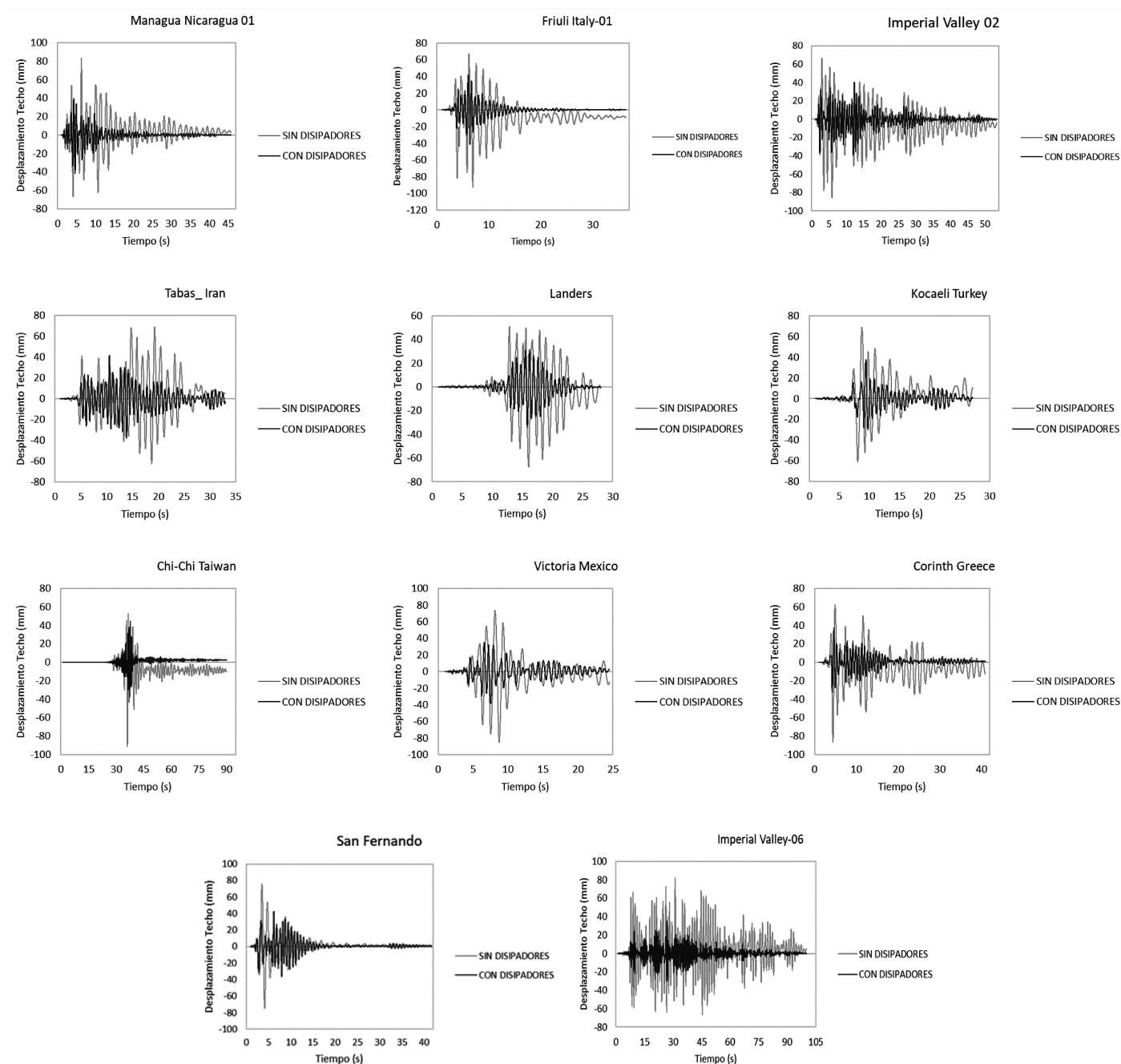
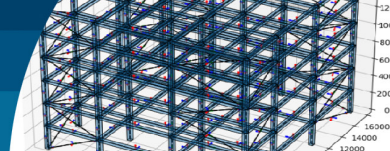


Figura 12: Desplazamientos Máximos de Azotea.

Tal como se evidencia en la Tabla 3, la cual muestra una disminución en los desplazamientos, y conjuntamente con lo observado en la Figura 12, donde se aprecia una reducción del periodo de la estructura y un comportamiento no tan alejado del eje de equilibrio, se infiere que los disipadores incrementan la rigidez de la estructura.

Derivas

Para el análisis comparativo, se definieron dos umbrales

de control de derivas: para la edificación sin disipadores de energía se consideró un límite de 0.007, de acuerdo con la Norma Técnica Peruana E.030 para estructuras de concreto armado; en los modelos con disipadores, se empleó un criterio más estricto, adoptando un límite de 0.005, correspondiente al nivel “Operacional” definido por la norma ASCE 41-17. La Figura 13 muestra las derivas máximas por piso obtenidas para un conjunto representativo de 11 registros sísmicos.

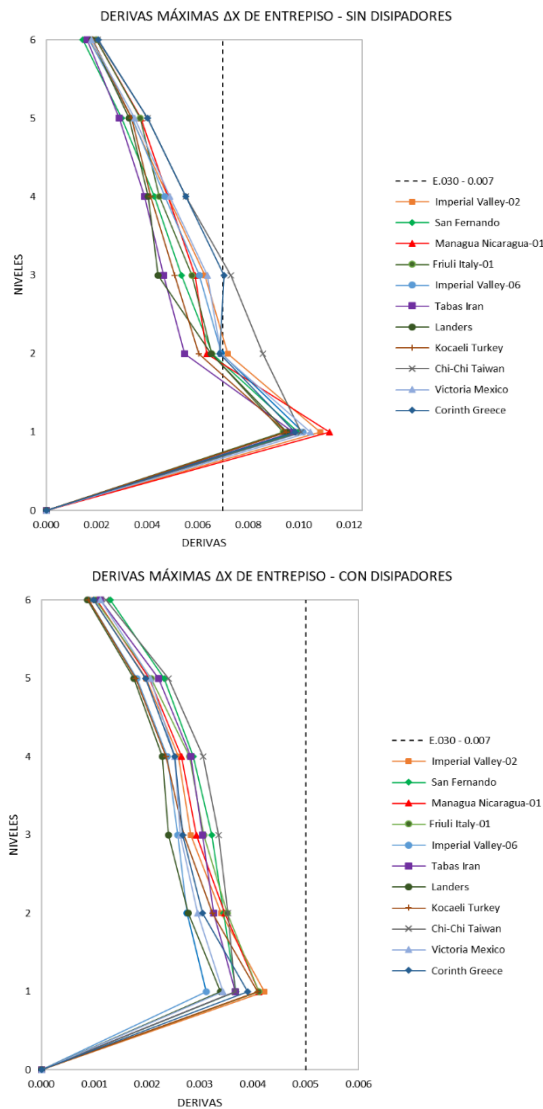
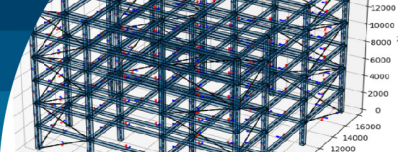


Figura 13: Derivas de Entrepiso

Tabla 4: Reducción de Derivas por Efecto de Disipadores

TERREMOTO	Deriva Máx Sin (%)	Deriva Máx Con (%)	Reducción Máx (%)	Deriva Prom Sin (%)	Deriva Prom Con (%)	Reducción Prom (%)
Imperial Valley 02	0.0109	0.0042	61.09%	0.0057	0.0027	53.18%
San Fernando	0.0100	0.0037	63.02%	0.0051	0.0028	44.97%
Managua Nicaragua 01	0.0112	0.0041	63.35%	0.0057	0.0027	52.19%
Friuli Italy 01	0.0094	0.0041	56.12%	0.0053	0.0028	47.87%
Imperial Valley 06	0.0102	0.0031	69.24%	0.0055	0.0023	58.90%
Tabas Iran	0.0098	0.0037	62.36%	0.0047	0.0027	42.84%
Landers	0.0095	0.0034	64.47%	0.0049	0.0023	54.46%
Kocaeli Turkey	0.0095	0.0041	56.87%	0.0050	0.0025	49.69%
Chi Chi Taiwan	0.0101	0.0037	63.64%	0.0063	0.0029	54.10%
Victoria Mexico	0.0105	0.0034	67.18%	0.0057	0.0025	56.63%
Corinth Greece	0.0099	0.0039	60.34%	0.0059	0.0025	57.23%

La comparación evidencia que la implementación de disipadores reduce significativamente las derivas entre pisos, especialmente en los niveles superiores, confirmando la efectividad del sistema de disipación en el control de deformaciones laterales y su cumplimiento con los límites normativos establecidos. Esta disminución se cuantifica de manera más clara en la Tabla 4.

Comparación

La validación parcial se llevó a cabo mediante la comparación de los desplazamientos máximos del nivel superior, para un caso de sismo. La comparación se centró en el modelo con disipadores, ya que es el escenario más importante para propósitos de esta investigación, los valores se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Desplazamientos Máximos y Mínimos - OpenSeesPy vs SAP2000

Desplazamiento (mm)	OpenSeesPy	Sap2000	Error relativo (%)
Máximo	33.87	31.35	8.03%

La Figura 14 presenta la comparación de los historiales temporales de desplazamientos del nivel superior obtenidos mediante ambos softwares.

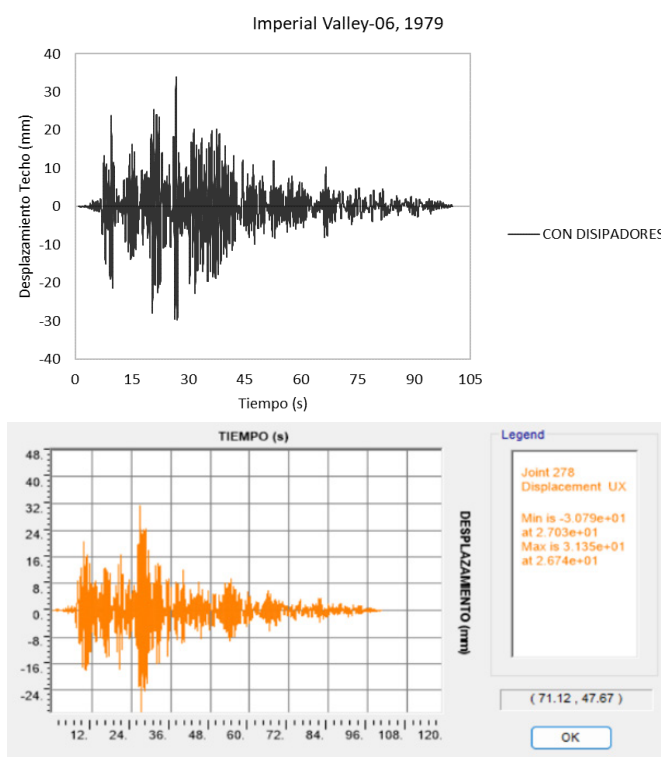


Figura 14: Historial de Desplazamiento de Azotea

Discusión

Los resultados presentados en las Figura 13, así como en la Tabla 4, muestran que la incorporación de disipadores histeréticos generó una reducción significativa tanto en las derivas máximas de entrepiso como en los desplazamientos globales del techo, en comparación con el modelo sin disipadores. Estas reducciones se mantuvieron dentro de los límites normativos establecidos por la norma ASCE 41-17 y la Norma Técnica Peruana E.030, lo que demuestra que el sistema estructural modificado cumple con los requisitos de seguridad y desempeño sísmico.

De acuerdo con Mendez y Olivares (2024), OpenSeesPy combina la robustez del motor de análisis OpenSees con la flexibilidad de Python, permitiendo automatizar procesos, realizar análisis secuenciales y modificar parámetros con facilidad. Esto se evidenció en el presente estudio al comparar la velocidad de ejecución entre OpenSeesPy y SAP2000, obteniéndose una diferencia promedio de 10 minutos a favor de OpenSeesPy, especialmente en registros sísmicos con mayor número de puntos. Esta eficiencia permitió realizar múltiples análisis en menor tiempo, lo cual es fundamental para realizar análisis no lineales a gran escala.

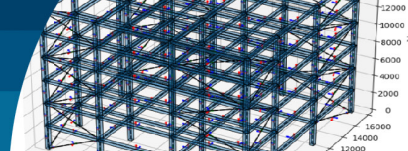
Asimismo, los resultados obtenidos fueron consistentes con los reportados en estudios previos. Por ejemplo, Mendez y Olivares (2024) desarrollaron modelos similares con OpenSees para estructuras aporticadas de concreto armado, encontrando respuestas dinámicas comparables a las obtenidas con software comerciales como SAP 2000. Del mismo modo, Contreras et al. (2021) reportaron diferencias menores al 8.5 % entre los desplazamientos y derivas calculadas en OpenSees y SAP2000. En concordancia con estos antecedentes, el análisis realizado en el presente estudio, utilizando el registro sísmico del Imperial Valley, evidenció una diferencia del 8.03 % en el desplazamiento de azotea entre el modelo con disipadores simulado en OpenSeesPy y su réplica en SAP2000 (ver Tabla 5). Esta similitud numérica respalda el modelo propuesto elaborado con OpenSeesPy, sin embargo, es importante la necesidad de realizar investigaciones adicionales que amplíen y profundicen la comparación entre estos 2 softwares.

De la misma manera, es importante señalar que, si bien, la estructura con disipadores presenta un periodo relativamente bajo, pudiendo haberse utilizado otras tecnologías, la presente investigación se centró en demostrar la eficacia y aplicabilidad de los disipadores CRP correspondiente a la realidad constructiva predominante en la Región Tacna.

Conclusiones

Se logró evaluar el desempeño sísmico no lineal mediante modelos desarrollados en OpenSeesPy, encontrando que la implementación de disipadores histeréticos permitió reducir los desplazamientos máximos de techo hasta en un 57% y las derivas máximas hasta en un 69%. Estos resultados demuestran que la estructura con disipadores cumple con los límites establecidos por la norma ASCE 41-17 (0.5%) y la E.030 (0.7%), mejorando significativamente su comportamiento frente a eventos sísmicos.

Se construyó un código de análisis dinámico no lineal para una edificación de seis niveles utilizando OpenSeesPy. La estructura fue modelada con elementos tipo fibra, lo que permitió representar adecuadamente la no linealidad del concreto y del acero mediante los modelos constitutivos de Hognestad y el modelo bilineal idealizado, respectivamente. El análisis tiempo-historia se realizó con registros sísmicos escalados en función de la Norma ASCE 7-22.

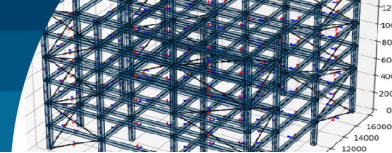


Se implementaron disipadores histeréticos CRP tipo barra en configuración diagonal, logrando una reducción promedio del 49% en desplazamientos de techo y del 52% en derivas, en comparación con el modelo sin disipadores. En el caso más crítico (sismo Imperial Valley-02), la deriva máxima con disipadores fue de 0.42%, valor que permanece dentro del límite normativo.

Se reconoce que los modelos utilizados en la presente investigación permiten evaluar adecuadamente la respuesta dinámica no lineal, futuras investigaciones deberán considerar diferentes parámetros estructurales, variabilidad de registros, y configuraciones alternativas de los disipadores, con el fin de ampliar la validez de los resultados y consolidar conclusiones más generales.

Referencias

- ASCE (2017). ASCE standard, ASCE/sei, 41–17: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings.
- ASCE (2022). ASCE standard, ASCE/sei, 7-22: Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures.
- Caballero, L., Cano, H., Molina, M. y Villalba, J. (2023). Propuesta de modelación numérica de disipadores histeréticos metálicos tipo TADAS, en edificaciones de pórticos de concreto y acero. *Revista EIA*, 20(40), 1-20. <https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1688>
- Computers and Structures, Inc. (CSI). (2025). SAP2000 (versión 25) [Software]. <https://www.csiamerica.com>
- Contreras, N., Hernández, F., Bazáez, R., Astroza, R., Ochoa, F., y Pastén, C. (2022). Análisis de la respuesta no lineal tiempo-historia del Puente Águila Norte usando OpenSees y SAP2000. Universidad de Chile. <https://www.researchgate.net/publication/359222734>
- Dampo. (s.f.). Características Generales del Disipador Dampo Dual Protect [Catálogo]. <https://www.dampo.com.mx/disipador-dampo-dual-protect/>
- Göni, W., Maquin, N., Rodríguez, J., y Moran, Y. (2019). Analysis of Constructive Errors in masonry confined in Highly Seismic Countries and Reinforcement of Walls with Galvanized Mesh. *Revista MATEC Web of Conferences*, 303(2), 1-6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201930304001>
- Guerrero, D. y Maza, G. (2020). Análisis no lineal de estructuras regulares de acero con pórticos especiales resistentes a momento utilizando OpenSees y Ceinci-Lab. *Revista Green World Journal*, 5(5), 1-23. <https://doi.org/10.53313/gwj51013>
- Hognestad, E. (1951). *A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members*. University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series No. 399, Bulletin No. 1.
- Koketsu, K., y Furumura, T. (1999). Imaging earthquake fault rupture and simulating seismic ground motion. *Revista Geophysics*, 18(12), 1414-1416. <https://doi.org/10.1190/1.1438238>
- Lewis, W. J. (2003). *Tension structures: Form and behaviour*. Thomas Telford Publishing.
- Mendez, L. y Olivares, E. (2024). Análisis dinámico de una estructura de concreto armado de 4 niveles de sistema aporticado con la aplicación del software OpenSees [Tesis para título, Universidad César Vallejo]. Repositorio de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/147356>
- Ministerio de Vivienda y Construcción (2019). Norma E.030: Diseño Sismorresistente de Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Orocollo, H. (2024). Análisis comparativo del comportamiento sísmico de disipadores histeréticos SLB, TADAS y disipadores sísmicos de fluido-viscoso aplicados en la infraestructura de la Universidad Tecnológica del Perú de Tacna – 2024. [Tesis de Maestría, Universidad Privada de Tacna]. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/3717>
- Pimiento, J., Salas, A. y Ruiz, D. (2014). Desempeño sísmico de un pórtico con disipadores de energía pasivos de placas ranuradas de acero. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(3), 283-198. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300005>
- Roque, P., Violanda, R., Bernido, C., y Soria, L. (2023). Earthquake occurrences in the Pacific Ring of Fire exhibit a collective stochastic memory for magnitudes, depths, and relative distances of events. *Research Center for Theoretical Physics*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4450059>
- Ruiz-García, J. y Miranda, E. (2006). Residual displacement ratios for assessment of existing structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(3), 315–336. <https://doi.org/10.1002/EQE.523>

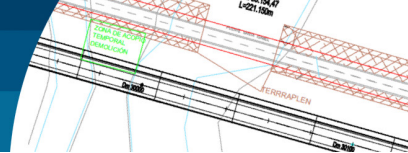


Saldaña, K. y Scaletti, H. (2022). Eficiencia de los disipadores de energía en la respuesta sísmica de los edificios. *Revista Tecnia*, 32(2), 127–137. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v32i2.1379>

Tavera, H. (2020). Terremotos vs. sismos: frases y reflexiones para recordar. Instituto Geofísico del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4851>

Tena, A., y Gama, A. (2017). Determinación de parámetros de diseño sísmico para marcos dúctiles de concreto reforzado con disipadores de energía histeréticos. *Revista SulAmericana de Engenharia Estrutural*, 14(1), 36–58. <http://dx.doi.org/10.5335/rsace.v14i1.6496>

Velasco, L., Guerrero, H. y Hospitaler, A. (2025). Seismic optimization of buckling restrained brace mid rise frames by metaheuristics and machine learning surrogate models. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 68(62). <https://doi.org/10.1007/s00158-025-04000-3>



Economía circular en contratos de la dirección de vialidad: aplicación a la demolición del puente Santalsabel en la región de Ñuble

Circular economy in highway directorate contracts: application to the demolition of the Santa Isabel bridge in the Ñuble Region

Javier Díaz¹, Marcelo Márquez²

¹Universidad Federico Santa María, Valparaíso, Chile, javier.diazg.14@sansano.usm.cl

² Dirección de Vialidad, Santiago, Chile, marcelo.marquez@mop.gov.cl

Como parte de las etapas del ciclo de vida de un puente están, entre otras, el diseño, la ejecución y la operación. En Chile existen puentes en operación que están cercanos a cumplir con su vida útil de diseño, e incluso hay casos en los cuales se ha visto superada. Cuando se planifica la reposición de un puente debe tomarse la decisión de si la estructura antigua debe demolerse. Desde el año 2021, y para todas las obras de construcción de la Dirección de Vialidad se incluye la partida Plan de Gestión de Residuos de la Construcción que aborda las actividades de demolición desde la perspectiva del uso eficiente de los residuos. El presente trabajo tiene como objetivo presentar la experiencia en la aplicación de dicha partida en la demolición del puente Santa Isabel, como parte

del contrato Reposición Ruta N-59-Q Chillán-Yungay, Región de Ñuble, siendo este caso la primera vez que aplica para un activo vial tipo puente. En primer término se analizan los aspectos administrativos contractuales, luego se desarrollan los aspectos técnicos del contrato y de la demolición para finalizar entregando conclusiones y propuesta para futuros proyectos. Entre los resultados destacados se puede comentar que aplicar el Plan de Gestión de Residuos de la Construcción en el contrato ha permitido clasificar, seleccionar y segregar materiales para su reutilización y valorización además de minimizar los volúmenes de residuos derivados a disposición final.

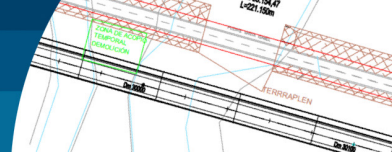
Palabras Clave: Economía circular, puentes, demolición, gestión de residuos inertes.

Introducción

Los puentes son estructuras críticas de la infraestructura civil debido a que garantizan la conectividad de la red vial. De acuerdo al catastro actualizado a diciembre de 2021 la Dirección de Vialidad tiene la tuición de 6.781 puentes. En Chile los puentes se diseñan y construyen empleando distintos materiales, como hormigón armado, hormigón pre esforzado, acero estructural, madera, entre otros, siguiendo los requerimientos establecidos en el Manual de Carreteras. Los puentes viales se diseñan en la mayoría de los casos para una vida útil de 50 años, pero hoy en día existen puentes que están en operación que han sobrepasado largamente su vida útil. Por lo tanto, cuando se planifica la reposición de un puente se debe evaluar la conveniencia de mantener la estructura antigua o demolerla.

Con el fin de minimizar el impacto de dichos residuos y

favorecer la reutilización y su valorización, a partir del año 2021, todas las obras de construcción de la Dirección de Vialidad, han incluido la partida denominada *Plan de Gestión de Residuos de Construcción y/o Demolición (PRCD)*, que se relaciona con la Norma Chilena NCh3562 y con la Ley 20.920 (Ibáñez, 2023). Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) son residuos que provienen de la construcción de nuevos proyectos, de la rehabilitación, reparación y reacondicionamiento de obras existentes, de los procesos de preparación de terrenos y de la demolición de obras que han perdido su valor de uso o demoliciones que se generan por situaciones de catástrofe (NCh 3562:2019). Anteriormente en Chile, los RCD se conocían como RESCON (Residuos de Construcción), pero el concepto fue modificado con el objetivo de tener un estándar internacional en lo que respecta al manejo de residuos de construcción. Esta homologación de



conceptos busca ser el primer paso de Chile para lograr altos estándares de gestión de RCD.

Contar un de PRCD significa reducir, valorizar y realizar una disposición final adecuada asegurando su trazabilidad, cuyo objetivo es disminuir pérdidas económicas e impactos ambientales. Por esta causa, tal como se muestra en la Figura 1, la jerarquización de los residuos es fundamental, en el proceso donde su primera etapa es prevenir, luego, reutilizar, y reciclar, considerando su valorización y determinando con una buena disposición final de los residuos.



Figura 1. Jerarquización en el manejo de los residuos (Soto y Díaz, 2023)

Hoy en día la normativa apunta tener un estándar internacional en lo que respecta al manejo de residuos de construcción. Esta homologación de conceptos busca ser el primer paso de Chile para lograr altos estándares de gestión de los residuos generados por la construcción y demolición. Los RCD se clasifican en: residuos peligrosos y residuos no peligrosos. Por su parte los RCD no peligrosos se clasifican en residuos inertes y no inertes.

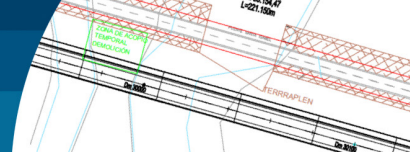
El enfoque del PRCD consiste en considerar lo que estipula la economía circular donde se considera una mirada integral a las actividades económicas en el marco de la sostenibilidad medioambiental. Esto implica un amplio abanico de campos en los cuales se replantean los procesos de producción, los patrones de consumo, el tipo y uso de los materiales, el transporte, la generación de energía, la cadena agroalimentaria, la generación y tratamiento de residuos entre otras. También se alinea con el acuerdo de París en el marco de la convención sobre el

cambio climático y al mismo tiempo con los objetivo de desarrollo sostenible de la agenda 2030 del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), en particular el número 12 que plantea: “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles y a través del cambio en los métodos de producción y consumo de los bienes y recursos se pueda reducir la huella ecológica para asegurar un crecimiento y desarrollo sostenible.”

Por todo lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es exponer la gestión desarrollada como parte de la demolición del puente Santa Isabel incluido en el contrato *Reposición Ruta N-59-Q, Sector Chillán - Yungay, Sector tramo IX, tramo Dm. 28.800,00 al Dm. 30.920,00, comunas de San Ignacio y el Carmen, Provincia Diguillín, Región del Ñuble* ya que es la primer vez que se aplica la partida *Plan de Gestión de Residuos de Construcción y/o Demolición (PRCD)* en un activo tipo puente. Como objetivos secundarios se tiene exponer la gestión realizada en el contrato en torno del plan antes indicado y mostrar los beneficios obtenidos en particular para la demolición del puente.

El contrato considera el mejoramiento de la ruta N-59-Q, el cual contempla modificar la geometría y el trazado en toda la ruta, además del ensanchamiento del perfil tipo actual. Se considera además el mejoramiento del sistema de seguridad vial, del sistema de saneamiento y drenaje de toda la ruta, la reposición y demolición del puente existente. Por otra parte se da solución a las distintas pasadas urbanas, ya sea con la implementación de equipamiento vial urbano como también por la implementación de medidas de seguridad, considerando cruces con ramales/pistas de viraje a la izquierda, en el cruce a la localidad de El Carmen debido a la cantidad de tránsito en el sector, el cual incluye por conceptos de seguridad vial proyectos de iluminación de los cruces. Como pavimento, se consideró una solución en base a mezclas asfálticas tradicionales.

El puente existente tiene fecha estimada de construcción en la década del año 1950. Presenta una longitud de 210 m y ancho de tablero de 7 m, con calzada de 6 m, tal como se muestra en la Figura 2. Posee 2 estribos de hormigón armado y 7 cepas tipo muro también de hormigón armado. El puente tiene una tipología estructural mixta, en 6 tramos la superestructura está conformada por 4 vigas de hormigón armado con losa de hormigón, en algunos tramos



se observan apoyos tipo Gerber, juntas del tipo cantonera metálica y aparatos de apoyo tipo metálicos (rodillo). En 2 tramos se considera el uso de vigas metálicas con losa colaborante en hormigón armado. Finalmente, también se aprecian tramos con un sistema de cajón en hormigón armado. Los dos tramos que presentan viga metálica corresponden a la reconstrucción del puente posterior al terremoto de 1960.

El puente fue construido con distintos materiales, entre los que se tiene hormigón armado y acero estructural, por lo que los materiales recuperables son el hormigón, las barras de refuerzo del hormigón armado y el acero estructural de las vigas.



Figura 2. Vista general puente Santa Isabel (Soto y Díaz, 2023)

Metodología para la gestión de RCD

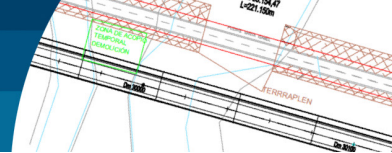
La metodología para la gestión de RCD presenta una serie de fases que se efectuaron en el puente Santa Isabel y que se detallan a continuación.

Primeramente, se analizan los antecedentes contractuales como son las bases de licitación y la oferta del contratista (Fernández et al., 2021), así como la normativa chilena que aplica al estudio. Las bases de licitación consideran como parte de las especificaciones técnicas, entre otros, el ítem 804-2 *Plan de Gestión Residuos de Construcción y/o Demoliciones (PRCD)*. Esta partida se refiere a las consideraciones que debe tener el contratista para el manejo sustentable de los residuos provenientes de la obra, de acuerdo a lo establecido en la NCh 3562 del año 2019. Para ello, previo al inicio de la obra, el contratista debe presentar un plan de gestión de todos los residuos que se genere incluyendo los asimilables a domiciliarios. El plan deberá establecer, entre otros:

- La jerarquía en el manejo de los residuos, los recursos para su implementación, así como el establecimiento de medidas para la prevención de la generación de RCD en la obra objeto del proyecto.
- La persona responsable de la gestión de los RCD en la obra. Entre otras funciones, el responsable debe implementar, monitorear e informar sobre el estado del plan de gestión de RCD.
- La estimación de la cantidad de RCD que se generarán en la obra, expresados en metros cúbicos (m^3) y toneladas (t).
- El programa de capacitación para el personal de la obra y subcontratos, sobre gestión de RCD y sus beneficios.
- Las medidas que se establecerán para la clasificación de los RCD, que deberá estar de acuerdo a cláusula 4 de la NCh 3562, su separación en origen, la recolección selectiva y la cuantificación de los RCD generados en obra (en m^3 y t), identificándolos según su tipo, forma de manejo y destino.
- Las disposiciones para el manejo y valorización de los RCD, considerando un manejo ambientalmente racional de los residuos.
- Las instalaciones y áreas previstas para el almacenamiento, manejo, separación y, en su caso, otras operaciones de gestión de los RCD dentro de la obra, lo cual debe estar dispuesto en planos o croquis.

El contratista debe asegurar la trazabilidad de los RCD y sus procesos, mediante la mantención en obra, durante todo el período de su duración, de la documentación y los registros (digitales o físicos) que aseguren que los RCD generados han sido gestionados de acuerdo a la legislación vigente y aquellos registros que acrediten el manejo de los RCD, la cuantificación de los residuos (en m^3 y t), los documentos de recolección/tratamiento/eliminación de RCD y los registros que señale el PRCD.

Se debe disponer de la documentación que acredite que los RCD generados en la obra se han entregado a un gestor de residuos autorizado. Esto incluye, el manejo y las declaraciones realizadas por el contratista de las emisiones a la atmósfera y residuos peligrosos generados



en la obra en la plataforma de Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC) del Ministerio del Medio Ambiente.

El PRCD debe identificar los residuos generados incluyendo lo siguiente:

- Estimación de los residuos a generar por cada una de las etapas de la obra de construcción y/o demolición (m^3 y t).
- Clasificación de los RCD.
- Identificación de los residuos de productos prioritarios, cuando corresponda.
- Logística de recolección interna.
- Acopio de RCD provisorio en la obra.

Estos documentos, deben incluir al menos:

- Antecedentes de los gestores (autorizaciones de las instituciones pertinentes).
- Certificados de tratamiento de residuos (valorización y disposición final).
- PRCD y sus registros.
- Tabla resumen de la gestión de los RCD de la obra, por etapas de construcción y/o demolición, indicando las cantidades por tipo de residuo y su tratamiento (valorización o disposición final).
- Declaración de Residuos Peligrosos en la Plataforma del RETC.
- Declaración de Emisiones a la Atmósfera en la plataforma RETC.

El contratista debe anexar toda la documentación que acredite los lugares de disposición final de los residuos, firmados por el receptor de ellos, incluyendo las autorizaciones para los botaderos los que sólo podrán ser utilizados para mejoramientos o recuperación ambiental de terrenos con material proveniente del movimiento de tierra. Los escombros, residuos asimilables a domiciliarios, residuos productos del movimiento de tierra que no fueron destinados a botaderos, residuos peligrosos, deben ser dispuestos en lugares autorizados de acuerdo a la legislación vigente.

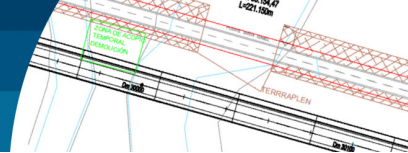
Se debe acreditar la trazabilidad de aquellos elementos provenientes de obra que se hayan reutilizados, enviados a terceros, donados o entregados a la Dirección de Vialidad. Para ello el contratista debe generar bitácoras que permitan hacer el seguimiento de su destino. El receptor del residuo debe firmar la bitácora, estampando su rol único tributario, fecha y lugar de recepción, informando, además, del uso que se le dará a éste. Se debe entregar el registro de la Declaración de Residuos Peligrosos y emisiones a la Atmósfera en la plataforma RETC.

Como parte del proceso se deben identificar aquellos residuos inertes que genera la construcción y demolición en sus distintas etapas, con la finalidad de realizar la separación de los residuos en el origen, para facilitar su tratamiento, disposición y, en los casos que corresponda, reciclaje y reutilización, se mantienen acopiados y señalizados, hasta determinar su disposición final. En el caso de los escombros, fierros y acero estos son donados, para lo cual se debe formalizar la alianza con un privado (gestor del residuo) que tiene las capacidades para reutilizar y reciclar el material solicitado como materia prima para la producción de agregados de hormigón. El acero es separado del hormigón el cual será llevado a disposición final a una planta recicladora de metales para su posterior fundición. Para ello se genera un contrato con los compromisos de ambas partes. Se realiza una inspección visual del sitio para el acopio temporal de las condiciones ambientales, localización y accesibilidad.

Para el adecuado manejo de los desechos o residuos producto de la construcción se deben segregar en el origen, según tipo: fierro de construcción, escombros, chatarra de demoliciones y vigas de acero. Una vez ordenados y clasificados los residuos en el punto limpio y acopios temporales, se procederá a evaluar las potenciales formas de reutilización, considerando alternativas de reciclaje o reutilización.

Análisis de Resultados de la gestión de RCD

El proceso se inicia con la presentación por parte del contratista del PRCD. Como parte del marco legal es importante destacar que la legislación y reglamentación nacional en materia de residuos no tiene (al 2019) apartados específicos para RCD, ya que se encuentra atomizada y



fragmentada a través de leyes dependientes de diferentes organismos públicos. Sin embargo, la gestión de RCD cuenta con una norma específica oficializada de carácter voluntario. La legislación ambiental regula a todos los generadores y gestores de residuos, cuya obligación es declarar a través de los sistemas de reporte habilitados en el sistema de ventanilla única, y cuya reportería se asocia al sistema RETC. La legislación de transporte regula, por una parte, la existencia de ciertas infraestructuras necesarias para obras que generan más de 60.000 toneladas de residuos y, por otra, el transporte de desechos a vertederos clandestinos. A continuación, se detallan las leyes, reglamentos y normas más importantes:

- NCh 3562:2019 Gestión de residuos – Residuos de construcción y demolición (RCD) -Clasificación y directrices para el plan de gestión, plantea una guía para ayudar a equipos profesionales en terreno a gestionar sus RCD de forma eficiente y responsable.
- Ley 20.920 (2017) - Ministerio del Medio Ambiente Marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje.
- Ley 21.161 (2019) -Ministerio de Transporte y Telecomunicación. Esta establece que para verificar si el depósito de los residuos, basuras, escombros o desechos se realizará en un recinto legalmente habilitado, a los transportistas de carga sólo se les exigirá el documento tributario que acredite el origen y destino de su recorrido, ya sea boleta, factura o guía de despacho.
- Modifica Ley 20.879 (2015) - para precisar las autorizaciones requeridas para transportar desechos. Sanciona a través de multas el transporte de desechos a vertederos clandestinos. Esta ley va dirigida para empresas generadoras, empresas transportistas y choferes.
- Decreto Supremo 01 (2013) - Ministerio del Medio Ambiente Registro de emisiones y transferencias de contaminantes (RETC) que captura, recopila, sistematiza, conserva, analiza y difunde la información sobre emisiones, residuos y transferencias de contaminantes potencialmente dañinos para la salud y el medio ambiente que son emitidos al entorno,

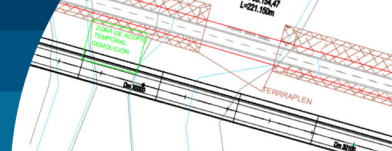
generados en actividades industriales o no industriales o transferidos para su valorización o eliminación.

- Decreto Supremo 148 (2003) - Ministerio de Salud Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos.
- Resolución 5081 (1993) - Ministerio de Salud Establece sistema de declaración y seguimiento de desechos sólidos industriales.
- Decreto con Fuerza de Ley 725 (1968) - Ministerio de Salud Código Sanitario que rige todas las cuestiones relacionadas con el fomento, protección y recuperación de la salud de los habitantes de la República. Fija las condiciones de saneamiento y seguridad relativas a la acumulación de basuras y desperdicios.
- Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales básicas en los lugares de trabajo D.S. 594/99.
- D.S. 148 Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. RESPEL.
- D.S 43/2015 Almacenamiento de Sustancias Peligrosas.
- Norma Chilena NCh 3322 de colores de reciclaje en Chile.

Para el proyecto del puente Santa Isabel, se consideraron recicladores base, gestores de residuos, transportistas, una planta de valorización de residuos y una planta de relleno controlado. Así mismo, la Ilustre Municipalidad El Carmen cuenta con programas de recuperación y pavimentación de caminos rurales donde se puede utilizar parte de la demolición de la carpeta asfáltica. Respecto de puntos limpios cuentan con un acopio para el plástico PET N°1. Además, en la comuna de Chillán se cuenta con puntos limpios para depositar otros residuos no peligrosos y también con empresas recicladora y comercializadora donde se valorizan los residuos.

La estimación de RCD a generar en el proyecto son las indicadas en la Figura 3.

El procedimiento principal en terreno se enfoca en la separación de residuos en origen, según su tipología, responsabilizando a realizar la acción de separación, en



Etapas	Estimación de Cantidad de Residuos Para Generar					
	Sub-Etapas	Estimaciones				
		Volumen	U.	Conversión	Toneladas	U.
Obras Preliminares	Hormigón-Inst de Faenas	84	M³	2.40	201.60	(T)
	Madera Inst de Faenas	20	M³	0.34	6.80	(T)
	Acero Inst de Faenas	5	M³	7.85	39.25	(T)
	Residuos peligrosos	2	M³	1.00	2.00	(T)
	Punto limpio	1	M³	1.20	1.20	(T)
Puente	Hormigón-Infraestructura y Super estructuras	70	M³	2.40	168.00	(T)
	Madera-Infraestructura Superestructura	10	M³	0.34	3.40	(T)
	Acero-Infraestructura y Super estructuras	1	M³	7.85	7.85	(T)
	Excavación y escarpe	10.000	M³	1.50	15000.00	(T)
	Residuos Peligrosos	0.5	M³	1.00	0.50	(T)
Demolición	Remoción de Estructuras	103	M³	2.40	247.20	(T)
	Remoción de ductos	20	M³	0.93	18.60	(T)
	Remoción pavimentos asfálticos	2357.2	M³	2.00	4714.40	(T)
	Remoción Obras de drenaje	30	M³	0.93	27.90	(T)
	Remociones barreras de contención	40	M³	7.85	314.00	(T)
	Remoción señalización vertical	10	M³	7.85	78.50	(T)
	Remoción de aceras	15	M³	2.40	36.00	(T)
	Remoción de cercos	120	M³	0.34	40.80	(T)
	Remoción de paradas	6	M³ ³⁰	1.00	6.00	(T)
	Remociones bajadas de agua	6	M³	0.93	5.58	(T)
Pavimentación	asfalto	0.5	M³	0.5	1.00	(T)
Movimiento de Tierra	Escarpe	17.604	M³	1.50	24.645,6	(T)
	TCN	5.981	M³	1.50	8.373,4	(T)

Figura 3. Estimación de cantidad de residuos del contrato (Soto y Díaz, 2023)

cada una de áreas o partidas del proyecto generadores de residuos. Una vez separado cada residuo en la zona de trabajo, se responsabiliza a un equipo de trabajo encargado del manejo interno de los residuos de todo el proyecto, este equipo se conforma por supervisores y jornales de manejo residuos, su cantidad depende de las características del proyecto. La función principal de este equipo es diariamente transportar eficientemente los residuos separados desde su origen hasta el centro de acopio de residuos del proyecto, utilizando la menor cantidad de recursos, principalmente de horas hombre y maquinaria que se comparte para todas las partidas de la obra como la retro excavadora y camiones. Cuando el residuo separado llega al centro de acopio del proyecto, es recibido por un encargado ambiental, la función principal de este trabajador es mantener limpio, ordenado y señalizado el centro de acopio de residuos, dirigiendo y enseñando a sus compañeros, la correcta disposición de cada residuo. Además, se encarga de seleccionar el residuo que puede pasar a un tratamiento de valorización, reciclando o reutilizando en alguna partida interna del proyecto. Todo lo mencionado anteriormente debe ir acompañado constantemente de inducciones, capacitaciones y comunicación de modificaciones de los estándares, procedimientos y objetivos que se describen en

el plan de gestión de residuos a todos los trabajadores del proyecto.

Donde se generan los principales residuos valorizados del proyecto, corresponde a los residuos de hormigón, la demolición del camino y puente. Una parte de estos son donados a la Ilustre Municipalidad El Carmen para el proyecto de pavimentación de caminos rurales, otros son donados a Instituciones sin fines lucro y donaciones a personas naturales que requieren material para relleno. También todas aquellas señaléticas que se encuentren en el camino son dispuestas a la Dirección de Vialidad de Ñuble. El segundo corresponde al despunte de fierro que, gracias a un procedimiento de reutilización, se genera una menor pérdida del residuo, lo que posteriormente es vendido a una empresa dedicada al reciclaje de chatarra ferrosa, localizada en km 35 ruta Chillán-Yungay, si bien este es un gestor intermedio, ya que ellos realizan la disposición final en un centro de fundición y transformación de los metales de una compañía siderúrgica ubicada en Talcahuano. El tercer residuo es la madera que se reutiliza en diferentes partidas de la obra y en las instalaciones provisionales del proyecto, estos son donados a Juntas de Vecinos o particulares que la soliciten. Aquellos residuos como: cartón, vidrio y plástico enfocado principalmente en la economía circular, son reciclados y enviados a una empresa autorizada en la región, localizada en la comuna de Chillán.

Respecto del levantamiento del escarpe, un porcentaje de ésta son dispuestos en botadero autorizado para este proyecto por la Dirección de Vialidad, otro porcentaje son reutilizados en proyectos particulares e instituciones sin fines de lucro, tales como un liceo que requiere generar espacios de áreas verdes y recreación como mejorar una cancha de fútbol. También la obra mantiene un acopio temporal con aquel material que es reutilizado en las terminaciones de taludes y relleno para las áreas verdes del proyecto. Finalmente, aquellos residuos peligrosos, residuos domiciliarios y escombros que no se puedan reutilizar, serán dispuesto en una planta dedicada al manejo y disposición final de los residuos, localizada en Variante Cruz km 1,5 Chillán Viejo.

En otro aspecto, como parte del control de residuos, se establecen fichas de registro para el control mensual de la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición. La ficha incluye ítems sobre identificación del generador

titular del proyecto, del ejecutor de las obras, la obra de procedencia de los residuos y de la empresa transportista. Además, se considera la identificación del destino final (o intermedio), considerando la firma del representante generador ejecutor de las obras y del representante gestor final de los RCD. En el caso particular de la demolición del puente, el proceso continúa con reuniones de coordinación para establecer la metodología de demolición, los recursos que son necesarios para cumplir la metodología y finalmente analizar la disposición final de los escombros, que para este caso es de aproximadamente 2000 m3.

En contratos tradicionales, y hasta antes que los proyectos consideran la aplicación del RCD, se planificaba el traslado de la totalidad de los escombros a un botadero autorizado. Con la inclusión del plan a los proyectos públicos, se abre la posibilidad de reciclar y reutilizar estos escombros, pero se abre el desafío para el caso de estudio de encontrar la forma de hacerlo, para lo cual aparecen distintas alternativas. Depende principalmente de los gestores y condiciones mismas de cada proyecto (locación, envergadura y materiales a reciclar), el conocer y estudiar los procesos, generando un ahorro significativo para todas las partes involucradas en una obra de construcción vial y ser un beneficio para los gestores que tengan la capacidad de reutilizar como materia prima, ya sea por medio de un contrato de donación de los mismos, dejando expresamente que él se hará cargo del traslado y separación de los residuos. Por parte de la constructora se compromete a generar los acopios temporales tal como se muestra en la Figura 4, para que pueda realizar su proceso directamente desde la obra a la empresa en funcionamiento. Además, el contratista se compromete con gestión de los resguardos de seguridad y medioambiente.

La gestión realizada en el contrato en torno al proceso de RCD aplicado al puente Santa Isabel es el que se muestra en la Figura 5.

La evaluación en un PRCD es un proceso continuo, que permite la recolección de información de forma constante, dando un seguimiento a la ejecución y cumplimiento del plan durante todo el proceso. Los datos que se obtienen a partir de la evaluación son los indicadores que permiten hacer el análisis de la efectividad del plan, pudiendo hacer correcciones, o bien, replicándolo por sus buenos resultados. La trazabilidad es una herramienta que le

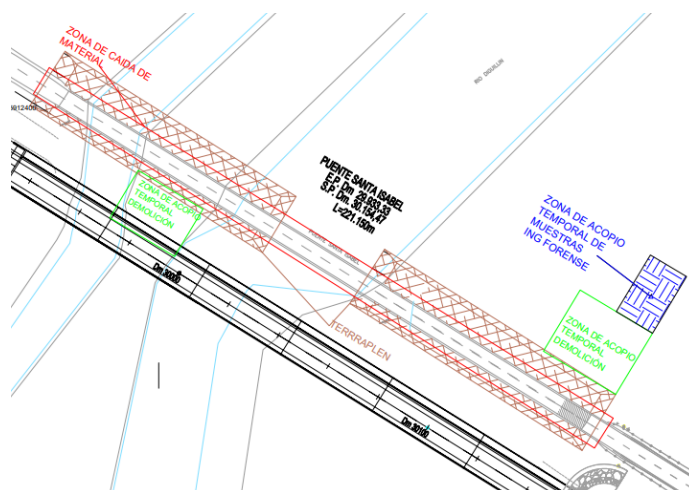


Figura 4. Esquema de acopio temporal producto de la demolición del puente (Soto y Díaz, 2023)

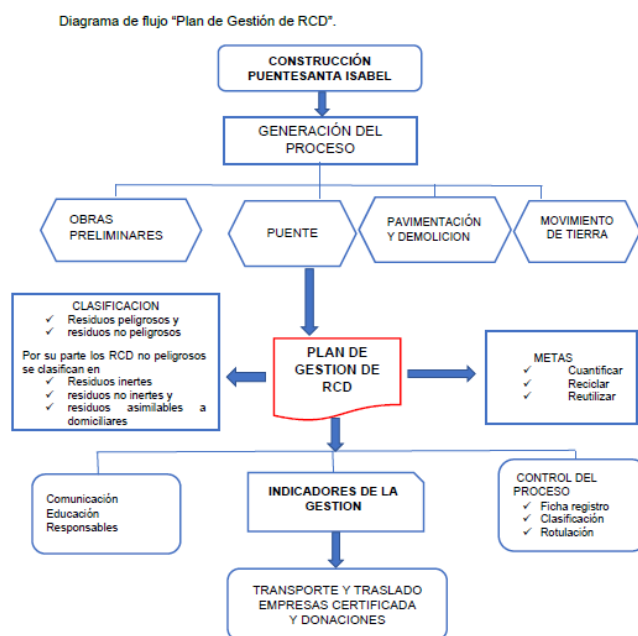
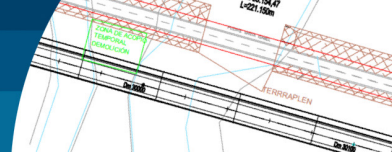


Figura 5. Flujograma gestión puente Santa Isabel (Soto y Díaz, 2023)

permite al generador de residuos el acompañamiento y control de la gestión de los residuos. De esta forma, se garantiza que los ciclos de su gestión sean finalizados dentro de los plazos y metas establecidas.

Al aplicar la metodología descrita en el caso de estudio se obtienen los siguientes indicadores:

- Se logró disminuir posibles pérdidas económicas e impactos ambientales generados por los procesos constructivos y/o demoliciones de obras viales



llegando incluso a disponer para reciclaje o reutilización el 100% de los escombros que genera la demolición del puente.

- Se garantizó una producción sostenible a través de la reutilización de los desechos que genera la construcción en sus diversas etapas, reintegrándolos al flujo económico y evitando la pérdida de recursos naturales, de consumo, energía y tiempo.
- Se optimizó el volumen de residuos asociados a la gestión de disposición final, se establecieron mecanismos que garantizaron la trazabilidad y valorización de los residuos inertes. Se capacitó a los encargados de realizar la separación de residuos en el origen fomentando las buenas prácticas y fortaleciendo los diferentes sistemas de reciclaje, promoviendo hábitos y costumbres del manejo de los residuos. Se establecieron responsables del transporte y vigilancia del correcto traslado de escombros, hormigón, demoliciones, carpetas de asfaltos, entre otros, hacia botaderos autorizados y donaciones a la comunidad.
- Se cumplió con la metodología expuesta en cada aspecto de la ley mencionada, generando la economía circular que se proyectaba pudiendo así cumplir con las expectativas de la propuesta desarrollada.

Estas características son relevantes en los estudios de economía circular en cuanto a los potenciales usos de algunos de estos elementos posteriores al proceso de demolición (ejemplo las vigas metálicas para puentes menores), o establecer los materiales que puedan utilizarse como el hormigón para material granular en nuevos hormigones. Adicionalmente, el estudio de estructuras históricas es de gran interés, dado que aportan información fundamental para el desarrollo de procesos asociados a la ingeniería forense.

Conclusiones

El artículo expone los aspectos incorporados en la gestión de los residuos de un contrato de infraestructura vial, el cual aplica el PRCD en particular para el puente Santa Isabel, reintegrándolos al flujo económico y así evitando la pérdida de recursos naturales, de consumo, energía y

tiempo. Basado en esta experiencia y de los resultados obtenidos al aplicar el plan propuesto se puede concluir:

- La Economía Circular, aplicada a obras de infraestructura vial y en particular al activo tipo puente, genera beneficios a todas las partes involucradas en un contrato, entre ellas la Dirección de Vialidad.
- El reciclar o reutilizar es una alternativa válida como parte del PRCD en proyectos de la Dirección de Vialidad, en particular cuando se considera la demolición de un puente.
- Aplicar la gestión de residuos a un contrato de infraestructura vial, y en particular para la demolición de un puente, logra generar en los equipos de trabajo un cambio cultural, tanto en el personal administrativo como en el personal de terreno, asociado a la cultura ecológica.

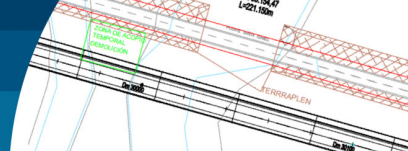
En cuanto a las futuras líneas de investigación sería pertinente analizar mejoras a incluir al plan, desde el punto de vista administrativo y técnico, y analizar posibles alternativas de uso a las materias producidas por los residuos de la construcción y demolición de obras de infraestructura vial. De la misma forma, se deben implementar protocolos de seguimiento del uso de estos residuos tanto en empresas como en la comunidad con el objeto de asegurar los beneficios de este tipo de implementación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas y a la empresa Bründl Construcciones S.A. por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

Referencias

- Ibáñez, P. (2023). *Revista de Obras Públicas*. Ministerio de Obras Públicas.
- Fernández R., Soto E., Flores M., Herrera C. & Campos J., (2021). *Antecedentes de licitación. Reposición Ruta N-59-Q, Sector Chillan Yungay, Tramo IXDM. 28.800,00 AL dm 30.920,00, Comunas de San Ignacio y El Carmen, Provincia de Diguillín, región del Ñuble, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.*



Carmine I. & Díaz J. (2023). *Protocolo investigación de ingeniería forense del puente Existente “Santa Isabel”* Anexo Procedimiento demolición. Bründl S.A. El Carmen, Región de Ñuble.

Soto M. & Díaz. J (2023). *Procedimiento de la gestión Ambiental en el proceso de demolición del puente Santa Isabel*. Anexo Procedimiento demolición. Bründl S.A. El Carmen, Región de Ñuble.

NCh 3562 (2019). *E Residuos de construcción y demolición (RCD) Gestión de residuos – Residuos de construcción y demolición (RCD) -Clasificación y directrices para el plan de gestión*.

Decreto Supremo 01 (2013) - Ministerio del Medio Ambiente., *Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC)*.

Mantenimiento vial (2021). *Manual de Carreteras Volumen N°7, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile*.

Estudios y criterios ambientales en proyectos viales (2021). *Manual de Carreteras Volumen N° 9, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile*.



Relaves de flotación de escoria de cobre como árido fino en morteros de cemento

Copper slag flotation tailings as fine aggregate in cement mortars

Elizabeth Olave¹ y Amin Nazer^{2*}

¹ Universidad de Atacama, Departamento de Construcción, Facultad Tecnológica, Av. Copayapu 485, Copiapó, Chile, eolavear@gmail.com. Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-3661-617X>

² Universidad de La Serena, Departamento de Ingeniería en Construcción, Facultad de Ingeniería, Benavente 980, La Serena, Chile, amin.nazerv@userena.cl. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0176-2344>

* Autor de correspondencia: amin.nazerv@userena.cl

Los relaves de flotación de escoria de cobre (CSFW) son un residuo secundario de la recuperación hidrometalúrgica de cobre desde la escoria de fundición; en la Planta Manuel Antonio Matta de ENAMI (Copiapó, Chile) se depositan ~65.000 t/mes. Este estudio evaluó el CSFW como reemplazo parcial de arena normalizada en morteros de cemento (1:3 en masa) en niveles de sustitución de 0 (control), 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 75%, ensayados a 7, 28 y 90 días. Las sustituciones se realizaron en masa manteniendo constante la masa total de árido, lo que, dada la mayor densidad del CSFW, implica una reducción progresiva del volumen de árido; este efecto se cuantifica y discute explícitamente. Se prepararon probetas prismáticas (40 × 40 × 160 mm) evaluando consistencia, densidad endurecida, resistencia a flexión y compresión. La resistencia a compresión se analizó por ANOVA de un factor y prueba de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$), complementados con verificación de supuestos (Shapiro-Wilk, Levene) y con contrastes robustos (ANOVA de Welch, Kruskal-Wallis y Games-Howell). El CSFW presentó mineralogía cristalina (hedenbergita, magnetita, fayalita, albita), densidad real seca de 3.760 kg/m³ y absorción de agua de 1,71%. La consistencia disminuyó con el contenido de CSFW y la densidad endurecida aumentó proporcionalmente. La mezcla CSFW con 25% de sustitución produjo la mayor resistencia a compresión entre los niveles evaluados, 44,17 ± 0,83 MPa a 28 días, 22,9% sobre el control ($p < 0,05$), y la mayor resistencia a flexión (7,89 ± 0,35 MPa a 28 días, +7,6%). El incremento se atribuye a la acción combinada del aumento de la razón volumétrica pasta/árido y de la densificación física de la matriz cementicia por las partículas finas y de alta densidad del CSFW. Dado que no se ensayaron niveles intermedios entre 25 y 50%, el óptimo global podría situarse en dicho intervalo.

Palabras clave: relaves de flotación de escoria de cobre; árido fino; mortero de cemento; resistencia a compresión; valorización de residuos

Copper slag flotation tailings (CSFW) are a secondary residue generated during hydrometallurgical copper recovery from smelting slag. At the Manuel Antonio Matta Plant of Empresa Nacional de Minería (ENAMI), Copiapó, Chile, approximately 65,000 t/month are deposited in tailings impoundments. This study evaluated CSFW as a partial replacement for normalized river sand in cement mortars (1:3 mass ratio) at substitution levels of 0, 5, 10, 15, 20, 25, 50 and 75%, tested at 7, 28 and 90 days. Replacement was performed on a mass basis at constant total aggregate mass; because CSFW is denser than sand, this entails a progressive reduction in aggregate volume, an effect that is quantified and discussed explicitly. Prismatic specimens (40 × 40 × 160 mm) were evaluated for consistency, hardened density, flexural strength and compressive strength. One-way analysis of variance (ANOVA) and Tukey HSD post-hoc tests ($\alpha = 0.05$) were applied to compressive strength data, together with assumption checks (Shapiro-Wilk, Levene) and robust alternatives (Welch ANOVA, Kruskal-Wallis and Games-Howell). CSFW exhibited predominantly crystalline mineralogy (hedenbergite, magnetite, fayalite, albite), real dry density of 3,760 kg/m³ and water absorption of 1.71%. Fresh mortar consistency decreased progressively with CSFW content, while hardened density increased proportionally. The CSFW 25% mix achieved the highest compressive strength among the levels tested, 44.17 ± 0.83 MPa at 28 days, 22.9% above control ($p < 0.05$), and the highest flexural strength (7.89 ± 0.35 MPa at 28 days, +7.6%). The enhancement is attributed to the combined action of an increased paste-to-aggregate volume ratio and physical densification of the cement matrix by the fine, high-density CSFW particles. As intermediate levels between 25 and 50% were not tested, the global optimum may lie within that interval.

Keywords: copper slag flotation tailings; fine aggregate; cement mortar; compressive strength; waste valorization



Introducción

Chile es el principal productor mundial de cobre, con aproximadamente el 27% de la producción global (Cochilco, 2019). La fundición de concentrados de cobre genera grandes volúmenes de escoria de fundición de cobre (CS) como subproducto vítreo del proceso pirometalúrgico. Wang et al. (2021), en una revisión crítica de más de cien estudios, reportaron que la producción global de CS superó los 57 millones de toneladas en 2021 y que la disposición en vertederos sigue siendo el método de manejo dominante, con riesgos asociados de lixiviación de metales pesados y ocupación de suelo. Las fundiciones chilenas producen aproximadamente 4,5 millones de toneladas de CS anuales (Nazer et al., 2016). En respuesta a la disminución de las leyes de mineral, varias fundiciones chilenas han incorporado circuitos de molienda y flotación para recuperar el cobre residual contenido en la CS acumulada, generando un residuo secundario conocido como relaves de flotación de escoria de cobre (CSFW). En la Planta Manuel Antonio Matta de ENAMI, en Copiapó, Región de Atacama, se generan aproximadamente 65.000 toneladas mensuales de CSFW (Herrera, 2018), las cuales se depositan actualmente en tranques de relave y representan un pasivo ambiental creciente en una región árida.

La valorización de CS como árido fino en hormigones y morteros está ampliamente documentada. Wang et al. (2021) concluyeron que sustituciones moderadas (20–50% en volumen) mejoran consistentemente la resistencia mecánica y la durabilidad, con reducciones de porosidad documentadas mediante microscopía electrónica de barrido. Abdalla y Alahmari (2024), en la revisión más reciente del estado del arte en la materia, confirmaron que la microestructura del hormigón con CS se vuelve más densa y homogénea al aumentar el contenido de CS, evidenciando una zona de transición interfacial (ITZ) más compacta. En el caso de morteros, Al-Jabri et al. (2011) demostraron que todas las mezclas con CS como árido fino (0–100% sustitución) produjeron resistencias a compresión iguales o superiores al mortero de control, con incrementos de más del 70% para sustituciones del 50%. Panda et al. (2022) verificaron microestructuralmente el mecanismo de densificación de la ITZ en hormigón con CS. En el contexto chileno, Nazer et al. (2013) demostraron que la CS de fundiciones de la Región de Atacama mejora la resistencia

a compresión y flexión de morteros independientemente del tipo de cemento, y Pradena et al. (2019) confirmaron su viabilidad en morteros de albañilería, con incrementos de 18,1% y 20,2% en resistencia a compresión y adherencia, respectivamente. Cendoya (2009) reportó incrementos de resistencia en hormigones con sustituciones de 25–50% en volumen de CS como árido fino.

Como reemplazo parcial del cemento, la CS y el CSFW muestran un comportamiento marcadamente distinto. Su mineralogía predominantemente cristalina, dominada por silicatos de hierro como fayalita y hedenbergita, les confiere reactividad puzolánica despreciable, lo que se traduce en reducciones de resistencia a compresión al aumentar el nivel de sustitución del cemento (Afshoon y Sharifi, 2017; Sharma y Khan, 2017). Nazer et al. (2025) confirmaron este comportamiento para CSFW de la misma planta de ENAMI, donde un 5% de reemplazo del cemento alcanzó aproximadamente el 80% de la resistencia del hormigón de control a 60 días.

Pese a la abundante literatura sobre CS como árido fino, los reportes en literatura científica del uso de CSFW son prácticamente inexistentes. El CSFW difiere de la CS sin procesar en dos aspectos clave: una distribución granulométrica más fina, derivada de la etapa de molienda previa a la flotación, y mayores concentraciones de metales pesados (Fe, Cu) procedentes del proceso de flotación. Estas diferencias implican que los resultados publicados para CS no pueden extrapolarse directamente al CSFW. Un aspecto adicional que condiciona la comparación con la literatura es la base de sustitución empleada: la mayoría de los estudios sobre CS reportan reemplazos en volumen (Cendoya, 2009; Wang et al., 2021), mientras que el presente trabajo emplea reemplazo en masa conforme al protocolo comparativo de NCh 2260. Dada la elevada densidad del CSFW, ambas bases no son equivalentes, lo que se aborda de forma explícita en la sección de resultados.

Este estudio aborda esta brecha de conocimiento evaluando el desempeño mecánico de morteros de cemento en los cuales se reemplaza parcialmente la arena normalizada por CSFW de la Planta Manuel Antonio Matta de ENAMI en ocho niveles de sustitución (0, 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 75%), ensayados a 7, 28 y 90 días. Los objetivos específicos son: (i) caracterizar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas del CSFW; (ii) determinar el efecto del



nivel de sustitución sobre la consistencia del mortero fresco y la densidad del mortero endurecido; y (iii) evaluar la resistencia a compresión y flexión de los morteros con CSFW relativos a una mezcla de control, soportado por ANOVA de un factor y análisis post-hoc de Tukey HSD. Estos resultados contribuyen a una línea de investigación enfocada en la valorización de residuos mineros de la región de Atacama para la producción de materiales alternativos de construcción de baja huella de carbono.

Materiales y métodos

Materiales

Relaves de flotación de escoria de cobre (CSFW).

El CSFW se obtuvo de la Planta Manuel Antonio Matta operada por ENAMI en Copiapó, Región de Atacama, Chile. El material presenta apariencia negra y vítrea, y se genera durante la flotación de la escoria de fundición de cobre para recuperar el cobre residual. El CSFW se utilizó sin molienda adicional.

Cemento. Cemento Portland de alta resistencia (tipo HR), conforme a NCh 148 (INN, 1968). Proveedor: Hormigones Bicentenario BSA, Copiapó.

Árido fino. Arena normalizada de río preparada según NCh 2260 (INN, 1996), tamizada y combinada para cumplir con los requisitos granulométricos de la norma.

Agua. Agua potable conforme a NCh 1498 (INN, 1982).

Condición de humedad de los áridos. Tanto la arena normalizada como el CSFW se emplearon en condición seca de horno. Ambos materiales se secaron en estufa eléctrica a 110 ± 5 °C durante 24 h y se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente en desecador antes de su pesaje y amasado. La misma condición se aplicó en la determinación de las propiedades físicas reportadas en

la Tabla 2, de modo que la absorción de agua indicada corresponde al agua que los áridos son capaces de captar desde el agua de amasado durante el mezclado. Esta precisión es relevante para la interpretación del balance de agua libre presentada más adelante.

Caracterización del CSFW

La composición química se determinó por espectrofotometría de absorción atómica (AAS), y la composición mineralógica por difracción de rayos X (XRD) usando un difractómetro Shimadzu XRD-6100 (radiación Cu K α , 5°–70° 2 θ , paso 0,02°). La distribución granulométrica (PSD) se determinó por análisis granulométrico según NCh 165 (INN, 2009); el contenido de finos (< 0,08 mm) por tamizado húmedo según NCh 1223 (INN, 1977). Las densidades real seca, neta y la absorción de agua se determinaron según NCh 1239 (INN, 2009) y NCh 1116 (INN, 2008); la densidad aparente según NCh 1116 (INN, 2008). Los mismos ensayos se aplicaron a la arena normalizada para comparación.

Diseño de mezcla y preparación de probetas

Las mezclas de mortero se prepararon con una relación cemento-árido en masa de 1:3 según NCh 2260 (INN, 1996). Se confeccionaron ocho mezclas: una de control (0% CSFW) y siete con CSFW reemplazando arena normalizada en 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 75% en masa. La razón agua-cemento ($a/c = 0,65$) se mantuvo constante en todas las mezclas, definida a partir del ensayo de consistencia de la mezcla de control conforme al protocolo de NCh 2260. Las dosificaciones y los volúmenes equivalentes de árido se presentan en la Tabla 1. Dado que la sustitución se efectuó en masa y que la densidad real seca del CSFW (3.757 kg/m³) es 47,6% mayor que la de la arena normalizada (2.545 kg/m³), el volumen de árido incorporado disminuye

Tabla 1. Dosificación de las mezclas de mortero y volúmenes equivalentes de árido.

Mezcla	CSFW (%)	Cemento (g)	CSFW (g)	Arena (g)	Agua (g)	V arena (cm ³)	V CSFW (cm ³)	V árido total (cm ³)	CSFW (% vol.)
Control	0	844,80	0,00	2.534,40	549,12	995,8	0,0	995,8	0,0
CSFW-5	5	844,80	126,72	2.407,68	549,12	946,0	33,7	979,8	3,4
CSFW-10	10	844,80	253,44	2.280,96	549,12	896,3	67,5	963,7	7,0
CSFW-15	15	844,80	380,16	2.154,24	549,12	846,5	101,2	947,6	10,7
CSFW-20	20	844,80	506,88	2.027,52	549,12	796,7	134,9	931,6	14,5
CSFW-25	25	844,80	633,60	1.900,80	549,12	746,9	168,7	915,5	18,4
CSFW-50	50	844,80	1.267,20	1.267,20	549,12	497,9	337,3	835,2	40,4
CSFW-75	75	844,80	1.900,80	633,60	549,12	249,0	505,9	754,9	67,0

Volúmenes calculados a partir de las densidades reales secas de la Tabla 2 (CSFW: 3.757 kg/m³; arena normalizada: 2.545 kg/m³). Masas de cemento (844,80 g) y agua (549,12 g) constantes en todas las mezclas.

progresivamente con el nivel de sustitución: de 995,8 cm³ en el control a 915,5 cm³ en CSFW-25 (-8,1%) y a 754,9 cm³ en CSFW-75 (-24,2%). En consecuencia, una sustitución del 25% en masa equivale a solo 18,4% en volumen. Puesto que las masas de cemento y agua permanecen constantes, la razón volumétrica pasta/árido aumenta un 8,8% en CSFW-25 y un 31,9% en CSFW-75 respecto del control. Las implicancias de este efecto sobre la interpretación de los resultados se analizan en la sección de resultados.

Se moldearon nueve probetas prismáticas (40 × 40 × 160 mm) por mezcla: tres por cada edad de ensayo (7, 28 y 90 días). Las probetas se desmoldaron a las 48 h y se curaron en solución saturada de Ca(OH)₂ a 20 ± 2 °C hasta el ensayo (NCh 2261, INN, 2010).

Consistencia del mortero fresco

La consistencia del mortero se determinó mediante el ensayo de asentamiento con cono de 15 cm según NCh 2257/3 (INN, 1996), que es el método normalizado para morteros y el prescrito por NCh 2260 para la comparación de morteros patrón (requisito: 60 ± 20 mm). El asentamiento se midió como el descenso del mortero moldeado respecto de la altura del molde. La razón a/c de la mezcla de control se ajustó por incrementos sucesivos del 5% del peso de cemento hasta alcanzar el requisito normativo, obteniéndose a/c = 0,65 para un asentamiento de 66 mm; dicha razón se aplicó sin modificación a todas las mezclas con sustitución, conforme al protocolo comparativo de NCh 2260.

Ensayos en mortero endurecido

Densidad. Calculada a partir de la masa y mediciones geométricas (pie de metro, ±0,01 mm) según NCh 1037 (INN, 2009).

Resistencia a flexión (ff). Ensayo de flexión en tres puntos (luz = 100 mm, velocidad de carga = 15 kgf/cm²·s) según NCh 158 (INN, 1967): $ff = 3 \cdot P \cdot L / (2 \cdot b \cdot h^2)$. Se reporta media ± DE para n = 3 por mezcla y edad.

Resistencia a compresión (fc). Se ensayaron las dos mitades fracturadas de cada probeta de flexión, sobre un área de 40 × 40 mm (velocidad de carga = 15 kgf/cm²·s), según NCh 1037 (INN, 2009): $fc = F/A$; A = 1.600 mm². Se reporta media ± DE para n = 6 por mezcla y edad.



Figura 1. Preparación de muestras y ensayos a flexión y compresión.

Análisis estadístico

Se evaluó el efecto del nivel de sustitución de CSFW sobre la resistencia a compresión mediante ANOVA de un factor a cada edad (7, 28 y 90 días), con el nivel de sustitución como factor único (ocho niveles). Cuando el ANOVA indicó diferencias significativas ($\alpha = 0,05$), las comparaciones por pares se realizaron mediante la prueba de diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey. Los datos de resistencia a flexión se reportan de forma descriptiva (n = 3 por celda). Todos los cálculos se realizaron en Python (SciPy v1.11).

Previamente a la aplicación del ANOVA se verificaron sus supuestos. La normalidad se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk aplicada a los residuos del modelo de cada edad (N = 48) y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene basada en la mediana, robusta frente a desviaciones de la normalidad. Dado que el supuesto de normalidad no se cumplió a 7 días (véase la sección de resultados), el análisis se complementó con procedimientos robustos que no requieren homocedasticidad ni

normalidad: el ANOVA de Welch, la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis y, para las comparaciones múltiples, la prueba de Games-Howell. Se reportan tanto los resultados clásicos como los robustos, y se adopta como criterio de significancia la concordancia entre ambos enfoques.

Resultados y discusión

Caracterización del CSFW

El análisis por AAS identificó el Fe como elemento dominante (32,35%), seguido de Si (17,45%), Ca (4,13%), K (0,92%), Al (0,64%) y Cu (0,53%). El análisis XRD reveló una mineralogía predominantemente cristalina compuesta por hedenbergita (23,90%), magnetita (20,36%), fayalita (20,00%), albita (18,05%), fengita (9,55%) y cuarzo (2,01%).

La PSD del CSFW (Figura 2) muestra una granulometría continua entre 0,15 y 4,75 mm (100% pasante por tamiz 4,75 mm). El contenido de finos (< 0,08 mm) fue de 3,88%, por debajo del límite del 5% establecido en NCh 163 (INN, 2013). Las propiedades físicas del CSFW y de la arena normalizada se comparan en la Tabla 2. La densidad real seca del CSFW (3.757 kg/m³) supera en un 47,6% a la de la arena normalizada (2.545 kg/m³), consistentemente con su mineralogía rica en hierro (magnetita, fayalita, hedenbergita). La absorción de agua del CSFW (1,71%) es inferior a la de la arena (2,68%).

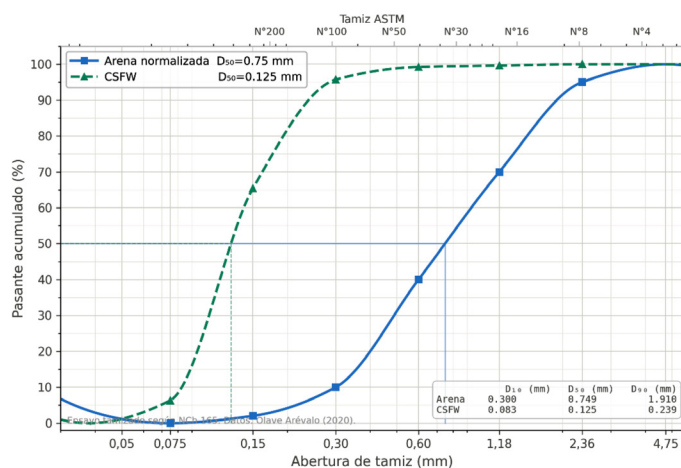


Figura 2. Distribución granulométrica del CSFW comparada con la banda granulométrica de la arena normalizada (NCh 2260)

Efecto de la base de sustitución sobre el volumen de árido

La sustitución en masa a masa total de árido constante

Tabla 2. Propiedades físicas del CSFW y de la arena normalizada.

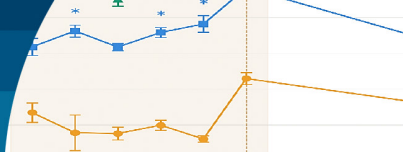
Propiedad	CSFW	Arena normalizada
Densidad real seca (kg/m ³)	3.760	2.545
Densidad neta (kg/m ³)	4.015	2.739
Absorción de agua (%)	1,71	2,68
Densidad aparente (kg/m ³)	2.047	1.691
Finos < 0,08 mm (%)	3,88	0,00

La densidad real seca del CSFW (3.757 kg/m³) excede el rango de aplicabilidad de NCh 1239, diseñada para áridos silíceos; el resultado es físicamente consistente con la mineralogía ferrosa del material.

implica que el volumen de árido incorporado disminuye a medida que aumenta el contenido de CSFW, dada su mayor densidad real (Tabla 1). Este efecto debe considerarse al interpretar el desempeño mecánico, ya que un menor volumen de árido con masas constantes de cemento y agua se traduce en una razón volumétrica pasta/árido mayor, lo cual por sí solo tiende a incrementar la resistencia dentro de ciertos límites.

No obstante, este efecto volumétrico no explica por sí mismo el comportamiento observado. Si el aumento de la razón pasta/árido fuese el mecanismo dominante y único, la resistencia debería crecer de forma monótona con el contenido de CSFW, puesto que dicha razón aumenta monótonamente (+1,6% en CSFW-5, +8,8% en CSFW-25, +19,2% en CSFW-50 y +31,9% en CSFW-75). Sin embargo, la resistencia a compresión a 28 días alcanza un máximo en CSFW-25 (44,17 MPa) y decae marcadamente en CSFW-50 (35,61 MPa) y CSFW-75 (29,02 MPa), siendo esta última la mezcla con la mayor razón pasta/árido y, simultáneamente, la de menor resistencia. Por lo tanto, el efecto volumétrico opera como una contribución favorable en el rango bajo y moderado de sustitución, pero es superado por un mecanismo competitivo de degradación asociado a la pérdida de trabajabilidad y a la consiguiente deficiencia de compactación en el rango alto.

En consecuencia, el incremento de resistencia observado en CSFW-25 debe atribuirse a la acción combinada de al menos dos contribuciones favorables, el aumento de la razón volumétrica pasta/árido y la densificación física aportada por las partículas finas y densas del CSFW, que el presente diseño experimental no permite deconvolucionar. Para separar ambas contribuciones sería necesario un diseño con sustitución en base volumétrica, en el cual el volumen de árido se mantenga constante; esto se plantea como línea prioritaria de trabajo futuro.



Consistencia del mortero fresco

La consistencia del mortero fresco disminuyó de forma monótona con el aumento del contenido de CSFW (Tabla 3). La mezcla de control alcanzó un asentamiento de 66,0 mm, cumpliendo el requisito de NCh 2260 (60 ± 20 mm). Las mezclas CSFW-5 a CSFW-20 se mantuvieron dentro del rango normativo (47,8–61,4 mm), mientras que CSFW-25 (43,0 mm) quedó ligeramente por debajo del límite inferior. La mezcla CSFW-50 alcanzó 21,2 mm y la mezcla CSFW-75 no presentó asentamiento medible, dificultando notablemente el amasado.

Tabla 3. Consistencia del mortero fresco (asentamiento de cono de 15 cm, NCh 2257/3)

Mezcla	CSFW (%)	Asentamiento (mm)	Reducción vs. control (%)
Control	0	66,0	—
CSFW-5	5	61,4	−7,0
CSFW-10	10	57,0	−13,6
CSFW-15	15	52,4	−20,6
CSFW-20	20	47,8	−27,6
CSFW-25	25	43,0	−34,8
CSFW-50	50	21,2	−67,9
CSFW-75	75	0,0	−100,0

Esta reducción progresiva se atribuye principalmente al aumento del área superficial específica del árido. El CSFW aporta una fracción de finos inferiores a 0,08 mm equivalente al 3,88% de su masa, mientras que la arena normalizada no contiene finos en ese rango (Tabla 2). En términos absolutos, la masa de finos aportada por el CSFW crece desde 0 g en el control hasta 24,6 g en CSFW-25 y 73,8 g en CSFW-75. Este material ultrafino demanda agua para el humedecimiento superficial, agua que deja de estar disponible para la lubricación entre partículas, reduciendo la fluidez de la mezcla. A ello se suma la mayor angulosidad de las partículas de CSFW, derivada de la etapa de molienda previa a la flotación, frente a la morfología más redondeada de la arena de río, lo que incrementa la fricción interna del esqueleto granular.

Conviene precisar que el efecto de la menor absorción de agua del CSFW actúa en sentido opuesto al observado, pero su magnitud es marginal y no revierte la tendencia. El balance de agua indica que el agua absorbida por el árido disminuye de 67,9 g en el control a 49,5 g en CSFW-75, de modo que el agua libre aumenta solo de 481,2 g a 499,6 g (+3,8%), lo que equivale a un incremento de la razón a/c

efectiva de 0,570 a 0,591 ($\Delta = +0,022$). Este incremento resulta un orden de magnitud menor que el efecto de la superficie específica descrito en el párrafo anterior, razón por la cual la consistencia disminuye pese a la mayor disponibilidad nominal de agua libre. Esta aclaración corrige la interpretación presentada en la versión anterior del manuscrito.

Densidad del mortero endurecido

La densidad del mortero endurecido aumentó con el contenido de CSFW en todas las edades (Tabla 4). A 90 días, la densidad varió de 2.207 kg/m³ (control) a 2.452 kg/m³ (CSFW-75), un aumento aproximado del 11%. Esta tendencia refleja directamente la sustitución de arena ($\rho = 2.545$ kg/m³) por CSFW de mayor densidad ($\rho = 3.757$ kg/m³) y el llenado de vacíos interpartícula por la fracción fina del CSFW.

Tabla 4. Densidad del mortero endurecido (kg/m³) a 7, 28 y 90 días

Mezcla	CSFW (%)	7 días	28 días	90 días
Control	0	2.168	2.168	2.207
CSFW-5	5	2.188	2.188	2.207
CSFW-10	10	2.207	2.227	2.227
CSFW-15	15	2.207	2.227	2.259
CSFW-20	20	2.259	2.272	2.279
CSFW-25	25	2.305	2.305	2.279
CSFW-50	50	2.363	2.363	2.382
CSFW-75	75	2.389	2.402	2.452

Resistencia a flexión

Los resultados de resistencia a flexión (media $\pm$ DE, $n = 3$) se presentan en la Tabla 5. La mezcla CSFW-25 produjo la mayor resistencia a flexión entre los niveles evaluados, en todas las edades: $6,19 \pm 0,22$ MPa a 7 días (+9,8% sobre el control), $7,89 \pm 0,35$ MPa a 28 días (+7,6%) y $8,48 \pm 0,45$ MPa a 90 días (+9,0%). Las mezclas CSFW-5 y CSFW-15 produjeron resultados dentro de un $\pm 5\%$ del control en todas las edades. Las sustituciones de 50% y 75% redujeron la resistencia a flexión a 28 días en 16–18% respecto del control. Dado que $n = 3$ por celda (según NCh 158), estos resultados se interpretan de forma descriptiva, en conjunto con los datos de compresión.

Resistencia a compresión

Las estadísticas descriptivas de resistencia a compresión ($n = 6$ por celda) se presentan en la Tabla 6 y la Figura 3. El



Tabla 5. Resistencia a flexión (MPa): media $\pm$ DE a 7, 28 y 90 días (n = 3 por celda)

Mezcla	CSFW (%)	7d Media $\pm$ DE	28d Media $\pm$ DE	90d Media $\pm$ DE	Δ 28d	Δ 90d
Control	0	5,64 $\pm$ 0,11	7,33 $\pm$ 0,26	7,78 $\pm$ 0,43	—	—
CSFW-5	5	5,60 $\pm$ 0,14	7,47 $\pm$ 0,35	8,23 $\pm$ 0,23	+2,0%	+5,7%
CSFW-10	10	5,13 $\pm$ 0,24	7,06 $\pm$ 0,48	7,46 $\pm$ 0,11	-3,6%	-4,1%
CSFW-15	15	5,15 $\pm$ 0,36	7,15 $\pm$ 0,49	7,97 $\pm$ 0,26	-2,4%	+2,5%
CSFW-20	20	4,95 $\pm$ 0,09	7,17 $\pm$ 0,43	7,53 $\pm$ 0,12	-2,2%	-3,3%
CSFW-25	25	6,19 $\pm$ 0,22	7,89 $\pm$ 0,35	8,48 $\pm$ 0,45	+7,6%	+9,0%
CSFW-50	50	5,78 $\pm$ 0,35	6,13 $\pm$ 0,52	7,83 $\pm$ 0,31	-16,4%	+0,6%
CSFW-75	75	5,30 $\pm$ 0,47	6,04 $\pm$ 0,63	7,85 $\pm$ 0,47	-17,6%	+0,9%

Nota: Δ calculado respecto a la media del control en cada edad.

Tabla 6. Resistencia a compresión: media $\pm$ DE (MPa), n = 6 por celda

Mezcla	%	7d Media $\pm$ DE	CV%	28d Media $\pm$ DE	CV%	90d Media $\pm$ DE	CV%
Control	0	26,75 $\pm$ 1,35	5,0	35,93 $\pm$ 1,21	3,4	45,74 $\pm$ 1,36	3,0
CSFW-5	5	23,94 $\pm$ 2,49	10,4	38,16 $\pm$ 0,84	2,2	48,30 $\pm$ 1,28	2,6
CSFW-10	10	23,83 $\pm$ 0,91	3,8	35,91 $\pm$ 0,50	1,4	42,62 $\pm$ 1,00	2,3
CSFW-15	15	24,99 $\pm$ 0,72	2,9	37,94 $\pm$ 0,71	1,9	46,17 $\pm$ 0,90	1,9
CSFW-20	20	23,07 $\pm$ 0,44	1,9	39,13 $\pm$ 1,15	2,9	47,70 $\pm$ 1,16	2,4
CSFW-25	25	31,50 $\pm$ 0,81	2,6	44,17 $\pm$ 0,83	1,9	49,10 $\pm$ 1,18	2,4
CSFW-50	50	27,33 $\pm$ 0,99	3,6	35,61 $\pm$ 1,58	4,4	41,39 $\pm$ 0,77	1,9
CSFW-75	75	20,57 $\pm$ 2,78	13,5	29,02 $\pm$ 0,89	3,1	37,30 $\pm$ 1,67	4,5

coeficiente de variación (CV) se mantuvo $\leq 5,5\%$ en todas las celdas, con la excepción de CSFW-5 a 7 días (CV = 10,4%), CSFW-75 a 7 días (CV = 13,5%), atribuibles a la mayor variabilidad propia de las edades tempranas y de las sustituciones extremas.

La verificación de supuestos del ANOVA se resume en la Tabla 7. A 28 y 90 días se cumplen tanto la normalidad de los residuos (Shapiro-Wilk, $p = 0,706$ y $p = 0,281$) como la homogeneidad de varianzas (Levene, $p = 0,333$ y $p = 0,419$). A 7 días se mantiene la homocedasticidad ($p = 0,493$) pero se rechaza la normalidad ($p = 0,001$), desviación originada en una determinación de la celda CSFW-75 (26,09 MPa frente a un rango de 18,79–20,61 MPa en las cinco restantes). Dado este incumplimiento parcial, se aplicaron contrastes robustos como análisis confirmatorio.

El ANOVA de un factor confirmó un efecto altamente significativo del nivel de sustitución sobre la resistencia a compresión en las tres edades (Tabla 8). Los contrastes robustos conducen a la misma conclusión: el ANOVA de Welch y la prueba de Kruskal-Wallis resultan significativos ($p < 0,001$) en las tres edades, de modo que el rechazo de

la hipótesis nula de igualdad de medias no depende del cumplimiento de los supuestos paramétricos.

Tabla 7. Verificación de los supuestos del ANOVA para la resistencia a compresión

Edad	Shapiro-Wilk (residuos)	Levene (mediana)	Decisión
7 días	W = 0,899; $p = 0,001$	F = 0,93; $p = 0,493$	Normalidad rechazada
28 días	W = 0,983; $p = 0,706$	F = 1,19; $p = 0,333$	Ambos supuestos cumplidos
90 días	W = 0,971; $p = 0,281$	F = 1,04; $p = 0,419$	Ambos supuestos cumplidos

Shapiro-Wilk aplicado a los residuos del modelo (N = 48 por edad); Levene basado en la mediana ($k = 8$ grupos, $n = 6$ por grupo). Criterio de decisión: $\alpha = 0,05$.

Tabla 8. Contrastes globales para la resistencia a compresión (factor: nivel de sustitución de CSFW)

Edad	ANOVA clásico	ANOVA de Welch	Kruskal-Wallis
7 días	F = 27,52; $p < 0,001$	F(7; 16,8) = 65,40; $p < 0,001$	H = 37,52; $p < 0,001$
28 días	F = 104,92; $p < 0,001$	F(7; 17,0) = 117,60; $p < 0,001$	H = 40,44; $p < 0,001$
90 días	F = 68,79; $p < 0,001$	F(7; 17,1) = 51,51; $p < 0,001$	H = 43,26; $p < 0,001$

Tabla 9. Comparaciones múltiples frente al control: Tukey HSD y Games-Howell ($\alpha = 0,05$)

Mezcla	7d: Δ vs. control	Sig.	28d: Δ vs. control	Sig.	90d: Δ vs. control	Sig.
CSFW-5	-2,80 (-10,5%)	ns	+2,23 (+6,2%)	ns	+2,56 (+5,6%)	ns
CSFW-10	-2,92 (-10,9%)	*	-0,02 (-0,1%)	ns	-3,12 (-6,8%)	*
CSFW-15	-1,75 (-6,5%)	ns	+2,02 (+5,6%)	ns	+0,43 (+0,9%)	ns
CSFW-20	-3,67 (-13,7%)	*	+3,20 (+8,9%)	*	+1,96 (+4,3%)	ns
CSFW-25	+4,75 (+17,8%)	*	+8,24 (+22,9%)	*	+3,36 (+7,3%)	*
CSFW-50	+0,59 (+2,2%)	ns	-0,32 (-0,9%)	ns	-4,35 (-9,5%)	*
CSFW-75	-6,18 (-23,1%)	*	-6,91 (-19,2%)	*	-8,44 (-18,5%)	*

HSD de Tukey: 7d = 2,84 MPa; 28d = 1,87 MPa; 90d = 2,20 MPa. (*) diferencia significativa bajo ambos criterios (Tukey y Games-Howell); ns = no significativa o no concordante entre criterios. Diferencias expresadas en MPa (porcentaje respecto del control).

Las comparaciones frente al control se presentan en la Tabla 9. Los signos de significancia corresponden a la prueba de Games-Howell, robusta a la heterocedasticidad, y se indican únicamente cuando coinciden con la conclusión de la prueba de Tukey HSD. A 7 días, la mezcla CSFW-25 superó significativamente al control (+17,8%). A 28 días, las mezclas CSFW-20 y CSFW-25 excedieron al control en magnitudes estadísticamente significativas bajo ambos criterios, alcanzando CSFW-25 la mayor diferencia (+22,9%); las mezclas CSFW-5 y CSFW-15, significativas bajo Tukey, no alcanzan significancia bajo Games-Howell ($p = 0,062$ y $p = 0,088$, respectivamente), por lo que se reportan como no concluyentes. A 90 días, CSFW-25 mantuvo una diferencia positiva significativa (+7,3%), mientras que CSFW-10, CSFW-50 y CSFW-75 resultaron significativamente inferiores al control; CSFW-20 no difirió significativamente del control (+4,3%).

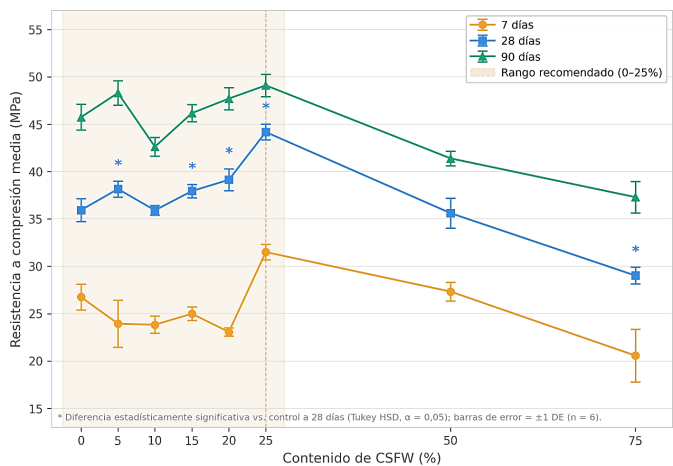


Figura 3. Resistencia media a compresión (MPa) en función del nivel de sustitución de CSFW a 7, 28 y 90 días ($n = 6$ por celda; barras de error = ± 1 DE). Asteriscos (*): diferencias estadísticamente significativas frente al control a 28 días (Tukey HSD y Games-Howell, $\alpha = 0,05$). Zona sombreada: rango de sustitución recomendado (0–25%)

Cabe destacar que la superioridad de CSFW-25 frente al control se mantiene en las tres edades bajo el criterio robusto de Games-Howell ($p = 0,001$ a 7 días; $p < 0,001$ a 28 días; $p = 0,016$ a 90 días), lo que confirma que la conclusión principal del estudio no depende del cumplimiento de los supuestos paramétricos del ANOVA clásico.

Interpretación mecánica

El desempeño mecánico superior de la muestra CSFW-25 no puede atribuirse a reactividad puzolánica. El análisis XRD confirma una mineralogía completamente cristalina, sin fase amorfa detectable, descartando una contribución significativa a la formación adicional de gel C-S-H, consistente con Wang et al. (2021) y Nazer et al. (2025). La mejora de resistencia se atribuye a la acción combinada de tres contribuciones de naturaleza física: (i) el aumento de la razón volumétrica pasta/árido derivado de la sustitución en masa, cuantificado en +8,8% para CSFW-25; (ii) la densificación del esqueleto granular, dado que reemplazar arena ($\rho = 2.545 \text{ kg/m}^3$) por CSFW ($\rho = 3.757 \text{ kg/m}^3$) reduce la porosidad efectiva de la matriz, confirmado por el aumento monótono de la densidad endurecida (Tabla 4); y (iii) el llenado de vacíos en la ITZ por la fracción fina del CSFW ($3,88\% < 0,08 \text{ mm}$), que mejora la transferencia de carga entre árido y pasta. Panda et al. (2022) verificaron este último mecanismo microestructuralmente en hormigón con CS mediante SEM, documentando una ITZ más compacta y libre de defectos en comparación con árido convencional. En el presente estudio, la ausencia de análisis SEM-EDS impide la verificación directa y, en particular, impide cuantificar la contribución relativa de cada uno de los tres mecanismos señalados.

El mejor desempeño a 25% de sustitución, nivel inferior



al rango 40–50% reportado para CS sin procesar (Al-Jabri et al., 2011; Wang et al., 2021), se explica por el efecto combinado de la PSD más fina del CSFW y de su mayor angulosidad. Al aumentar el contenido de CSFW, su mayor área superficial específica eleva rápidamente la demanda de agua para humectación superficial y la fricción interna del esqueleto granular, deteriorando progresivamente la trabajabilidad (Tabla 3). Por sobre el 25% de sustitución, la pérdida de trabajabilidad compromete la compactación bajo condiciones de mezclado manual, generando vacíos de aire atrapado que contrarrestan y finalmente superan las tres contribuciones favorables descritas. Este mecanismo de degradación, y no el aumento de la razón a/c efectiva, cuya variación total es de solo +0,022 unidades entre el control y CSFW-75, podría explicar la caída de resistencia en el rango alto de sustitución.

Estos resultados muestran la dualidad funcional del CSFW: su mineralogía cristalina y de alta densidad constituye una limitación cuando se utiliza como material cementicio suplementario (donde se requiere reactividad), pero un activo cuando se emplea como árido fino (donde dominan el empaquetamiento físico y la densidad), confirmando que el rol óptimo del material depende del contexto funcional.

Deben señalarse cuatro limitaciones del estudio: (i) no se evaluaron propiedades de durabilidad ni la lixiviación de metales pesados (Fe, Cu), aspecto que constituye un requisito previo para aplicación en obra dado el contenido de 32,35% Fe y 0,53% Cu; (ii) no se realizó caracterización por SEM-EDS, por lo que el mecanismo de densificación se sustenta en evidencia macroscópica indirecta; (iii) no se ensayaron niveles intermedios entre 25 y 50% de sustitución, de modo que el nivel de 25% corresponde al mejor desempeño entre los niveles evaluados y no necesariamente al óptimo global, el cual podría situarse en 30, 35 o 40%; (iv) la sustitución en masa impide desacoplar la contribución del aumento de la razón volumétrica pasta/árido respecto de la del efecto de densificación del CSFW. Las prioridades de investigación futura incluyen un diseño experimental con sustitución en base volumétrica y niveles intermedios de 30, 35 y 40%, ensayos de lixiviación, análisis SEM-EDS de la interfaz pasta-árido CSFW, amasado mecanizado y ensayos de durabilidad en condiciones representativas de la Región de Atacama.

Conclusiones

Sobre la base de los resultados experimentales y del análisis estadístico, se concluye que:

1. El CSFW de la Planta Manuel Antonio Matta de ENAMI es un material predominantemente cristalino, con densidad real seca de 3.757 kg/m^3 y granulometría compatible con el uso como árido fino en morteros de cemento sin molienda adicional.
2. La consistencia del mortero fresco disminuyó de forma monótona con el contenido de CSFW, manteniéndose dentro del requisito de NCh 2260 ($60 \pm 20 \text{ mm}$) hasta una sustitución del 20% y resultando impracticable al 75%. La reducción se explica principalmente por el aumento del área superficial específica y de la angulosidad del árido, y no por el balance de agua libre, cuya variación es marginal (+3,8%).
3. La densidad del mortero endurecido aumentó con el contenido de CSFW, alcanzando 2.452 kg/m^3 a 90 días para CSFW-75, frente a 2.207 kg/m^3 del control.
4. La mezcla CSFW-25 produjo la mayor resistencia a compresión entre los ocho niveles evaluados: $31,50 \pm 0,81 \text{ MPa}$ (7 días), $44,17 \pm 0,83 \text{ MPa}$ (28 días) y $49,10 \pm 1,18 \text{ MPa}$ (90 días). El incremento a 28 días (+22,9% respecto al control) es estadísticamente significativo tanto bajo la prueba de Tukey HSD como bajo la prueba robusta de Games-Howell ($p < 0,001$). La resistencia a flexión siguió la misma tendencia: $7,89 \pm 0,35 \text{ MPa}$ a 28 días (+7,6%).
5. Dado que no se ensayaron niveles de sustitución intermedios entre 25 y 50%, el valor de 25% corresponde al mejor desempeño observado dentro del rango evaluado y no puede afirmarse que constituya el óptimo global.
6. El mejor nivel de sustitución de CSFW como árido fino identificado en este estudio (25%) es inferior al rango 40–50% reportado para escoria de cobre (CS) sin procesar, y se atribuye a la distribución granulométrica más fina y a la mayor angulosidad del CSFW, las cuales desplazan el umbral de degradación de la trabajabilidad, y con ello el de la resistencia, hacia niveles de sustitución menores.
7. La mejora de resistencia se atribuye a mecanismos de naturaleza física y no a reactividad puzolánica, consistentemente con la mineralogía cristalina determinada por XRD. Dichos mecanismos incluyen el aumento de la



razón volumétrica pasta/árido inducido por la sustitución en masa (+8,8% en CSFW-25), la densificación del esqueleto granular y el llenado de vacíos en la ITZ. El diseño experimental empleado no permite cuantificar la contribución individual de cada mecanismo, lo que requiere un estudio complementario con sustitución en base volumétrica.

8. Se recomienda el uso de CSFW como reemplazo de árido fino en morteros de cemento de uso no estructural hasta un 25% de sustitución en masa (equivalente a 18,4% en volumen), condicionado a la verificación futura de la seguridad ambiental mediante ensayos de lixiviación y a la verificación microestructural del mecanismo de densificación mediante SEM-EDS. Estos resultados contribuyen a una línea de investigación más amplia sobre la valorización de residuos mineros de la Región de Atacama para la producción de materiales alternativos de construcción de baja huella de carbono.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), Planta Manuel Antonio Matta de Copiapó, por el suministro del material CSFW utilizado en este estudio.

Referencias

Abdalla, T.A. y Alahmari, T.S. (2024). Mechanical strength and microstructure properties of concrete incorporating copper slag as fine aggregate: A state-of-the-art review. *Advances in Civil Engineering* 2024, 4389616

Afshoon, I. y Sharifi, Y. (2017). Use of copper slag microparticles in self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal* 114(5), 691–699

Al-Jabri, K.S., Al-Saidy, A.H. y Taha, R. (2011). Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. *Construction and Building Materials* 25(2), 933–938

Cendoya, P. (2009). Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería* 17(1), 85–94

Cochilco (2019). Producción de cobre en Chile 2018. Comisión Chilena del Cobre, Santiago, Chile

Herrera, C. (2018). Evaluación de circuitos de flotación de escoria de cobre en Planta Manuel Antonio Matta. Memoria de título, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile

INN (1967). NCh 158. Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1968). NCh 148. Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1977). NCh 1223. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del material fino menor que 0,080 mm. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1982). NCh 1498. Hormigón – Agua de amasado – Requisitos. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1996). NCh 2257/3. Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 3: Método del cono de 15 cm. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (1996). NCh 2260. Cementos – Arena normal para morteros de cemento – Requisitos. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2008). NCh 1116. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2009). NCh 165. Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2009). NCh 1037. Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2009). NCh 1239. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real, neta y la absorción de agua de las arenas. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2010). NCh 2261. Cementos – Determinación de la resistencia a la compresión. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

INN (2013). NCh 163. Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales. Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile



Nazer, A., Pavez, O. y Toledo, I. (2013). Effect of type of cement on the mechanical strength of copper slag mortars. *REM. Revista Escola de Minas* 66(1), 85–90

Nazer, A., Payá, J., Borrachero, M.V. y Monzó, J. (2016). Use of ancient copper slags in Portland cement and alkali activated cement matrices. *Journal of Environmental Management* 167, 115–123

Nazer, A., Pavez, O. y Flores, H. (2025). Uso de relaves de flotación de escorias de cobre en hormigón. *Obras y Proyectos* 38, 27–34

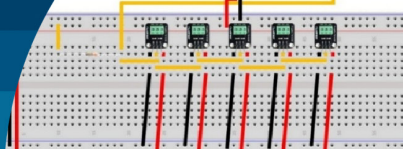
Olave Arévalo, E.S. (2020). Estudio de la incorporación de relaves de flotación de escoria de cobre como árido fino en morteros de cemento. Memoria de título, Universidad de Atacama, Copiapó, Chile

Panda, S., Sarkar, P. y Davis, R. (2022). Microstructural characterization of ITZ in copper slag concrete composite. *Journal of Materials in Civil Engineering* 34(8), 04022149

Pradena-Miquel, M., Cendoya-Hernández, P. y Borkowsky-Opazo, A. (2019). Factibilidad técnica del uso de escorias de cobre como reemplazo de arena en morteros de pega de muros de albañilería. *Tecnología en Marcha* 32(2), 100–111

Sharma, R. y Khan, R.A. (2017). Sustainable use of copper slag in self compacting concrete containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production* 151, 179–192

Wang, R., Shi, Q., Li, Y., Cao, Z. y Si, Z. (2021). A critical review on the use of copper slag (CS) as a substitute constituent in concrete. *Construction and Building Materials* 292, 123371



Impacto de la energía de activación en la estimación de la resistencia a la compresión de hormigones masivo

Impact of activation energy on the estimation of compressive strength of mass concrete

Rodrigo Guerra¹, Christian Vargas¹ y Paulo Rojas¹

¹Departamento de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad de La Serena.

El objetivo de este estudio es analizar el impacto de la energía de activación en la estimación de la resistencia a la compresión del hormigón masivo. Para ello, se confeccionó un cubo de hormigón G35 de arista 1,0 m. como un estudio de validación experimental de un caso único. Este bloque fue monitoreado con sensores de temperatura impermeables DS18B20 a distintas profundidades. Se registraron las temperaturas de cinco sensores durante 28 días en intervalos de recolección de información cada 15 minutos. La resistencia a la compresión de laboratorio fue medida en probetas cilíndricas para edades de 1, 3, 5, 7, 14, 21 y 28 días en el caso del hormigón patrón y en el caso del bloque de hormigón masivo su resistencia se comparó con un testigo. Los resultados permiten apreciar una mejor precisión en la estimación de la resistencia a la compresión al utilizar los métodos asociados a energía de activación. Entre ellos destaca el método de Nielsen-Kaasgaard con un error observado entre 1,07 % y 2,27% y se obtuvo una menor precisión en las estimaciones realizadas con el método de Nurse-Saul al reportar errores del orden del 5%.

Palabras clave: Calor de hidratación, Hormigón masivo, Factor temperatura-tiempo, Madurez del hormigón.

The aim of this study is to analyze the impact of activation energy on estimating the compressive strength of mass concrete. To this end, a G35 concrete cube with a 1.0 m edge was constructed as a single-case experimental validation study. This block was monitored with DS18B20 waterproof temperature sensors at various depths. Temperatures were recorded by five sensors over a 28-day period, with data collection intervals of every 15 minutes. The laboratory compressive strength was measured in cylindrical specimens for ages of 1, 3, 5, 7, 14, 21 and 28 days in the case of the mass concrete block its strength was compared to a core sample. The results show improved accuracy in estimating compressive strength when using methods associated with activation energy. Among them, the Nielsen-Kaasgaard method stands out with an observed error between 1.07% and 2.27%, and less precision was obtained in the estimates made with the Nurse-Saul method, reporting errors of around 5%.

Keywords: Heat of hydration, Mass concrete, Temperature-time factor, Concrete maturity

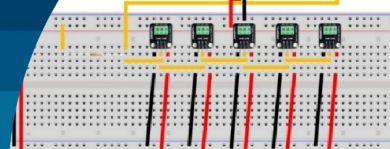
Introducción

El hormigón es un material artificial similar en apariencia y propiedades a algunas rocas naturales de piedra caliza. Su componente principal es agregado natural como grava o roca triturada, arena y partículas finas de cemento, todo mezclado con agua (Kaur & Kaur, 2012).

En la construcción de hormigones de dimensiones menores, el calor desarrollado por la hidratación de los materiales cementicios se disipa rápidamente al medio ambiente y esto normalmente no plantea problemas graves. Sin embargo, en elementos de hormigón de grandes dimensiones o masivos, el agrietamiento temprano inducido térmicamente

es un problema que requiere especial atención en las etapas de diseño y construcción (Ballim, 2004).

El hormigón masivo se ha asociado históricamente con estructuras como presas o grandes elementos de hormigón como pilares de puentes o fundaciones. El Comité ACI 207 ha definido el hormigón masivo como cualquier volumen de hormigón con dimensiones lo suficientemente grandes como para requerir que se tomen medidas para hacer frente a la generación de calor por la hidratación del cemento y el consiguiente cambio de volumen para minimizar el agrietamiento (Bakour & Ftima, 2021). Debido a que esta



definición no proporciona una medida específica, muchas agencias han desarrollado sus propias definiciones de hormigón masivo. Por ejemplo, algunas agencias definen el hormigón masivo como cualquier elemento de hormigón que tenga una dimensión mínima superior a 0,90 m. Otras agencias utilizan dimensiones mínimas diferentes, que van desde 0,46 a 2,00 m, según su experiencia. Es importante tener en cuenta que ninguna de estas definiciones considera el contenido de cemento del hormigón (Gajda & Vangeem, 2002).

Los efectos térmicos asociados con las primeras etapas de hidratación del cemento son de particular importancia en estructuras masivas de hormigón. La diferencia de temperatura entre el interior y la superficie exterior del elemento de hormigón, que se enfría relativamente rápido, provocada como resultado del calor liberado por la hidratación del cemento, conduce a la formación de tensiones térmicas en un hormigón inmaduro (Batog & Giergiczny, 2017)(Ballim, 2004).

La hidratación del cemento provoca una reacción exotérmica capaz de generar grandes cantidades de calor. Históricamente, esto ha sido un problema en obras como las presas, y desde la década de 1920 se dispone de métodos numéricos para predecir las temperaturas en elementos masivos de hormigón (Riding *et al.*, 2006).

Se han desarrollado numerosos productos comerciales para controlar los límites de temperatura permitidos y las diferencias de temperatura en el hormigón masivo, pero dicho control es una tarea difícil en las obras de construcción. La diferencia de temperatura máxima permitida (19°C) y los límites de temperatura (68-74°C) son factores esenciales que son críticos para lograr la integridad estructural, la capacidad de servicio y la durabilidad a largo plazo de estructuras masivas de hormigón, y deben ser tomados en cuenta para contrarrestar los efectos negativos del agrietamiento térmico sobre las propiedades mecánicas del hormigón (Y. R. Kim *et al.*, 2015).

La resistencia del hormigón correctamente dosificado, colocado y curado se puede expresar como una función de la historia temperatura-tiempo que se relaciona con la hidratación del hormigón (Yikici & Chen, 2015). Este concepto se conoce como madurez y está relacionado directamente a la temperatura a la que está expuesto el

hormigón, aunque en algunos casos esta tiene que ver con el grado de resistencia. Esto indica que un hormigón alcanza a cierta edad un grado de resistencia, dependiendo de las temperaturas a las que ha estado sometido durante dicho período (Instituto Nacional de Normalización, 2018).

Sin embargo, existen preocupaciones sobre la precisión del método de madurez en aplicaciones de hormigón estructural, especialmente cuando se construyen elementos de hormigón masivo donde las temperaturas variables del hormigón en toda la sección afectan el historial de curado (Maruyama & Lura, 2019). Además, el efecto “crossover” ha sido reportado en la literatura, dado que limita la aplicabilidad del método de madurez para predecir el comportamiento del hormigón que tiene una temperatura alta a temprana edad. Específicamente, las altas temperaturas de curado (>40°C) a una edad temprana conducen a valores de resistencia última más bajos en comparación con una temperatura de curado inicial más baja (Yikici & Chen, 2015).

A pesar de los avances normativos y los aportes de distintos autores, existe una brecha en la validación de estos modelos en contextos locales, específicamente para hormigones masivos con áridos del norte de Chile. Este estudio busca aportar a la discusión de esta brecha comparando la precisión del método de Nurse-Saul (NCh 3565:2018) frente a modelos de energía de activación variable en un bloque de 1 m³ de resistencia G35, proporcionando evidencia sobre el modelo que mejor captura la cinética de hidratación in situ para este estudio. Este trabajo se presenta como un estudio de validación experimental de un caso único.

Materiales y Métodos

Hormigón Patrón

Para la confección del bloque de hormigón masivo se dosificó un hormigón patrón G35 que tradicionalmente es utilizado en pavimentos o estructuras como puentes en Chile. Este hormigón tiene como característica principal una alta impermeabilidad y alto contenido de cemento. El cemento utilizado es del tipo alta resistencia Polpaico P-400 y la razón agua-cemento considerada en la dosificación es 0,46. En la Tabla 1 se muestran las cantidades de materiales que fueron consideradas en este trabajo.

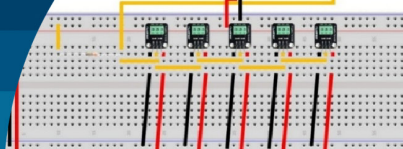


Tabla 1. Dosificación del Hormigón G35 para 1 m³.

Material	Masa Húmeda kg
Cemento	395
Agua	180
Grava	639
Gravilla	458
Arena	737
	2.409 kg

En el laboratorio se preparó un hormigón G35, con el fin de elaborar la curva de calibración por el método de madurez según NCh 3565:2018. Estas probetas cilíndricas se curaron en piscina con agua y cal a temperatura de 23°C ± 1°C. Se prepararon 3 probetas cilíndricas y se ensayaron dos para cada edad, dejando la tercera para corregir dispersiones importantes, totalizando 21 en total disponibles para la determinación de la resistencia a la compresión a 1, 3, 5, 7, 14, 21 y 28 días. Se confeccionó una probeta cilíndrica adicional para incorporar el sensor de temperatura y registrar la historia temperatura-tiempo del hormigón patrón durante los 28 días de curado.

Los resultados a 28 días presentaron un promedio de 38,23 MPa con un coeficiente de variación de 1,65%, garantizando la repetibilidad del ensayo de laboratorio. Se ha incluido la Tabla 2 con datos del promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para cada edad, lo que da muestra de la dispersión aceptable de los datos en el registro de resultados.

Tabla 2. Estadística de resultados Hormigón G35.

Edad (días)	Resistencia Promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	Coeficiente Variación (%)
1	6,36	0,06	0,89
3	14,35	0,23	1,63
5	18,87	0,72	3,84
7	23,03	0,88	3,82
14	33,29	1,10	3,30
21	35,70	0,34	0,94
28	38,23	0,63	1,65

Métodos de madurez

El desarrollo de los métodos de madurez se inicia a fines de la década de los '40 e inicio de los '50, y fue el resultado de la necesidad de estimar los efectos de los tratamientos

de curado con vapor sobre el desarrollo de resistencia del hormigón (Soutsos & Kanavaris, 2018).

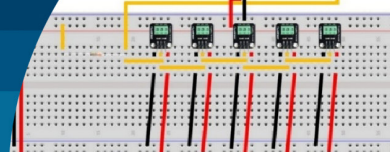
La norma NCh3565:2018 está dirigida al uso práctico de la metodología para estimar la resistencia del hormigón en Chile en terreno por medios no destructivos y está basada en la norma ASTM C1074 (Ebensperger *et al.*, 2020). En esta norma se define la ecuación de Nurse-Saul para la estimación del índice de madurez, la que tiene una estructura matemática simple (Guerra, 2025). La norma ASTM C1074 proporciona un procedimiento para estimar la resistencia del hormigón mediante el método de madurez, a través del índice de madurez se expresa en términos del factor temperatura-tiempo o en términos de la edad equivalente a una temperatura específica o temperatura Datum. Estas ecuaciones fueron incorporadas en la primera versión de la ASTM C1074 (ASTM C1074, 2019)

Aunque la NCh 3565:2018 define el método de Nurse-Saul como estándar en Chile, ACI 207 y autores como Maruyama & Lura (2019) advierten que modelos lineales pueden ser insuficientes cuando el calor de hidratación genera temperaturas que activan de forma no lineal la cinética del cemento.

Por ello, en la norma Chilena apartado 1.2 Alcance y campo de aplicación, se indica que en aquellos casos de condiciones de hormigonado y endurecimiento del hormigón con temperaturas del hormigón sobre 40°C de forma prolongada (como por ejemplo hormigones masivos, hormigones curados en vapor), la estimación de resistencia mediante el método, sobre 7 días, se debiera estudiar (Instituto Nacional de Normalización, 2018). Lo anterior, cobra relevancia dado que la ecuación de Nurse-Saul incorpora en su formulación una evolución lineal de la Madurez y no representa la no linealidad de la evolución de la temperatura en el hormigón y el fenómeno termodinámico que se produce. Esta no linealidad es un fenómeno relevante en hormigones masivo y es lo que motiva el estudio de este caso.

Método de Nurse-Saul

El método de Nurse-Saul se distingue por su sencillez, ya que establece una relación lineal entre el tiempo y la temperatura acumulada. Su facilidad de aplicación lo hace ideal para proyectos que requieren una rápida toma



de decisiones o que están ubicados en zonas donde las variaciones térmicas son mínimas. No obstante, esta simplicidad implica ciertas limitaciones, ya que no ajusta la ganancia de resistencia frente a cambios significativos en las temperaturas, lo que reduce su precisión en climas más variables (Maruyama & Lura, 2019). La ecuación (1) presenta la fórmula asociada al modelo de madurez de Nurse-Saul.

$$M(t) = \sum_0^t (T - T_0) \cdot \Delta t \quad (1)$$

Donde:

$M(t)$: Función de Madurez (°C-h)

T : Promedio de la temperatura en cada intervalo de tiempo (°C)

T_0 : Temperatura Datum (°C)

Δt : Intervalo de tiempo (h)

Una estimación práctica de la temperatura Datum o de referencia, que se define cuando el hormigón comienza a ganar resistencia, sugiere valores entre 0°C y -10°C. En Chile, el valor para la temperatura datum recomendado es 0°C para las regiones con temperaturas cálidas la mayoría del año y de -10°C para regiones del extremo sur o zonas de bajas temperaturas (Instituto Nacional de Normalización, 2018). El monitoreo y registro de la temperatura del hormigón, durante el tiempo de estudio, se realiza en intervalos de 30 minutos.

Método de Arrhenius

El método de Arrhenius introduce la energía de activación como un factor crucial, permitiendo modelar de manera más detallada la influencia de las variaciones térmicas en el proceso de hidratación del cemento. Este enfoque teórico ofrece mayor precisión en climas extremos o en proyectos con cambios importantes de temperatura (Tekle *et al.*, 2022). Sin embargo, su implementación requiere ensayos experimentales previos para determinar parámetros específicos de cada mezcla, lo que incrementa el tiempo y los recursos necesarios para su aplicación.

$$t_{eq} = \sum_0^t \exp \left[-\frac{E_a}{K} \cdot \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s} \right) \right] \cdot \Delta t \quad (2)$$

Donde:

t_{eq} : Edad Equivalente (días, horas)

E_a : Energía de Activación (J/mol)

K : Constante de los gases 8,314472 (J/mol*K)

T_a : Promedio de temperatura en el intervalo de tiempo (273 + T_a) (°K)

T_s : Temperatura de referencia especificada 20°C (273+20 = 293) (°K)

Δt : Intervalo de tiempo (horas)

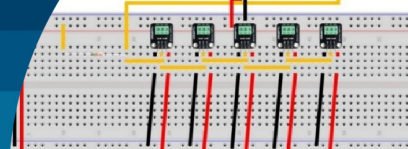
Ambas formas de determinar la función de Madurez fueron incorporadas en la primera versión de la norma ASTM C1074, entregando incluso procedimientos de laboratorio para determinar la Energía de Activación de un determinado cemento, y poder así aplicar adecuadamente la ecuación (2). Para la determinación de la Energía de Activación se pueden utilizar varios métodos, como la medición de la resistencia de cubos de mortero, la medición del calor de hidratación o de retracción química en la pasta de cemento (Ebensperger *et al.*, 2020).

El cálculo de la energía de activación (E_a) sigue una metodología estandarizada por la norma ASTM C1074 (ASTM C1074, 2019). Primero, se ensayan probetas de hormigón a diferentes edades bajo al menos tres temperaturas de curado, obteniendo curvas de desarrollo de resistencia específicas para cada caso. De estas curvas se derivan los valores de la constante K , que indican la tasa de ganancia de resistencia bajo las condiciones ensayadas. Luego, se calcula el logaritmo natural de K y se determinan las temperaturas absolutas en grados kelvin para graficar $\ln(K)$ frente a $1/T$. La pendiente de la recta obtenida mediante regresión lineal permite calcular $-E_a/R$, y a partir de este valor se determina E_a , que representa la sensibilidad térmica del hormigón en las condiciones evaluadas (Ebensperger *et al.*, 2020).

Propuestas para la determinación de la Energía de activación

La energía de activación es un parámetro clave en los métodos empleados para la estimación de la resistencia del hormigón y permite considerar cómo las condiciones térmicas afectan la velocidad de las reacciones de hidratación del cemento y, en consecuencia, el incremento de resistencia en el hormigón (Geng *et al.*, 2021).

Para la determinación de la Energía de Activación se pueden utilizar varios métodos, como la medición de la resistencia de cubos de mortero, la medición del Calor



de Hidratación o de Retracción Química en pasta de cemento (Ebensperger *et al.*, 2020). En la norma ASTM C1074 se entrega el procedimiento para determinar el valor de la energía de activación curando probetas de mortero a tres temperaturas isotérmicas diferentes y midiendo su resistencia a compresión a distintas edades. Sin embargo, en ocasiones, las tres condiciones de curado isotérmico resultan imposibles o requieren mucho tiempo para su aplicación en obra (Tekle *et al.*, 2022). En este estudio se evalúan distintas propuestas numéricas para la determinación de la energía de activación y su posterior uso en la estimación de la resistencia de hormigones.

Valores recomendados por ASTM y CEB-FIP

La norma ASTM C1074 proporciona valores de referencia, recomendando un rango de energía de activación entre 38.000 y 45.000 J/mol (ASTM C1074, 2019). Este intervalo es aplicable a una amplia variedad de mezclas de hormigón, ya que considera factores como el tipo de cemento, la relación agua/cemento y las condiciones de curado, que influyen en el comportamiento del material, basado especialmente en climas templados o en situaciones donde se controla la temperatura de curado.

Adicionalmente, el estudio de Geng *et al.* (2021) hace referencia al valor recomendado por el modelo CEB-FIP, que establece el cociente Ea/R en aproximadamente 4.000 K ($Ea=33.257$ J/Mol) (Geng *et al.*, 2021). Este valor, algo menor que el sugerido por la norma ASTM C1074, refleja un enfoque más conservador para estimar la influencia de la temperatura en la resistencia del hormigón y resulta adecuado en aplicaciones que consideran el efecto de temperaturas moderadas durante el curado.

Modelo de Freisleben-Hansen

El modelo de Freisleben-Hansen se caracteriza por su relación bilineal que ajusta los valores de la energía de activación según si la temperatura está por encima o por debajo de los 20 °C como se muestra en las ecuaciones (3) y (4) (Hansen & Pedersen, 1977). Su principal objetivo es proporcionar una herramienta para calcular la energía de activación en entornos donde la temperatura puede influir considerablemente en la cinética de la hidratación del cemento, especialmente en climas fríos (Nielsen & Kaasgaard, 2020).

$$Ea = [33.500 + K(20 - T)] J/mol \text{ Para } T \leq 20^\circ C \quad (3)$$

$$Ea = 33.500 J/mol \text{ Para } T > 20^\circ C \quad (4)$$

En este caso, el coeficiente K fue definido con un valor de 1470 J/mol/°C, como una constante de ajuste para temperaturas inferiores a 20°C. Este enfoque permite representar de manera efectiva el impacto de las bajas temperaturas en la reacción de hidratación, donde se observa una disminución en la velocidad de ganancia de resistencia (Nielsen & Kaasgaard, 2020).

Modelo de Nielsen-Kaasgaard

Nielsen y Kaasgaard (2020) introdujeron modificaciones al modelo de Freisleben-Hansen para superar las limitaciones observadas en el análisis inicial. La propuesta incluyó una diferenciación más detallada de los coeficientes de ajuste térmico según si la temperatura era superior o inferior a los 20 °C. Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$Ea = [Ea_{20} + K_1(20 - T)] J/mol \quad (5)$$

$$Ea = [Ea_{20} + K_2(T - 20)] J/mol \quad (6)$$

En estas ecuaciones, $Ea_{20} = 33.500$ J/Mol y representa la energía de activación de referencia a 20°C, mientras que los coeficientes K_1 y K_2 reflejan la variación de la sensibilidad térmica según el rango de temperaturas. Los valores propuestos fueron $K_1 = 700$ J/mol/°C para temperaturas inferiores a 20 °C y $K_2 = 300$ J/mol/°C para temperaturas iguales o superiores a 20 °C. Estos valores fueron seleccionados considerando las mezclas más comunes, basadas en composiciones estándar con cemento Portland sin aditivos (Nielsen & Kaasgaard, 2020).

Método RILEM TC 119-TCE

El método RILEM TC 119-TCE (1997) establece una aproximación para calcular la energía de activación del hormigón, permitiendo estimar su resistencia en función de las temperaturas de curado. Este método es particularmente útil en condiciones climáticas variables, donde la temperatura puede afectar significativamente el desarrollo de resistencia del material (Geng *et al.*, 2021).

Para temperaturas iguales o superiores a 20 °C, se define un valor constante de energía de activación dividido por la constante universal de los gases ideales, el cual se utiliza en condiciones de curado estables o con variaciones térmicas mínimas, permitiendo una estimación uniforme de la resistencia del hormigón.

$$Ea / R = 4.000 \text{ J / mol} \quad (7)$$

Por otro lado, cuando la temperatura desciende por debajo de los 20 °C, la ecuación ajusta este valor para reflejar la disminución en la velocidad de hidratación del cemento.

$$Ea / R = [4.000 + 175(20 - T)] \text{ J / mol} \quad (8)$$

En este caso, T representa la temperatura de curado en grados Celsius. La ecuación (8) ajusta Ea/R de acuerdo con el descenso de la temperatura respecto al umbral de 20 °C, lo que permite adaptar el cálculo de madurez a entornos fríos. Este ajuste incremental en Ea/R representa la disminución de la velocidad de hidratación del cemento a medida que disminuye la temperatura, asegurando una estimación más precisa del desarrollo de resistencia en estas condiciones (Anonymous., 1997).

Método de Kim J. K.

El método propuesto por Kim *et al.* (2021) es reconocido porque el cálculo de la energía de activación es no lineal, considerando de manera integral los efectos de la temperatura y el tiempo sobre el desarrollo de resistencia del hormigón. Este método responde a las limitaciones de modelos tradicionales que asumen una energía de activación constante y, por ende, no logran capturar la dinámica compleja del proceso de hidratación bajo condiciones variables de curado (J. K. Kim *et al.*, 2001).

$$Ea = (42.830 - 43 \cdot T) e^{(-0.00017 \cdot T \cdot t)} \text{ J / mol} \quad (9)$$

Donde T representa la temperatura en grados Celsius y t el tiempo de curado, expresado en días. Este modelo se compone de dos términos fundamentales, donde el primer término introduce una reducción lineal en la energía de activación a medida que aumenta la temperatura, reflejando la aceleración de la hidratación del cemento a temperaturas más altas. El segundo término aplica un factor exponencial

que incorpora la interacción entre la temperatura y el tiempo, ajustando la energía de activación para considerar la hidratación progresiva conforme avanza el curado del hormigón (J. K. Kim *et al.*, 2001).

Desarrollo experimental

Instrumentación del bloque de hormigón masivo

Se confeccionó un bloque de hormigón masivo de dimensiones 1,0x1,0x1,0 m. El bloque fue instrumentado con cinco sensores digitales de temperatura impermeable DS18B20 con precisión de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, los que se conectaron a una placa Arduino Uno para recolectar la temperatura con una frecuencia de 15 minutos a lo largo de los 28 días de duración del estudio del curado del bloque in situ.

Para conectar los sensores DS18B20 al computador se utilizó una protoboard como se muestra en la Figura 1, junto con una resistencia de 4,7K Ohmios (ohm) para la comunicación OneWire, este protocolo utiliza solo un pin de datos para comunicarse y permite conectar más de un sensor en el mismo bus. La conexión del sensor tiene tres pines, el primero es el pin VDD (rojo) que debe conectarse al pin 5V de la placa Arduino, el segundo es el pin GND (negro) o tierra y el último es el pin DQ (amarillo) o Data, el cual es el pin que entrega la información de la temperatura (Ruiz Guti, 2007).

Una vez conectados adecuadamente todos los pines, la placa Arduino que se ve en la Figura 1 es conectada al computador mediante un cable USB B, además para la conexión de esta, se debe cargar un código en el programa Arduino IDE. Para capturar los datos del monitoreo de la temperatura, se utilizó una macro de Excel PLX-DAQ Spreadsheet la que permite la captación de la información (Guerra, 2025).

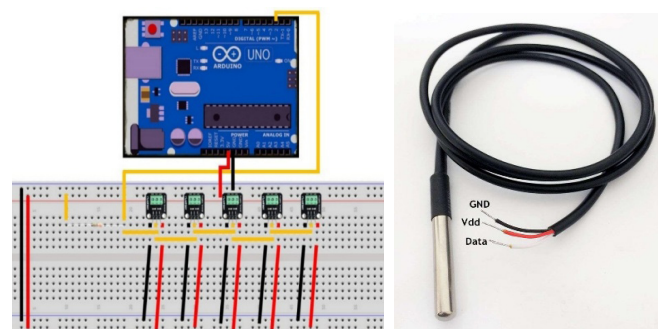
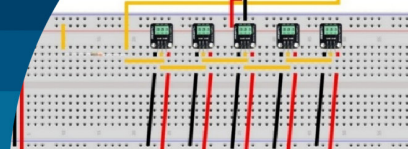


Figura 1. Esquema Arduino Sensor DS18B20



Confección del cubo de hormigón

Se confeccionó un moldaje de madera terciada revestido con placas de poliestireno expandido de 50 mm en cada cara del moldaje y además se incorporó una capa de polietileno que ayuda a la impermeabilidad del bloque, lo que se puede ver en la Figura 2. En el exterior del terciado como reforzamiento se dispuso elementos de madera de pino 2"x 4" entrecruzado para evitar el desarme del moldaje en el vertido de la mezcla.



Figura 2. Moldaje para la confección del bloque de hormigón masivo.

Ubicación de los sensores

Los sensores fueron ubicados estratégicamente para poder monitorear las temperaturas en distintos lugares dentro del bloque de hormigón, como se muestra en la Figura 3. Se colocó uno en el núcleo del bloque que es donde se espera que el diferencial de temperatura sea mayor. Otros dos sensores fueron posicionados en las partes externas del elemento, a 3 cm del borde, tanto en la base como en la parte superior. Por último, los otros dos sensores fueron colocados a 25 centímetros de la superficie y del fondo del bloque, con esto se obtuvo la información para estudiar la evolución de la temperatura en el bloque y pronosticar la evolución de la resistencia del hormigón in situ.

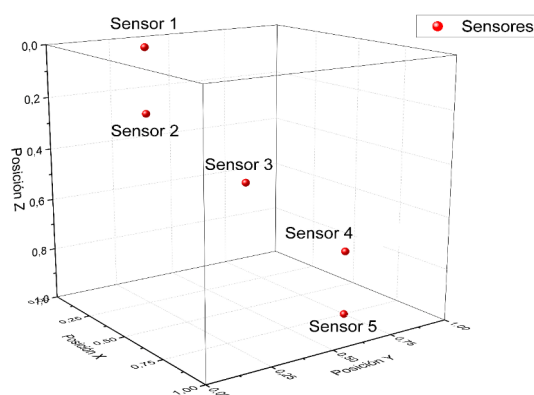


Figura 3. Ubicación de sensores de temperatura en el interior del bloque.

Resultados y discusión

Curva de calibración en laboratorio Método Nurse-Saul para hormigón patrón

En la Figura 4 se muestra la curva de calibración Madurez-Resistencia, obtenida por el método Nurse-Saul, para el hormigón patrón curado en piscina a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Cada valor de la curva representa los resultados de madurez y resistencia a la compresión a 1, 3, 5, 7, 14, 21 y 28 días de curado. La curva de calibración se obtuvo según NCh 3565:2018 y para ello se ensayaron 14 probetas (2 por edad) y se reservó una tercera para casos de alta dispersión. Los resultados a 28 días presentaron un promedio de 38,23 MPa con un coeficiente de variación de 1,65% y para las restantes edades el coeficiente de variación es menor a 4% como se muestra en la Tabla 2, garantizando la repetibilidad del ensayo de laboratorio. Sin embargo, es importante indicar que la curva de calibración es válida para las condiciones y resultados obtenidos para el hormigón de estudio en este trabajo, sometido a condiciones controladas en laboratorio según el plan de ensayo.

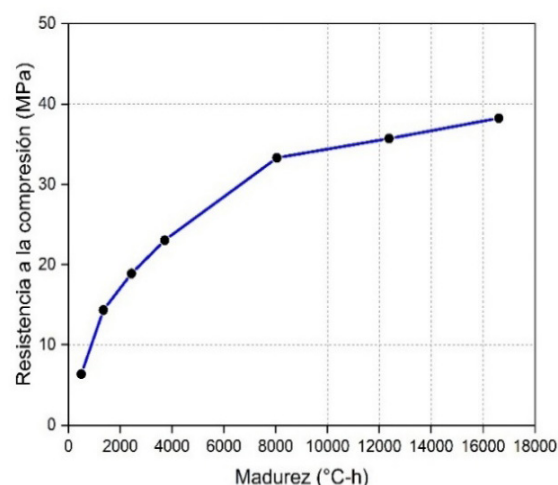


Figura 4. Curva Madurez-Resistencia método de Nurse-Saul para el hormigón patrón.

Temperatura del bloque a través del tiempo

El registro de la historia temperatura-tiempo de los sensores dispuestos en el interior del bloque se puede observar en la Figura 5. El registro muestra que el sensor 1, que es el que se ubica en la parte superior del bloque, presenta una marcada influencia de la temperatura ambiente mostrando ciclos día y noche muy marcados. En cambio, el sensor

ubicado en el núcleo del bloque presentó una mayor variación de temperatura, alcanzando una temperatura máxima de 52 °C aproximadamente. Esta temperatura se alcanzó entre el primer y segundo día después del vaciado. Los demás sensores muestran un comportamiento similar en cuanto a historia temperatura-tiempo, pero en escalas menores según su profundidad.

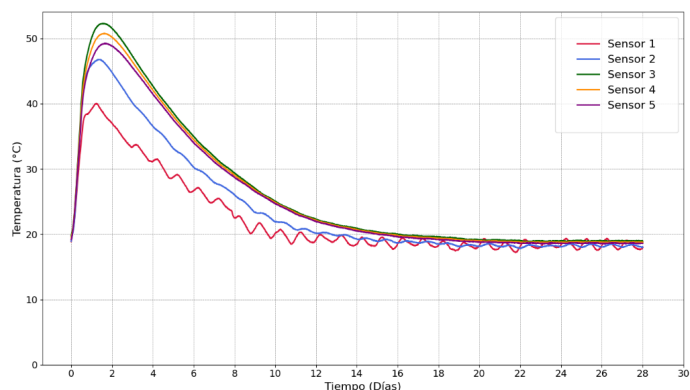


Figura 5. Evolución de las temperaturas en los sensores del bloque

La temperatura máxima de 52°C alcanzada en el núcleo del bloque supera el umbral crítico de 40°C donde se manifiesta el efecto crossover. Esto explica la mayor desviación del método Nurse-Saul, validando la necesidad de emplear energías de activación que se ajusten a estas condiciones térmicas.

Evaluación de la Resistencia a la compresión

Dada la naturaleza del hormigón masivo, este trabajo se presenta como un estudio de validación experimental in situ. A la edad de 28 días se extrajo un testigo en el bloque de hormigón con el fin de comparar los resultados obtenidos in situ con los predichos por el método de madurez de Nurse- Saul y Arrhenius para distintos valores de energía de activación. El testigo fue extraído en el centro del bloque de forma horizontal y sus dimensiones fueron de 10cm de diámetro y largo total de 40cm. En la Figura 6 se muestra el proceso de extracción del testigo desde el bloque de hormigón limitadas por el alcance del equipo extractor.

El testigo de hormigón se dividió en dos secciones para obtener estimaciones más representativas de las resistencias en la zona interior y exterior del bloque como se muestra

en la Figura 7. Para asegurar la calidad de las muestras, se descartaron los primeros 2 cm del testigo, dejando dos muestras (interior y exterior) de altura 19 cm cada una. Estas muestras fueron sometidas a ensayos en laboratorio.



Figura 6. Testigo extraído del bloque de hormigón masivo.

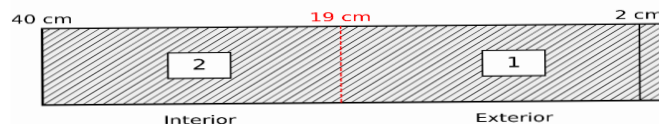


Figura 7. Esquema de segmentación del testigo de hormigón

Los ensayos realizados en laboratorio proporcionaron los valores corregidos de resistencia a la compresión para las muestras del testigo de hormigón a los 28 días, como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados corregidos de ensayo a la compresión del testigo de hormigón.

Nº de muestra	RESISTENCIA testigo 1 (MPa)
1 (Exterior)	41,11
2 (Interior)	40,87

A partir de los parámetros edad equivalente y energía de activación consideradas en este estudio, se estimaron las resistencias correspondientes a cada sensor. En la Tabla 4 se presentan los resultados de las resistencias estimadas a la edad de 28 días para cada sensor.

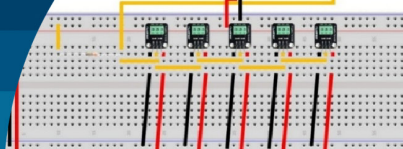


Tabla 4. Resistencia estimada para cada método y sensor a los 28 días

Método	Sensor 1 (MPa)	Sensor 2 (MPa)	Sensor 3 (MPa)	Sensor 4 (MPa)	Sensor 5 (MPa)
CEB-FIP	37,58	38,64	39,91	39,71	39,51
38000 J/mol	37,51	38,77	40,26	40,02	39,78
41500 J/mol	37,47	38,88	40,55	40,28	40,01
45000 J/mol	37,44	39,02	40,85	40,55	40,25
Arrhenius	37,55	38,69	40,06	39,84	39,62
Freisleben-Hansen	37,57	38,64	39,93	39,73	39,52
Nielsen	37,84	39,16	40,69	40,43	40,18
RILEM	37,57	38,63	39,91	39,71	39,51
Kim J. K.	37,54	38,90	40,50	40,24	39,98
Nurse-Saul	37,37	38,10	38,99	38,86	38,74

El análisis del sensor 4, ubicado a 25 cm de la base del cubo, se basó en una comparación con la resistencia obtenida en la muestra 2 (interior) del testigo de hormigón a los 28 días. En esta comparación, se observa, que en este estudio, los métodos basados en edad equivalente muestran mayor precisión en la estimación de la resistencia en comparación con el método de Nurse-Saul.

Los errores reportados son observaciones directas del caso de estudio. Es importante notar que la incertidumbre de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ de los sensores DS18B20 y pequeñas desviaciones en la profundidad de extracción de los testigos podrían influir en la correspondencia exacta entre la madurez calculada y la resistencia medida.

En la Tabla 5 se presentan los valores de resistencia estimada por cada método para este estudio, junto con el porcentaje de error observado respecto a la resistencia real de la muestra 2 de 40,87 MPa obtenida en el testigo. En la Tabla 5 se evidencia que los métodos con energías de activación más elevadas, como 45.000 J/mol, presentan un buen nivel de precisión, con un error de solo 0,79 %. Sin embargo, el modelo de Nielsen y Kaasgaard, que utiliza una energía de activación variable en función de la temperatura, también destaca por su capacidad de adaptarse a las condiciones térmicas locales, logrando un error de 1,07 %. Por otro lado, el método de Nurse-Saul muestra un error mayor al alcanzar un 4,91 %.

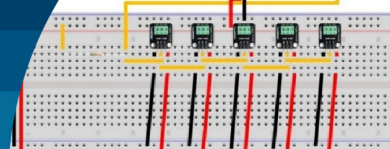
Tabla 5. Porcentaje de error observado en la estimación de resistencia sensor 4

Método	Resistencia (MPa)	Error (%)
CEB-FIP	39,71	-2,84
38.000 J/mol ASTM C1074	40,02	-2,07
41.500 J/mol ASTM C1074	40,28	-1,45
45.000 J/mol ASTM C1074	40,55	-0,79
Arrhenius	39,84	-2,53
Freisleben-Hansen	39,73	-2,80
Nielsen	40,43	-1,07
RILEM	39,71	-2,84
Kim J. K.	40,24	-1,54
Nurse-Saul	38,86	-4,91

En cuanto al sensor 5 ubicado a 3 cm de la base del cubo y en la periferia, este fue utilizado para estudiar la resistencia de la muestra 1 (exterior) del testigo. El análisis muestra un comportamiento similar a la del sensor 4, aunque con un ligero aumento en las diferencias entre las estimaciones de resistencia y la resistencia real. Este sensor se utilizó para comparar las estimaciones con la resistencia obtenida en la muestra 1 del testigo de hormigón. Los métodos basados en la energía de activación y edad equivalente, en particular el modelo de Nielsen y Kaasgaard, se acercaron más a los valores reales en comparación con el método de Nurse-Saul, que presentó una subestimación mayor en este caso.

La Tabla 6 se muestra la comparación de las resistencias estimadas por los diferentes métodos con la resistencia real de la muestra 1 de 41,11 MPa obtenida en el testigo en este estudio. En esta representación, se observa que los métodos de edad equivalente se ajustan mejor, mientras que Nurse-Saul subestima la resistencia respecto al valor real.

El análisis de los datos de la Tabla 6 permite indicar que los métodos con energías de activación más elevadas, como 45.000 J/mol, destacan por su precisión, con un error observado de 2,09 %. Por su parte, el modelo de Nielsen y Kaasgaard también demuestra un error observado bajo de 2,27 %. En contraste, el método de Nurse-Saul presenta un error observado mayor al alcanzar un 5,77 %,.



lo que evidencia su menor capacidad para adaptarse a las variaciones de temperatura.

Tabla 6. Porcentaje de error observado en la estimación de resistencia para el sensor 5.

Método	Resistencia (MPa)	Error (%)
CEB-FIP	39,51	-3,89
38.000 J/mol ASTM C1074	39,78	-3,22
41.500 J/mol ASTM C1074	40,01	-2,68
45.000 J/mol ASTM C1074	40,25	-2,09
Arrhenius	39,62	-3,62
Freisleben-Hansen	39,52	-3,86
Nielsen	40,18	-2,27
RILEM	39,51	-3,89
Kim J. K.	39,98	-2,74
Nurse-Saul	38,74	-5,77

Distintos autores han utilizado experiencias basadas en bloques de hormigón para el estudio de hormigones masivos analizando temas de resistencias, estimación de campos temperatura o parámetros que representen el comportamiento adiabático de hormigones. En el estudio de Yikici & Chen (2015), se utilizó el método de madurez para estimar la resistencia in situ de grandes bloques de hormigón de dimensiones 1,8m, determinando los valores de energía de activación en el laboratorio para los cálculos de edad equivalente. Sus resultados muestran una importante variabilidad de la resistencia predicha versus los testigos tanto en la superficie, zona media y en la sección inferior de los bloques de hormigón reportando incluso diferencias de $\pm 15\%$.

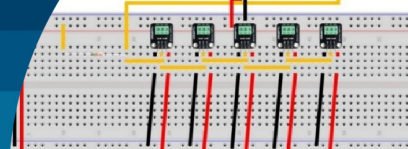
Conclusiones

En este trabajo se puede observar que la energía de activación desempeña un rol esencial en la ecuación de Arrhenius y los valores recomendados ofrecen una solución práctica para proyectos con recursos limitados o mezclas estándar de hormigón. Los distintos modelos presentados en este estudio introducen un concepto relevante al considerar que la energía de activación puede variar según

las condiciones externas. Este planteamiento rompe con el paradigma tradicional de que la energía de activación es un valor constante para cada mezcla. Sin embargo, en futuros trabajos se debe abordar las limitaciones del programa experimental, considerando mayor número de testigos, varias dimensiones del bloque, evaluación a edades tempranas y distintas condiciones ambientales.

Los resultados para el hormigón G35 utilizado en este estudio permiten observar que se obtiene una mayor precisión en la estimación de la resistencia a la compresión utilizando los métodos asociados a energía de activación (E_a). Se aprecia que los métodos empleados en este estudio para estimar la resistencia a la compresión subestiman el valor real de resistencia en el hormigón. Entre los distintos métodos que se utilizaron en este estudio destaca la propuesta de Nielsen-Kaasgaard con un error observado de estimación entre 1,07 y 2,27% y se obtuvo una menor precisión en las estimaciones realizadas con el método de Nurse-Saul al reportar errores observados entre 4,91 y 5,77%. Estas predicciones incrementan su error observado si la estimación de la resistencia se realiza con respecto a probetas de laboratorio, como lo indica la norma, al reportar errores observados entre 6,46 y 7,01%. Sin embargo, en este trabajo se verificó que a tempranas edades el método de Nurse-Saul entrega muy buenas estimaciones de la resistencia. La precisión superior del método de Nielsen-Kaasgaard se limita al caso estudiado, pero sugiere que, en proyectos de hormigón masivo en el norte de Chile, su adopción permitiría optimizar la secuencia constructiva como el caso de retiro de moldajes, aplicación de cargas de rellenos en muros de contención o la entrega al tránsito de pavimentos, evitando la condición conservadora del método de madurez tradicional a los 28 días. Por ello, este trabajo con hormigones masivos nos obliga a poner atención en la forma en que se aborda la estimación de resistencia de hormigones in situ.

Para este diseño específico con áridos locales, los modelos de E_a variable resultaron más adecuados. Investigaciones futuras deberían validar estos hallazgos en bloques de distintas geometrías, diferentes condiciones climáticas, diferentes tipos y cantidades de cemento, nuevas dosificaciones para hormigones de resistencia distinta a G35 e incorporar diferentes adiciones para generalizar la recomendación a nivel global. En la misma línea, se debe



avanzar a la validación en elementos masivos a escala real y el uso de modelos numéricos para su estudio.

Referencias

Anonymous. (1997). TCE1: Adiabatic and semi-adiabatic calorimetry to determine the temperature increase in concrete due to hydration heat of the cement. *Materials and Structures*, 30(8), 451–464. <https://doi.org/10.1007/bf02524773>

ASTM C1074. (2019). *Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*. <https://doi.org/10.1520/C1074-19>

Bakour, A., & Ftima, M. Ben. (2021). Experimental investigations on the asymptotic fracture energy for large mass concrete specimens using wedge splitting test. *Construction and Building Materials*, 279, 122405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122405>

Ballim, Y. (2004). A numerical model and associated calorimeter for predicting temperature profiles in mass concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26(6), 695–703. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00093-3)

Batog, M., & Giergiczny, Z. (2017). Influence of mass concrete constituents on its properties. *Construction and Building Materials*, 146, 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.085>

Ebensperger, L., Oyarzún, J., & Torres, R. (2020). Determination of the datum temperature for applying maturity in cold weathers. *Revista Ingenieria de Construcción*, 35(1), 84–99. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000100084>

Gajda, J., & Vangeem, M. (2002). Understanding mass concrete is the key to controlling temperatures and ultimately saving time, effort, and money. *Concrete International*, January, 58–62.

Geng, D. J., Dai, N., Jin, X. S., & Miao, E. X. (2021). Comparison of calculating methods and applications of different concrete maturity. *Journal of Physics: Conference Series*, 2011(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2011/1/012022>

Guerra, R. (2025). Estimación de la resistencia a la compresión de hormigones a los 28 días utilizando Modelos de Mezclas Gaussianas. *Obras y Proyectos*, 37, 4–14.

Hansen, P. F., & Pedersen, E. J. (1977). *Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete*.

Instituto Nacional de Normalización. (2018). NCh 3565 Hormigón - Estimación de la resistencia mecánica- Método de

la madurez. In *INN*.

Kaur, M., & Kaur, M. (2012). A review on utilization of coconut shell as coarse aggregates in mass concrete. *International Journal of Applied Engineering Research*, 7(11 SUPPL.), 2063–2065.

Kim, J. K., Han, S. H., & Lee, K. M. (2001). Estimation of compressive strength by a new apparent activation energy function. *Cement and Concrete Research*, 31(2), 217–225.

Kim, Y. R., Khil, B. S., Jang, S. J., Choi, W. C., & Yun, H. Do. (2015). Effect of barium-based phase change material (PCM) to control the heat of hydration on the mechanical properties of mass concrete. *Thermochimica Acta*, 613, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.05.025>

Maruyama, I., & Lura, P. (2019). Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete. *Cement and Concrete Research*, 123(May), 105770. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.015>

Nielsen, C. V., & Kaasgaard, M. (2020). Activation Energy for the Concrete Maturity Model – Part 1: Compressive Strength Tests at Different Curing Temperatures. *Nordic Concrete Research*, 62(1), 87–106. <https://doi.org/10.2478/ncr-2020-0002>

Riding, K. A., Poole, J. L., Schindler, A. K., Juenger, M. C. G., & Folliard, K. J. (2006). Evaluation of temperature prediction methods for mass concrete members. *ACI Materials Journal*, 103(5), 357–365. <https://doi.org/10.14359/18158>

Ruiz Guti, M. (2007). Manual de Programación Arduino Arduino : Manual de Programación. *Arduino Notebook*, 1, 3–70.

Soutsos, M., & Kanavaris, F. (2018). The modified nurse-saul (MNS) maturity function for improved strength estimates at elevated curing temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00206. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00206>

Tekle, B. H., Al-Deen, S., Anwar-Us-Saadat, M., Willans, N., Zhang, Y., & Lee, C. K. (2022). Use of maturity method to estimate early age compressive strength of slab in cold weather. *Structural Concrete*, 23(2), 1176–1190. <https://doi.org/10.1002/suco.202000693>

Yikici, T. A., & Chen, H. L. (2015). Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete. *Construction and Building Materials*, 95, 802–812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.026>