

Low-Carbon Concrete Mixtures

Q. *I am working on a project that requires low-carbon concrete. What is low-carbon concrete, how do I create low-carbon concrete mixtures, and how do I report their CO₂ reduction?*

A. A universally accepted definition of low-carbon or sustainable concrete does not exist. This is because lower/low-carbon concrete, as measured by the embodied carbon of concrete, depends on location, type, application, industry experience, material availability, and construction need.¹ However, many licensed design professionals define low-carbon concrete (LCC) as concrete produced with reduced upfront embodied global warming

potential (GWP) compared to traditional concrete with the same compressive strength or benchmarked concrete. There are three essential concepts to understand from this definition:

1. GWP is measured in carbon dioxide (CO₂) equivalents (CO₂e), which is a unit of measurement that standardizes the climate effects of various greenhouse gases (for example, methane or nitrous oxide) to CO₂ over 100 years;
2. The upfront embodied energy corresponds to life-cycle modules A1 through A3 in the building life cycle according to ISO 21930.² As shown in Table 1, this is the embodied energy from cradle-to-gate or the extraction of the raw materials through the manufacture of the concrete; and
3. The GWP values for concrete mixtures are documented in

Table 1:
Building life-cycle information

Product/manufacture stage			Construction process stage		Use								End-of-life stage				Benefits and loads beyond
					Building fabric					Operation of the building							
Raw material extract / process / supply	Transport	Manufacture	Transport to the site	Assembly/install in the building	Use/application of installed products	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Deconstruction/demolition	Transport to waste process	Reuse-recovery-recycle	Disposal	Reuse-recovery-recycle potential	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
Cradle-to-gate			Gate-to-grave														
Cradle-to-grave																	
Cradle-to-cradle																	
System boundaries																	

Concrete Q&A

one of the following: an independent third-party verified life-cycle assessment (LCA) report, an independent third-party verified product-specific environmental product declaration (EPD), or an independent third-party verified LCA tool. LCA reports, EPDs, and LCA tools shall conform to the appropriate ISO standards, including ISO 14040³ and ISO 14044,⁴ and the applicable product category rule that conforms to ISO 21930 and ISO 14025.⁵

The National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), National Precast Concrete Association (NCPA), Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI), and many material suppliers (for example, slag cement, fly ash, silica fume, reinforcing steel, and fiber) have or are in the process of creating industry-wide cradle-to-gate EPDs or independent EPDs that concrete practitioners may use.

Cement and concrete manufacturers heavily influence the environmental impact of the concrete produced and used in the construction industry. This is illustrated in Fig. 1 when reviewing the cradle-to-gate processes of raw material extraction, transportation to the production site, and the manufacture of the concrete product.⁶

LCC can be produced by implementing changes within the production processes. Three critical areas for the lowering of upfront carbon in concrete mixtures are described herein.

Partial or total replacement of portland cement clinker

Using blended cement conforming to ASTM C595/C595M or replacing portland cement in concrete mixtures with supplementary cementitious materials (SCMs) or natural

pozzolans can lower the upfront embodied energy.⁷ However, local and regional availability and variability in material properties significantly impact the options for low-carbon concrete mixtures. In addition, many alternative cement binders with lower environmental impacts can be used in concrete construction (for example, reactive belite portland cement or calcium sulfoaluminate-belite cement).^{1,8,9}

Lastly, novel technologies can be installed in ready mixed or precast concrete operations to reduce portland cement contents by increasing early-age strength through mineral carbonation, CO₂ mineral sequestration by the injection of CO₂ into concrete mixtures, or the use of CO₂ in curing operations.^{1,10} These emerging approaches have been used for CO₂ removal and storage.

Development of efficient concrete mixture designs

Concrete mixtures are complex material systems with many characteristics that include economic, environmental, mechanical, and durability-related properties.¹¹ Producers can optimize concrete mixture proportions and reduce binder content through enhanced particle packing and the use of admixtures. Service-life conditions and material constituent cost impact the set of optimal concrete mixture designs regarding the types and quantities of used mixture ingredients.

Reduction in overdesign

Ready mixed concrete producers often overdesign their concrete mixtures above the required average strength, f'_{cr} , to ensure the quality of the final delivered product irrespective of the quality of field construction and testing practices. The

factors that cause ready mixed concrete producers to include overdesign above f'_{cr} requirements for concrete mixture design approval include:

- Prescriptive specification constraints;
- Prescriptive mixture proportions;
- Compensation for poor construction practices;
- Compensation for poor agency field testing practices; and
- Means and methods of construction.¹²

For ready mixed concrete production in 2020, an additional 7.0 million metric tons (7.7 million tons) of portland cement was consumed due to the overdesign of concrete mixtures. This was equivalent to 6.7% of the total 103 million metric tons (113 million tons) of cement consumed during the period. Licensed design professionals, concrete producers, contractors, and testing agencies must work cohesively to ensure that overdesign is lowered on projects requiring LCC.¹²

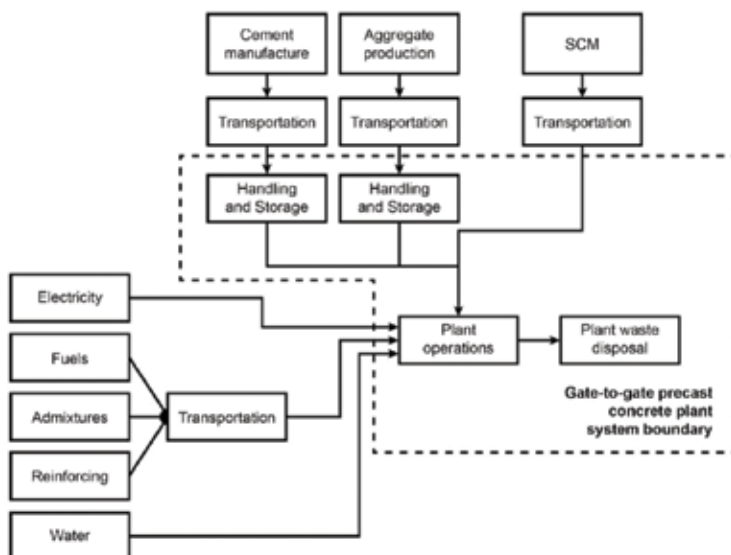


Fig. 1: Cradle-to-gate precast concrete plant system boundary

Examples of Reporting the GWP for Concrete Mixtures

Three concrete mixtures were evaluated for GWP reduction: a concrete footer/foundation, a wall, and an exterior concrete.

3000 psi (20.7 MPa) concrete footer/foundation mixture—Tech Ready Mix in Cleveland, OH, USA, participated in the data collection process of the “NRMCA Member Industry-Average EPD for Ready Mixed Concrete” and used the information within the EPD to quantify the reduction in GWP for 1 yd³ or 1 m³ of concrete.¹³ This EPD represents a production-weighted average result compiled across all participating companies and their plants.

Tech Ready Mix’s declared concrete mixture included 470 lb/yd³ (279 kg/m³) of cementitious material with 25% replacement of the portland cement with fly ash. Using tables on pages 17 and 18 of the NRMCA EPD, which summarizes the results for concretes between 2500 and 3000 psi (17.2 and 20.7 MPa), Tech Ready Mix reported a GWP of 205.22 kg CO₂e/yd³ (268.42 kg CO₂e/m³) for its mixture. This compares to a mixture of portland cement without SCM replacement of 238.08 kg CO₂e/yd³ (311.39 kg CO₂e/m³), resulting in a GWP reduction of 14%.

4000 psi (27.6 MPa) concrete wall mixture—Dickinson Ready Mix Co. & Concrete Products in Dickinson, ND, USA, reported GWP for its wall mixture using a product-specific EPD. The EPD was generated from Athena Sustainable Materials Institute software (see Table 2), and the life cycle inventory data was collected from its State Street plant and compared to the NRMCA industry average benchmark. The declared mixture included 600 lb/yd³ (356 kg/m³) of cementitious materials with 70% replacement of portland cement with slag cement (50%) and fly ash (20%). The replacement of portland cement by SCMs resulted in a GWP reduction of 52%.

5000 psi (34.5 MPa) exterior concrete mixture—Ready mixed concrete producer ABC did not participate in the NRMCA industry-wide EPD collection program and did not have software to create EPDs on demand. They chose to use the Slag Cement Association’s online Life Cycle Assessment Calculator, which adheres to the requirements of an independent third-party verified LCA tool conforming to the appropriate ISO standards. This calculator allows the input of custom concrete mixtures with varying slag cement contents and compares them to the NRMCA regional benchmarks, allowing for calculating LCA results in real time.

Producer ABC used a declared concrete mixture of 614 lb/yd³ (364 kg/m³) cementitious material with the portland-limestone cement (PLC) replaced with 30% slag cement. Replacing PLC with slag cement resulted in a GWP of 208.81 kg CO₂e/yd³ (273.11 kg CO₂e/m³). This was compared to the straight PLC baseline mixture having a GWP of 260.07 kg CO₂e/yd³ (340.16 kg CO₂e/m³), equating to a reduction in GWP of 19.7%.

In summary, requirements for using LCC are becoming more prevalent in the construction industry, and understanding the terminology, data collection, and measurement of GWP will become essential.

References

1. Kanavarus, F., and Scrivener, K.L., “The Confused World of Low-Carbon Concrete,” *Concrete*, V. 57, No. 3, Apr. 2023, pp. 38-41.
2. ISO 21930:2017, “Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works—Core Rules for Environmental Product Declarations of Construction Products and Services,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2017, 80 pp.
3. ISO 14040:2006, “Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006, 20 pp.

Table 2:
EPD for wall concrete mixture generated from Athena Sustainable Materials Institute software

DRM concrete mixture code	Mixture description	Impact per m ³	Benchmark	Declared mixture	% of benchmark
6.39F-LS-AE	4000 psi air	GWP, kg CO ₂ e	312.33	163.18	(47.76)
		Ozone depletion, kg CFC11e	7.37 × 10 ⁻⁶	5.34 × 10 ⁻⁶	(27.55)
		Acidification, kg SO ₂ e	1.00	0.84	(16.01)
		Eutrophication, Ne	0.44	0.32	(27.37)
		Smog formation, kg O ₃ e	21.36	19.68	(7.83)
		Nonrenewable energy, MJ, NCV	1910.37	1645.93	(13.84)

Note: 1 kg = 2.2 lb

4. ISO 14044:2006, “Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006, 46 pp.

5. ISO 14025:2006, “Environmental Labels and Declarations—Type III Environmental Declarations—Principles and Procedure,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006, 25 pp.

6. “Structural Precast Concrete Industry Wide EPD,” *EPD-117*, Sept. 2019, 16 pp.

7. ASTM C595/C595M-23, “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 9 pp.

8. Miller, S.A., and Myers, R.J., “Environmental Impacts of Alternative Cement Binders,” *Environmental Science Technology*, V. 54, No. 2, Dec. 2019, pp. 677-686.

9. Scrivener, K.L.; John, V.M.; and Gartner, E.M., “Eco-Efficient Cements: Potential, Economically Viable Solutions for a Low-CO₂ Cement-Based Materials Industry,” *Cement and Concrete Research*, V. 114, Dec. 2018, pp. 2-26.

10. Alturki, A., “The Global Carbon Footprint and How New Carbon Mineralization Technologies Can Be Used to Reduce CO₂ Emissions,” *Chemical Engineering*, V. 6, No. 3, June 2022, p. 44.

11. DeRousseau, M.A.; Kasprzyk, J.R.; and Srubar III, W.V., “Multi-Objective Optimization Methods for Designing Low-Carbon Concrete Mixtures,” *Frontiers in Materials*, V. 8, July 2021, www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2021.680895/full.

12. Buffenbarger, J.K.; Casilio, J.M.; AzariJafari, H.; and Szoke, S.S., “Role of Mixture Overdesign in the Sustainability of Concrete: Current State and Future Perspective,” *ACI Materials Journal*, V. 120, No. 1, Jan. 2023, pp. 89-100.

13. “NRMCA Member Industry-Average EPD for Ready Mixed Concrete,” National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2019, 34 pp.

Thanks to Julie Buffenbarger, FACI, Senior Scientist and Sustainability Principal at Beton Consulting Engineers, LLC, Mendota Heights, MN, USA, for providing the answer to this question.

Anyone. Anytime. Anywhere.

Instantly verify
an individual’s
ACI Certification.
Download the ACI
Certification Verify App now!



To learn more or download
the Verify App, visit
concrete.org/verify.



Preguntas y Respuestas

Las preguntas de esta columna fueron formuladas por usuarios de los documentos de ACI y han sido respondidas por el personal de ACI o por un miembro o miembros de los comités técnicos de ACI. Las respuestas no representan la posición oficial de un comité de ACI. Los comentarios deben enviarse a keith.tosolt@concrete.org.

Mezclas de Concreto de Bajo Carbono

P *Estoy trabajando en un proyecto que requiere concreto con bajo contenido de carbono. ¿Qué es el concreto con bajo contenido de carbono, cómo creo mezclas de concreto con bajo contenido de carbono y cómo reporto sobre su reducción de CO₂?*

R No existe una definición universalmente aceptada de concreto con bajo contenido de carbono o sostenible. Esto se debe a que el concreto con bajo contenido de carbono, medido por el carbono incorporado en el concreto, depende de la ubicación, el tipo, la aplicación, la experiencia en la industria, la disponibilidad de materiales y las necesidades de construcción¹. Sin embargo, muchos profesionales de diseño definen el concreto con bajo contenido de carbono (LCC) como aquel producido con una reducción del potencial de calentamiento global incorporado en comparación con el concreto tradicional con la misma resistencia a la compresión o con el concreto de referencia. Hay tres conceptos esenciales para entender a partir de esta definición:

1. El potencial de calentamiento global (GWP) se mide en equivalentes de dióxido de carbono (CO₂). Esta unidad estandariza los efectos climáticos de varios gases de efecto invernadero (por ejemplo, metano o óxido nitroso) en CO₂ durante 100 años.
2. La energía incorporada inicial corresponde a los módulos del ciclo de vida A1 a A3 de acuerdo con ISO 21930². Esto incluye la energía incorporada desde el origen hasta su aplicación, abarcando la extracción de materias primas hasta la fabricación del concreto como se muestra en la Tabla 1.
3. Los valores de GWP para las mezclas de concreto son documentados en uno de los siguientes: un informe de evaluación del ciclo de vida (LCA) verificado por un tercero independiente; una declaración ambiental de producto (EPD) específica del producto verificada por un tercero independiente; o una herramienta de LCA verificada por un tercero independiente. Los informes de LCA, las EPD y las herramientas de LCA deben cumplir con las normas ISO apropiadas, incluyendo ISO 14040³ e ISO 14044⁴, y la regla de categoría de producto aplicable que cumple con ISO 21930 e ISO 14025⁵.

La Asociación Nacional de Concreto Premezclado de los Estados Unidos (NRMCA), la Asociación Nacional de Concreto Prefabricado (NCPA), el Instituto de Concreto Prefabricado/Pretensado (PCI) y muchos proveedores de materiales (por ejemplo, cemento de escoria, ceniza volante, humo de sílice, acero de refuerzo y fibra) tienen o están en proceso de crear EPDs cradle-to-gate (de la cuna a la puerta) o EPDs independientes a nivel de la industria que los profesionales del concreto pueden utilizar.

Tabla 1: Información del ciclo de vida del edificio.

Etapa de producción/fabricación			Etapa de procesos		Uso								Etapa fin de la vida				Beneficios y cargas adicionales
					Estructura del edificio					Operación del edificio							
Extracción de materias primas/ proceso / suministro	Transporte	Fabricación	Transporte al sitio de obra	Ensamble y/o instalación en el edificio	Uso o aplicación de productos instalados	Mantenimiento	Reparación	Reemplazo	Renovaciones	Uso de energía operativa	Uso de agua operativa	Demoliciones	Transporte de escombros y desperdicios	Ciclos de reuso y reciclaje	Desechos	Potencial de reuso, recuperación o reciclaje	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
De la cuna a la puerta			De la puerta a la tumba														
De la cuna a la tumba																	
De la cuna a la cuna																	
Límites del sistema																	

Los fabricantes de cemento y concreto tienen una gran influencia en el impacto ambiental del concreto producido y utilizado en la industria de la construcción. Esto se ilustra en la Fig. 1 al revisar los procesos de cuna a puerta de extracción de materias primas, transporte al sitio de producción y fabricación del elemento de concreto⁶.

LCC (concreto con bajo contenido de carbono) se puede producir implementando cambios dentro de los procesos de producción. Aquí se describen tres áreas críticas para la reducción del carbono inicial en las mezclas de concreto.

Reemplazo Parcial o Total de Clinker de Cemento Portland

El uso de cementos adicionados conforme a ASTM C595/C595M o el reemplazo parcial o total de cemento Portland en mezclas de concreto con materiales cementantes suplementarios (SCM) o puzolanas naturales, puede reducir la energía incorporada inicial⁷. Sin embargo, la disponibilidad local y regional y la variabilidad en las propiedades de los materiales impactan significativamente las opciones para las mezclas de concreto de bajo carbono. Además, se pueden utilizar aglutinantes de cemento alternativos con menores impactos ambientales, (como el cemento Portland de belita reactiva o el cemento de belita sulfoaluminato de calcio)^{1,8,9}.

Nuevas tecnologías pueden implementarse en operaciones de concreto premezclado o prefabricado para reducir el contenido de cemento Portland. Estas tecnologías incluyen el aumento de la resistencia temprana a través de la carbonatación mineral, el secuestro mineral de CO₂ inyectando CO₂ en las mezclas de concreto, o el uso de CO₂ en operaciones de curado^{1,10}. Estos enfoques emergentes se han utilizado para la remoción y almacenamiento de CO₂.

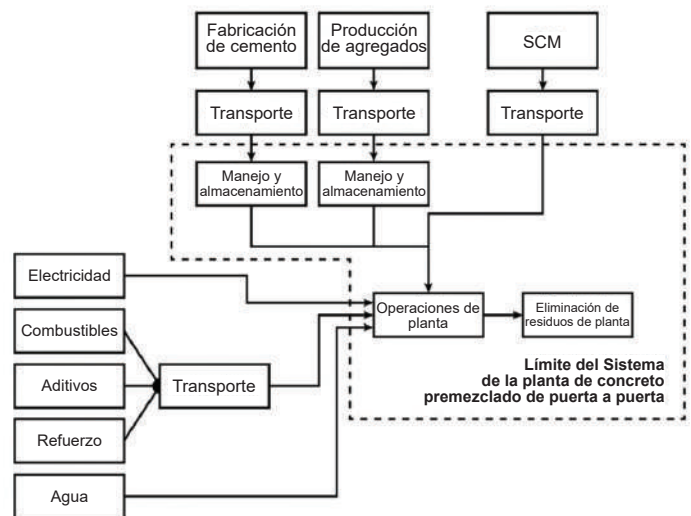


Fig. 1: Límite del sistema de planta de concreto prefabricado de la cuna a la puerta.

Desarrollo de Diseños Eficientes de Mezclas de Concreto

Las mezclas de concreto son sistemas de materiales complejos con propiedades económicas, medioambientales, mecánicas y de durabilidad¹¹. Los productores pueden optimizar las proporciones de la mezcla de concreto y reducir el contenido de aglutinante mediante un mejor empaquetamiento de partículas y el uso de aditivos. Las condiciones de vida útil y el costo de los componentes del material impactan el conjunto de diseños de mezclas de concreto óptimas.

Reducción en el Sobrediseño

Los productores de concreto premezclado de manera cotidiana sobrediseñan sus mezclas de concreto por encima de la resistencia promedio requerida, f'_{cr} , para garantizar la calidad del producto final entregado, independientemente de la calidad de las prácticas de construcción y pruebas en el campo. Los factores que llevan a los productores de concreto premezclado a incluir un diseño excesivo por encima de los requisitos f'_{cr} para la aprobación del diseño de la mezcla de concreto incluyen:

- Restricciones prescritas en especificaciones.
- Proporciones prescritas de la mezcla.
- Compensación por prácticas deficientes de construcción.
- Compensación por prácticas deficientes de pruebas en el campo por parte de la agencia.
- Medios y métodos de construcción¹².

En la producción de concreto premezclado en 2020, se consumieron en exceso 7.0 millones de toneladas métricas (7.7 millones de toneladas) de cemento Portland debido al sobre diseño de las mezclas de concreto. Esto equivalió al 6.7% del total de 103 millones de toneladas métricas (113 millones de toneladas) de cemento consumido durante ese período. Los profesionales de diseño, productores de concreto, contratistas y agencias de pruebas deben trabajar de manera coordinada para asegurar que se reduzca el diseño excesivo en proyectos que requieren concreto de bajo carbono (LCC)¹².

Código de mezcla de concreto DRM	Descripción de la mezcla	Impacto por m ³	Referencia	Mezcla declarada	% of referencia
6.39F-LS-AE	4000 psi air	GWP, kg CO ₂ e	312.33	163.18	(47.76)
		Agotamiento de la capa de ozono, kg CFC11e	7.37×10^{-6}	5.34×10^{-6}	(27.55)
		Acidificación, kg SO ₂ e	1.00	0.84	(16.01)
		Eutrofización, Ne	0.44	0.32	(27.37)
		**Smog formation, kg O ₃ e	21.36	19.68	(7.83)
		Energía No renovable, MJ, NCV	1910.37	1645.93	(13.84)

Nota: 1 kg = 2.2 lb

Tabla 2: Declaración Ambiental de Producto (EPD) para la mezcla de concreto de pared generada por el software del Instituto de Materiales Sostenibles Athena.

Ejemplos de Informes del GWP para Mezclas de Concreto

Se evaluaron tres mezclas de concreto para la reducción del GWP:

Mezcla de concreto para cimiento/cimentación de concreto de 3000 psi (20.7 MPa):

Tech Ready Mix en Cleveland, OH, EE. UU., participó en el proceso de recopilación de datos del "EPD promedio de la industria para concreto premezclado de miembro de NRMCA" y utilizó la información dentro del EPD para cuantificar la reducción en la GWP para 1 yd³ o 1 m³ de concreto¹³. Este EPD representa un resultado promedio ponderado por la producción compilado entre todas las empresas participantes y sus plantas.

La mezcla de concreto declarada por Tech Ready Mix incluyó 470 lb/yd³ (279 kg/m³) de material cementicio con un reemplazo del 25% del cemento Portland por ceniza volante. Utilizando las tablas en las páginas 17 y 18 del EPD de NRMCA, que resume los resultados para concretos entre 2500 y 3000 psi (17.2 y 20.7 MPa), Tech Ready Mix reportó una GWP de 205.22 kg CO₂e/yd³ (268.42 kg CO₂eq/m³) para su mezcla. Esto se compara con una mezcla de cemento Portland sin reemplazo de SCM que tenía una GWP de 238.08 kg CO₂eq/yd³ (311.39 kg CO₂eq/m³), lo que resulta en una reducción de GWP del 14%.

Mezcla para muro de concreto de 4000 psi (27.6 MPa):

Dickinson Ready Mix Co. & Concrete Products en Dickinson, ND, EE. UU., reportó la GWP para su mezcla de muro utilizando un EPD específico del producto. El EPD se generó a partir del software del Instituto de Materiales Sostenibles Athena (ver Tabla 2), y los datos del inventario del ciclo de vida se recopilaron de su planta en State Street y se compararon con el punto de referencia promedio de la industria de NRMCA. La mezcla declarada incluyó 600 lb/yd³ (356 kg/m³) de materiales cementicios con un reemplazo del 70% de cemento Portland por cemento de escoria (50%) y ceniza volante (20%). El reemplazo de cemento Portland por SCM resultó en una reducción de GWP del 52%.

Mezcla de concreto para exterior de 5000 psi (34.5 MPa):

El productor de concreto premezclado ABC no participó en el programa de recopilación de EPD de NRMCA a nivel de la industria y no tenía software para crear EPD a pedido. Optaron por utilizar la Calculadora de Evaluación del Ciclo de Vida en línea de la Asociación de Cemento de Escoria, que cumple con los requisitos de una herramienta de evaluación del ciclo de vida verificada por terceros independientes que cumple con las normas ISO correspondientes. Esta calculadora permite la entrada de mezclas de concreto personalizadas con diferentes contenidos de cemento de escoria y las compara con los puntos de referencia regionales de NRMCA, lo que permite calcular los resultados del ACV en tiempo real.

El productor ABC utilizó una mezcla de concreto declarada de 614 lb/yd³ (364 kg/m³) de material cementicio con el cemento Portland con piedra caliza (PLC) reemplazado con un 30% de cemento de escoria. Reemplazar el PLC con cemento de escoria resultó en una GWP de 208.81 kg CO₂eq/yd³ (273.11 kg CO₂eq/m³). Esto se comparó con la mezcla de referencia PLC que tenía una GWP de 260.07 kg CO₂eq/yd³ (340.16 kg CO₂eq/m³), lo que equivale a una reducción de GWP del 19.7%.

En resumen, los requisitos para el uso de LCC se están volviendo más prevalentes en la industria de la construcción, y comprender la terminología, la recopilación de datos y la medición de la GWP se volverá esencial.

Referencias

1. Kanavarus, F., y Scrivener, K.L., "The Confused World of Low-Carbon Concrete," *Concrete*, V. 57, No. 3, Apr. 2023, pp. 38-41.
2. ISO 21930:2017, "Sustainability in Buildings and Civil Engineering Works—Core Rules for Environmental Product Declarations of Construction Products and Services," International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 2017, 80 pp.
3. ISO 14040:2006, "Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework," International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 2006, 20 pp.
4. ISO 14044:2006, "Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines," International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 2006, 46 pp.
5. ISO 14025:2006, "Environmental Labels and Declarations—Type III Environmental Declarations—Principles and Procedure," International Organization for Standardization, Ginebra, Suiza, 2006, 25 pp.
6. "Structural Precast Concrete Industry Wide EPD," EPD-117, Sept. 2019, 16 pp.
7. ASTM C595/C595M-23, "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 9 pp.
8. Miller, S.A., y Myers, R.J., "Environmental Impacts of Alternative Cement Binders," *Environmental Science Technology*, V. 54, No. 2, Dec. 2019, pp. 677-686.
9. Scrivener, K.L.; John, V.M.; y Gartner, E.M., "Eco-Efficient Cements: Potential, Economically Viable Solutions for a Low-CO2 Cement-Based Materials Industry," *Cement and Concrete Research*, V. 114, Dec. 2018, pp. 2-26.
10. Alturki, A., "The Global Carbon Footprint and How New Carbon Mineralization Technologies Can Be Used to Reduce CO2 Emissions," *Chemical Engineering*, V. 6, No. 3, June 2022, p. 44.
11. DeRousseau, M.A.; Kasprzyk, J.R.; y Srubar III, W.V., "Multi-Objective Optimization Methods for Designing Low-Carbon Concrete Mixtures," *Frontiers in Materials*, V. 8, July 2021, www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2021.680895/full.
12. Buffenbarger, J.K.; Casilio, J.M.; AzariJafari, H.; y Szoke, S.S., "Role of Mixture Overdesign in the Sustainability of Concrete: Current State and Future Perspective," *ACI Materials Journal*, V. 120, No. 1, Jan. 2023, pp. 89-100.
13. "NRMCA Member Industry-Average EPD for Ready Mixed Concrete," National Ready Mixed Concrete Association, Alexandria, VA, 2019, 34 pp.

Agradecimientos a Julie Buffenbarger, FACI, Científica Senior y Principal de Sostenibilidad en Beton Consulting Engineers, LLC, Mendota Heights, MN, EE. UU., por proporcionar la respuesta a esta pregunta.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Sureste

*Título: Preguntas y Respuestas.
Mezclas de Concreto de Bajo Carbono*



*Traductora:
Maria Jesús
Domínguez Ramos*



*Traductor y Revisor Técnico:
Mtro. Joseph Eli
Mandujano Zavala
MSc DIC.*