

DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE SISTEMA CONSTRUCTIVO PARA MUROS A BASE DE DESECHOS INDUSTRIALES

Gonzalo Bojórquez, Aníbal Luna, Ricardo Gallegos

Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Arquitectura
Calle de La Normal e Ignacio López Rayón, S/N, Tercer Piso, Unidad Mexicali, C. P. 21900
Mexicali Baja California México, Teléfono y fax 00 52 65 66 42 50
gonzalo.bojorquez@sia.mxl.uabc.mx, anibal.luna@sia.mxl.uabc.mx,
ricardo.gallegos@sia.mxl.uabc.mx

RESUMEN

La generación de residuos sólidos industriales y la falta de sistemas constructivos de origen local aptos al clima, son problemas constantes y crecientes en el mundo. Con la utilización de desechos industriales en concretos y morteros se pueden disminuir las problemáticas antes expuestas, por lo que el objetivo de estudio fue desarrollar un sistema constructivo, con una mezcla sílice y lodo de papel, desechos industriales de Mexicali Baja California, México. Se caracterizaron los residuos, se diseñaron y evaluaron las mezclas, conforme a la normas de ASTM, posteriormente se seleccionó la mezcla mas apta, se diseño el sistema constructivo y mortero de unión; finalmente se hizo una simulación térmica del sistema aplicado a una vivienda y se comparó el sistema desarrollado con materiales locales. Los resultados indicaron que el sistema Luna- Bojórquez (LB) tiene una resistencia a compresión que cumple con ASTM C270 y su comportamiento térmico según simulador Doe 2.1E, es más apto para un clima desértico que los materiales de uso local. Con la combinación y evaluación adecuada de concretos y morteros con desechos industriales, es posible el desarrollo de sistemas constructivos, con un comportamiento termofísico más conveniente para la región, que los productos que actualmente se utilizan.

ABSTRACT

The generation of solid industrial residues, and the lack of local construction systems with climatic concerns, are amongst the two constant and increasing worldwide problems.

The use of industrial residues in a concrete mix as part of a constructive system can reduce to some extent the above mentioned problems. The objective of this study was to develop a constructive system from mixtures of two local industrial residues: silica and paper mud.

In a first stage, the residues were characterized, different mixtures where designed and evaluated, and according to ASTM the optimum mixture was selected. A joint mortar was also developed as part of the construction system. The constructive system was named the LB System (or Luna-Bojórquez system). Finally a thermal simulation of the system applied to a dwelling unit was conducted. The results where compared to those obtained from evaluating the average local construction system. The results showed that the LB system has an acceptable compression strength according to ASTM, and presents a better thermal behavior than the average construction system that uses local materials. Thus, with the proper combination and evaluation of concrete and industrial residues, it is possible to develop a constructive system with a thermophysical behavior more suitable to the regional climatic situation than the constructive systems used at present

1. INTRODUCCION

Farge y Da Silva (citados por Cilento, 1996) señalan que en los próximos veinte años, la investigación de materiales de construcción verá una evolución que tendrá como base el uso de residuos sólidos como materia prima.

Mientras que González (1985), afirma que las tecnologías aplicadas para la utilización de desechos en la construcción requieren de una evaluación sistemática para hacerlos competitivos y poder incorporarlos a un mercado donde la falta de productos de calidad con menor costo es una demanda clara día a día.

El constante y creciente problema de la generación de residuos industriales en el mundo, exigen a las empresas mejorar y hacer más eficientes sus procesos para disminuir la carga de contaminantes al medio ambiente. Una opción viable es la reutilización de los desechos como materia prima de otros productos, esta práctica puede traer beneficios en las facetas económicas y tecnológicas de la industria.

Desde el punto de vista ambiental, el hecho de que la materia prima sea un residuo, evita una disposición final que genera contaminación, además de un costo por construcción y mantenimiento de basureros o rellenos sanitarios.

El uso de residuos industriales como agregados en concretos o parte de un sistema constructivo no es nuevo, sin embargo lo que caracteriza este estudio es que el diseño de la mezcla consideró y evaluó el comportamiento estructural y térmico de la misma con base en sus componentes principales: dos residuos de la industria local.

Lo anterior, es importante si se considera: el volumen de producción de los desechos utilizados, su aplicación en un sistema constructivo para muros y se diseña para una área desértica con temperaturas máximas promedio de 41.8 °C y máximas extremas de 54 °C.

2. ANTECEDENTES

Existen varias investigaciones dirigidas a la reutilización de desechos como materia prima para elaborar materiales de construcción, lo que han permitido prever su factibilidad de uso.

A nivel internacional en Europa se utilizaron aserrín y escoria de hulla como agregados en concretos ligeros a finales del siglo XIX. En Estados Unidos se ha experimentado con fibras de papel, coco, plátano, trozos de madera y aserrín como agregados ligeros en concretos.

En China, se realizaron estudios para la utilización de desechos domésticos como agregados en la fabricación de bloques de mampostería. En el trabajo de Salas (1992) se da una serie de ejemplos de aprovechamiento de desechos de tipo agrícolas e industriales y sus aplicaciones en viviendas de bajo costo en América Latina.

A nivel nacional, se han elaborado concretos con bagazo de caña y otros desechos de origen agrícola, así como sistemas constructivos para losas y muros con desechos modulares de cartón, también se han fabricado piezas constructivas con desecho de papel y plásticos

3. SISTEMA CONSTRUCTIVO PARA MUROS LUNA - BOJÓRQUEZ (LB)

El sistema constructivo para muros Luna – Bojórquez (LB), se compone de 4 elementos modulares, fabricados con un concreto ligero que utiliza como agregados sílice y lodo de papel. Con un mortero de unión de sílice.

3.1. Mezcla sílice - lodo de papel

En el proceso de generación de energía eléctrica de la planta Geotermoeléctrica de Cerro Prieto, localizada a 25 km, al Suroeste de Mexicali Baja California, se produce un desecho con un volumen de 36 toneladas por día, en el que al eliminarse los líquidos quedan minerales en forma de arena; del cual el 66% es sílice. Las características de este residuo se muestran en la tabla 1.

La Fábrica de Papel San Francisco de Mexicali B.C., genera como parte de su proceso de producción de papel higiénico, un desecho conocido como “lodo de papel”, este producto está compuesto de celulosa, ceniza, tintas y agua; con un volumen de producción de 10 toneladas por día; Del 57.77 % de sólidos el 82 % es fibra de celulosa y el 18 % es ceniza. Debido a que la celulosa en su forma base, tiene un efecto retardante sobre el fraguado y una reducción de resistencia en el concreto, por lo que se mineralizó con cal. Las características del lodo de papel se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Características de la sílice y lodo de papel mineralizado según Luna *et al.* (1998)

Prueba y norma	Sílice	Lodo de papel	Notas
Actividad puzolánica (ASTM C 311, 618)	85%	-----	Mínimo requerido 75%
Peso específico (ASTM C 128)	1.63 gr/cm ³	1.74 gr/cm ³	Agregados finos
Peso Unitario (ASTM C 29)	473 kg/m ³	391 kg/m ³	Agregados ligeros
Granulometría (ASTM C 331, 332)	Pasa malla (4.75mm) No. 4	Pasa malla (4.75mm) No. 4	Agregados ligeros finos

Para diseñar la mezcla se analizaron los porcentajes de cemento utilizados en ASTM C270, concretos experimentales con agregados orgánicos, y concretos para elaboración de bloques comprimidos. La mezcla fue diseñada a partir de una mezcla desarrollada por Luna (Luna *et al.* 1998), y se añadió lodo de papel, trabajando con 3 diferentes variaciones, posteriormente a cada mezcla se le determinó fluidez, masa volumétrica (densidad) y resistencia a compresión a los 28 días de edad, se seleccionó la mezcla con mayor resistencia a compresión ya que la masa volumétrica estaba dentro de los concretos ligeros.

En el diseño de la mezcla sílice – lodo de papel se utilizaron como aglomerante cemento Portland tipo 1 y cal hidratada, como aditivo inclusor de aire se usó una solución de jabón de barra, en el agua de mezclado. El método de curado que se utilizó fue por saturación, y la mezcla se elaboró en una mezcladora de mortero

La resistencia a compresión se determinó a los 28 días de edad, según ASTM C67, las propiedades determinadas se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Características de la mezcla sílice – lodo de papel

Propiedad	Fluidez	Masa volumétrica	*Resistencia a compresión
Norma	ASTM C109	ASTM C303	ASTM C67
Resultado	20 –25%	855 Kg/m ³	34 Kg/cm ²

*28 días de edad en estado saturado, validadas por el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Baja California.

La evaluación térmica de la mezcla sílice-lodo de papel consistió en la estimación de sus propiedades térmicas con el método del cable caliente, en el que analizó la fase estable de las temperaturas registradas para estimar la conductividad térmica y con la fase transitoria se estimó el calor específico, a partir de estas propiedades y la masa volumétrica se estimaron: retraso térmico, resistencia térmica y difusividad térmica.

3.2. Mortero de unión

Se diseñó un mortero de unión con sílice para que el sistema constructivo tuviese un comportamiento térmico similar, además de aprovechar el residuo de sílice en esta parte del sistema constructivo.

Para este diseño se utilizó el mismo proceso de desarrollo y evaluación de la mezcla sílice – lodo de papel. Los componentes del mortero de unión son cemento Portland tipo 1, cal hidratada, sílice y agua, el método de curado fue por saturación, y se elaboró en una mezcladora de mortero. Las características del mortero de unión se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Características de mortero de unión de sílice

Propiedad	Fluidez	Masa volumétrica	* Resistencia a compresión	Conductividad térmica	Calor específico
Norma	ASTM C109	ASTM C303	ASTM C67	-----	-----
Resultado	20 –25%	843 kg/m ³	32 kg/ cm ²	0.394 W/m °C	1838 J/kg °C

*28 días de edad en estado saturado.

La estimación de las propiedades térmicas se hizo bajo el mismo procedimiento que en el caso de la mezcla sílice – lodo de papel.

3.3. Elementos constructivos

Con base en las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de la mezcla sílice - lodo de papel y tomando como base el diseño de sistemas constructivos con elementos sólidos ensamblables se desarrolló un sistema constructivo con 4 elementos básicos que son: 1) Pieza base (macho - hembra) de 0.12 m de espesor, 0.325 m de altura y 0.525 m de longitud, 2) Pieza base (hembra - hembra) de 0.12 m de espesor, 0.325 m de altura y 0.525 m de longitud, 3) Media pieza macho - hembra de 0.12 m de espesor, 0.325 m de altura y 0.271 m de longitud y 4) Media pieza hembra - hembra de 0.12 m de espesor, 0.325 m de altura y 24.6 m de longitud.

También se diseñaron y fabricaron moldes para la elaboración de las piezas mencionadas. En la figura 1, se muestran los elementos constructivos. Una de las características principales del sistema es que aún cuando es modular y de tipo cerrado, es posible cortar las piezas con sierra manual o eléctrica.



Figura 1. Elementos del sistema constructivo para muros LB

El comportamiento térmico en estado dinámico del sistema LB, se evaluó mediante simulación térmica con el programa Doeplus, donde se modeló una vivienda masiva típica de la región, que tiene 45 m² y un volumen de 108 m³.

Doeplus es una derivación de DOE-2 que fue desarrollado para el Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos. Este programa de computo es para modelar el comportamiento térmico en estado dinámico de edificios y el consumo de energía en los sistemas de climatización artificial. Para la modelación, el programa simula otros consumos de energía (iluminación, equipo, electrodomésticos, etc.) que representan cargas térmicas y consumo energético.

Para este estudio no se consideró aislamiento térmico en ningún elemento. Debido a que los espesores de los sistemas constructivos que se utilizan en la región son diferentes se simuló con un espesor de 0.12 m para todos los sistemas. El periodo de simulación fue del 01 de mayo al 30 de septiembre. La temperatura de diseño fue de 25 °C. El archivo meteorológico utilizado fue de El Centro California, en Estados Unidos, ésta ciudad se localiza a 18 km al Noroeste de Mexicali Baja California México. Los parámetros de comportamiento térmico analizados fueron conducción en muros y máximo enfriamiento requerido para alcanzar la temperatura de diseño.

4. ESTUDIO COMPARATIVO

Los sistemas constructivos con los que se comparo el sistema LB fueron adobe, ladrillo común y bloque de concreto, se seleccionaron estos materiales debido a que son los de uso común a nivel local.

4.1. Propiedades físicas y mecánicas de la mezcla

En la tabla 4, se muestran los valores de resistencia a compresión de bloque de concreto, ladrillo y adobe; se observa que en lo referente a la resistencia mecánica la mezcla del sistema LB (sílice - lodo de papel) es menor en 15 % con respecto al bloque de concreto, 47 % mayor al ladrillo común y 76 % mayor que el adobe. Cabe mencionar que la resistencia promedio de la mezcla sílice – lodo de papel está dada en su estado critico (saturado), mientras que los otros materiales son probados en estado seco.

En lo que respecta a la masa volumétrica, la mezcla LB es 47% menor que el adobe, 52% menor que el ladrillo y 62% menor que el bloque de concreto.

Tabla 4. Resistencia a compresión y masa volumétrica de materiales locales

Material	Resistencia mecánica (kg/cm ²)	Masa volumétrica (kg/m ³)
Sílice – lodo de papel (LB)	34	855
Adobe	8	1620
Ladrillo común	18	1800
Bloque de concreto	40	2100

Fuente: Luna et al, 1998

4.2. Propiedades térmicas de la mezcla

En la tabla 5, se muestran los resultados obtenidos, comparándolos con los valores del ladrillo y adobe; se observa que en lo que se refiere a la conductividad térmica la mezcla sílice - lodo de papel es menor 22% con respecto al adobe, 47 % con respecto al ladrillo y 65 % menor en comparación con el bloque de concreto; mientras que el calor específico es mayor al adobe en 21%, al ladrillo en 47 %, en cuanto al bloque es mayor en un 42%.

4.3. Simulación térmica

Los resultados obtenidos en la simulación térmica indicaron que la mezcla utilizada en el sistema LB tiene un comportamiento térmico similar al adobe local. Con respecto al ladrillo

común la conducción en muros de la mezcla LB es 32% menor, mientras que el enfriamiento máximo requerido es 11% menor en el caso del sistema LB.

Tabla 5. Propiedades térmicas de ladrillo, adobe y mezcla sílice - lodo de papel y bloque de concreto

Propiedades	Sílice – lodo de papel (LB)	Adobe	Ladrillo	Bloque de concreto
Conductividad térmica (W/m °C)	0.38	0.49	0.72	1.08
Calor específico (J/kg °C)	1573	1240	829	920
Difusividad térmica (m ² /s)	1.02x10 ⁻³	*8.78x10 ⁻⁴	*1.73x10 ⁻³	1.83x10 ⁻³
Retraso térmico (hrs)	5 hrs 11'	*5 hrs 36'	*3 hrs 59'	3 hrs 52'
Amortiguamiento térmico (%)	26	*23	*35	*36
Resistencia térmica (m ² °C/ W)	0.313	*0.245	*0.167	0.111

* Estimado a partir de Rojas 1992; para un espesor de 0.12 m

Al comparar por simulación el sistema LB y el bloque de concreto local, se observó que la conducción en muros del sistema LB es 40% menor, mientras que el máximo enfriamiento requerido es menor en 15%. Lo antes descrito se presenta en la tabla 6.

Tabla 6. Conducción en muros y máximo enfriamiento requerido obtenidos con el simulador Doeplus

Material	Conducción en muros (kW)	Máx. enfriamiento requerido (kW)
sílice – lodo de papel (LB)	3.639	13.229
Adobe	3.639	13.229
Ladrillo común	5.372	14.962
Bloque de concreto	6.030	15.619

4.4. Sistema constructivo

En este caso el análisis fue cualitativo y no cuantitativo, al comparar el sistema LB con el adobe, se observa una gran diferencia en las dimensiones de las piezas, pero en el caso del peso el adobe tiene 2 kgs menos en comparación con el sistema LB, sin embargo en área de muro construido por pieza el sistema LB es mayor.

Al comparar con el ladrillo local sucede algo similar que en el caso del adobe, pero el peso por pieza es mayor en el caso del sistema LB.

Al comparar con el bloque los pesos por pieza completa son similares, pero el área de muro es mayor en el caso del sistema LB, este factor es determinante en lo que se refiere al rendimiento de m² de muro construido por jornada.

Por otro lado, el espesor en las juntas, presenta un valor similar en el caso del bloque, adobe y ladrillo, pero en el sistema LB la junta es de una tercera parte que en los otros sistemas, esto es por que se

utiliza para absorber posibles fallas en el dimensionamiento de las piezas y evitar infiltraciones de aire caliente a espacios interiores ya que el sistema es ensamblable.

Las características de los sistemas constructivos locales para muros se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Características de los sistemas constructivos locales para muros

Sistema constructivo	Descripción del sistema
LB	4 elementos, ensamblable, normal hembra – macho, normal hembra – hembra, media hembra- macho, media hembra-hembra, 0.12x0.325x0.525 m, peso 17 Kg, sólido, mortero de unión cemento – sílice espesor de la junta 0.005 m, castillos esquineros de concreto armado.
Adobe	1 elemento, 0.10x0.23x0.40, sólido, peso 15 Kg, mortero de unión arcilla, espesor de la junta 0.015 m, traslapado en esquinas.
Ladrillo común	1 elemento, 0.06x 0.13x0.26, sólido, peso por pieza 3.5 Kg, mortero de unión cemento:arena 1:4, espesor de la junta 0.015 m, castillos esquineros colados con concreto y varilla de refuerzo.
Bloque de concreto	4 elementos, pieza normal, media pieza, dala y esquinero. Dimensiones de la pieza normal 0.12x0.20x0.40m. Peso aproximado pieza normal 16 Cha (hueco), mortero de unión cemento:arena 1:4, espesor de la junta 0.015 m, cada 1.20 m se cuela con mortero las celdas y se incluye una varilla de refuerzo, cada tres hiladas un refuerzo horizontal.

5. CONCLUSIONES

La reacción puzolánica de la sílice provocada por los cementantes utilizados y la adición del lodo de papel generaron las propiedades térmicas y físicas en la mezcla desarrollada.

Las propiedades físicas estudiadas indican que el sistema LB ofrece ventajas con respecto a los materiales locales. Se obtuvo una resistencia a compresión que cumple con las normas internacionales y supera al ladrillo y adobe local.

Se tiene una baja masa volumétrica y un dimensionamiento de elementos que aumenta el rendimiento de m² construido por jornada.

El comportamiento térmico en estado dinámico, indica que el sistema LB, es similar al adobe local y mejor que el ladrillo y el bloque de concreto. Esta característica permite un ahorro energético por climatización artificial.

Este estudio indica que es posible: 1) el desarrollo de nuevos productos para construcción con el uso de desechos industriales, y 2) obtener propiedades térmicas y físicas similares o mejores que las de materiales de construcción de uso local.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México por el financiamiento del proyecto, a la Universidad Autónoma de Baja California a través de sus Facultades de Arquitectura e Ingeniería por el apoyo técnico, al Dr. Alfonso Alfonso, Lic. Enrique Amat, Tec. Abel Cota, Tec. Rafael Salcido y Tec. Ricardo Cota por sus asesorías y apoyo. Al Dr. Augusto Arredondo por su apoyo en la elaboración de este documento.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). Annual book of ASTM standards Section 4, Volumes 04.02, 04.05, 04.06, 04.07, 04.10 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103 U.S.A.
- CILENTO, A. (1996) Sincretismo e innovación tecnológica en la producción de viviendas. En revista *TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN*, Vol. 12, No. I, enero-junio de 1996. Ed; Instituto de desarrollo experimental de la construcción (IDEC), Universidad Central de Venezuela, Universidad de Zulia. Venezuela. p. 18 -20
- GONZÁLEZ, J. (1985) *Arquitectura + Basura = Casa. Ecotecnología aplicada a la construcción*. Ed. Conescal A.C. México. p. 30-35
- ITEM SYSTEMS (1995) *DOE-PLUS User's manual, Innovative Technologies for Energy Management*. U.S.A. 195 p.
- LUNA A. BOJÓRQUEZ G. GALLEGOS R. ALFONSO A. AMAT E. (1998). Sílice y lodo de papel: desarrollo de un concreto ligero y su evaluación térmica *CONFERENCIA INTERNACIONAL ECOMATERIALES Y HÁBITAT SOSTENIBLE*. 23 al 27 noviembre 1998. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana Cuba. p. 128-135
- ROJAS J. (1992) "Obtención de propiedades ópticas, térmicas y físicas de algunos materiales de construcción" Tesina no publicada, de especialización en Helio diseño, Posgrado en Energía Solar; IIM-UNAM, México, D.F. p. 85-90
- SALAS, J. (1992) *Contra el hambre de vivienda, soluciones tecnológicas latinoamericanas*. Ed. Escala, Colombia. p. 19-36