

Evaluación de las emisiones de CO₂ de muros de Tierra Estabilizada Mecánicamente en Chile incluyendo áridos artificiales provenientes de vidrios en los paneles de hormigón.

Nicolás Ignacio González Rissetti

Magister en Administración de la construcción, nigonzalez2@uc.cl

Rodrigo Andrés Ossandón Tapia

Tierra Armada Chile SpA, Chile, rossandon@tierra-armada.cl

El rubro de la construcción es una de las industrias que más emisiones de dióxido de carbono CO₂ emite en el mundo. Empresas de este sector se han unido desde el principio a los compromisos de la COP21 en reducir sus emisiones directas e indirectas para el año 2030. Dentro de estas emisiones el hormigón representa una parte importante de la contaminación (8%) y, a su vez, es el material más utilizado en la construcción. Además, y de forma paralela, existe a nivel mundial y en particular en Chile, una escasez de áridos para la producción de hormigones.

Esto ha llevado a la industria a experimentar y lograr sus primeras referencias en la fabricación de soluciones de hormigón amigables con el medio ambiente a través de diversos métodos, entre ellos la sustitución de los áridos del concreto por áridos artificiales.

Por otro lado, la tecnología de muros de Tierra Estabilizada Mecánicamente (TEM) es una técnica alternativa a los muros de hormigón tradicional, donde generalmente su fachada está hecha de paneles prefabricados de hormigón. Su economía, rapidez constructiva y buen comportamiento sísmico ha generado un crecimiento en el mercado chileno.

Esta investigación evaluó la reducción de las emisiones de CO₂ de un proyecto en específico de muros de Tierra Estabilizada Mecánicamente (TEM) en Chile, a través del uso de áridos artificiales en los hormigones de sus paneles prefabricados. Esto, mediante la comparación de una mezcla a base de vidrio reciclado que cumple con las condiciones técnicas y operacionales del sistema con una mezcla con áridos tradicionales.

Palabras Claves: Muros TEM, áridos artificiales, vidrios reciclados, hormigones livianos, huella de carbono, escasez de áridos.

1 INTRODUCCIÓN.

Desde la primera conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático en París, varias empresas vinculadas a la construcción se han sumado a la condicionalidad de reducir la huella de carbono en sus procesos (Naciones Unidas, 2015), pues este rubro produce un 38% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (CCHC et al., 2019), siendo la industria de la construcción uno de los sectores responsables de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo (Xiao et al., 2018). Cabe destacar que el hormigón es el material más usado por las empresas de construcción y representa el 8% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial (CCHC et al., 2019).

En esta misma línea, los áridos en el hormigón constituyen el principal componente volumétrico, ocupando entre el 65% y 75% de su volumen total (Instituto Nacional de Normalización, 1979) por lo que la demanda en el aumento de hormigón requiere un aumento de la demanda de los áridos.

La escasez de áridos para hormigones es un tema de preocupación a nivel mundial y en Chile en particular, “se consumen más de 16 millones de metros cúbicos por año y las plantas de extracción tienen una capacidad de producir solamente 4 millones de metros cúbicos” (CDT, 2023). Por consiguiente, se hace cada vez más

necesaria la búsqueda de materiales alternativos a los áridos del hormigón.

En el documento Study the Effect of Recycled Glass on the Mechanical Properties of Green Concrete, (Al-Zubaid et al., 2017) menciona “hay muchas maneras de obtener concreto ecológico a partir del reciclaje de materiales. Uno de ellos, la utilización de vidrio coloreado, triturado y de desecho en el hormigón”.



Figura 1. Áridos artificiales en base a vidrio reciclado expandido, Heat SpA.

Por otro lado, la tecnología de Tierra Estabilizada Mecánicamente (TEM), fue inventada (1958) y patentada (1963) por el ingeniero y arquitecto francés Henry Vidal. Esta solución consiste en la estabilización mecánica de un terraplén a través de refuerzos al interior de un relleno granular compactado y controlado. Estos refuerzos se unen de manera ordenada a una fachada de protección, la cual generalmente es de hormigón armado. De esta forma, se genera una estructura autosoportada y resistente a cargas horizontales y superficiales.

El estudio Sustainability Measures for MSE Walls and Baseline Environmental Impact Evaluations, hace un comparativo preliminar realizado el año 2010, donde muestra que las soluciones comunes de muros TEM son extremadamente eficientes en términos de impacto ambiental. (Rafalko et al., 2010). Además, el mismo estudio identifica que el hormigón es uno de los componentes que más contribuye al impacto ambiental dentro de un muro TEM. Si este componente se hiciera más sostenible, entonces la solución general de muro TEM será aún más eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Al realizar un reemplazo de áridos tradicionales por áridos artificiales a base de vidrio reciclado en el hormigón utilizado en los paneles prefabricados de los muros TEM, se puede apreciar una reducción de emisiones de dióxido de carbono en todos los procesos del proyecto, tales como la fabricación, el acopio, el transporte y el montaje de los elementos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las emisiones de CO₂ de muros TEM en Chile, a través de la comparación de una mezcla predefinida de hormigones a base de vidrio reciclado con respecto a una de áridos tradicionales.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a través de ensayos de laboratorio que la mezcla escogida cumpla con las condiciones mecánicas de los paneles de muros TEM.
- Fabricar, manipular y testear a un nivel productivo una muestra de paneles elaborados con esta mezcla en una planta de prefabricados, bajo las mismas condiciones que se fabrican paneles a escala masiva.
- Estimar qué disminución de CO₂ se obtendría en un proyecto si se comparan las emisiones del ciclo de vida de un muro TEM contemplando una nueva mezcla, así como la mezcla tradicionalmente utilizada en los paneles prefabricados.

3 METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación se realizó a través de un proceso de tres etapas para cumplir con los objetivos específicos.

3.1 ETAPA 1: ENSAYOS DE LABORATORIO

A través de la colaboración de la empresa Heat SpA y el Laboratorio de la Pontificia Universidad Católica de Chile, se ensayaron 3 mezclas de hormigón con áridos artificiales a compresión simple. La composición de cada mezcla es parte del *know how* de la empresa Heat SpA.

En términos de composición de cemento: La mezcla 1 posee un 26% del peso total de la mezcla, la mezcla 2 un 19% del peso total de la mezcla y la mezcla 3 un 17% de la mezcla. A su vez, en composición de áridos livianos: La mezcla 3 posee un 24% del peso total de la mezcla, la mezcla 2 un 18% del peso total de la mezcla y la mezcla 1 un 16% del total de la mezcla.

Además, fueron medidas sus densidades secas. Ver Figura 3

Tabla 1. Ensayos compresión simple 7 días

Mezcla	Probeta	Resistencia [MPa]	Promedio [MPa]	Desviación E.	Error E. %
Mezcla 1	1A	30,96	32,70	1,90	1,10%
	1B	34,73			
	1C	32,40			
Mezcla 2	2A	26,43	24,13	2,55	1,47%
	2B	24,57			
	2C	21,39			
Mezcla 3	3A	25,96	24,65	6,03	3,48%
	3B	29,92			
	3C	18,07			

Tabla 2. Ensayos compresión simple 28 días

Mezcla	Probeta	Resistencia [MPa]	Promedio [MPa]	Desviación E.	Error E. %
Mezcla 1	1D	40,91	38,54	3,35	1,93%
	1E	36,17			
	1F	(*)			
Mezcla 2	2D	34,12	32,71	5,36	3,09%
	2E	26,79			
	2F	37,22			
Mezcla 3	3D	27,04	32,87	5,07	2,93%
	3E	35,29			
	3F	36,29			

(*) Fallo al refrantar

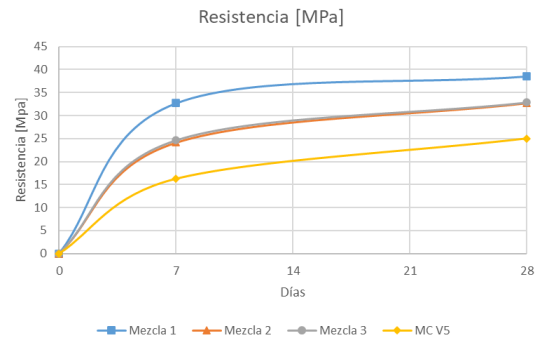


Figura 2. Curvas de resistencia del hormigón. En la Figura 2, se indica la curva que define el Manual de Carreteras MOP para este tipo de paneles prefabricados (MCV5).

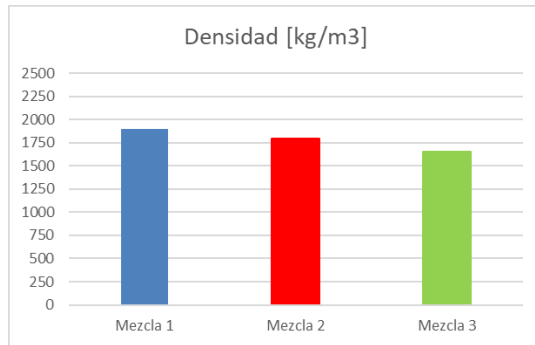


Figura 3. Densidades secas de las mezclas.

De esta etapa se puede comentar lo siguiente:

- El procedimiento de fabricación es distinto al de un hormigón tradicional.
 - Riesgos de segregación en la mezcla.
 - Riesgos de segregación en el vibrado.
- Al incluir áridos artificiales en la mezcla, se requiere el uso de aditivos, los cuales fueron utilizados bajo las recomendaciones del proveedor.
- Las resistencias de las mezclas son superiores a las definidas por el Manual de Carreteras MOP (MCV5).
- Las densidades obtenidas son inferiores a las de un hormigón tradicional (2300 a 2500 kg/m³).
- La mezcla 3 es la que mayores problemas de trabajabilidad presentó.
- La mezcla 2 será utilizada en la etapa 2: planta de prefabricado.

3.2. ETAPA 2: PLANTA DE PREFABRICADO

Esta etapa se realizó a través de la elaboración de tres paneles a escala real en la planta de prefabricados Bottai Santiago, bajo las mismas condiciones que se fabrican paneles a escala masiva. Para esto, se utilizaron los materiales de la mezcla 2 definidos en la etapa anterior (laboratorio).

Cada elemento fue chequeado con los puntos definidos por el Manual de Carreteras MOP, Volumen 5.

Se realizaron pruebas de acopio, izaje y giro.

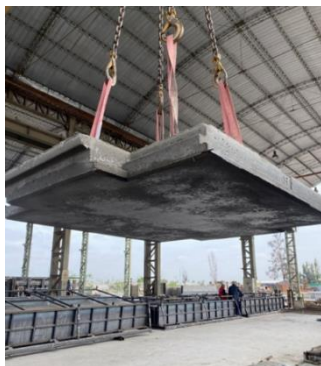


Figura 4. Prueba de Izaje

Además, se obtuvieron seis muestras de la mezcla, las cuales fueron ensayadas a compresión simple (11 días y 28 días) y fueron comparados con los resultados obtenidos en laboratorio y la curva exigida por el Manual de Carreteras MOP, Volumen 5.

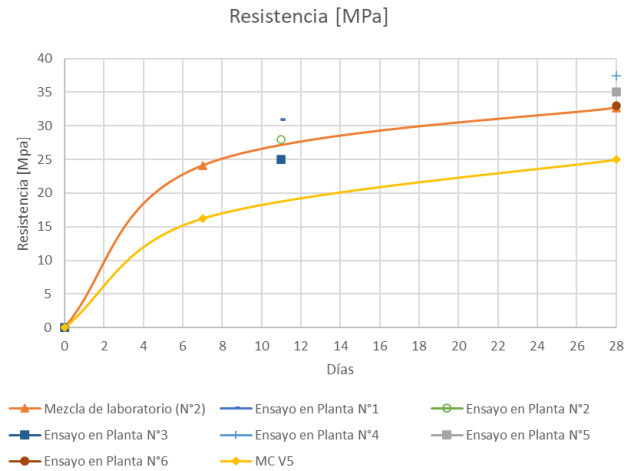


Figura 5. Curvas de resistencia del hormigón.

De esta etapa se puede comentar lo siguiente:

A través de la fabricación de tres paneles a escala real, se puede apreciar que se cumplen con las condiciones operacionales y los requisitos visuales establecidos por el Manual de Carreteras MOP, en su volumen 5.

En el caso de realizar producciones diarias de veinte o más paneles prefabricados de hormigón armado con áridos artificiales de vidrio reciclado expandido, se recomiendan los siguientes puntos:

- Saturar los áridos artificiales un día antes al ser incorporados en la mezcla, con el fin de disminuir su absorción en el proceso de vertido del hormigón.
- Al momento de verter el hormigón, este debe ser revuelto constantemente.
- Evaluar el uso de un retardador de fraguado.
- Se recomienda el uso de fraguado con vapor, ya que los estabilizantes generan un proceso de curado más lento en el hormigón de las piezas. Esto con el fin de desmoldar al día siguiente.
- Se recomienda el uso de mesas vibratorias, ya que la mezcla resulta ser similar a un hormigón autocompactante que requiere de muy poca energía de vibrado. Un exceso de vibrado puede generar segregación de los áridos gruesos en la pieza.

3.3. ETAPA 3: CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

La huella de carbono es un indicador del impacto asociado a emisiones de gases de efecto invernadero y son cuantificados mediante un análisis de ciclo de vida (ACV).

El cálculo de las emisiones totales de dióxido de carbono tiene en cuenta la suma de las emisiones de cada una de las partidas de un proceso a través de la multiplicación de su cantidad por un factor de emisión.

En esta etapa se realizó un comparativo de una situación tradicional con una situación propuesta, usando en esta última, la mezcla que incluye áridos artificiales.

Para obtener los datos para la comparación, se utilizó un proyecto emblemático del país de la tecnología de muros TEM: “Mejoramiento Santiago – Los Vilos, tramo Quilicura – Lampa”, el cual fue desarrollado entre los años 2015 y 2016.

El cálculo de la huella de carbono se realizará bajo los siguientes pasos:

- Paso 1: Se realizará el cálculo del proceso de fabricación de los paneles prefabricados de forma manual. Obteniendo los datos de kilogramos de dióxido de carbono equivalente de los siguientes documentos técnicos que establecen valores de los componentes de hormigón con áridos tradicionales y áridos artificiales en base a vidrio reciclado: Arriagada, 2016, Buritica, 2022 y Albornoz, 2015.
- Paso 2: Luego, se realizó el proceso de suministro y construcción con la calculadora de CO₂ del grupo Terre Armée. Esta calculadora de carbono permite estimar la huella total de CO₂ para proyectos de construcción de muros TEM.

La calculadora considera todas las actividades necesarias para construir un muro de Tierra Armada (fabricación, transporte e instalación de los paneles y refuerzos, transporte e instalación del relleno).

Del paso 1 se obtienen los siguientes valores:

- Situación tradicional de panel: 332 [kgCO₂e]
- Situación nueva mezcla en el panel: 322 [kgCO₂e]

Ver Tablas 3 y 4

Tabla 3. Emisiones CO₂ Mezcla tradicional

Material	Cantidad por m ³ [kg]	Emisiones en [kgCO ₂ e](!)
Agua	152	0,003
Cemento	402	0,737
Gravilla 3/8	282	0,0136
Gravilla 3/4	659	0,0105
Arena 7 mm	784	0,0104
Polvo roca 5mm	398	0,04
Hiperplastificante	1,5	1,17
TOTAL		332

Tabla 4. Emisiones CO₂ Mezcla con áridos artificiales

Material	Cantidad por m ³	Emisiones en [kgCO ₂ e]
Agua	352	0,0003
Cemento	390	0,737
Metacaolín	149	0,0139
Gravilla 3/8	757	0,0136
Vidrio expandido 0,1 - 0,3 mm	37	0,029
Vidrio expandido 0,25 - 0,5 mm	87	0,029
Vidrio expandido 0,5 - 1,0 mm	56	0,029
Vidrio expandido 1,0 - 2,0 mm	172	0,029
Hiperplastificante	10	1,17
Estabilizante	0,5	1,17
TOTAL		322

La calculadora de CO₂ del grupo Terre Armée requiere de los siguientes datos de entrada:

Tabla 5. Datos de entrada

MEJORAMIENTO RUTA 5 SANTIAGO LOS VILOS (TRAMO QUILICURA - LAMPA) 2015 - 2016		
CASO TRADICIONAL		
Geometría		
Altura promedio	[m]	10
Ancho promedio	[m]	8
Paneles		
Cantidad de paneles	[unidad]	22.358
Superficie	[m ²]	50.000
Volumen	[m ³]	7.000
Acero estructural por panel	[kg]	9,57
Refuerzos		
Largo de refuerzos	[m]	1.456.000

Las variables de una situación con la otra son:

- Las emisiones del hormigón.
- La densidad del hormigón.

Caso tradicional

Densidad: 2450 kg/m³

Emisiones del Hormigón: 332 kgCO₂e

Tabla 6. Resultados caso tradicional

CASO TRADICIONAL	(Kg CO ₂ e)	
Proceso Refuerzos	3.397.350	9%
Proceso Paneles	13.212.677	36%
Proceso Rellenos	14.825.973	40%
Otros (Energía y Residuos)	5.656.889	15%
Total	37.092.889	

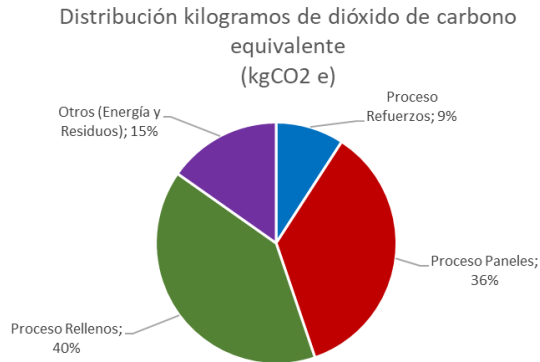


Figura 6. Resultados caso tradicional

Caso Propuesto

Densidad: 1791 kg/m³

Emisiones del Hormigón: 322 kgCO₂e

Tabla 7. Resultados caso propuesto

CASO PROPUESTO	(Kg CO ₂ e)	
Proceso Refuerzos	3397350,468	10%
Proceso Paneles	11.261.467	32%
Proceso Rellenos	14825972,64	42%
Otros (Energía y Residuos)	5.547.654	16%
	35.032.444	

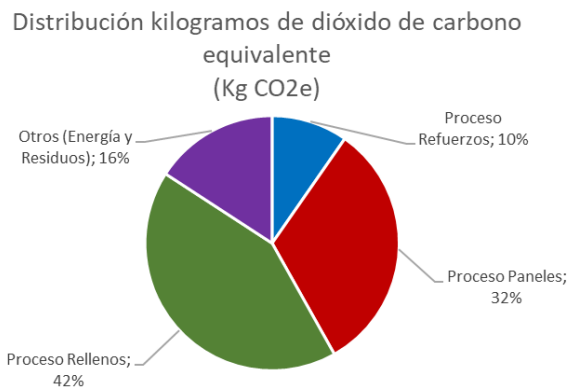


Figura 7. Resultados caso propuesto

Finalmente se hace un comparativo de ambos casos, según los procesos.

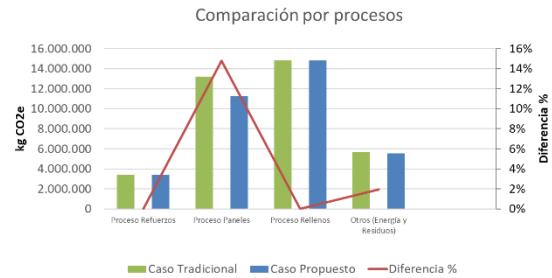


Figura 8. Resultados ambos casos

Al generarse una menor emisión de gases invernadero en la fabricación de paneles de hormigón armado, sumado a la menor ligereza de estos, se generan menores cantidades de emisiones en otros procesos, tales como transportes, procesos energéticos y residuos totales.

En términos concretos, la incorporación de una mezcla de vidrio reciclado como reemplazo de los áridos tradicionales hubiese entregado al proyecto de Quilicura – Lampa, una reducción total del 6% en las emisiones de CO₂.

4 CONCLUSIONES

Esta investigación evaluó la reducción de las emisiones de CO₂ de muros de Tierra Estabilizada Mecánicamente (TEM) en Chile, a través del uso de áridos artificiales en los hormigones de sus paneles prefabricados. Esto mediante la comparación de una mezcla en base de vidrio reciclado con una mezcla con áridos tradicionales, de lo cual se concluye:

- Las tres mezclas realizadas en laboratorio cumplen con los parámetros técnicos normativos para ser usados en hormigones de paneles de muros de Tierra Estabilizada Mecánicamente, específicamente en cuanto a su resistencia a la compresión simple y densidad.
- Las mezclas obtienen resistencias a la compresión simple superiores a las establecidas por el manual de carreteras (40% mayores).
- Se comprueba la baja densidad obtenida en hormigones con áridos artificiales a base a vidrio reciclado expandido, obteniendo valores 25% menores.

• A través de la fabricación de tres paneles a escala real, se pudo confirmar el cumplimiento de las condiciones operacionales y requisitos visuales establecidos por el Manual de Carreteras MOP, en su volumen 5.

• En el caso de hacer producciones de veinte o más paneles prefabricados de hormigón armado con áridos artificiales de vidrio reciclado expandido, se recomiendan los siguientes puntos:

- Saturar los áridos artificiales un día antes de ser incorporados en la mezcla, con el fin de disminuir su absorción en el proceso de vertido del hormigón.

- Al momento de verter el hormigón, este debe ser revuelto constantemente.
- Evaluar el uso de un retardador de fraguado.
- Se recomienda el uso de fraguado con vapor, pues los estabilizantes generan un proceso de curado más lento en el hormigón de las piezas. Esto con el fin de desmoldar al día siguiente.
- Se recomienda el uso de mesas vibratorias, pues la mezcla resulta ser similar a un hormigón autocompactante que requiere de muy poca energía de vibrado. Un exceso de vibrado puede generar segregación de los áridos gruesos en la pieza.
- Al comparar las emisiones que genera una mezcla tradicional con la mezcla propuesta con áridos artificiales, se obtuvo una reducción directa del 3% en las emisiones de CO₂.
- Para el proyecto estudiado, una menor emisión de gases de efecto invernadero en la fabricación de paneles de hormigón armado, sumado a una mayor ligereza, genera indirectamente menores emisiones en otros procesos, tales como: transportes, procesos energéticos y residuos totales. Todo esto hubiese entregado al proyecto de Quilicura – Lampa, una reducción total del 6% en las emisiones de CO₂.
- El cemento es el material que más emisiones de gases invernadero genera en los procesos de fabricación de hormigón. En este estudio presentó valores del 89% para las mezclas estudiadas.
- El sistema de los muros TEM es un sistema versátil que ha generado una mejora en temas ambientales con respecto a una solución tradicional de muros. El uso de mezclas alternativas en sus paneles ayuda a realizar proyectos con menores emisiones de CO₂. En el caso particular de usar áridos artificiales a base de vidrio reciclado, su aporte es mayor al generar elementos livianos que aportan en las partidas de transportes y construcción.
- Cabe destacar que los áridos son un elemento en escasez, y cada vez su valor de emisiones de CO₂ equivalente irá en aumento, lo que generará brechas mayores en estos comparativos y hace más atractiva la solución de reemplazar áridos artificiales en los hormigones de paneles de muros de TEM.

5 AGRADECIMIENTOS

Empresas Tierra Armada Chile SpA, Bottai y Heat SpA.

6 REFERENCIAS

- Akhtar, N., Ahmad, T., Husain, D., Majdi, A., Alam, M. T., Husain, N., & Wayal, A. K. S. (2022). Ecological footprint and economic assessment of conventional and geopolymer concrete for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134910>
- Ali, B., Qureshi, L. A., & Khan, S. U. (2020). Flexural behavior of glass fiber-reinforced recycled aggregate concrete and its impact on the cost and carbon footprint of concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120820>
- Al-Zubaid, A. B., Shabeeb, K. M., & Ali, A. I. (2017). Study the Effect of Recycled Glass on the Mechanical Properties of Green Concrete. *Energy Procedia*, 119, 680–692. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.095>
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). LRFD Bridge design specifications.
- Arriagada, C. (2018). Evaluación Termo Mecánica de Agregados de Vidrio Expandido.
- Arriagada, C., Navarrete, I., & Lopez, M. (2019). Understanding the effect of porosity on the mechanical and thermal performance of glass foam lightweight aggregates and the influence of production factors. *Construction and Building Materials*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116746>
- Bezerra, J. V. de A., Mota, T. G., Andrade, H. M. L. da S., Andrade, L. P. de, & Vigoderis, R. B. (2020). Comparative study of retaining walls aiming to optimize carbon footprint. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 11(1), 460–467. <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2020.001.0040>
- Buriticá, Y. (2022). Estimación de las emisiones de CO₂ de concretos con residuos de vidrio.
- Camilo Restrepo Gutiérrez, J., Jaime Restrepo Baena, O., & Iván Tobón, J. (2006). Effects of the addition of metakaolin in portland cement. *Año*, 73, 131–141.
- CCHC, Acuña, H., Easton, P., Ramos, C., & Torres, C. (2019). El sector de la construcción ante el desafío climático global.
- CDT. (2023). Nueva normativa: Impulsan la generación de áridos alternativos para la construcción.
- Das, S., Saha, P., Prajna Jena, S., & Panda, P. (2022). Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission – A review. *Materials Today: Proceedings*, 60, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.588>
- Instituto Nacional de Normalización, I. (1979). Nch163.Of79 Aridos para morteros y hormigones - Requisitos generales.
- Lee, N. M. H., & Bennani, Y. (2022). Application of Low Carbon Concrete on Reinforced Earth Wall. <https://doi.org/10.21467/proceedings.133>
- Li, X. J., Xie, W. J., Jim, C. Y., & Feng, F. (2021). Holistic LCA evaluation of the carbon footprint of prefabricated concrete stairs. *Journal of Cleaner Production*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129621>
- Lombardi, R., Jünemann, R., & Lopez, M. (2022). Experimental assessment of the behavior of expanded glass lightweight reinforced concrete walls.
- Meddah, M. S., Al Owaisi, M., Abedi, M., & Hago, A. W. (2023). Mortar and concrete with lime-rich calcined clay pozzolana: A sustainable approach to enhancing performances and reducing carbon footprint. *Construction and Building Materials*, 393.
- Mostazid, M. I., & Sakai, Y. (2023). Low-carbon footprint approach to produce recycled compacted concrete. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.04.052>

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.