

Sílice y lodo de papel, uso de residuos industriales como agregados en un concreto ligero

Gonzalo Bojórquez*,
Anibal Luna**,
Ricardo Gallegos***

Resumen

En la búsqueda de agregados para concreto, es indispensable considerar las posibles ventajas que éstos pudieran ofrecer; por lo que es necesario determinar su efecto en el comportamiento mecánico y térmico. En el presente documento se muestran los resultados de un estudio, en el cual se utilizan dos desechos de origen industrial generados en Mexicali, Baja California, los cuales se incorporan a un concreto ligero, en donde uno de ellos presenta propiedades aglomerantes, el otro baja conductividad térmica. Estos desechos son la sílice y lodo de papel.

Para la resistencia mecánica a compresión se elaboró una dosificación de cemento, cal, sílice y lodo de papel en una mezcladora para mortero, fabricando especímenes de $0.14 \times 0.14 \times 0.28$ m., sometiendo a compresión en estado húmedo a los 28 días. Para la evaluación térmica se elaboraron especímenes cilíndricos según norma ASTM C192, en cuyo eje longitudinal se proporciona energía a través de una resistencia eléctrica, método utilizado por Gallegos et al (1997).

Las propiedades termofísicas del material son: masa volumétrica de 855 Kg/m³, resistencia a compresión de 34 Kg/cm², conductividad térmica de 0.383 W/m °C, calor específico de 1573 J/Kg °C, difusividad térmica de 1.02×10^{-3} m²/s, considerando un espesor de 0.15 m se tiene: tiempo de retraso térmico de 6 horas con 28 minutos, amortiguamiento térmico del 18 %, y resistencia térmica de 0.395 m² °C/W.

La mezcla ofrece reducción de costos por: utilización de desechos industriales como agregados, en cimentación por su baja masa volumétrica y consumo energético por climatización artificial.

Abstrait

Dans la recherche de composants pour béton, il est indispensable de considérer les avantages possibles que ceux-ci pourraient offrir; il est donc nécessaire de déterminer leurs effets sur le comportement mécanique et thermique. Ce document présente les résultats d'une étude, dans laquelle deux déchets d'origine industrielle générés à Mexicali, Basse Californie, ont été utilisés et incorporés à un béton allégé, l'un présente des propriétés d'agglomération et l'autre une conductivité thermique basse. Ces déchets sont la silice et la boue de papier.

Pour la résistance mécanique à compression, on a élaboré un dosage de ciment, chaux, silice et boue de papier dans une bétonneuse, fabriqué des spécimens de $0.14 \times 0.14 \times 0.28$ m, soumis ceux-ci à une compression à l'état humide 28 jours plus tard. Pour l'évaluation thermique on a élaboré des spécimens cylindriques suivant la norme ASTM C192, dont l'axe longitudinal fournit de l'énergie à travers une résistance électrique, méthode utilisée par Gallegos et al (1997)

Les propriétés thermo-physiques du matériau sont: masse volumétrique de 855 Kg/m³, résistance à compression de 34 Kg/cm², conductivité thermique de 0.383 W/m °C, chaleur spécifique de 1573 J/Kg °C, diffusivité thermique de 1.02×10^{-3} m²/s, considérant une épaisseur de 0.15 m, on a: délai thermique de 6 heures et 28 minutes, amortissement thermique de 18% et résistance thermique de 0.395 m² °C/W.

Le mélange offre une réduction des coûts par: l'utilisation des déchets industriels comme suppléments, dans la cimentation pour sa faible masse volumétrique et sa consommation énergétique par climatization artificielle.

Abstract

In the search for aggregates for concrete it is vitally necessary to consider the possible advantages which these may offer, hence it is necessary to determine their effect in terms of mechanical and thermal outcome. This document shows the results of a study which used two types of industrial waste produced in Mexicali, Baja California. These were incorporated into Light concrete in which one of them had amassing properties and the other one low thermal conductivity. The wastes in question were silica and paper mud.

In order to achieve mechanical resistance under compression we prepared a mixture of cement, limestone, silica and paper mud in a mixer, producing samples measuring $0.14 \times 0.14 \times 0.28$ m which were held under compression in a damp state for 28 days. In order to carry out the thermal evaluation we made cylindrical samples based on the ASTM C192 standard. Using Gallegos et al.'s method (1997), energy is provided along the longitudinal axis through an electrical resistance.

The thermophysical properties of the material are the following: 855 Kg/m³ of volumetrical mass, 34 Kg/cm² of resistance under compression, 0.383 W/m °C of thermal conductivity, 1573 J/Kg °C of specific heat, 1.02×10^{-3} m²/s thermal diffusion; based on a thickness of 0.15 m we get a 6 hours 28 minutes thermal delay period, an 18% thermal reduction, and a 0.395 m² °C/W thermal resistance.

The mixture provides a reduction in costs by using industrial wastes as aggregates, foundations with low volumetrical mass and energy consumption through artificial air-conditioning.

* gonzalo.bojorquez@sia.mx, uabc.mx,

** anibal.luna@sia.mx, uabc.mx,

*** ricardo.gallegos@sia.mx, uabc.mx

Universidad Autónoma de Baja California,

Facultad de Arquitectura, Maestría en Arquitectura

Introducción

El objetivo del presente trabajo es dar a conocer los resultados del desarrollo de un concreto ligero, para aplicación en piezas de mampostería, utilizando como agregado dos desechos de origen industrial de la ciudad de Mexicali en Baja California. Este material es evaluado tanto mecánica como térmicamente.

Considerando el uso del producto se aplicaron pruebas estandarizadas de la American Society for Testing and Materials (ASTM), tanto en la evaluación mecánica como térmica. Cabe mencionar que el uso de desechos como agregado en los concretos, no es reciente; sin embargo, en este caso se presenta como innovación la evaluación térmica simultáneamente con la mecánica, esto es necesario ya que el área donde se realiza el estudio es una zona desértica, presentando temperaturas máximas promedio de 41.8 °C, y mínimas promedio de 19.3 °C, para el mes de Julio, alcanzando máximas hasta de 54 °C. (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1982)

Se documenta la descripción de los desechos que se estudiaron, posteriormente se indica como se desarrollaron las pruebas mecánicas y térmicas, finalizando con la discusión de los resultados obtenidos por experimentación en los laboratorios de las Facultades de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Autónoma de Baja California.

Propiedades mecánicas

En este apartado se describen las características de los agregados utilizados, así como el aditivo empleado, tipo de curado y resultados de la prueba compresión.

En el proceso de generación de energía eléctrica de la planta 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, con las características mostradas en la tabla uno.

Prueba	Norma	Resultado	Observaciones
Índice de actividad puzolánica	ASTM C311, 618	85%	Mínimo requerido a los 14 días 75%
Peso específico	ASTM C128	1.63 gr/cm ³	Agregados finos
Peso volumétrico suelto	ASTM C29	326 kg/m ³	17% de humedad
Peso volumétrico compactado	ASTM C29	473 kg/m ³	
Granulometría arena de sílice	ASTM C331, 332	pasa la malla 4 (4.75 mm)	Agregados ligeros para piezas de construcción

TABLA 1. CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA DE SÍLICE

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", con las características que se muestran en la tabla 2. Este producto está compuesto de celulosa, ceniza, tintas y agua; con un volumen de producción de 10 toneladas por día; presenta un 57.77 % de sólidos, de los cuales el 82 % es fibra de celulosa y el 18 % es ceniza. Debido a que la celulosa, tiene un efecto determinante sobre el fraguado y endurecimiento del concreto, se mineraliza con cal y se seca al ambiente.

Prueba	Norma	Resultado	Observaciones
Peso específico	ASTM C128	1.74 gr/cm ³	Agregados finos
Peso volumétrico suelto	ASTM C29	345 kg/m ³	8% de humedad
Peso volumétrico compactado	ASTM C29	391 kg/m ³	

TABLA 2. CARACTERIZACIÓN DEL LODO DE PAPEL MINERALIZADO

Como aglomerantes se utilizaron cemento Portland puzolánico, marca California (ASTM C592⁹²), y cal hidratada marca Pimacal.

Como aditivo inclusor de aire se usó una solución de jabón de barra, en el agua de mezclado.

Para el curado de los especímenes se utilizó el método de saturación en cuarto húmedo, para evaluar la resistencia de las piezas en la situación más crítica.

La resistencia a compresión se determinó a los 28 días de edad, según ASTM C67, con especímenes de 0.14x0.14x0.28 m (ver figura 1), con las propiedades que se muestran en la tabla 3. Para la fabricación de esta mezcla se utilizó una revolvedora de mortero.

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

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA SÍLICE – LODO DE PAPEL

Nota: valores promedio a los 28 días de edad en estado saturado, validadas por el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Baja California.



FIGURA 1. ESPÉCIMEN DE 0.14X0.14X0.28 M

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 sílice – lodo de papel es menor en 15 % con respecto al bloque, 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 crítico (saturado), mientras que los otros materiales son probados en estado seco.

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

TABLA 4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN
Y MASA VOLUMÉTRICA DE MATERIALES LOCALES

Fuente: Rojas, 1992

Evaluación térmica

La evaluación térmica de la mezcla de sílice - lodo de papel, consiste en la estimación de propiedades básicas y una simulación térmica para conocer su comporta-

miento en un régimen dinámico. Para la estimación de las propiedades térmicas se utilizó un dispositivo desarrollado por Gallegos *et al* (1997), el cual fue validado mediante su aplicación en materiales de construcción con propiedades ya conocidas.

Para las pruebas térmicas se elaboran, según norma ASTM C192, tres especímenes cilíndricos de 0.15 m de diámetro por 0.30 m de longitud, colocando en su eje un cable de resistencia de 0.5 mm de diámetro con una longitud de 0.32 m y una resistencia eléctrica de 2.3 Ohm/m.



FIGURA 2. ELABORACIÓN DE ESPÉCIMEN PARA PRUEBA TÉRMICA

Posterior a su fabricación, los especímenes se curaron según ASTM C177, permaneciendo en un cuarto húmedo por no menos de 20 horas ni más de 48 horas posteriores al moldeo, se descimbró y estuvo por 7 días a una temperatura de 23 ± 1.7 °C con una humedad relativa del $50 \pm 5\%$. A los 28 días de edad las piezas se secaron al horno a una temperatura de 110 ± 10 °C, pesándose cada 24 horas, hasta que su peso fue constante. Finalmente determinó su masa volumétrica según ASTM C303.

En cada uno de los cilindros, se hicieron 8 perforaciones a una profundidad de 0.055 m sobre una de las bases del espécimen, utilizando una broca para concreto de 0.003 m de diámetro, limpiando cada una de las perforaciones y colocando un termopar tipo T, sellando el orificio con silicón común. Los termopares se colocaron en el sentido radial, con las distancias especificadas en la tabla 5. Además se instaló un transductor del mismo tipo sobre la superficie del cilindro, que se cubrió con una cinta aislante de 0.02x0.02 m, sobre

la que se aplicó una capa de silicón de 0.03x0.03 m por lado con un espesor de 0.003 m; también se colocó un termopar al ambiente protegido de radiaciones indirectas mediante una cubierta aislante.

Termopar	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Distancia (m)	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055

TABLA 5.- DISTANCIAS DE TERMOPARES
AL EJE CENTRAL DE LOS CILINDROS

La fuente de energía utilizada es un VARIAC de tipo 3PN 1010 V. con un rango de 0 a 150 Volts de salida. Para determinar la energía suministrada a la resistencia eléctrica, se utilizó un multímetro, se realizaron pruebas de soporte de carga para determinar el amperaje para cada uno de los especímenes.

Los termopares se conectaron a una tarjeta de un sistema de interfaces, instalada en una computadora con un microprocesador 486 DX, utilizando un programa de cómputo, en el cual se diseñó una estrategia de monitoreo para los cilindros, en la que cada 10 segundos se promedian los datos de temperatura que registran los transductores, almacenando la información y desplegando en pantalla valores y gráficas de los mismos.



FIGURA 3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El dispositivo de medición fue instalado en un espacio cerrado de 6.30x8.00 m, con una altura de 2.70 m, el cual cuenta con un equipo de refrigeración de regulación automática; el período de monitoreo fue de 12 horas, comprendidas entre 6 P.M. a 6 A.M. permaneciendo el espacio cerrado y a una temperatura promedio de 15 °C. La información se captura desde la

activación de la fuente de energía hasta la estabilización de temperaturas, considerada, como un cambio de valor menor que el error estándar para el tipo de termopar según Acosta (1989).

Con base en la determinación de la masa volumétrica y el análisis de datos generados en el monitoreo, se aplicaron las ecuaciones correspondientes para obtener en un principio la conductividad térmica y el calor específico, a partir de los cuales se estimó el resto de las propiedades térmicas.

Para estimar la conductividad térmica, se parte de que cuando un cuerpo cilíndrico isotrópico recibe energía en una de sus caras, al alcanzar el estado estable, se verifica la Ley de Fourier de conducción de calor que en coordenadas cilíndricas se expresa como:

$$q = [2 p k l (T_i - T_o)] / [\ln (r_o / r_i)] \quad (1)$$

De aquí que, si se alcanza el estado estable, y se conoce con precisión q , T_o , T_i , r_o y r_i es posible determinar k . Modificando la ecuación (1), despejando k , e introduciendo los límites de confiabilidad del tipo de termopar utilizado, queda entonces un rango de conductividad térmica expresado como:

$$k = \{[q / 2p l] [\ln (r_o / r_i)]\} / [1.015 (T_i - T_o)] \quad (2)$$

$$k = \{[q / 2p l] [\ln (r_o / r_i)]\} / [(0.985 T_i) - (1.015 T_o)] \quad (3)$$

SIMBOLOGÍA

- q = Flujo de calor
- k = Conductividad térmica
- l = longitud del cilindro
- T_i = Temperatura en radio A
- T_o = Temperatura en radio B
- r_o = Distancia del eje al radio A
- r_i = Distancia del eje al radio B
- Q = Energía aplicada (potencia)
- m = Masa del cilindro
- C_p = Calor específico
- Dt = Pendiente de la ecuación lineal que describe la fase transitoria en el comportamiento de las temperaturas con respecto al tiempo

Estas ecuaciones se aplicaron para cada combinación de radios, de los últimos 500 datos registrados, obteniendo

una media de k ; verificando que el comportamiento de variación de temperaturas en cada uno de los radios fuera similar en el espécimen de prueba. Los resultados se presentan en la tabla siguiente:

Espécimen	A	B	C	Promedio
Conductividad térmica ($W/m^{\circ}C$)	0.379	0.430	0.339	0.383

TABLA 6.- ESTIMACIÓN DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Para la estimación del calor específico, se parte de la ecuación:

$$Q = m C_p Dt \quad (4)$$

Por lo tanto si se conocen Q , m y Dt , se puede estimar C_p , a partir de la ecuación:

$$C_p = Q / (m Dt) \quad (5)$$

Donde Dt es la pendiente de la ecuación lineal que describe a la fase transitoria en el comportamiento de las temperaturas con respecto al tiempo, por ello se hace un análisis de esta fase, determinando un modelo matemático con un valor de R^2 lo más próximo posible a 1.00 en cada caso. Cabe mencionar que este método es similar al establecido por la norma ASTM C351. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Espécimen	Calor específico				
	Masa (Kg)	Potencia (Q) (Watts)	Modelo lineal (Δt)	R^2 (%)	C_p ($J/Kg^{\circ}C$)
A	4.655	55.55	0.0073	96	1629
B	4.708	51.82	0.0076	97	1448
C	4.685	49.36	0.0064	96	1642
Promedio	4.683	52.24	0.0071	96	1573

TABLA 7. ESTIMACIÓN DE CALOR ESPECÍFICO

En la tabla 8, 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 en 47 % con respecto al ladrillo, 22 % menor con relación al adobe y 65 % menor en comparación con el bloque de concreto; mientras que el calor específico es mayor al ladrillo

con 47 % y mayor al adobe en 21 %, en cuanto al bloque es mayor en un 41%.

Propiedades	Ladrillo	Adobe	Sílice - lodo de papel	Bloque de concreto
Masa volumétrica (Kg/m^3)	1800	1620	855	2300
Conductividad térmica ($W/m^{\circ}C$)	0.72	0.49	0.383	1.08
Calor específico ($J/Kg^{\circ}C$)	829	1240	1573	920
Difusividad térmica (m^2/s)	$*1.7 \times 10^{-3}$	$*8.7 \times 10^{-4}$	1.02×10^{-3}	1.84×10^{-3}
Retraso térmico (hrs)	*4 hrs 38'	*6 hrs 32'	6 hrs 28'	4 hrs 31'
Amortiguamiento térmico (%)	*30	*18	18	*30
Resistencia térmica ($m^2^{\circ}C/W$)	*0.208	*0.306	0.391	0.138

TABLA 8. MASA VOLUMÉTRICA Y PROPIEDADES TÉRMICAS DE LADRILLO, ADOBE Y MEZCLA SÍLICE - LODO DE PAPEL

Fuente: Rojas 1992, Notas: * Estimado a partir de Rojas 1992; Los valores de retraso, amortiguamiento y resistencia térmica son para un espesor de 0.15 m

Para concretar la evaluación térmica se hizo una simulación en estado dinámico, aplicado a una vivienda tipo, con muros del material diseñando, además se llevó a cabo el mismo proceso para: adobe, ladrillo y bloque.

El simulador utilizado es el SUNCODE, que es una versión adaptada para computadora personal, del programa SERI/RES, diseñando para Solar Energy Research Institute (SERI). Éste simulador es aplicable al análisis térmico de edificios residenciales y locales comerciales pequeños. El simulador tiene la ventaja y flexibilidad para seleccionar el nivel de detalle que se requiere, así como la longitud del periodo de análisis.

La casa simulada es un prototipo del Instituto del Fondo Nacional para la Vivienda de los Trabajadores de México (INFONAVIT), con dos recamaras, sala, cocina – comedor y baño. Para el análisis se orientó la fachada principal al Norte, definiendo zonas refrigeradas independientes, estas son: recámaras y sala – comedor – cocina; existe además una zona adicional que es el baño, sin refrigeración. Los muros, tienen un espesor de 0.15 m sin aplanado en ambos lados, la losa es de concreto de 0.10 m de espesor con cartón arenado, el piso tiene loseta de 0.02 m de espesor, colocada con un mortero cemento – arena, sobre firme de concreto de 0.10 m. No se consideró aislado ningún elemento de la vivienda. (Ver figura 4)

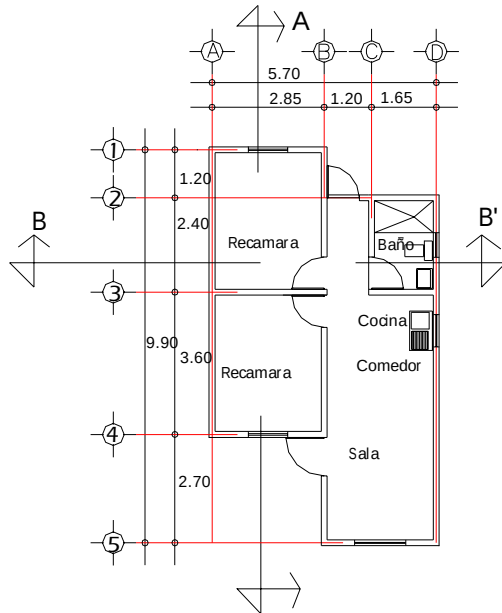


FIGURA 4. PLANTA ARQUITECTÓNICA DE VIVIENDA SIMULADA

Debido a la falta de un archivo meteorológico local en lenguaje ASCII, se utilizó el archivo de la ciudad de Yuma, Arizona, cuyas condiciones climáticas son similares a las de la ciudad de Mexicali, B.C.

La ganancia interna en el edificio se consideró con base a una familia tipo de acuerdo a las actividades realizadas de lunes a viernes y de sábado a domingo. El período de simulación se hizo para los 12 meses del año.

Este análisis comprende la capacidad de enfriamiento máximo requerido que determina la capacidad del equipo de enfriamiento para mantener la temperatura de diseño interior (25 °C); la simulación muestra que el enfriamiento máximo se necesita en Julio (Ver figura 5), y para el caso de la sílice – lodo de papel la carga es de 20.68 Kilowatts, lo que equivale a 5.88 toneladas de refrigeración, mientras que el adobe requiere de 5.94 toneladas para 20.87 kilowatts, en el caso del ladrillo este tiene 22.91 Kilowatts, para lo que requiere de 6.52 toneladas de refrigeración y el bloque presenta 23.72 Kilowatts, por lo que necesita de 6.75 toneladas de refrigeración.

En porcentajes la sílice – lodo de papel necesita el 1 % menos de tonelaje de enfriamiento que el adobe, y 10 %

menos que el ladrillo, contra 13 % menos que el bloque de concreto.

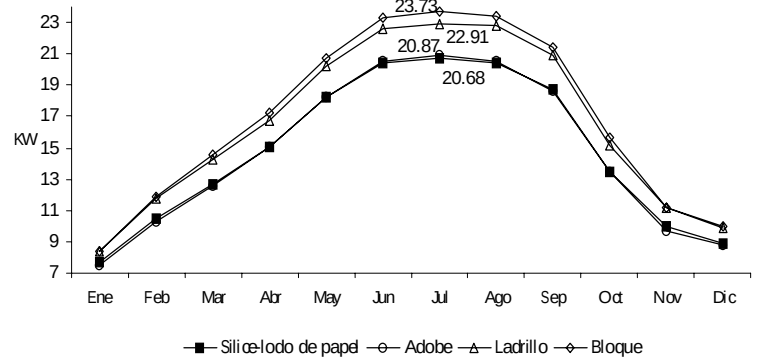


FIGURA 5. ENFRIAMIENTO MÁXIMO REQUERIDO

Conclusiones

A través de la estimación de propiedades térmicas y mecánicas de materiales, se pueden evaluar materiales alternativos y verificar su utilidad con respecto a los de uso tradicional. Para un mejor análisis de la utilidad del material es necesario evaluar propiedades como: resistencia a compresión, conductividad térmica, calor específico y masa volumétrica, para tener una idea clara del comportamiento del material.

Debido a la reacción puzolánica que presenta la sílice se tiene un agregado con propiedades cementantes, mientras que con el lodo de papel se mejora el comportamiento térmico de la mezcla.

Es importante resaltar que en este concreto ligero no se utiliza arena común y sin embargo su comportamiento mecánico supera en 38% a la norma británica para bloques de mampostería. Otra ventaja presentada por éste material es su ligereza, (representando un ahorro en cimentaciones), además de presentar mayores facilidades en el manejo de las piezas en obra.

Los valores obtenidos en la evaluación térmica muestran la ventaja en cuanto a propiedades térmicas, para la aplicación de este material, en climas cálidos seco como la ciudad de Mexicali B.C. Lo anterior se confirma en la simulación térmica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a: Abel Cota, Rafael Salcido, Ricardo Cota, personal del Laboratorio de Ingeniería Ci-

vil de la Universidad Autónoma de Baja California, por todo el apoyo brindado durante el desarrollo de esta investigación. A CONACYT por el apoyo económico para el desarrollo de este proyecto 

Bibliografía

- ACOSTA VARELA J.
1989 "Medición de temperatura" Ed. Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
- 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.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERING.
1995 ASHRAE Handbook 1995 Fundamentals SI Edition, ASHRAE, U.S.A.
- DELAHUNT M.
1985 Suncode – PC, a program user's manual' Program and original manual escrito por Wheeling T. And Palmiter L. Ecotope Inc. Seattle Washington U.S.A.
- GALLEGOS R., A. LUNA Y BOJÓRQUEZ G.
1997 Estimación experimental de conductividad térmica en materiales de construcción" en memoria de: XXI Semana Nacional de Energía Solar, 1ro. al 3 de octubre de 1997, Chihuahua, Chih.
- SECRETARIA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS
1982 Normales Climatológicas, período 1941-1970, Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional, México.
- SHORT, A. Y KINNIBURGH, W.
1977 "Concreto Ligero. Calculo, fabricación, diseño y aplicaciones" Ed; Limusa, México.
- ROJAS J.
1992 "Obtención de propiedades ópticas, térmicas y físicas de algunos materiales de construcción" Tesis no publicada, de especialización en Heliodiseño, Posgrado en Energía Solar; IIM-UNAM, México, D.F.
- SIMONSON J.R.
1975 "Engineering Heat Transfer" MacMillan Press LTD, London, England.