

TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS RECICLADAS PLÁSTICAS

HEAT TRANSFER IN CONCRETE REINFORCED WITH RECYCLED PLASTIC FIBERS

Alejandro Meza de Luna

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
alejandro.ml@aguascalientes.tecnm.mx

Fernando Chávez Valdivia

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
fernando.cv@aguascalientes.tecnm.mx

Rodolfo Benjamín Sierra Ortiz

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
rodolfo.so@aguascalientes.tecnm.mx

Rafael Reyes Cortes

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
rafael.rc@aguascalientes.tecnm.mx

Oscar Iván Medina Gutiérrez

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
ivan_mediin@hotmail.com

Recepción: 14/febrero/2021

Aceptación: 26/marzo/2021

Resumen

El uso de fibras para reforzar el concreto es una técnica que permite mejorar las propiedades mecánicas de un material compuesto cementicio. Comúnmente, las fibras de refuerzo son de materiales metálicos o polímeros, de tipo virgen o reciclado. El concreto frecuentemente es expuesto a temperaturas ambientes producidas por la energía solar, lo que puede dañar su capacidad, sobre todo cuando existen fibras poliméricas dentro del concreto. En este artículo se analiza la transferencia de calor en un bloque de concreto reforzado con fibras de tereftalato de polietileno (PET), tomando en cuenta la temperatura más alta registrada en Aguascalientes debido a la energía solar. El estudio tiene la finalidad de aportar información que pueda servir como base en el desarrollo del campo de la construcción con elementos reciclados. Los resultados obtenidos están basados en

el método de elemento finito, indicando que la temperatura máxima que adquieren las fibras es de 36.3 °C.

Palabras Clave: calor solar, concreto reforzado con fibras, fibras recicladas plásticas, temperatura, mallado.

Abstract

The use of fibers to reinforce concrete is a technique that improves the mechanical properties of cementitious composite material. Commonly, reinforcing fibers are made of metallic or polymeric materials, virgin or recycled type. Concrete is frequently exposed to ambient temperatures produced by solar energy, which can damage its capacity, especially when there are polymeric fibers inside the concrete. This article analyses the heat transfer in a concrete block reinforced with polyethylene terephthalate (PET) fibers, considering the highest temperature recorded in Aguascalientes due to solar energy. The study aims to provide information that can serve as a basis in the development of the construction field with recycled elements. The results are based on the finite element method, indicating that the maximum temperature that the fibers acquire is 36.3 °C.

Keywords: fiber reinforced concrete, recycled plastic fiber, solar heat, temperature.

1. Introducción

Las botellas plásticas de PET (Tereftalato de polietileno) son utilizadas cotidianamente por la sociedad; se reporta que en México se desechan 780 millones de toneladas anuales de estos productos, de los cuales el 50% son de bebidas gaseosas y 17% de agua [1].

La conservación en la intemperie de las botellas plásticas desechadas puede producir problemas a la salud [1], cuando estos elementos son incinerados se genera la liberación de toxinas que producen enfermedades respiratorias relacionadas con el cáncer [1]. Por otra parte, García [2] indica que el 80% de la basura que es alojada en los océanos se debe al plástico; lo que fomenta un problema, considerando que el plástico requiere de más de 700 años para su degradación [3].

En la actualidad el reciclado de botellas de PET es una de las actividades más usuales en la búsqueda de alternativas para reducir los niveles de contaminación. México es uno de los países con mayor índice de recolección de botellas plásticas, el primero a nivel Latinoamérica, logrando recuperar el 56% de las botellas plásticas consumidas [4]. Recientemente se han mostrado propuestas para utilizar las botellas plásticas desechadas para producir fibras de refuerzo para el concreto [5-7]. También se ha demostrado que la incorporación de fibras recicladas de PET en el concreto reduce escasamente su resistencia a compresión; los investigadores han indicado que existe una incorporación de aire debido a la inmersión de fibras en el concreto, reduciendo la capacidad mecánica de la matriz [8-12]. Un aspecto importante que considerar es la degradación que puede someterse un polímero debido a los efectos de la temperatura. El estudio térmico del concreto reforzado con fibras recicladas ha sido estudiado insuficientemente. Los principales hallazgos en la literatura están direccionados en el concreto reforzado con fibras comerciales (metálicas y poliméricas):

- Jin et al., [13] estudiaron el impacto de someter fibras metálicas en el concreto a temperaturas de 25, 400 y 600 °C.
- Park et al., [14] ensayaron fibras poliméricas en el concreto sometidos a fuego.
- Di Carlo et al., [15] analizaron numéricamente el concreto reforzado con fibras sometido a calor.
- Sukontasukku et al., [16] analizaron muestras de concreto con fibras metálicas y plásticas sometidas a fuego por 15, 30, 45 y 60 minutos.

En general los resultados han mostrado grados de degradación de las fibras de acuerdo con los materiales, temperaturas y condiciones de calor a las que fueron sometidas. En esta investigación se utilizó el método de elemento finito para analizar la transferencia de calor en el concreto reforzado con fibras recicladas, simulando el efecto que tiene la energía solar cuando incide sobre una superficie de concreto, y determinar la temperatura que llega a tener una fibra plástica reciclada dentro de una matriz cementicia.

2. Métodos

Principios de transferencia de calor

La transferencia de calor es un proceso por el cual se genera un intercambio de energía térmica por cualquiera de sus tres formas básicas (conducción, convección y radiación) [17,18]. La conducción representa un movimiento de energía entre sólidos, la convección en fluidos y la radiación puede generar un movimiento de energía sin contacto entre los elementos [17,18]. Las ecuaciones que permiten estimar la tasa de transferencia de calor, para cada una de las formas previamente indicadas, son mostradas en las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$Q_k = \frac{KS(T_c - T_f)}{E} \quad (1)$$

$$Q_h = h_c A \Delta T \quad (2)$$

$$Q_R = S_B A T^4 \quad (3)$$

Donde:

Q_k : Calor transferido por conducción

Q_h : Calor transferido por convección

Q_R : Calor transferido por radiación

K : Conductividad térmica del material

S : Superficie

T_c : Temperatura de transferencia mayor

T_f : Temperatura de transferencia menor

E : Espesor del material o cuerpo

h_c : Coeficiente de convección para flujo laminar o turbulento

ΔT : Diferencia de temperatura entre los elementos de transferencia de calor

S_B : Constante de Stefan Boltzman

A : Área de la transferencia para radiación

T : Temperatura absoluta

Método de elemento finito

El método de los elementos finitos (FEM) ha sido utilizado para estudiar la transferencia de calor entre elementos [13,14]. El proceso del FEM consiste en el

diseño de los elementos, la aplicación de ecuaciones basadas en teorías de la termodinámica, la subdivisión de los elementos por estudiar para formar una malla unida por nodos, la aplicación de cargas térmicas y condiciones de análisis, y finalmente el cálculo matricial del comportamiento térmico en cada uno de los nodos que componen los elementos estudiados.

Procedimiento de estudio

FEM fue aplicado en este trabajo para analizar la transferencia de calor en el concreto reforzado con fibras plásticas debido a la energía calorífica solar. El software utilizado es el *Solidworks* 2016 con el complemento de *simulation* en un tratamiento de análisis térmico por conducción de tipo estable, omitiendo las caracterizaciones de flujo de fluidos. El diseño del concreto reforzado con las fibras se realizó a nivel de ensamble, otorgando datos técnicos correspondientes al concreto y a las fibras, sin considerar fricción o algún contacto mecánico. En el planteamiento del problema se idealizó un elemento de concreto reforzado con fibras de PET, el bloque de concreto tiene dimensiones de 150x150x500 mm, las cuales están alineadas la Norma ASTM C78 [19]. Considerando que el análisis térmico fue en un estado bidireccional, los estudios de transferencia de calor se realizaron en secciones de 150x150x10 mm. Las propiedades de los materiales fueron asignadas en base a datos propuestos del *Solidworks* y tablas técnicas [20]. La tabla 1 indica los datos técnicos de los materiales, alimentados para la simulación.

Tabla 1 Datos técnicos de los materiales utilizados para la simulación.

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad del concreto	2400	kg/m ³
Densidad del PET	1420	kg/m ³
Conductividad térmica del PET	0.261	W/mK
Conductividad térmica del concreto	0.800	W/mK

La discretización de los materiales se realizó con un concepto de mallado fino, buscando obtener resultados con mayor precisión. La tabla 2 muestra las generalidades de los elementos que comprenden el mallado de la simulación. La

figura 1 muestra una imagen representativa de la discretización del concreto y de las fibras.

Tabla 2 Datos técnicos de los materiales utilizados para la simulación.

Característica	Valor
Puntos Jacobianos	4
Tamaño de elementos	16.57 mm
Calidad de la malla	Prismáticos de alto orden
Número total de nodos	34398
Número total de elementos	19366

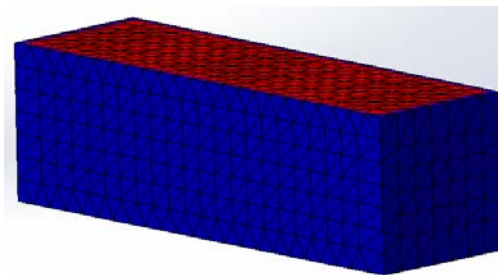


Figura 1 Discretización del concreto reforzado con fibras.

La aplicación de cargas térmicas consideradas para la simulación fue de 39.6 °C, temperatura referenciada al registro más alto en Aguascalientes en los últimos 10 años [21]. Dicha carga térmica fue aplicada en la cara superior de la pieza, mientras que las otras caras se consideraron temperaturas ambientales de 20 °C. La figura 2 muestra la asignación de la carga térmica de 39.6 °C.

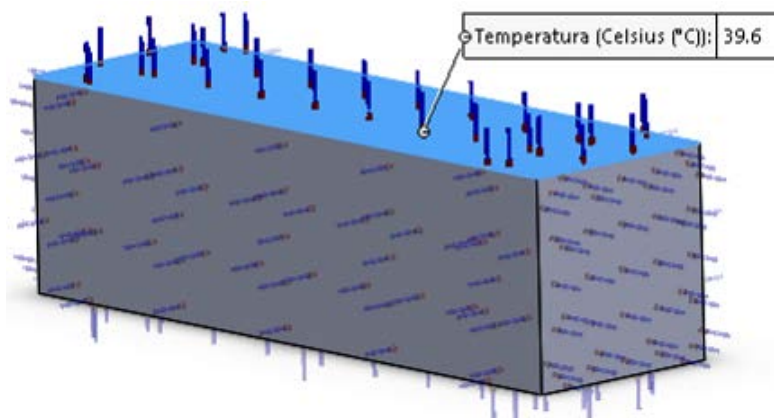


Figura 2 Temperatura considerada en la simulación FEM.

3. Resultados

Simulación por elemento finito

En la generación de un concreto reforzado con fibras, sus elementos son distribuidos aleatoriamente debido al proceso de mezclado (manual, con revoladora o con camión de mezclado). Para considerar la distribución discreta de las fibras, se realizaron tres matrices de ordenamiento de las fibras. Con el objetivo de analizar el comportamiento de distribución de temperatura a través del bloque de concreto reforzado con fibras recicladas. Las matrices generadas obedecen un ordenamiento de las fibras de tipo circular, vertical y horizontal. Para los estudios de transferencia de calor entre los tres arreglos de las fibras se consideró una sección del bloque de concreto reforzado con fibras, la sección tiene una dimensión de 150x150x10 mm. Con las mismas características a las indicadas previamente, es decir, una temperatura en la cara superior de 39.6 °C y en las otras caras de 20 °C. La primera simulación considera una distribución de fibras tipo circular, la figura 3 muestra la distribución de las fibras y la figura 4 indica los resultados obtenidos. Los resultados muestran una dirección de calor desde la temperatura más alta (en la parte superior de la muestra de concreto) hacia el lugar donde se ubican las fibras. La temperatura más alta observada en las fibras es de 36.3 °C, presentada en los elementos más cercanos a la superficie con la temperatura más alta. Las otras fibras están en el rango de temperatura de 20 a 23 °C.

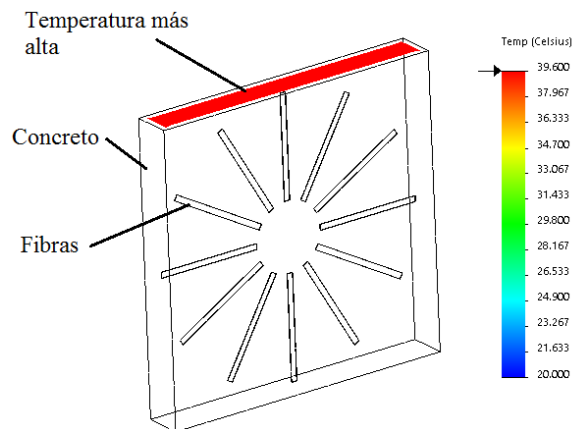


Figura 3 Distribución circular de fibras dentro del concreto.

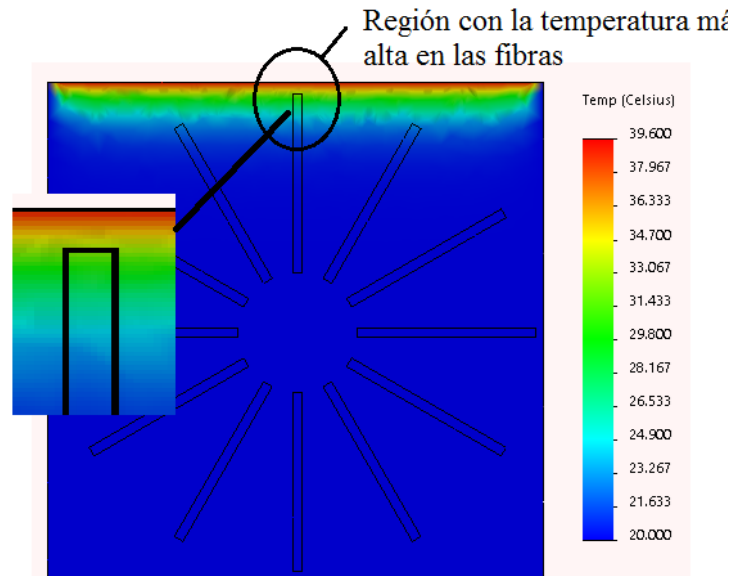


Figura 4 Distribución de calor en fibras con arreglo circular.

La segunda simulación estudia una distribución de fibras tipo vertical, la figura 5 muestra esta distribución dentro del concreto, mientras que la figura 6 indica los resultados obtenidos. Similar al estudio previo, se observó un gradiente de calor desde la temperatura más alta hacia el lugar donde se ubican las fibras. La temperatura más alta en las fibras oscila entre los 28.2 y 36.3°C. Las fibras más alejadas de la fuente de calor están a la temperatura de simulación de las otras fronteras (20 °C).

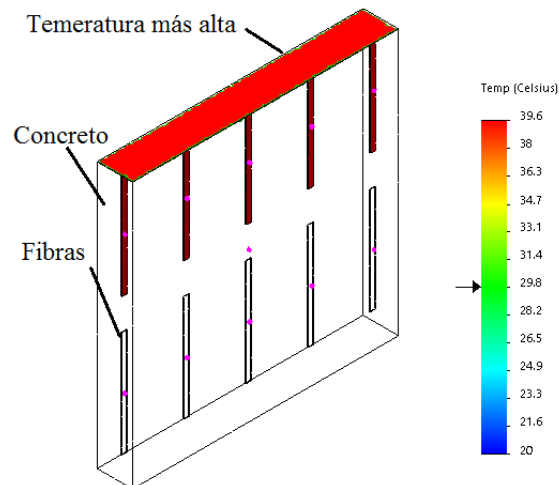


Figura 5 Distribución vertical de fibras dentro del concreto.

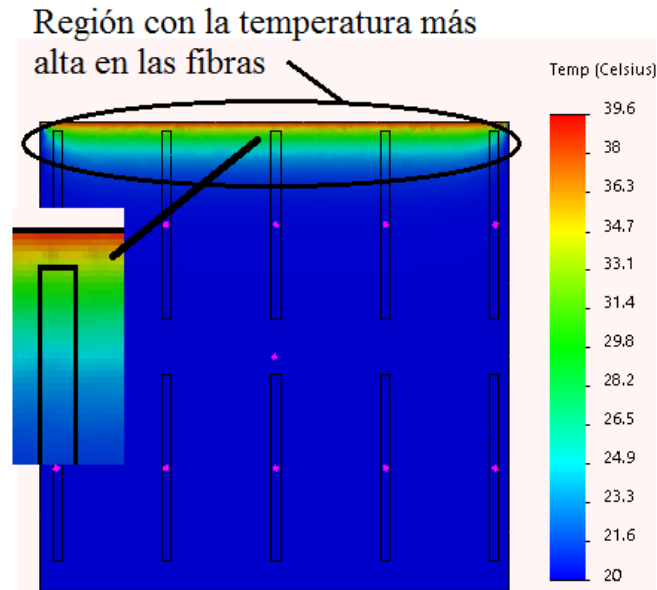


Figura 6 Distribución de calor en fibras con arreglo vertical.

La tercera simulación se destinó al análisis de transferencia de calor cuando las fibras tienen una distribución de tipo horizontal, la figuras 7 y 8 muestran la distribución de fibras dentro del concreto y los resultados, respectivamente. Similarmente a los patrones de gradiente de calor observados en los estudios previos, el calor se proyecta de la superficie con la mayor energía hacia aquellas con menor calor. La temperatura más alta en las fibras oscila entre los 24.9 y 33.1 °C. Las fibras más alejadas de la fuente de calor están a la temperatura de simulación de las otras fronteras (20 °C).

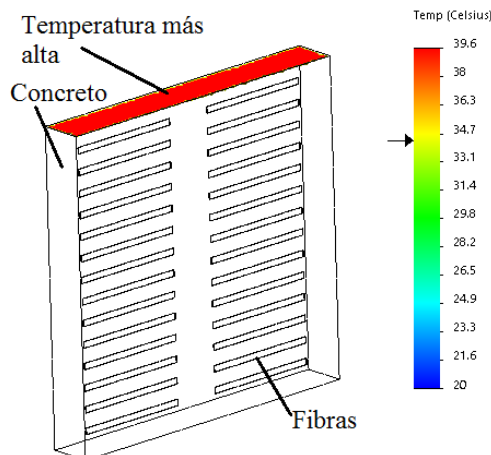


Figura 7 Distribución horizontal de fibras dentro del concreto.

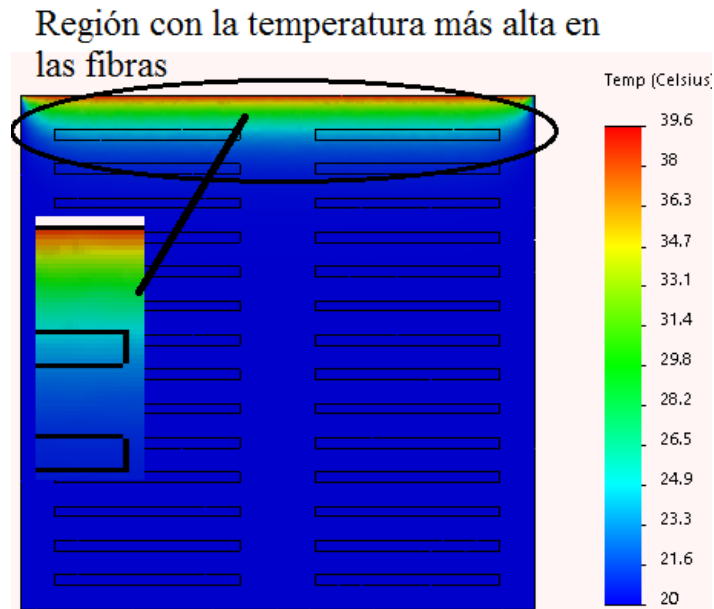


Figura 8 Distribución de calor en fibras con arreglo horizontal.

4. Discusión

Tres distribuciones de fibras fueron estudiadas con el mismo principio de cargas térmicas, 39.6 °C en la cara superior y 20 °C en las caras laterales e inferior. Los estudios muestran que la temperatura se proyecta desde el foco de calor hacia las fibras. Las temperaturas más altas muestran un rango entre los 33.1 y 36.3°C. Estas temperaturas no afectan el comportamiento del PET, considerando que la temperatura vítrea del PET, es decir, la temperatura donde puede cambiar su estructura molecular del material debido al calor es de 70 °C [22]. La tabla 3 indica los resultados obtenidos con las diferentes distribuciones.

Tabla 3 Temperaturas registradas en las fibras acorde a la distribución aleatoria.

Distribución	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C	Diferencia °C
Circular	36.3	20.0	16.3
Vertical	36.3	20.0	16.3
Horizontal	33.1	20.0	13.1

En contraste con estos estudios, Yap et al. [23] reportaron que la exposición del concreto con fibras poliméricas a temperatura más altas (200°C) producen una degradación en las propiedades mecánicas del material. Por otra parte, Jin et al.

[24] indican que el cambio de distribución de temperatura fue menor al 2%, debido a la incorporación de fibra en el concreto.

5. Conclusiones

En este estudio se analizó las temperaturas que pueden adquirir las fibras recicladas de PET dentro del concreto, como parámetros de estudio se utilizó la temperatura más alta registrada en Aguascalientes (39.6 °C). El objetivo es observar si esta temperatura acompañada con el proceso de transferencia de calor entre los materiales puede producir algún daño a las fibras que se utilizan en el concreto como refuerzo.

Considerando la distribución aleatoria de las fibras dentro del concreto, producto del proceso natural de mezclado, se realizó el estudio de tres diferentes patrones de acomodo de fibras (circular, vertical y horizontal).

Los resultados indican que las fibras con la temperatura más alta están entre 33.1 y 36.3 °C, esta temperatura se observó en aquellos elementos más cercanos a la fuente de calor. Conforme las fibras se alejan de la fuente de calor su temperatura se reduce gradualmente hasta la temperatura mínima (20 °C). En general, las temperaturas en las que trabajan las fibras están por debajo de cambio molecular de las fibras.

Esta información permite inferir que, en condiciones normales de temperatura ambiental, las fibras de PET reciclado no se verán afectadas. Los autores consideran que estos estudios permiten profundizar en estudios similares realizando diferentes consideraciones, tales como tiempo de la carga térmica o el impacto de tener una energía solar radiante en forma directa.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Universidad Veracruzana, Botellas desechables, problemas permanentes: https://www.uv.mx/cienciauv/blog/botellas_desechables.
- [2] García Salvador, 2015, Contaminación por el plástico, El Financiero: <https://www.elfinanciero.com.mx/opinion/salvador-garcia-linan/contaminacion-por-el-plastico>.

- [3] Semana Sostenible, 2016, PET un plástico amigable pero no inofensivo: <https://sostenibilidad.semana.com/negocios-verdes/articulo/plastico-pet-un-amigable-pero-no-inofensivo/36282>.
- [4] Animal político, 2019, México es líder en América en reciclaje de PET: <https://www.animalpolitico.com/2019/09/reciclar-eliminar-plastico>.
- [5] Meza, A. & Siddique, S. (2019). Effect of aspect ratio and dosage on the flexural response of FRC with recycled fiber. *Construction and Building Materials*, 213, 286-291.
- [6] Foti, D. (2013) Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures*, 96, 396-404.
- [7] Meza, A. & Ahmed, F.U. (2020) Anisotropy and bond behaviour of recycled Polyethylene terephthalate (PET) fibre as concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*, 265, 120331.
- [8] Borg, R.B., Baldacchino, O., Ferrara L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 108, 29–47.
- [9] Gu, L., Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19-42.
- [10] Yin, S., Tuladhar, R., Riella, J., Chung, D., Collister, T., Combe, M., Sivakugan, N. (2016). Comparative evaluation of virgin and recycled polypropylene fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 114, 134–141.
- [11] Pereira, L.A, Castro, J.P. (2011) Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Construction and Building Materials* 25 1712–1717.
- [12] Kim, S.B., Yi, N.H., Kim, H.Y., Kim, J.J., Song, Y.C. (2010) Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*, 32, 232–240.
- [13] Jin, L., Zhang, R., Li, L., Du, X., Yao, Y. (2019). Impact behavior of SFRC beams at elevated temperatures: Experimental and analytical studies. *Engineering Structures*, 197, 109401.
- [14] Cengel, Y.A. *Transferencia de calor y masa*. Tercera edición, Mc. Graw-Hill.

- [15] Di Carlo, F., Meda., A., Rinaldi, Z. (2018). Evaluation of the bearing capacity of fiber reinforced concrete sections under fire exposure. *Materials and Structures*, 51:154.
- [16] Park, J.J., Yoo, D.Y., Kim, S., Kim, S.W. (2019) Benefits of synthetic fibers on the residual mechanical performance of UHPFRC after exposure to ISO standardfire. *Cement and Concrete Composites*, 104, 103401.
- [17] Sukontasukkul P., Jamnam, S., Sappakittipakorn, M., Fujikake, K., Chindaprasirt, P. (2018). Residual flexural behavior of fiber reinforced concrete after heating. *Materials and Structures*, 51:98.
- [18] Holman, J.P. Transferencia de calor. Octava edición, Mc. Graw-Hill.
- [19] ASTM. (2000). C78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).
- [20] Neri, L. (2013). Estudio del efecto de fibras de politereftalato de etileno (pet) reciclado como agentes de refuerzo en una matriz de polietileno de alta densidad (hdpe). Tesis de Ingeniería, Universidad Autónoma de México.
- [21] Hidrocálido, se registran temperaturas más altas en Aguascalientes: <http://www.hidrocalidodigital.com>.
- [22] Groover, M.P., (2007). Fundamentos de manufactura moderna. Mc. Graw Hill, tercera edición.
- [23] Yap, S.Y., Goh, Y., Goh, W.X., Mo, K.H., Liu, M.Y.J., Ibrahim, H.A. (2020) Relationship between microstructure and performance of polypropylene fibre reinforced cement composites subjected to elevated temperature. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1734489>
- [24] Jin, L., Zhang, R., Li, L., Du, X., Yao, Y. (2019) Impact behavior of SFRC beams at elevated temperatures: Experimental and analytical studies. *Engineering Structures* 197 109401. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109401>.