

PET DE DESECHO EN SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA MUROS

Lina Balderrabano-Ayala ^{1a}, J. Antonio Castillo ^{1b}, Guadalupe Huelsz ^{2b}

¹ Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Tecamachalco, Instituto Politécnico Nacional, Av. Fuente de Los Leones 28, Lomas de Tecamachalco, 53950 Naucalpan de Juárez, Edo.Méx. México

² Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Priv. Xochicalco S/N Temixco, Morelos 62580 México

^{1a}lina.balderrabano.a@gmail.com; ^{1b}jacat@ier.unam.mx; ^{2b}ghl@ier.unam.mx

RESUMEN: Se presenta un estudio del desempeño térmico de un sistema constructivo (SC) para muros formado por PET granulado (PETG) y tierra en capas diferenciadas. Se utiliza el programa Ener-Habitat con las características de un clima cálido de México y una condición de no uso de sistemas de climatización para obtener el desempeño térmico del SC con PETG y tierra. Los resultados se comparan con el desempeño térmico de otros dos sistemas constructivos comúnmente utilizados en la construcción. La comparación de los desempeños térmicos de todos los SC tiene como objetivo dar una primera aproximación de la viabilidad del uso del PET en sistema constructivos para muros.

PALABRAS CLAVES: PET, material sustentable, reciclado, sistema constructivo, muro

ABSTRACT: A study of the thermal performance of a construction system (CS) for walls, formed by differentiated layers of flaked PET (FPET) and soil, is presented. The software Ener-habitat is used to calculate the thermal performance of the SC, considering the characteristics of a warm climate of Mexico and a condition of nonuse of HVAC. The results of the thermal performance of the CS with FPET and soil are compared with the results of two CS formed by layers of materials commonly used in the construction industry. This comparison provides a first approximation of the viability of the incorporation of the FPET in CS for walls.

KEYWORDS: PET, sustainable material, recycling, constructive system, wall

1. INTRODUCCIÓN

El PET fue patentado en 1941 como un polímero para fibras textiles [1]. Hoy en día es usado principalmente para producir envases para bebidas embotelladas. México es uno de los principales consumidores de envases de PET a nivel mundial [2]. Se estima que en México se consumen alrededor de 800 mil toneladas de PET al año, con un crecimiento anual de 13% [3]. Una vez que es consumido el producto en el interior, la mayoría de los envases de PET son dispuestos en rellenos sanitarios, cauces de ríos, calles o tiraderos clandestinos, convirtiéndose en un material contaminante [3] en vez de aprovechar su potencial de reutilización y de reciclaje. Este desaprovechamiento es generalizado para la mayoría de los desperdicios en México, ya que la mayor parte son depositados en tiraderos a cielo abierto, de los cuales más del 50% son residuos orgánicos reutilizables en composta y 30% son sólidos con potencial de reutilización y de reciclaje [4]. En la

Zona Metropolitana de México se consumen por día un total de 600 toneladas de PET en forma de envases, de acuerdo al producto que contienen, 400 toneladas corresponden a refrescos, 100 toneladas a agua y 100 toneladas a aceite. Esta cantidad en toneladas representa entre 18 a 22 millones de botellas por día [2]. En 2011 se estimó una recuperación total de los envases de PET, para reutilización y reciclaje, en la Zona Metropolitana del 32% [5]. Por lo que estrategias de gestión integral de residuos sólidos a nivel nacional dirigidas a la reutilización y al reciclaje del PET son importantes para incidir positivamente en la salud pública mediante la disminución de rellenos sanitarios a cielo abierto. Además de los impactos positivos al medio ambiente y a la economía sustentable por el ahorro de materia prima y de recursos energéticos.

Actualmente en la industria de la construcción se reutilizan los envases PET como contenedores, es decir, cuando se utilizan los envases sin modificar o alterar su diseño original.

Es común que los envases se rellenen con tierra, arena u otros materiales del sitio o con mezclas de diferentes tipos de concreto. También, se reciclan los envases PET mediante los procesos de limpieza y trituración, convirtiendo el envase en fibras o gránulos de PET. Posteriormente, este material granulado de PET se utiliza como materia prima para mezclas con mortero o cemento [6]. A la reutilización y el reciclaje de envases PET para su uso en la construcción se le conoce como Construcción con Botellas, utilizada principalmente en la autoconstrucción sustituyendo a materiales típicos en muros, como el ladrillo, debido a su bajo costo y fácil acceso.

En la literatura se reportan estudios de viviendas construidas con muros de PET reutilizado, en otras palabras, sistemas constructivos (SC) con PET reutilizado donde se analiza el comportamiento mecánico estructural [7,8,9,10]. Todos los trabajos concluyen que los SC con PET tienen un comportamiento mecánico estructural adecuado.

Hay que resaltar que, los SC con PET también deben de ser diseñados para que su desempeño térmico sea el adecuado según el clima y la condición de uso o no uso de sistemas de climatización. Una vivienda energéticamente eficiente, con impactos positivos en la sustentabilidad y en el medio ambiente, es aquella que está diseñada de acuerdo al clima del lugar para generar condiciones de confort al interior [8]. En México, el consumo energético de edificios corresponde al 19% del total nacional, donde el 90% de esa energía consumida es generada mediante la quema de combustibles fósiles [11]. Por otro lado, la mayoría de las viviendas en México no están diseñadas de acuerdo al clima. Por lo que el usuario instala sistemas de climatización artificial, también llamados sistemas electromecánicos, cuando tiene la capacidad económica para hacerlo, produciendo un alto consumo de energía. Una parte importante en el diseño Bioclimático es el empleo de sistemas constructivos para muros y techos de la envolvente arquitectónica de acuerdo al clima y condición de uso o no uso de sistemas de climatización. Se ha comprobado que el uso adecuado de SC en la envolvente de las viviendas, con la combinación correcta de materiales térmicamente aislantes y materiales con masa térmica, de acuerdo a la condición de uso o no uso de sistemas de climatización, puede aumentar el confort térmico y disminuir de manera importante el consumo de energía destinada a la climatización interior [12].

De la revisión bibliográfica realizada se observa que no existe ningún estudio que analice el desempeño térmico de sistemas constructivos de capas diferenciadas de PET reciclado (granulado) para su uso en muros, ya sea en la condición de uso o no uso de sistemas de climatización. Por lo que en este trabajo se presenta el estudio de las propiedades térmicas del PET granulado (PETG) y el desempeño térmico de un SC que utiliza el PETG en capas diferenciadas. Se utiliza el programa Ener-Habitat con las características de un clima cálido de

México y una condición de no uso de sistemas de climatización para obtener el desempeño térmico del SC con PETG. Los resultados se comparan con el desempeño térmico de otros dos sistemas constructivos comúnmente utilizados en la construcción. La comparación de los desempeños térmicos de todos los SC tiene como objetivo dar una primera aproximación de la viabilidad del uso del PET en sistema constructivos para muros.

2. HERRAMIENTA PARA EL CÁLCULO DE DESEMPEÑO TÉRMICO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS EN MÉXICO

El Grupo de Energía en Edificaciones del Instituto de Energías Renovables de la UNAM ha desarrollado una herramienta de simulación numérica para comparar el desempeño térmico de los SC de techos y muros de la envolvente de una edificación en las condiciones climáticas de las principales ciudades de México. Utiliza el modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo, en condiciones de uso o no uso de sistemas de aire acondicionado [14]. Esta herramienta llamada Ener-Habitat es de uso gratuito y está desarrollada para que las personas relacionadas con la industria de la construcción comparen el desempeño térmico de los materiales que conforman los SC. Ener-Habitat calcula numéricamente la transferencia de calor unidimensional en estado dependiente del tiempo de SC conformados por capas homogéneas y en dos dimensiones para SC con capas no homogéneas (como tabiques huecos). La temperatura del aire al interior y otros parámetros reportados, son resultado de la transferencia de calor exclusivamente por el SC en evaluación. El resultado no representa el que se tendría en situaciones reales en donde existen otros factores a considerar como transferencia de calor a través de toda la envolvente, mezclado no instantáneo y no uniforme del aire interior, cargas térmicas al interior por ocupación o equipamiento, ventilación natural, entre otros [13]. Ener-Habitat resulta ser una herramienta versátil y rápida (en términos computacionales) para comparar el desempeño térmico en varios climas de diferentes SC aplicados a un mismo elemento de la envolvente arquitectónica, por ejemplo, un muro con una orientación y ángulo dados o un techo con o sin inclinación.

3. SELECCIÓN DE LA BOTELLA PET TIPO

En México se consumen en promedio 163 litros de refresco al año, lo que equivale a beber 466 ml diarios de refresco. De acuerdo a la consultora de mercados Canadean en promedio se consumen dos botellas por persona por día. Estos datos

muestran que 81% de los refrescos que se compran en los hogares mexicanos son de sabor cola de 600 ml. Por no contar con información oficial de la producción de botellas PET por forma y capacidad de la botella, se tomará como botella de PET tipo a las botellas de refresco de 600 ml, por ser la botella que contiene el refresco que se reporta hasta el momento como la de mayor consumo en México. Esta botella de 0.24 m de altura define el grosor del muro que se simula en el programa Ener-Habitat.

4. PROPIEDADES TÉRMICAS DEL PET

Las propiedades térmicas del PET reportadas para un bloque sólido en Throne, J. [14] son para la densidad $\rho = 1350$ kg/m³, el coeficiente de transferencia de calor por conducción $k = 0.14$ W/mK y el calor específico $C_p = 1884$ J/kgK.

Las propiedades térmicas del PETG se obtuvieron mediante mediciones experimentales en el Laboratorio de Transferencia de Energía y Masa del Instituto de Energías Renovables de la UNAM. Con la ayuda del KD-2 Pro, el cual es un dispositivo de mano utilizado para medir las propiedades térmicas. El equipo de medición consiste en un controlador de mano y un kit de sensores, que incluye de una y dos agujas; en este experimento se utilizó el sensor de doble aguja que mide conductividad térmica, resistividad, capacidad calorífica volumétrica específica y difusividad. Se realizaron tres tipos de pruebas que se diferencian entre sí por la forma en que se deposita el PETG en el contenedor de prueba. En la Figura 1 se muestra se muestra el PETG dentro del contenedor de muestra. El primer tipo de prueba consistió en dejar caer el PETG dentro del contenedor, en el segundo tipo se agitó ligeramente el PETG después de ser depositado y en el tercer tipo se agitó y presionó el PETG dentro del contenedor. Para todos los tipos de pruebas, una vez que se tenía el PETG dentro del contenedor se colocaba el sensor de doble aguja con la etiqueta SH-1 - 04234 10802 -04 12/21/16, se presionaba el botón iniciar para que el equipo alcanzara la temperatura de operación en un tiempo de 30 min. Después de que el equipo alcanzaba la temperatura de operación se procedía a la toma de 10 mediciones con un intervalo de 18 min entre cada una. Cada prueba, independientemente del tipo, tenía una duración de aproximadamente 210 min (3.5 horas). De cada tipo de prueba se obtuvieron 18 mediciones para cada una de las propiedades térmicas. Se realizaron 3 campañas experimentales por cada tipo de prueba, resultando un total de 9 campañas experimentales. Los valores de las propiedades térmicas se promediaron incluyendo las tres campañas de cada tipo de prueba. Los valores promedio son $\rho = 308$ kg/m³, $k = 0.08$ W/mK y $C_p = 1879$ J/kgK. Se encontró que los valores de todas las propiedades térmicas no varían de forma significativa con respecto al tipo de prueba, es decir con respecto al procedimiento de cómo se depositó el PETG en el contenedor.

Por lo que, los valores promedio son los que se utilizan en el Ener-Habitat.

5. PROPIEDADES TÉRMICAS DE TIERRA COMO RELLENO

Las propiedades térmicas de la tierra se obtienen del trabajo de Farouki, O. [15] para una tierra con un 50% de saturación de agua: $\rho = 1300$ kg/m³, $k = 0.25$ W/mK y $C_p = 1926$ J/kgK.



Figura 1. PET granulado dentro de un contenedor.

6. SIMULACIONES EN ENER-HABITAT

Las simulaciones tienen la finalidad de obtener el comportamiento térmico del PETG en SC para la condición de no uso de sistemas de climatización al interior. Se llevaron a cabo simulaciones con las propiedades térmicas que se obtuvieron del PETG para un SC de muro con capas homogéneas. Se consideró un muro con orientación norte. Se utilizó el clima de la ciudad de Temixco, Morelos con condición no uso de sistema de climatización para el día típico del mes de mayo, es decir para el día que representa la época cálida. En la Tabla 1 se muestran los tres SC utilizados en la simulación. El orden de los materiales es de exterior a interior (de arriba hacia abajo). Todos los SC tienen en la cara exterior una absorptancia solar $\alpha = 0.3$ y en ambas caras una capa de mortero cemento-arena de 0.015 m. El SC1 está formado por una capa homogénea de adobe de 0.24 m. El SC2 por una capa PETG de 0.05 m, una de tierra de 0.08 m y una de PETG de 0.08 m. El SC3 por una sola capa de concreto de 0.15 m. Los SC1 y 2 tiene un grosor mayor al de SC3 con la finalidad de representar el ancho de real de cada uno de los muros que pueden ser construidos con cada uno de los SC. Los valores de las propiedades térmicas del adobe y del concreto utilizadas en las simulaciones son los que tiene por default el programa Ener-

Habitat. En la Figura 2 se muestra el esquema de las capas diferenciadas que conforman al SC2.

Tabla 1. Sistemas constructivos

SC	Material	Expesor [m]	Absortancia [-]
1	Adobe	0.24	0.3
2	PETG-Tierra-PETG	0.24	0.3
3	Concreto	0.15	0.3

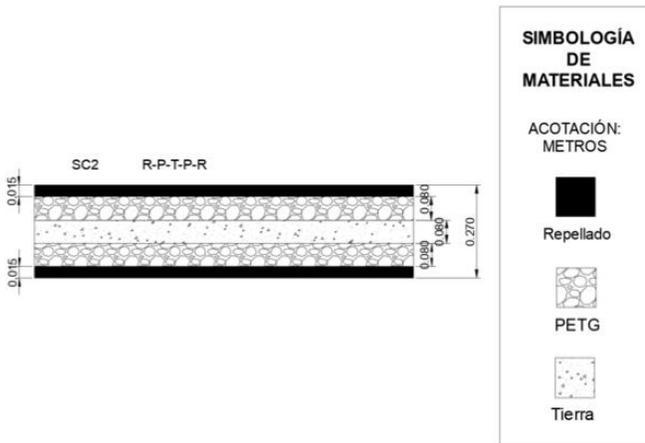


Figura 2. Esquema de detalle del Sistema Constructivo 2 con espesores de los materiales de las diferentes capas diferenciadas.

7. DESEMPEÑO TÉRMICO

Se utiliza el factor de decremento Df y el tiempo de retraso TR como parámetros de evaluación [12]. Para un SC se considere con un desempeño térmico adecuado con condición de no uso de sistema de climatización se deben de tener valores de Df cercano a 0 y un TR mayor a 8 horas.

La Figura 3 muestra la temperatura interior para cada SC como función de la hora. En esta gráfica se incluye la temperatura del aire al exterior. Entre dos líneas horizontales verdes se muestra la zona de confort térmico. Se puede observar que las temperaturas resultantes de los SC1 y 2 están dentro de la zona de confort térmico. La Figura 4 muestra los valores del Df para todos los SC. Los SC 1 y 2 tienen un valor de $Df < 0.05$, mientras que el SC3 tienen un valor de $Df > 0.25$. Los SC 1, 2 y 3 tienen un TR positivo con valores de 21.6, 16.2 y 7.3 respectivamente.

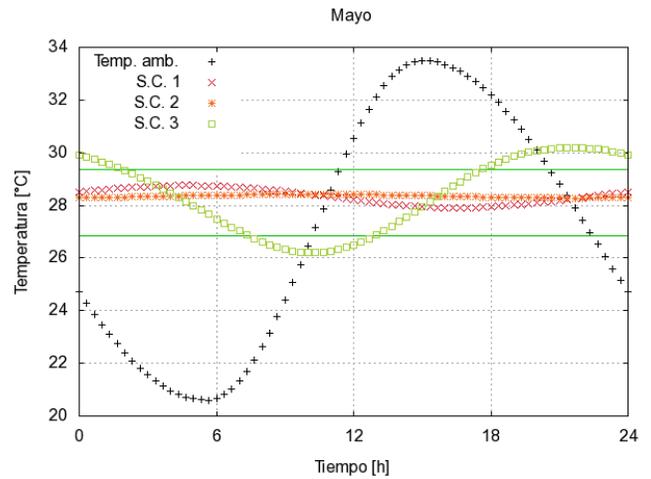


Figura 3. Evolución de la temperatura al interior dependiendo del efecto de cada sistema constructivo.

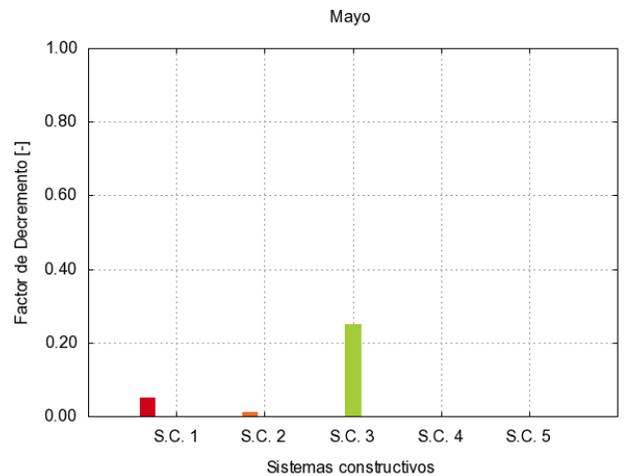


Figura 4. Factor de decremento.

De esta simulación se observa que el SC2 conformado por PETG tiene un comportamiento cercano al SC1 formado por adobe, es decir por un material con alta masividad térmica.

8. DISCUSIÓN

El SC con PETG es estudiado numéricamente en el programa Ener-Habitat en una sección de muro. Este muro representa el comportamiento por unidad de área de un muro con dimensiones reales. Los resultados deben corroborarse experimentalmente. El estudio debe extenderse para diferentes climas y para una condición de uso de sistemas de climatización. También se puede estudiar el comportamiento en elementos horizontales, por ejemplo losas.

En este estudio el SC con PET no incluye el efecto de instalaciones, elementos estructurales u otros elementos diferentes a la constitución del sistema constructivo.

9. CONCLUSIONES

El sistema constructivo para muros con capas diferenciadas de PET granulado y tierra muestra un desempeño térmico similar a un muro formado por una sola capa de adobe. Por lo que el uso del PET granulado en sistemas constructivos para muros tiene la ventaja de construir muros más livianos con respecto a los de adobe con un desempeño térmico adecuado para un clima cálido.

AGRADECIMIENTO

L. Balderrabano-Ayala agradece la beca doctoral de CONACYT. J. A. Castillo agradece la beca posdoctoral del proyecto CONACYT-SENER 291600.

REFERENCIAS

- [1] E. Morales, "Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos". México: Editorial Trillas, pp. 66-73. 2014
- [2] C. Orozco, "Problemas resueltos de contaminación ambiental, cuestiones y problemas resueltos". *Manual para el reciclamiento urbano*. 2012 [en línea]. Disponible en http://www.elecologista.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id (Consultada el 20 de abril de 2021).
- [3] Secretaria del medio Ambiente y Recursos Naturales. (SEMARNAT). Instituto Mexicano de Ecología y Cambio Climático. México: Gaceta Ecológica. 2009
- [4] E. Santiago, "Manual para el manejo de los residuos sólidos". México: Editorial Limusa, pp. 84-87. 2011
- [5] L. De la Rosa, J. Guzmán, C. Mendoza, D. Santiago, "Propuesta de un plan de negocio para reciclar botella PET (Tereftalato de polietileno)". México: Editorial Trillas, pp. 54. 2011
- [6] D. Ruiz, C. López, E. Cortes, A. Froese, "Nuevas alternativas en la construcción de botellas PET con relleno de tierra". *Colombia: En apuntes*, 25, pp. 292-303. 2012
- [7] J. Pérez, "Nuevos materiales compositos como elementos constructivos alternativos de bajo costo para vivienda popular extrapolables a prácticas de auto-construcción". México: Informe técnico Fondo: FOMIX Coahuila, pp. 1-46. 2011
- [8] K. Shahzard, "Enhance mechanical properties of recycled Polyethylene terephthalat (PET) from used bottle". *Rensi*, pp. 1995-0756. 2011
- [9] L. Soares, U. Targino, N. Perazzo, "Blocks for performance of Masory Using PET Bottle seal: Acoustic, and Mechanical and evaluation", *Construction and building Materials*, pp. 1906-1915. 2011
- [10] F. Fraternali, V. Ciancia, R. Chechile, G. Rizzano, L. Feo, L. Incamato, "Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete". *Composite Structures*, pp. 2368-2374. 2011
- [11] "Secretaría de Energía". (SENER). *Balance de Energía*. México. 2021
- [12] G. Barrios, G. Huelsz, R. Rechtman, J. Rojas, "Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms", *Energy and Buildings*, 43, pp. 219-223. 2011
- [13] Ener-Habitat. "Evaluación Térmica de la Envolvente Arquitectónica". 2014 [en línea] disponible en: <http://www.enerhabitat.unam.mx/> (Consultado el 01 de diciembre de 2021).
- [14] J. Throne, "Diseño y fabricación de un molde de termoformado utilizando herramientas CADCAECAM (Propiedades térmicas de materiales termoplásticos y ciertos materiales de uso común)." 2017 [en línea] disponible en: <https://es.slideshare.net/centenodaniel/diseo-y-fabricacin-de-un-molde-de-termoformado-utilizando-herramientas-cadcaecam>. Accessed: 08-13-2018.
- [15] Humphreys, A. Michael, J. Nicol y Fergus. "Understanding the adaptive approach to thermal comfort". volume 104, pages 991-1004. 1998
- [16] O. Farouki. *Thermal properties of soils*. United states army corps of engineers cold regions research and engineering laboratory hanover, USA. 1981

Fecha de recepción: 15 de diciembre de 2021

Fecha de aceptación: 26 de enero de 2022