

FORM FINDING WITH FLEXIBLE CONCRETE MATERIALIZATION WITH ADDITION OF AGRO- INDUSTRIAL POZZOLANS

Luis Manuel Ramírez Pérez¹, Erika Elizabeth Pérez Muzquiz², Miguel Ángel Ruvalcaba Sandoval¹

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
arqluis2008@outlook.es; mirvs@icloud.com

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México
erika.muzquiz@umich.mx

Resumen. This research is based on the problems faced by designers in the execution of models generated with the "Form-finding" design technique, due to the low or non-existent market proposal regarding the quality of materials capable of withstanding the stresses to which a model with complex curvatures is subjected; therefore, the use of agro-industrial pozzolans (sugarcane bagasse ash) is proposed as a 20% substitute for Portland cement to obtain flexible concrete, with the intention of evaluating the physical-mechanical behavior and its application to geometries based on force systems (catenaries) obtained from mesh relaxation through digital simulation, following the form-finding technique, resulting in a 16% superiority in compression tests of concrete with pozzolans compared to conventional concrete (control).

Keywords: Cane bagasse ash, Puzolane, Concrete, Formfinding, Catenary.

1 Introducción

El diseño computacional, conforme avanza la tecnología, ofrece mayores funciones que permite a los diseñadores predecir el comportamiento de estructuras en el mundo físico, sin embargo, las variables aumentan en función de la complejidad de las formas creadas digitalmente, por lo tanto, es necesario conocer el comportamiento en el mundo físico.

Esta investigación parte de la inquietud de proponer un concreto capaz de materializar formas complejas sin depender de cálculos matemáticos de la estructura para la ejecución de modelos a escala objeto y, que estos, sean resilientes a las cargas axiales a las cuales se someten estas formas con curvaturas variables; es decir, "fuerzas a través de la geometría" (Block P.

2018) en donde se utiliza la técnica de diseño form-finding para la búsqueda de catenarias capaces de absorber cargas de flexión y compresión, para ello es necesario que el material, en este caso el concreto con ceniza de bagazo de caña (CBC), cuente con la capacidad de soportar estas cargas destructivas. Un estudio referente a la innovación del concreto, la mezcla de concreto con CBC superara al concreto convencional en las pruebas de tensión y flexión en un 13% y 16% respectivamente (Villicaña, 2015).

1.1 Descripción del problema

El diseño no se refiere únicamente a la generación de formas que obedecen al capricho del diseñador, pero se entiende que obedecen a un resultado del proceso de trabajo en sinergia con la materialización de este, pues el solo “especular” no genera innovación, sino hasta la comprobación de su eficiencia.

El diseño genera formas que se pueden alejar de la geometría euclíadiana, formas en las que las rectas son ausentes, donde lo perpendicular se convierte en líneas oblicuas, donde la doble curvatura es la constante de las formas, pero: ¿Con qué material pueden ejecutarse las formas que obedecen a un diseño generado por métodos de diseño como el form-finding con características curvas que resistan las cargas axiales?

Aunado a esta problemática, según datos de la cámara nacional del cemento (CANACEM), por cada tonelada de cemento producido, se genera 1 tonelada de dióxido de carbono (CO₂), sabiendo que la construcción es una de las industrias con mayor actividad contaminante en el mundo.

1.2 Objetivo

Experimentar, explorar y diseñar modelos físicos con la técnica de form finding asistido por un software que simule el comportamiento de mallas y líneas afectadas y/o deformadas por fuerzas de gravedad, materializándolos con concreto adicionado con puzolanas agroindustriales, con la finalidad de evaluar la resistencia de los modelos fabricados, si son aptos de su réplica y si obedecen a un diseño digital eficiente en el mundo físico.

Concreto

El concreto (hormigón) es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada piedra machacada, pedrejón), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua (Portland Cement Association, 2004).

Cemento. El cemento Portland está compuesto principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada piedra machacada, pedrejón u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo (Portland Cement Association, 2004).

Agregado grueso. Frecuentemente la variación de la resistencia del concreto puede explicarse con el cambio de la relación a/c, no obstante, existe evidencia en la literatura que éste no siempre es el caso. Además, por consideraciones teóricas, independientemente de la relación a/c, las características de las partículas del agregado tales como el tamaño, la forma, la textura de la superficie y el tipo de mineral, influyen en las características de la zona de transición y, por lo tanto, afectan la resistencia del concreto (Mehta K., Monteiro P., 1998).

Agregado fino. En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado, el módulo de finura (MF), y por el otro la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finuras aceptables (entre 2.2 y 3.1) y carecer de alguna clase granulométrica. Si consideramos únicamente el módulo de finura, pueden obtenerse dos condiciones desfavorables: una de ellas existe cuando el módulo de finura es mayor a 3.1 (arena gruesa), en donde puede ocurrir que las mezclas sean poco trabajables, faltando cohesión entre sus componentes y requiriendo mayores consumos de cemento para mejorar su trabajabilidad; la otra condición es cuando el módulo de finura es menor a 2.2 (arena fina), en este caso puede ocurrir que los concretos sean pastosos y que haya mayores consumos de cemento y agua para una resistencia determinada, y también una mayor probabilidad que ocurran agrietamientos de tipo contracción por secado (Uribe R. 1991).

Puzolana (Ceniza de bagazo de caña). Newman (Newman & Choo, 2003) y Kosmatka (2004) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, 2004) describen las aportaciones de los principales materiales puzolánicos se usan de forma común en la fabricación de concreto, dichos materiales son: Ceniza volante, Escoria granulada de alto horno, Humo de sílice y puzolanas naturales (dentro de éstas de las más usadas son el Metacaolín y la piedra caliza, sin embargo, al día de hoy existen otros materiales que también han sido muy estudiados, tales como la ceniza de bagazo de caña y la ceniza de cascarilla de arroz (S. Marquez-Montero Et Al,

2010) (Águila, 2008) (Hernández, 2010); estos materiales podrían clasificarse dentro de las puzolanas artificiales de origen agrícola o agroindustrial.

La CBC es el subproducto del sector de ingenios azucareros y alcoholeros, y este se considera un residuo, ya que pasa por varias fases industrializadas: quema de la hoja de caña para su cosecha, transporte de la caña a los ingenios, proceso de molienda de la caña para la extracción del jugo, triturado de la caña y este ser cristalizado para la producción de azúcar o fermentado para la producción de alcohol, de esta etapa se genera un subproducto llamado bagazo de caña, el cual es calcinado para calentar las turbinas de los ingenios y producir energía eléctrica, de este paso resulta la CBC, que es un material inerte pues se somete a más de 600°C. Su recolección es sencilla, ya que se encuentra en bancos donde la conservan en grandes montículos.

1.3 Form- finding

Form-finding es el término bajo el cual se agrupan las diferentes técnicas de generación formal basadas en principios biológicos y físicos, dando como resultado formas estéticamente bellas, aparentemente inspiradas en la naturaleza, pero, además, funcional y estructuralmente óptimas (Patiño, 2018).

El término form-finding fue empleado por primera vez por el arquitecto Frei Otto, quién logró sistematizar y parametrizar las leyes físicas que rigen estas técnicas, para lograr transformaciones formales significativas en sus proyectos (Schumacher, 2008); sin embargo, antes de tomar el nombre de form-finding, ya algunos arquitectos buscaban inspiración en la naturaleza para sus construcciones, tal es el caso de Antoni Gaudí quien afirmaba que “El arquitecto del futuro se basará en la imitación de la naturaleza, porque es la forma más racional, duradera y económica” (Urbanismo, 2106).

La técnica de diseño de form-finding consiste en la instrumentalización de la deformación elástica como propiedad del material para estabilizarse y auto conformarse (Lienhard, 2014). Dicha técnica permite lograr figuras con comportamiento eficiente respecto al material, en donde con el mínimo de área se pueden lograr cuerpos envolventes, cubiertas y formas que son estables por sí mismas, tal como se observa en la figura 1, que expone la comparativa de un arco a dos puntos que es cruzado por una curva catenaria de manera eficiente, ya que cubre las zonas críticas por donde cruzan las fuerzas a través de la geometría.

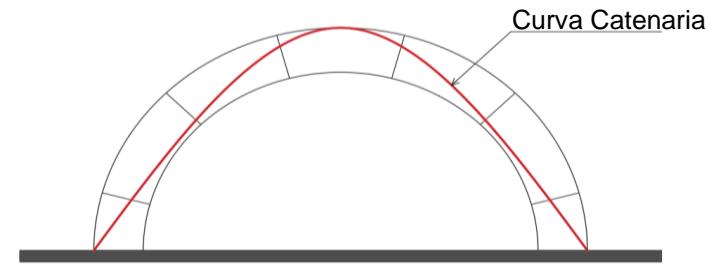


Figura 1. Arco a dos puntos en comparativa con una curva catenaria. Fuente: elaboración propia, 2022.

Es necesario resaltar que, pese a la carencia de cálculos complejos, la construcción de las catenarias se ejecutaba gracias a modelos a escala que predeterminaban el comportamiento de las futuras estructuras a una mayor escala. Uno de los modelos catenarios más famosos es el modelo colgante de invertido de la iglesia la Colonia Güell (Fig. 2), dicha estructura fue creada por el arquitecto Antonio Gaudí en el siglo XX, en donde este modelo de cuerdas colgantes se invierte para lograr ejecutar en mayor escala, ya que la forma lograda predice la estabilidad de las curvas encontradas por la técnica de relajación de las cadenas y, también, permiten dibujar la forma creada para la elaboración de los planos de esta iglesia.

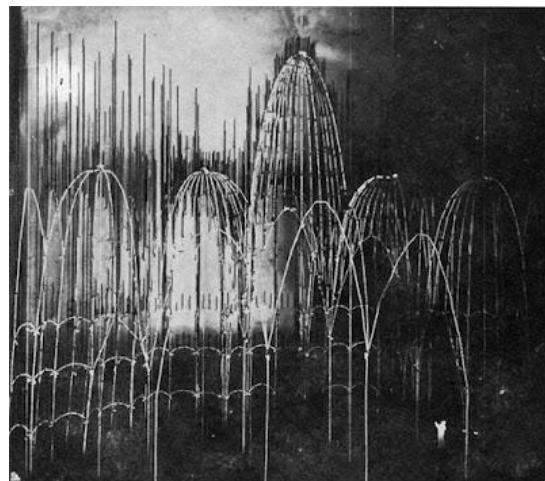


Figura 2. Modelo colgante (invertido) usado por Gaudí para dibujar los planos de la iglesia de Colonia Güell (Huerta S. 2013).

2 Metodología

Esta metodología es rescatada de estudios de form-finding analógico, que es la determinación de escalar de la forma a través de la replicación de las condiciones materiales y contextuales del mundo físico, que apunta a optimizar la geometría respecto al comportamiento material y su desempeño estructural. Existen estudios de experimentación en este capo, apoyados por investigaciones científicas y ejemplos construidos, incluso antes del uso generalizado del diseño computacional en arquitectura, aun así, continúa aportando una lectura esencial para la innovación e investigación en diseño (Gronda & Chiarella, 2017).

Para el desarrollo de esta investigación, se procede al diseño de un algoritmo en el software de diseño asistido por computadora “Rhino 7”, con lenguaje de programación llamado Grasshopper que es un plugin dentro de este software y, también, dentro de este lenguaje se instala un motor de simulación física (Kangaroo) para obtener cubiertas estructurales de auto-organización, para, con estas estructuras, iterar la forma hasta lograr una aproximación a los objetivos establecidos en esta investigación (Fig. 3).

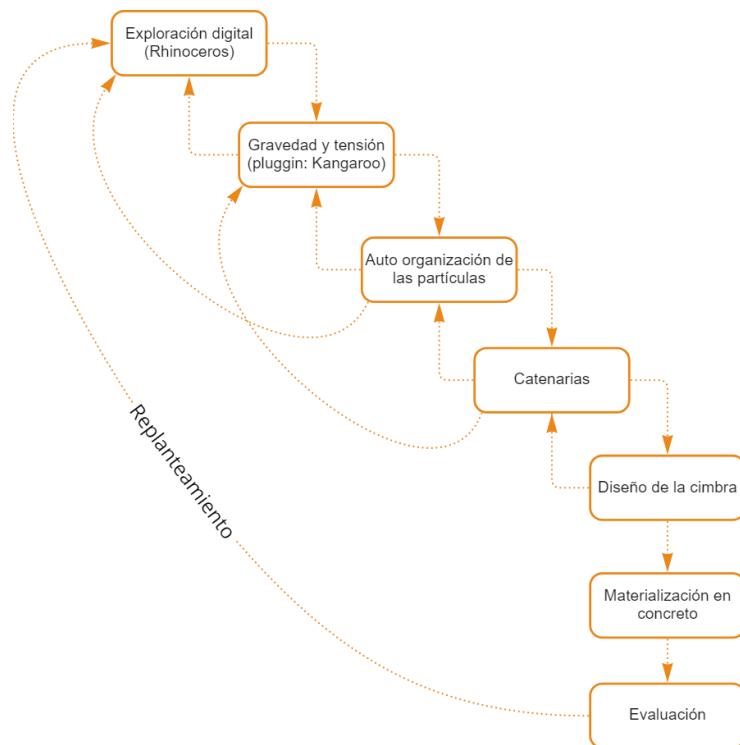


Figura 3: Metodología propuesta, basada en el trabajo de (Gronda & Chiarella, 2017). Fuente: elaboración propia, 2022.

2.1 Fases

La técnica de diseño form-finding analógica de divide en 3 fases, la primera consiste en la exploración de la forma digital, incluyendo al principio de la ideación de la cimbra con los diferentes materiales antes mencionados, la segunda fase es la materialización en concreto, en donde se considera el colado y el fraguado del concreto, que va desde la fabricación de la mezcla, pasando por el proceso de fraguado de acuerdo a las normas NMX C-161-ONNCCE-2013 y NMX-C-160-ONNCCE-2004, hasta llegar al descimbrado y, subsecuente a esta etapa, hacer observaciones físicas y, de ser necesario, un replanteamiento, hasta llegar al modelo físico y, a este último, someterlo a una prueba de compresión simple (Fig. 4).

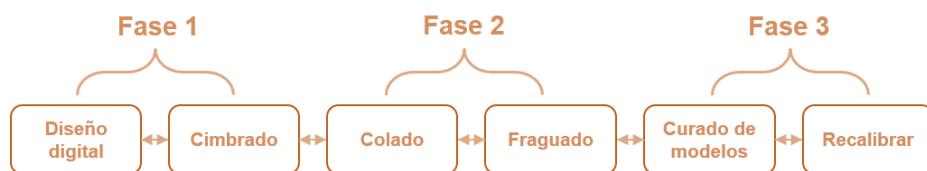


Figure 4. Fases del proceso de experimentación. Fuente: elaboración propia, 2022.

2.2 Materiales

Los materiales a utilizar para la elaboración de la mezcla se dividen en materiales para contener (recipientes cerámicos con capacidad de contener 1 litro), vaso medidor, báscula al gramo, agitadores, cuchara metálica de albañilería; como insumos: Cemento portland, grava, arena, agua, fluidificante, ceniza de bagazo de caña; como cimbra: tela de algodón, tela de nylon, tela de algodón 50% y nylon 50%.

El concreto es el material de la construcción más utilizado a nivel mundial y uno de los materiales más estudiado, sin embargo, dado al origen pétreo desde el cemento portland (aglutinante) hasta los agregados tanto finos como gruesos, son componentes que elevan el peso específico del hormigón. Esto conlleva a un uso limitado en estructuras complejas y de claros largos en proporciones largo-esbeltez de cada elemento en donde es aplicado, ya que el agrietamiento por la patología de “contracción plástica”, que está directamente ligado con la perdida abrupta de humedad en el fraguado, sin descartar las diversas patologías de dicho material.

2.3 Técnica de diseño computacional

En esta investigación se ha implementado la técnica de diseño de form-finding de mallas en relajación aplicado en el programa de diseño Rhino 7, en donde

se realiza una serie de simulaciones. “Toda masa aumenta su volumen según su grado de inclinación” (Newton, 1703), partiendo de este principio de la física se puede predecir que se generará un cambio de dimensiones tanto en la parte interna, como en la parte externa de la línea a afectar, tan solo por la relajación de esta línea. En la figura 5 se muestra la afección ante la aplicación del concreto internamente, y como la cimbra responde ante la autoorganización de las partículas del concreto, que busca llenar este espacio, para dar paso a un colado monolítico.

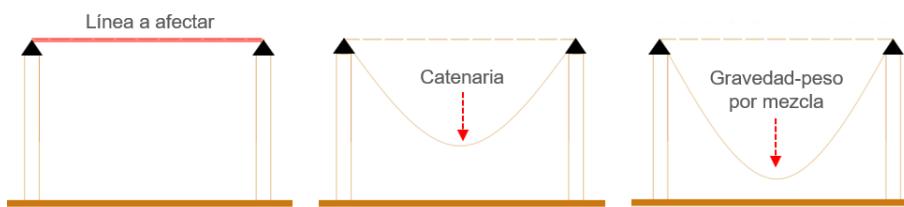


Figura 5. Comportamiento de curva catenaria. Fuente: elaboración propia, 2022.

Como base a la complejización de las catenarias, se comienza el diseño con el principio de organización de partículas del voronoi limitado por una circunferencia, en donde la distribución de las líneas se hace de manera en que la intersección de las líneas con perpendiculares respecto al cruce de cada punto interno dado en el programa computacional Rhino 7, para generar una figura en planta con líneas en diferentes direcciones (Fig. 6).

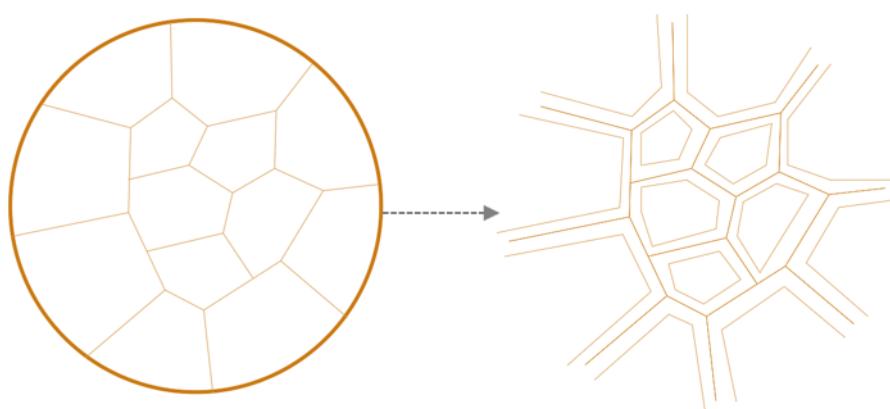


Figura 6: Voronoi como base de líneas en relajación. Elaboración propia, 2022.

Después de haber obtenido las líneas base a aplicar la relajación, se prosigue a realizar un fenómeno desfase perpendicular paralelo, para obtener una tubería en dos dimensiones y, esta, convertirla en una malla con la intención de introducirla al lenguaje de grasshopper, cuya finalidad es someterla a fuerzas de tensión, que servirá como base para imprimir en tela de caucho para llevarla a la materialización (Fig. 7).



Figura 7: Relajación de líneas y mallas simuladas con el plugin Kangaroo. Fuente: elaboración propia, 2022.

Una vez obtenido el diseño digital, este es llevado al mundo físico, haciendo efectiva la aplicación del form-finding híbrido. El diseño parte de la planta establecida en el diseño digital, la cual delimita el comportamiento que esta tomará al someterse en relajación por efecto de gravedad, y está compuesta por 8 vectores, cuyo inicio de estos se estabilizan con un anillo de acero inoxidable y abrazaderas que contienen la tela y obliga a esta a contener la mezcla a menara de tubo. La malla se coloca en puntos de anclaje por cada brazo vector, y esta se adapta a la deformación demandada por los esfuerzos provocados por la gravedad y, posteriormente, por las cargas de la mezcla colada como se observa en la figura 8.

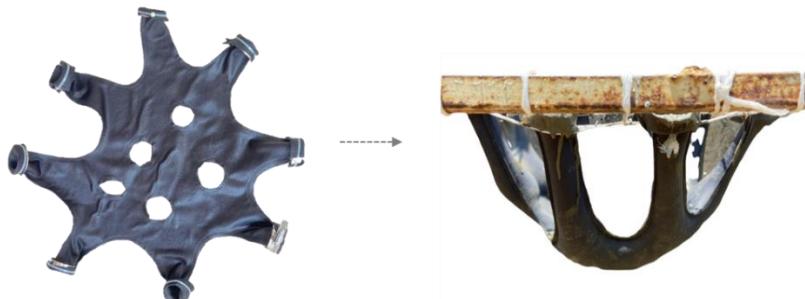


Figura 8: Aplicación del diseño digital en el mundo físico con telas de algodón y nylon. Fuente: elaboración propia, 2022.

Resultados

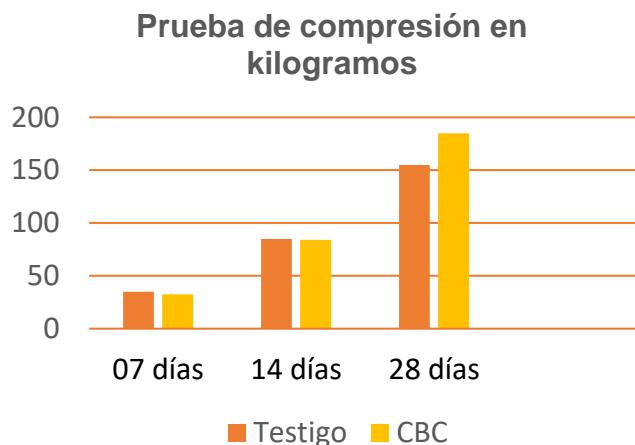
De acuerdo a la normatividad mexicana (NMX C-161-ONNCCE-2013), el proceso de descimbrado debe ser después de las 24 horas de colado, sin embargo, para garantizar la perdida de humedad por fraguado y obtener un modelo monolítico, se opta por retirar la cimbra a los 7 días, ya que se garantiza una mayor estabilidad del modelo por experiencia obtenida en esta investigación, de lo contrario, ya que los poros de esta cimbra es cerrado respecto a los otros tipos de cimbra utilizados, el proceso de fraguado es mayor, y las piezas anteriores se desprendían en ciertos puntos por efecto de un fraguado deficiente, es por ello que se descimbra con mayor tiempo posterior al colado (Fig. 9).



Figura 9: Modelo de concreto creado con la técnica form-finding. Elaboración propia, 2022.

Como exigencia para evaluar este modelo, obedeciendo al método comparativo, se ha optado por la prueba de compresión comparando modelo fabricados con concreto convencional y concreto con CBC y, que estos, sean probados como lo marca la norma: 7, 14 y 28 días de fraguado, para obtener resultados propios de un rigor metodológico (Tabla 1).

Tabla 1. Prueba de compresión directa con resultados en kilogramos. Fuente: Elaboración propia.



Como se puede observar en esta tabla, los modelos fabricados con concreto con CBC obtuvieron resultados favorables en un 16% en la prueba de compresión; sin embargo, con esta prueba, dado a que los modelos cuentan con curvas en diferentes direcciones, brazos que actúan como soportes complejos, se puede afirmar que el concreto también trabaja a flexión para poder disipar o absorber las cargas hasta su punto máximo de ruptura.

3 Discusión

Esta investigación aporta una solución práctica a los retos de los diseñadores y constructores para la ejecución de formas complejas, ya que propone un material que es resistente a la flexo-compresión superior a un concreto convencional en un 16 %, pues se ha demostrado en este trabajo que puede ser aplicado en figuras de curvaturas complejas, ofreciendo una opción viable técnica y sustentablemente, pues este concreto es fabricado con residuos de la agroindustria, aprovechando un subproducto que se desecha en cantidades industriales en las localidades cercanas a los ingenios azucareros y alcoholeros. Entonces, este concreto genera un impacto positivo en el campo de la arquitectura y el diseño en general, ya que no se limita a una sola escala ni a una sola disciplina.

Referencias

- Águila, I. (2008). *Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña*.
- Gronda, L., & Chiarella, M. (2017). Materialidad Digital. Análisis de estrategias performativas transferibles al diseño resiliente. *SiGraDi 2017 [Proceedings of the 21th Conference of the Iberoamerican Society of Digital Graphics - ISBN: 978-956-227-439-5]*, 22-24.
- Hernández, T. (2010). *Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de .* Cruz Xoxocotlán: Instituto Politécnico Nacional, centro.
- Lienhard, J. (2014). *Bending Active Structures, Form-Finding Strategies Using Elastic.* Stuttgart: University Of Stuttgart.
- Marquez-Montero, S. (2010). *Efecto de la sustitución parcial del cemento portland por CBC.*
- Mehta K., Monteiro P. (1998). Concreto, estructura, propiedades y materiales IMCYC. En M. P. Mehta K., *Concreto, estructura, propiedades y materiales IMCYC* (pág. 38). Mexico: IMCYC.
- Patiño, E. &. (2018). Construction of a Repertoire of Analog Form-Finding. En E. &. Patiño, *In Computational105 Intelligence in Music, Sound, Art and Design* (pág. 50). Parma, Italy: EvoMUSART.
- Portland Cement Association. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. México: Portland Cement Association.
- Uribe, R. (1991). El control de calidad en los agregados para concreto 3a. En U. R., *Construcción y tecnología* (pág. 40). México.
- Huerta, S. (2013). El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí. En S. Tarragó. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Urbanismo, F. d. (2106). Docencia, investigación, extensión y gestión. *Comunicaciones científicas y tecnológicas anuales* , 80.
- Villicaña, M. (2015). *Innovación en el diseño de concreto; empleo de puzolanas para incrementar la durabilidad*. Morelia: Univercidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.