



CONCRETO ALTERNATIVO CON SUSTITUCIÓN DE AGREGADO FINO POR VIDRIO RECICLADO

ALTERNATIVE CONCRET WITH SUBSTITUTION OF FINE AGGREGATE FOR RECYCLED GLASS

ErasmO Aguilar ^{1,*}, Angel Mendoza ², Diego Olvera ³, José Pérez ⁴, Celia Ochoa ⁵,
Alexa Xicohtencatl Gómez ⁶

¹ Arquitectura y Mas S.A. Managua, Nicaragua.

ark.joe07@gmail.com , (<https://orcid.org/0000-0002-6267-9405>)

² Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Guadalajara,
Jalisco, México.

angel.mendoza9679@alumnos.udg.mx , (<https://orcid.org/0009-0007-8400-4138>)

³ Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías. Guadalajara,
Jalisco, México.

diego.olvera9680@alumnos.udg.mx , (<https://orcid.org/0009-0000-3343-8648>).

⁴ Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Veracruz, México.
Zs22024592@estudiantes.uv.mx, (<https://orcid.org/0009-0009-5258-1998>).

⁵ Universidad Vizcaya de las Américas, Delicias, Chihuahua, México.

arq.ochoajocelyn@gmail.com, (<https://orcid.org/0009-0008-0864-7024>).

⁶ Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Veracruz, México.
alexiaxicoh@hotmail.com (<https://orcid.org/0009-0000-4839-318X>).

(*recibido/received: 30-10-2024; aceptado/accepted: 19-11-2024*)

RESUMEN

El presente escrito contiene el análisis y los resultados del trabajo realizado en el periodo 2024 como parte de la investigación “MATERIALES ALTERNATIVOS A BASE DE CEMENTO” acreditado por la UNI en colaboración con “Programa Delfín”, la Universidad de Guadalajara y la Universidad Veracruzana, permitiendo el análisis y exploración de posibilidades de utilización de concretos alternativos con cemento y reciclados de vidrio (oscuro y claro). Los resultados comparados con otros estudios similares y sustentados en las normativas para su elaboración y ensayos, demostró la viabilidad de estos materiales para la utilización en productos de concreto con fines no estructurales, de manera que se comprueba la importancia y aporte a la sostenibilidad de los procesos y recursos. Partiendo de los residuos generados por la población en el constante uso y desecho de vidrio, se elaboró una propuesta de concreto reciclado a partir de la reutilización con la sustitución de un porcentaje del agregado fino por vidrio reciclado, siendo triturado y tamizado estos materiales y proponiendo una dosificación en base a estudios similares.

Palabras clave: Vidrio, sostenibilidad, reciclaje, Cemex, viabilidad.

* ErasmO Aguilar.

Correo: ark.joe07@gmail.com

ABSTRACT

This document contains the analysis and results of the work carried out in the period 2024 as part of the research “ALTERNATIVE CEMENT-BASED MATERIALS” accredited by the UNI in collaboration with “Programa Delfin”, the University of Guadalajara and the Universidad Veracruzana, allowing the analysis and exploration of possibilities for using alternative concretes with cement and recycled glass (dark and light). The results compared with other similar studies and supported by the regulations for their preparation and testing, demonstrated the viability of these materials for use in concrete products for non-structural purposes, so that the importance and contribution to the sustainability of the materials is proven. processes and resources. Starting from the waste generated by the population in the constant use and disposal of glass, a proposal for recycled concrete was developed from reuse with the replacement of a percentage of the fine aggregate with recycled glass, these materials being crushed and sieved and proposing a dosage based on similar studies.

Keywords: Glass, sustainability, recycling, Cemex, viability.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha avanzado en el desarrollo de nuevos concretos que tengan un valor de sostenibilidad y reciclaje en su proceso o producto final. En la actualidad ya se manejan términos como “Concretos alternativos o ecológicos”, que se pueden definir como variantes del concreto tradicional, diseñadas para minimizar su impacto ambiental sin comprometer su rendimiento. Estos concretos se fabrican utilizando materiales reciclados o subproductos industriales, como cenizas volantes, escoria de alto horno, y vidrio molido, entre otros. Estos materiales, que de otra manera terminarían en vertederos, contribuyen a la resistencia y durabilidad del concreto, mientras reducen la necesidad de cemento Portland, uno de los mayores contribuyentes a las emisiones de CO₂ en la producción de concreto.

Tanto las empresas productoras de cemento como organizaciones que velan por el medio ambiente y el desarrollo, avaladas por muchos países, consideran de alta relevancia la reducción de impactos y la protección de los recursos o su uso moderado, siendo una alternativa cada vez más aplicable la del reciclaje.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible u ODS consisten en un conjunto de 17 objetivos destinados a perseguir la igualdad entre las personas, proteger el planeta y asegurar la prosperidad sin dejar a nadie atrás. Estos objetivos los firmaron un total de 193 países en 2015, asegurando su cumplimiento para el año 2030 (García, 2021).

Los concretos alternativos presentan una serie de ventajas y oportunidades que los posicionan como una opción viable y sostenible en la construcción moderna. Al emplear materiales reciclados o subproductos industriales, estos concretos contribuyen significativamente a la sostenibilidad, reduciendo el uso de recursos naturales y disminuyendo las emisiones de CO₂, lo que ayuda a mitigar el impacto ambiental asociado con la producción de concreto tradicional. Además, el uso de agregados reciclados puede suponer un ahorro de costos, ya que muchos de estos materiales son más accesibles y económicos en comparación con los agregados convencionales. A nivel de rendimiento, algunos de estos agregados alternos mejoran las propiedades del concreto, como el aislamiento térmico y acústico, lo que favorece el desarrollo de edificaciones con mayor eficiencia energética y confort habitacional. Esto abre nuevas oportunidades para el diseño de estructuras más sostenibles, económicas y con mejores prestaciones.

Se realizó la revisión de diferentes estudios relacionados con el tema, entre los cuales se destacan la compresibilidad de los materiales, materiales reciclables en el concreto a base de agregados y se tomó como punto de partida el estudio “Concreto reciclado a partir de escombros de mampostería de bloque de cemento”, para así obtener una comparativa de los resultados obtenidos por nosotros con un material fuera

del ámbito constructivo y poder medir las diferencias entre estos específicamente en las pruebas de compresión simple para poder entender las diferencias entre materiales constructivos y no constructivos en nuevas mezclas alternativas de concretos de baja resistencia y de edificaciones menores. Está comprobado que el uso de polvo de vidrio en concreto como un sustituto resulta viable desde la perspectiva de sostenibilidad y resistencia mecánica, especialmente para proyectos que buscan disminuir el impacto ambiental sin comprometer la durabilidad estructural (Bhat, et al, 2021).

Los resultados obtenidos mostraron valores intermedios conforme las resistencias sugeridas en la normativa nicaragüense, mismas que son factibles y viables para la construcción de otros materiales con funciones no estructurales, como elementos urbanos, muros perimetrales y muros bajos, entre otros.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales y preparación

Para este estudio experimental, se trabajó con agregado reciclado de “vidrio de botellas de dos tipos (oscuro y claro)”, para lo cual se elaboraron cilindros de concreto aplicando dos diseños de mezcla. Se elaboraron 7 cilindros con vidrio oscuro y 4 con vidrio claro, utilizando moldes con tamaños de 10 x 20 cm. Estas diferencias en el tipo de vidrio para las mezclas, permite más posibilidades de análisis para obtener una comparativa de las diferencias y contrastes que puede existir entre cada mezcla.

El vidrio fue triturado y luego cribados con malla #100. Ambos tipos de vidrio se obtuvieron de botellas de bebidas de consumo frecuente por parte de la población. Se destaca que estos materiales frecuentemente terminan como desperdicios en las calles o botaderos, sin aprovechar los valores de reciclaje que estos tienen.

Se empleó cemento hidráulico Portland gris de uso general (GU) marca CEMEX en concordancia con la norma NTON 12 006-11(NTON, 2011) y ASTM C1157(ASTM, 2003a). Posteriormente a la construcción y curado de los especímenes, se realizaron los ensayos de acuerdo con la normativa, considerando dos momentos, a los 14 días y a los 28 días.

Este cemento es flexible en el diseño de mezclas, permitiendo a los fabricantes de cemento emplear diversas materias primas y métodos de producción, siempre que el cemento cumpla con los requisitos de desempeño especificados. Esto promueve la innovación, el uso de materiales alternativos y la optimización de procesos en la producción de cemento. Se debe destacar que la especificación se centra en el desempeño permitiendo que se utilicen materiales complementarios al clínker tradicional (como las puzolanas o escorias), lo cual ayuda a reducir la huella de carbono del cemento y promover la sostenibilidad en la construcción (ASTM C1157).

El diseño de las mezclas se realizó siguiendo la normativa ASTM C31, la materia prima utilizada fue:

- Árido fino (arena de río)
- Árido grueso (piedrín de ½”)
- Vidrio reciclado (tamizado por malla #100)
- Agua

Los equipos e instrumentos manejados durante el procedimiento fueron:

- Cabezales/cilindros de acero (10 x 20 cm)
- Aceite (para lubricar cabezales de acero)
- Tamices #100

- Cono de Abrams (de revenimiento)
- Cucharas de albañilería
- Pala
- Carretilla
- Prensa hidráulica para compresión POWER TEAM Model A, capacidad de 10.000 PSI

Se utilizó una proporción de Agua-Cemento (a/c)0.7. La dosificación fue de 1:2:1 (cemento: árido fino: árido grueso), para la cual, se realizaron dos mezclas con diferentes dosificaciones: para el primer tipo, se sustituyó en un 15% de la arena tradicional por vidrio claro; la segunda, se sustituyó en un 20% de la arena tradicional por vidrio oscuro. Las mezclas probadas fueron sometidas a la prueba de revenimiento usando el cono de Abrams, en condiciones de laboratorio, a temperatura de 34°C (ver Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Proporciones utilizadas en la mezcla - vidrio claro (Autores 2024).

Material	Proporción	%	Peso en gr
Cemento	1		3,373
Árido fino		(80)	7,701.85
Vidrio claro	2	(15)	1,359.15
Árido grueso	1		3,160
Agua	0.7		2,212

Tabla 2. Proporciones utilizadas en la mezcla - vidrio oscuro (Autores 2024).

Material	Proporción	%	Peso en gr
Cemento	1		5,903
Árido fino		(80)	12,686.4
Vidrio oscuro	2	(20)	3,171.6
Árido grueso	1		5,806
Agua	0.7		4,064.2

2.3 Método

Siendo este un “Experimento aplicado”, se tomaron como referencia y guía los procedimientos descritos de las siguientes normas:

- ASTM C39 Standar Test Method for Compressive Stength of Cilyndrical Concrete Specimens.
- ASTM C31 Standar Practice for Making Curing Concrete Test Specimens in the Field.
- Reglamento Nacional de Construcción (RNC-07).
- Norma Mínima de Diseño y Construcción General de Mampostería MP-001.

- NMX-C-109-ONNCCE-2013.

Para realizar los especímenes de concreto alternativo, se atendió de manera estricta a la normativa nacional e internacional, considerando sus procedimientos en todo momento: elaboración de los cilindros, preparación, enmoldado, desencofrado, almacenamiento y curado, hasta el periodo de las pruebas de compresión simple.

Todos los procedimientos se realizaron en el laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el Recinto Universitario Pedro Araúz Palacios (RUPAP), organizados en 4 etapas principales:

Primera etapa – Selección, procesamiento y dosificación de los materiales

Se revisaron y seleccionaron los materiales para proponer una posible dosificación con adaptaciones del agregado fino, basándose en trabajo de “Concreto reciclado a partir de escombros de mampostería de bloque de cemento” que fue ajustada a la relación de agua cemento que fue necesaria. Se utilizó cemento (Portland), arena, pedrín y material reciclado a partir de vidrio reciclado (claro y oscuro) que fue triturado y tamizado (ver Figura 1).



Figura 1. Tipos de botellas utilizadas en el estudio.

Segunda etapa – Elaboración y curado de los especímenes

El proceso de elaboración de los especímenes se separó en dos, que, a la vez, se trabajaron de forma paralela, uno con la mezcla en sustitución de nuestro agregado fino por el *vidrio claro* (4 cilindros), el otro con sustitución del agregado por *vidrio oscuro* (7 cilindros). Procedimientos que fueron realizados en laboratorio, acorde a las normativas NMX-C-109-ONNCCE-2013 y las ASTM C31, respetando las siguientes actividades:

- El moldeo llenando el molde en tres capas aproximadamente iguales.
- Compactación manual con varilla de compactación de acero con un diámetro de 16 mm (5/8 in) realizando 25 golpes por capa, distribuidos uniformemente en toda la superficie.
- El curado de los especímenes se realizó con el sumergimiento de estos en agua, cubriendo el 100% de su volumen.
- La nivelación se realizó con varilla de acero, sobre la superficie superior del concreto asegurado que esta quedara plana y lisa.

- Almacenamiento inicial del molde se hizo en ambiente controlado (laboratorio RUPAP), protegido de vibraciones, temperatura extrema, viento o luz solar directa.
- No se requirió cubrir la parte superior del molde con una hoja de plástico o un material impermeable dado que las temperaturas (por efecto de lluvias) se mantuvieron dentro de los rangos sugeridos (16°C a 27°C).

Tercera etapa – Ensayo a compresión de los especímenes

Los once cilindros creados con la mezcla del concreto alternativo, 10 fueron sometidos a prueba de compresión simple, dejando un cilindro que fue hecho con vidrio oscuro como testigo para de igual forma realizarle la prueba de compresión simple. Las pruebas de compresión se realizaron en dos momentos (14 y 28 días), en condiciones de laboratorio por medio del equipo “POWER TEAM Model A-10.000 PSI”. El procedimiento realizado es el descrito en la ASTM C39.

Cuarta etapa – Interpretación de resultados

Se realizó una interpretación y análisis comparativo de los datos. Se evaluó el desempeño de los cilindros con las sustituciones de ambos tipos de vidrio para determinar las diferencias de las resistencias para exponer los resultados y también desde una perspectiva tanto técnica como ambiental y de sustentabilidad. Además, consideramos superficialmente la viabilidad económica y las aplicaciones reales de construcción.

3. TEORÍA DE LOS CONCRETOS ALTERNATIVOS

3.1 Vigencia e importancia del concreto en la actualidad

El concreto o conocido en algunas partes como hormigón, es y ha sido durante muchos años uno de los materiales estructurales, fundamentales en la industria de la construcción a nivel mundial, debido a sus características de resistencia y durabilidad mismas que lo vuelven versátil por lo que se ha convertido en parte vital para las estructuras de todo tipo, siendo que se utiliza para la ejecución de edificios de gran altura hasta viviendas de un nivel, además de ser utilizado en obras de todo tipo como puentes, túneles, presas, carreteras, etc.

El concreto ligero ofrece propiedades térmicas que promueven ahorro de energía para el usuario, adecuadas propiedades acústicas y de resistencia al fuego, así como la reducción de cargas muertas en las estructuras. Adicionalmente, el concreto autocompactable mejora el acabado de los terminados aparentes y reduce los costos asociados a la colocación, ya que no se requiere mano de obra excesiva ni vibradores para compactar el concreto (CEMEX, 2012).

Actualmente, se han desarrollado diversas tecnologías en el uso del concreto, que ofrecen componentes adicionales como el uso de los aditivos, que pueden generar efectos dentro de la mezcla, como retardantes, acelerantes o mejoradores de propiedades a la resistencia, entre otros, que pueden aplicarse bajo diferentes condiciones climáticas o incluso para estructuras que requieren estar dentro del agua, por lo que requieran de impermeabilidad o mayor dureza.

Sin embargo, a pesar de todas estas características que se pueden ofrecer en el concreto, en la actualidad este material requiere ciertas innovaciones tecnológicas que favorezcan a la condición mundial, debido a que se requiere materiales que reduzcan el consumo de recursos naturales y a su vez aporten al medio ambiente, teniendo en cuenta que cada día aumenta la demanda de vivienda para la población, esto hace que cada día se necesiten con más urgencia nuevos materiales o alternativas en la industria de la construcción, para que las viviendas sean más funcionales, seguras y económicas (Jaimes Estupiñan & García Caballero, 2021).

Es importante tener en cuenta que el concreto a pesar de ser un material con una gran historia y trayectoria, no se le considera obsoleto debido a que sigue siendo una de las opciones más populares en la construcción actual, algunas de las razones por las que se utiliza es por su costo-beneficio ya que al ser relativamente económico de producir, lo hace accesible para una amplia variedad de proyectos, otra de las razones por las que el concreto se mantiene vigentes, es debido a que es un material muy resistente que puede soportar condiciones climáticas extremas, además de que se puede moldear en una gran variedad de formas y tamaños, por lo cual lo hace ideal para diferentes tipos de aplicaciones mismas que lo vuelven versátil, desde el punto de vista de la sostenibilidad el concreto puede llegar a ser un material sostenible, esto debido a que se puede producir con diferentes tipos de materiales, garantizando una larga vida útil.

3.2 Principales propuestas de concretos alternativos

Actualmente existen diversos medios los cuales buscan brindar diferentes alternativas o soluciones sostenibles para los problemas procurando optimizar la tecnología del concreto, a base de constantes investigaciones y pruebas mecánicas del material para evaluar y determinar la viabilidad de dichas propuestas, algunas de las propuestas más destacadas que se pueden encontrar son las siguientes:

Concreto geopolímero: Teniendo en cuenta que los geopolímeros son materiales cementicos (cenizas, escoria de alto horno o sílice cálcica) que poseen características potencialmente aptos para su uso en la construcción y generan menos emisiones de contaminantes en su producción, este tipo de concreto tiene el potencial de remplazar al concreto a base de cemento portland tradicional, debido a que reduce considerablemente la huella de carbono, es más resistente a la compresión, al fuego y algunos corrosivos químicos, sin embargo alguno de sus problemas es que su tiempo de fraguado y curado es muy corto, lo que reduce el tiempo de trabajabilidad en comparación con el tradicional.

Concreto de cáñamo: Este tipo de propuesta utiliza como base el cáñamo, específicamente las fibras derivadas de este, las cuales aportan características relevantes al concreto como una reducción considerable en el peso propio, la cual repercute directamente en un menor consumo de materiales, dentro de sus características más relevantes es su capacidad aislante, la cual permite que las edificaciones cuente con una mejor eficiencia energética, al ser un tipo de material biodegradable y renovable promueve la sostenibilidad, alguna de sus limitaciones son el hecho de tener disponibilidad del cáñamo en la zona a emplear y una reducción considerable en la resistencia a la flexión en comparación del concreto tradicional.

Concreto de plástico reciclado: Es una de las alternativas que suele emplearse con mayor frecuencia, este tipo de concreto utiliza los residuos plásticos como agregados de la mezcla, de esta manera favorece al medio ambiente al reducir la cantidad de plástico que termina en los basureros aplicando la reutilización de los materiales, alguna de sus características es una mejora en la resistencia a la tracción y en la ductilidad del concreto, haciendo que este sea más resistente a la fisuración, alguno de los retos es el hecho de que dependiendo de su proceso de reciclaje, existe la posibilidad de encontrar presencia de micro plásticos en la mezcla final.

Concreto de grafeno: El grafeno es un material que se extrae a través del grafito y se compone de carbono puro, este novedoso nanomaterial integra nanopartículas las cuales sirven para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, aumentando de esta manera la resistencia a la flexión, compresión y fractura de los elementos de concreto, así mismo dicho materia permite que se realicen estructuras más delgadas y ligeras, optimizando de esta manera el uso y aplicación de los materiales, sin embargo en la actualidad este material está en fase de investigación y desarrollo, por lo que mantiene un costo elevado de producción (Chao, 2016).

Estas son algunas de las propuestas de concreto alternativo que se utilizan en la actualidad, cabe mencionar que para el uso más adecuado de dichos materiales, dependerá de factores específicos del producto final, como el tipo de estructura o material a construir, los tipos de carga de diseño, la disponibilidad de material

prima en la zona o región donde se ejecutara la construcción, los costos del concreto tradicional y las posibilidades de nuevas alternativas (a partir de la premisa de reciclaje). Así pues, un nuevo criterio para muchas empresas constructoras e inclusive productoras de cemento, evaluar el impacto ambiental que genera en base a la huella de carbono es una prioridad, que se suma al cumplimiento con las normas o requerimientos oficiales de construcción vigentes a nivel nacional e internacional.

Hay investigaciones que sugieren, que al usar ladrillo de arcilla triturado con otros materiales tiene la posibilidad de incrementar las propiedades mecánicas de este. Por ejemplo, al reemplazar el 100% de los agregados gruesos por residuos cerámicos (mezcla de ladrillos cerámicos; azulejo blanco y porcelana sanitaria), la resistencia a la compresión se incrementa en un 11% (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010). Debieb and Kenai examinan la posibilidad de usar el triturado de bloque de arcilla como agregado fino y grueso usando diferentes porcentajes de reemplazos (25%, 50%, 75% y 100%) a los agregados tradicionales (Debieb & Kenai, 2008). Los resultados mostrados desarrollaron concretos con triturado de ladrillo de arcilla cocida con características similares a los concretos tradicionales, mientras se limita a un 25% y 50% la cantidad de agregado grueso y fino respectivamente.

3.3 Viabilidad del uso de vidrio en concreto alternativo

Los concretos con polvo de vidrio son un tipo de concreto en el que una parte del agregado fino, como la arena, es reemplazada por polvo de vidrio reciclado. Este material surge como una alternativa sostenible en la construcción, ayudando a reducir los desechos de vidrio y las emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de concreto. El polvo de vidrio utilizado en estas mezclas se obtiene triturando vidrio reciclado, principalmente de fuentes como botellas y ventanas desechadas.

En el estudio publicado en 2021 en *Materials Today: Proceedings*, se investigó cómo el polvo de vidrio, utilizado como reemplazo parcial del cemento en proporciones del 10%, 20%, y 30%, influye en las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto. Los resultados indicaron que el polvo de vidrio tiene una reacción pozoalánica efectiva cuando se encuentra finamente molido (es decir, cuando las partículas de vidrio son menores a 100 micrones). A porcentajes de reemplazo de hasta un 20%, se observó que:

- **Resistencia a la compresión:** La resistencia del concreto con polvo de vidrio alcanzó niveles similares o superiores a los del concreto convencional después de 28 días de curado, obteniendo resistencias de aproximadamente 45 MPa, cuando el reemplazo fue del 10-20%. A mayores proporciones de vidrio (por encima del 30%), se observaron ligeras disminuciones en la resistencia debido a la reacción álcali-sílice (RAS).
- **Durabilidad:** El uso de polvo de vidrio también mejoró la impermeabilidad del concreto y la resistencia al ataque de cloruros. Esto es especialmente importante para estructuras sometidas a ambientes agresivos, como zonas costeras o infraestructuras expuestas a la salinidad.
- **Sostenibilidad:** El estudio destacó los beneficios ambientales del uso de vidrio reciclado, ya que reduce la dependencia de los materiales convencionales y las emisiones de carbono asociadas a la producción de cemento. Además, el polvo de vidrio reduce los desechos generados por el vidrio no reciclado, que de otro modo terminarían en vertederos.

En cuanto a las resistencias mecánicas, el estudio confirma que hasta un 20% de reemplazo de cemento con polvo de vidrio es óptimo para mantener una resistencia a la compresión adecuada, siendo comparables a las resistencias obtenidas en concreto tradicional.

De igual manera, dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible–ODS, específicamente los Objetivos 11 y 12 plantean la necesidad y la oportunidad de mejorar la calidad de vida, procurando la mejor gestión ecológica de productos químicos y desechos, reduciendo significativamente su liberación al medio ambiente para minimizar impactos negativos en la salud y el ecosistema (un.org, 2024).

- El Objetivo 11 busca que ciudades y asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. Esto responde al acelerado crecimiento urbano que ha llevado a que más de la mitad de la población mundial viva en áreas urbanas, una cifra que alcanzará el 70 % para 2050. Sin embargo, el rápido aumento de la población en las ciudades ha superado el desarrollo de infraestructura adecuada, lo que provoca el crecimiento de barrios marginales, contaminación y falta de espacios públicos.
- Por su parte, el Objetivo 12 se enfoca en garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles para preservar los recursos naturales. Con el crecimiento poblacional, se estima que en 2050 podrían requerirse los recursos de casi tres planetas para mantener el estilo de vida actual. Se promueve la gestión adecuada de productos químicos y desechos, así como la reducción de generación de desechos mediante la prevención y el reciclaje, destacando la importancia de adoptar prácticas sostenibles para el bienestar de futuras generaciones.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo con las normativas rectoras en Nicaragua (RNC-07) y en fundamento de las normas mexicanas e internacionales, se acepta para el trabajo de construcción los concretos siguientes: concreto estructural, concreto liviano (con una resistencia mínima entre 1.440 y 1.840 kg/m³), concreto presforzado y concreto prefabricado. Las aplicaciones del concreto normal o liviano, de estructuras de concreto, se delimita un valor de $f'c$ de 210kg/cm² y no se establece valor máximo del mismo. Cambia entonces cuando el concreto es liviano, sus aplicaciones en muros estructurales especiales y marcos resistentes, se delimita un valor mínimo de igual forma de $f'c$ de 210kg/cm², estas si estableciendo un valor máximo de 350kg/cm².

Ensayo a compresión simple

Se realizó la prueba de nuestras mezclas de laboratorio, de acuerdo con la ASTM-C39 con cilindros preparados y ensayados según lo marca la ASTM C-192. (Figura 2).



Figura 2. Ensayos a compresión de especímenes de concreto.

La resistencia a la compresión de las mezclas de concreto se obtuvo siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C39. En este ensayo se probaron las primeras muestras a los 14 días (6 de especímenes), siendo 3 de sustitución de vidrio claro y 3 de vidrio oscuro, el resto fueron sometidos a la prueba de compresión a los 28 días, dejando estos almacenados en el laboratorio, en condiciones donde no sufrieran ningún tipo de alteración. Al pasar los 28 días de ser elaborados, se realizó la segunda prueba a 4 cilindros más, uno de vidrio claro, el resto de vidrio oscuro. Se debe aclarar que el número de muestras construidas fue bajo, en correspondencia a la materia prima (polvo de vidrio a partir de la trituración de botellas), que

se pudo obtener para el período destinado a esta investigación. Las resistencias obtenidas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Codificación y resistencia a la compresión (Autores 2024).

Código del espécimen	Edad (días)	Resistencia a la compresión (Lbf)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
VC-1	14	25200	145.54
VC-2	14	34520	199.36
VC-3	14	32800	193.22
VO-1	14	22320	131.48
VO-2	14	29230	172.19
VO-3	14	23330	137.43
VC-4	28	48090	283.29
VO-4	28	41860	246.59
VO-5	28	41180	242.58
VO-6	28	41810	246.30

En otras investigaciones similares, donde la relación y proporción de los agregados que se utilizó fue la misma (Aguilar et al 2021), encontramos que utilizaron una relación mayor de a/c, al utilizar escombros como sustituto del agregado fino, en esos especímenes se necesitó una cantidad mayor de agua para aglomerar eficientemente con el pedrín, el cemento y el agua (ver figura 3).

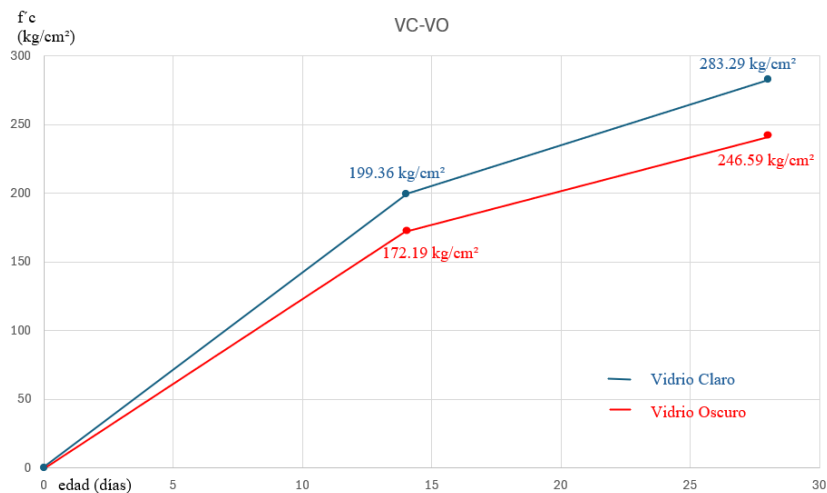


Figura 3. Diferencias entre resistencias en tipos de vidrio.
Elaborado por los autores

La diferencia entre un tipo de vidrio y otro, aunque no llega a escalas y magnitudes grandes, es notable, variando en una compresión mayor en el vidrio claro por 36.7 kg/cm², que al final es una diferencia del 13% que es considerablemente notable. En todos los especímenes arrojó este comportamiento en donde el vidrio sin color arrojaba un valor mayor en la resistencia a la compresión sin importar que número de prueba fuera.

Al no ser sometido a alguna coloración y otras alteraciones en el vidrio como base para su fabricación primaria, otorga una compresibilidad mayor, ya que este no se ve expuesto a más alteraciones que eliminen más sus características iniciales, al venir de una sílice (arena de alta calidad).

Los valores entre el máximo y el mínimo, en compresión a 28 días, está por debajo de los 50kg/cm², expresando de manera implícita una buena homogeneidad entre todos los agregados. Cabe resaltar, que, en nuestra relación de agua para obtener la mezcla y el revenimiento adecuado, se ajustó la cantidad de agua, teniendo que ser menor, equivalente a la cantidad de nuestro agregado sustituto de fino, debido a que la capacidad de absorción del vidrio molido es potencialmente menor a la capacidad natural que tiene la arena (ver Tabla 4).

Tabla 4. Diferencias entre diferentes pruebas de compresión de diferentes mezclas (Autores 2024).

F _c (28 días)	Valverde y Castellanos (2017)		Aguilar y Hernández (2021)		Especímenes de los autores (2024)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
	143.78	257.9	171.7	372.13	242.58	283.29
Mediana	199.86		339.03		246.44	
Promedio	196.91		292.32		254.69	

Sabemos que siempre la resistencias buscadas y obtenidas dependen mucho de la calidad de los materiales utilizados, de su cuidado y donde se lleve a cabo la prueba, así como de otros componentes que en muchas ocasiones representan otro tipo de variables exógenas a los ensayos.

Las resistencias mecánicas varían según la proporción de reemplazo y la finura del polvo de vidrio. En general, se ha observado que hasta un 20% de sustitución del agregado fino por polvo de vidrio no afecta significativamente la resistencia a la compresión, alcanzando valores similares a los de un concreto convencional, entre 30 MPa y 50 MPa (aproximadamente 306 kg/cm² y 510 kg/cm²). Sin embargo, si el contenido de vidrio es demasiado alto, puede afectar negativamente la resistencia, debido a posibles problemas con la reacción álcali-sílice (RAS). (Bhat, et al, 2021).

Cuando de materiales reciclables hablamos, al basarnos y compararlos con las pruebas realizadas por Aguilar et al (2021), vemos que el agregado de vidrio triturado tiene una menor compresibilidad, esto como punto en contra, aunque como punto a favor, podemos ver una mayor regularidad y menor desfase entre una prueba y otra, al tener menor diferencia entre el valor máximo y mínimo de resistencia obtenido. Aunque el valor de proporción de agua fue diferente más allá de la diferente materia prima para el agregado sustituto, esto se presentó por un análisis de su capacidad de absorción entre el escombros de mampostería de bloque de cemento y el vidrio reciclado al ya ser molido, resultando menor el del último mencionado, además por la humedad del ambiente al realizar las mezclas.

Los resultados de los especímenes realizados en esta investigación muestran una buena capacidad de carga en contraste a experimentos similares (Valverde y Castellanos 2017, y Aguilar y Hernández 2021). Entre los valores de Valverde y Castellanos (196.91 kg/cm²) y Aguilar y Hernández (292.32 kg/cm²) se observa un aumento del 48.45%. Por otro lado, entre los valores de Valverde y Castellanos y los elaborados por los autores (254.69 kg/cm²) hay una diferencia del 29.34%. Finalmente, al comparar los valores de Aguilar y Hernández con los de los autores, se aprecia una disminución del 12.87%.

Esto indica que el concreto elaborado por "los autores" tiene una mejor resistencia que el de Valverde y Castellanos, mostrando una mejora significativa del 29.34%. Sin embargo, al compararse con los resultados

de Aguilar y Hernández, la resistencia es inferior en un 12.87%, lo que sugiere que, aunque los ensayos realizados por "los autores" presentaron un rendimiento sólido, no alcanzan el nivel de resistencia obtenido por Aguilar y Hernández. Sin embargo, a pesar de que los resultados fueron inferiores (sin generar grandes distancias), considerando la dosificación ensayada, se comprueba la importancia del uso de estos materiales reciclados

5. CONCLUSIONES

Si bien estos resultados no son contundentes ni suficientes para proponer una estandarización del aporte mecánico del agregado de vidrio triturado, y reconociendo la necesidad (y oportunidad) de continuar con este estudio, se evidencia que la utilización de este agregado se justifica satisfactoriamente en otros productos de concreto (bancas, ladrillos y bloques para bardas y muros exteriores, huellas, maceteras y otros elementos urbanos), y tiene un importante valor ambiental al reciclar botellas que generalmente son desechadas (como en el caso de Managua), como basura en general (sin ningún tipo de tratamiento o clasificación).

Se confirma que se cumplen parámetros de referencia para aplicaciones sostenibles del vidrio. Su uso en construcción reduce el consumo de materias primas no renovables y la generación de residuos, lo que ayuda a disminuir la huella de carbono. Además, estudios demuestran que el vidrio reciclado puede mantener propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, sin aumentar significativamente los costos, lo cual lo posiciona como una opción económicamente viable y ambientalmente beneficiosa. Las principales ventajas incluyen sostenibilidad, ahorro de costos y la promoción de una economía circular que mantiene los materiales en la cadena de valor a través del reciclaje y la reutilización.

Las empresas pueden contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente al ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles) y al ODS 12 (Producción y consumo responsables), mediante el uso de vidrio reciclado en sus procesos constructivos. Sin embargo, las variaciones en los métodos de procesamiento y las propiedades del vidrio dificultan una comparación directa entre estudios, lo que subraya la necesidad de estandarizar procedimientos y metodologías experimentales.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA CRediT

Los roles de autoría para la elaboración de este trabajo fueron los siguientes:

Conceptualización: Erasmo José Aguilar Arriola.

Metodología: Ángel G. Mendoza Rodríguez

Validación: Diego F. Olvera Sarabia

Investigación: José Antonio Pérez Orellan y Alexa Irene Xicohtencatl Gómez

Redacción - Borrador Original: Celia J. Ochoa Portillo

Redacción - Revisión y Edición: Ángel G. Mendoza Rodríguez y Diego F. Olvera Sarabia

Supervisión: Erasmo José Aguilar Arriola

DECLARACIÓN DE INTERESES CONTRAPUESTOS

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en conflicto ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados y/o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Dr. Néstor López Irías del Departamento de Investigación de la UNI, a la Ing. Matilde Avilés - jefa del departamento de Ing. Civil y arq. Irguí Gómez - jefe del departamento de Arquitectura, quienes con su gestión y apoyo fueron primordiales para la realización de este trabajo, gracias a sus valiosas contribuciones.

REFERENCIAS

Aguilar Arriola, E. J., Hernández, E. F. . ., & Espinoza, P. A. (2021). Recycled concrete from cement block masonry debris. *Nexo Scientific Journal*, 34(05), 7–19. <https://doi.org/10.5377/nexo.v34i05.13099>).

ASTM C31, Práctica estándar para la fabricación y el curado de muestras de hormigón para ensayos en el campo).

Ministerio de Transporte e Infraestructura (2011). Norma técnica obligatoria nicaragüense fabricación, uso y manejo del cemento NTON 12 006-11.

ASTM C1157(ASTM, 2003a). Especificación de rendimiento estándar para cemento hidráulico. <https://www.astm.org/standards/c1157>

Concreto premezclado. Concreto Ecológico: El Futuro de la Construcción Sustentable. Retomado de <https://concretosguadalajara.com/concreto-ecologico-construccion-sustentable/> CEMEX. Concreto profesional–Ligero celular y Autocompactable [en línea] 2012. Disponible en: www.cemexmexico.com

Bhat, I., Gowda, K. H., & Khan, S. (2021). Effect of glass powder as a partial replacement of cement in concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 46(5), 6852-6856. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.320>

PACHECO-TORGAL, F., & JALALI, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete . *Construction and Building Materials*, 24.

DEBIEB, F., & KENAI, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and building materials*, 22.

Chao, Enrique (2016). El Grafeno, ¿la nueva vitamina del concreto?/ construcción y tecnología en concreto. Retomado de <https://www.imcyc.com/revistacyt/index.php/punto-de-fuga/609-el-grafeno-la-nueva-vitamina-del-concreto>

Jaimés Estupiñán , D. F., & García Caballero, J. J. (2020). Importancia del concreto en el campo de la construcción. Formación Estratégica, 2(1), 1–13. Recuperado a partir de <https://www.formacionestrategica.com/index.php/foes/article/view/18>

García, Paula (2021). ¿Qué son los ODS u Objetivos de Desarrollo Sostenible?. Geoinnova.org. Retomado de https://geoinnova.org/blog-territorio/ods-objetivos-de-desarrollo-sostenible-gestion-territorio/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwsoe5BhDiARIsAOXVoUvzatLgvRy7FzA5fdiFmOEcD7TnL9gqITITlxD6OucECGd-10rGKYaAshHEALw_wcB

United Nations UN.Org (2024). 17 objetivos para transformar nuestro mundo. Retomado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Norma mínima de diseño y construcción de mampostería MP-001. MTI, Nicaragua.