

SIMULACIÓN DEL EFECTO DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA TEJA FABRICADA CON POLIPROPILENO RECICLADO

Melissa Galván Celedón ^a, Edilberto Murrieta Luna ^{a*}, Ana Michelle Jao López ^a,
Luz Yareli Duran Morales ^a

^a Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Departamento de Ingeniería en Manufactura Avanzada,
Santa Cruz de Juventino Rosas, Gto., C.P. 38400, México. emurrieta@upjr.edu.mx

Resumen

La contaminación plástica se ha convertido en un desafío ambiental significativo, que requiere soluciones urgentes y efectivas para mitigar su impacto. Actualmente, el tratamiento de residuos plásticos, como el PP incluye el reprocesado, la pirolisis, la incineración, entre otros. Se sabe que el reprocesado de plásticos puede realizarse un número limitado de veces para elaborar la misma pieza debido a la degradación de las cadenas poliméricas, sin embargo, es posible elaborar otro tipo de productos con el mismo plástico reciclado. Un enfoque prometedor es el desarrollo de materiales de construcción derivados los desechos de polipropileno (PP). Este esfuerzo se alinea con los principios del desarrollo sostenible. En este proyecto se realizará el análisis térmico de una teja fabricada con PP reciclado. Se diseñó y fabricó el molde de acero para manufacturar una teja con dimensiones de 0.13 m de ancho, 0.3 m de largo y 0.005 m de espesor. El análisis térmico de la teja se realizó utilizando software CFD especializado. Se supuso que la radiación solar incide de forma perpendicular sobre la teja. La simulación se realizó en estado transiente por un periodo de tiempo de 10 s, utilizando el modelo P1 de radiación. Los resultados se presentan en forma de contornos de temperatura, presión y líneas de corriente y fueron comparados con datos experimentales.

Palabras clave: polipropileno; reciclaje; teja; CFD; modelo de radiación P1.

SIMULATION OF THE EFFECT OF SOLAR RADIATION ON A MANUFACTURED RECYCLED PP ROOF

Abstract

Plastic pollution has become a significant environmental challenge, requiring urgent and effective solutions to mitigate its impact. Currently, the treatment of plastic waste, such as PP, includes reprocessing, pyrolysis, incineration, among others. It is known that plastics can be reprocessed a limited number of times to produce the same piece due to the degradation of the polymer chains; however, it is possible to produce other types of products with the same recycled plastic. A promising approach is the development of construction materials derived from polypropylene (PP) waste. This effort aligns with the principles of sustainable development. This project will perform a thermal analysis of a roof manufactured from recycled PP. A steel mold was designed and manufactured to produce a roof with dimensions of 0.13 m wide, 0.3 m long, and 0.005 m thick. The thermal analysis of the roof was performed using specialized CFD software. It was assumed that solar radiation falls perpendicularly on the roof. The simulation was performed in a transient state for a period of 10 s using the P1 radiation model. The results are presented as temperature, pressure, and streamline contours and compared with experimental data.

Keywords: polypropylene; recycling; roof; CFD; P1 radiation model.

1. Introducción

Como componente indispensable en la vida moderna, el plástico posee ventajas sobre otros materiales como durabilidad, flexibilidad, ligereza y procesabilidad, lo que hace que se utilice en diversos sectores industriales, como el transporte, salud, alimentos, construcción, electrónica y embalaje (Qian y col., 2025), (Sharma y col., 2024). Una de las principales desventajas de los productos fabricados con plástico, es que por lo general son de un solo uso y rápidamente se convierten en residuos, generando serios problemas de contaminación ambiental a nivel global (Ayeleru y col., 2020). Los plásticos son materiales no biodegradables, por lo que pueden durar muchos años en el ambiente sin degradarse (Mohan y col., 2022) y cumplen con un ciclo de vida, el cual se muestra en diagrama de la Figura 1.



Figura 1. Diagrama de ciclo de vida del plástico.

Actualmente, los métodos de eliminación han sido inadecuados, partiendo de las bajas tasas de recolección, hasta la falta de infraestructura, tecnología y diseño de estrategias gubernamentales. Por ejemplo, el consumo per cápita de plásticos en México se estimó en 66 kg/habitante/año, y la generación de residuos plásticos de 59 kg/habitante/año, de los cuales solo el 83 % se recolecta y de los sólidos recolectados el 45 % no tiene un tratamiento adecuado (Albores y col., 2023). Estos residuos se pueden clasificar en terrestres y los marinos que incluyen los residuos plásticos vertidos en masas de agua y los residuos de pesca (Vanapalli y col., 2019).

El reciclaje y el reúso de componentes plásticos son necesarios para obtener soluciones sostenibles y reducir la contaminación ambiental. El reciclaje primario y secundario implican la recolección, clasificación, lavado y trituración del material (Ragaert y col., 2017). Esto contribuye de manera importante a generar economía circular. Esta circularidad cierra ciclos de materiales y dependen en gran medida de la calidad del material reciclado, es decir, un reciclaje donde se conservan las propiedades del material plástico, para buscar

si es posible, el obtener productos similares (Eriksen y col. 2018), (Bora y col., 2020).

El incremento en la producción de la industria del plástico continúa escalando, de tal manera que se tiene proyectado que para el año 2050 la producción mundial será de 1,100 Mt (Wu y col., 2025). Los principales polímeros que se producen son el polipropileno (PP), tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de baja densidad (LDPE), poliestireno (PS) y la categoría compuesta por otros plásticos como el policarbonato o el nylon.

El PP es el segundo plástico más utilizado, después de PET. El PP ofrece una combinación de propiedades como tenacidad, resistencia a la tensión, al desgarro y a la flexión, así como resistencia química, térmica y a la humedad (Gijsman y col. 2023). Su procesamiento puede ser por inyección, extrusión, termoformado y soplado. El PP es propenso a degradarse durante su procesamiento y vida útil (Ragaert y col., 2017), (Mannheim y Simenfalvi, 2020). En busca de opciones para el aprovechamiento del PP reciclado (Alsabri y col., 2022) propone diferentes opciones en la que se incluyen la incineración, el reciclaje

mecánico, la pirólisis y la gasificación. (Chia y col., 2025) incluyen fibras de PP en la fabricación de concreto, mejorando con esto las propiedades físicas como la resistencia a la compresión, la elevación del módulo elástico y mejoramiento en la flexión. El PP también ha sido utilizado en la fabricación de ladrillos en combinación con HDPE, obteniendo disminución en peso, menor absorción de agua e incrementando la carga máxima soportada (Kulkarni y col., 2022).

En México las tejas son un producto ampliamente utilizado en diferentes tipos de edificaciones, esto debido a su capacidad para mantener frescos los interiores, además de tener durabilidad y atractivo estético. En este trabajo de investigación se diseñó el proceso para realizar simulaciones mediante CFD del efecto de la radiación solar sobre una teja fabricada de PP reciclado. El proceso consta de varias etapas computacionales, iniciando con la configuración del modelo, la realización de simulaciones y el posprocesamiento de los resultados para extraer datos de la distribución de la temperatura, los perfiles de flujo de calor y otras métricas de rendimiento relevantes.

2. Ecuaciones gobernantes

Se resolvieron numéricamente las ecuaciones (ANSYS FLUENT, 2021):

2.1. Ecuación de continuidad

Es una expresión matemática utilizada para garantizar la conservación de la masa en el movimiento de fluidos.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

donde ρ es la densidad, v el vector velocidad y S_m es un término fuente.

2.2. Ecuación de momentum

Calcula la cantidad de movimiento dentro del fluido.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

donde ρ es la densidad, v el vector velocidad y Δp es el cambio de presión, g la gravedad y F son fuerzas externas.

2.3. Ecuación de transferencia de calor por conducción

Predice la cantidad de transferencia térmica en el fluido por conducción.

$$K_m \nabla^2 T = 0 \quad (3)$$

Donde K es la constante de transferencia de calor, T la temperatura

2.4. Ecuación de transferencia de calor por convección

Predice la cantidad de transferencia térmica en el fluido por convección.

$$\nabla(\rho h \vec{v}) = -p \nabla V + \nabla(K \nabla T) + \phi + s_h \quad (4)$$

donde ρ es la densidad, h la entalpía, v el vector velocidad y p la presión, k la constante de transferencia de calor, T la temperatura y ϕ y s_h términos fuente.

2.5. Ecuación de radiación y modelo de radiación PI

Predice la cantidad de transferencia térmica en el fluido por radiación.

$$Q_{rad} = \sigma(T_{max}^4 - T_{min}^4) \quad (5)$$

$$q_r = -\frac{1}{3(a+\sigma)-C\sigma_s} \nabla G \quad (6)$$

donde Q_{rad} es el calor de radiación, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T_{max} la temperatura máxima medida y T_{min} la temperatura mínima medida, a es el coeficiente de absorción, C es el coeficiente de función de fase anisotrópica lineal y G es la radiación incidente.

3. Modelo geométrico

En este trabajo se desarrolló un modelo numérico para describir el proceso de transferencia de calor en una teja fabricada de PP reciclado. La parte exterior de la teja es calentada por radicación solar incidente. La Figura 2 muestra el diagrama de flujo del proceso utilizado para realizar el análisis mediante técnicas de CFD.

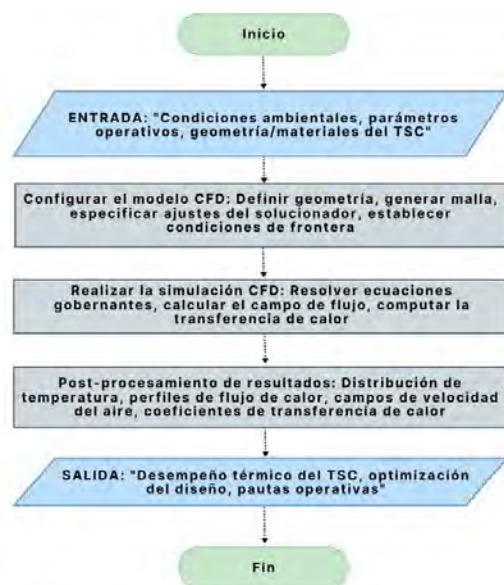


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso para la simulación CFD.

Se desarrollo el modelo tridimensional en CAD utilizando el software CFD ANSYS Fluent 2025 R1. El diseño consta de la teja rodeada de aire. La teja tiene una parte plana que es donde se ensambla la siguiente teja, y una parte semicircular. Las dimensiones de la teja se muestran en la Figura 3. La teja tiene

un volumen de 0.000227 m^3 y un área superficial de 0.098 m^2 .

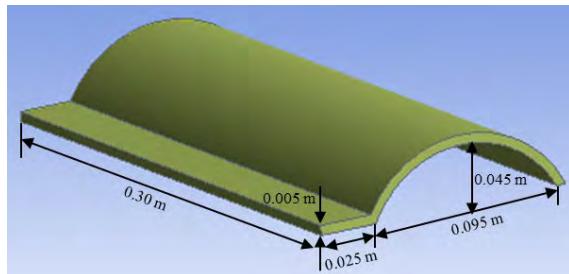


Figura 3. Dimensiones de la teja.

3.1. Generación del mallado y condiciones de frontera

El modelo realizado en CAD se malló en el módulo ANSYS Meshing, generando una malla tetraédrica híbrida, esto debido a la complejidad del modelo, obteniendo 5915 nodos y 27856 volúmenes de control. El modelo mallado se puede apreciar en la Figura 4. Para el análisis térmico se generó un dominio de control de $0.33 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ para el flujo de aire.

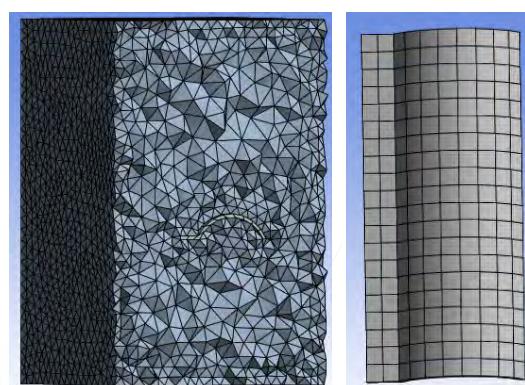


Figura 4. a) Modelo mallado y b) teja mallada.

Se utilizaron propiedades del PP en estado sólido, la densidad tiene un valor de 920 kg/m³, la capacidad calorífica 1900 J/kg*K y la conductividad térmica 0.2 W/m*K. Mientras que las propiedades del aire se calcularon en base a los datos proporcionados en el libro Holman (1999), la densidad tuvo un valor de 1.45 kg/m³, capacidad calorífica 5.00 J/kg*K, viscosidad 1.647X10⁻⁵ kg/m*s.

El modelo de turbulencia utilizado fue el k- ε realizable y la radiación fue calculada por el modelo P1. Los parámetros de iluminación utilizados fueron medidos experimentalmente con un radiómetro, obteniendo una radiación directa de 980 W/m² y una irradiación de 200 W/m², los cuales corresponden a la zona de Juventino Rosas, Gto. El modelo de turbulencia utilizado fue el k- ε realizable. Las ecuaciones gobernantes fueron acopladas mediante el modelo SIMPLE y la presión fue discretizada por el método de segundo orden. Las simulaciones se realizaron por un periodo de tiempo de 1000 iteraciones en espacios temporales de 0.01 s, lo que significa que se simularon 10 s de tiempo real.

Se realizaron las simulaciones y se obtuvieron mediciones de temperatura en 30 puntos repartidos en 3 zonas de la teja. Los primeros se realizaron del lado de la ceja a

una distancia de 0.02 m en dirección del eje y (zona 1), las segundas mediciones fueron en el centro de la teja (zona 2) y finalmente las tercera mediciones se realizaron a 0.08 m respecto a la ceja (zona 3), esto se puede apreciar en la Figura 5.

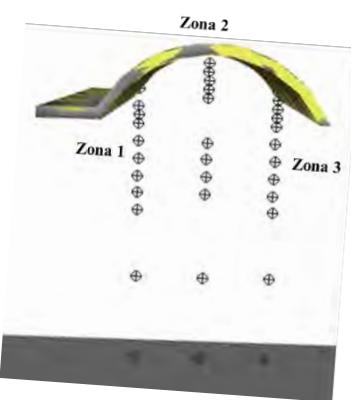


Figura 5. Puntos para mediciones de temperatura.

El sistema de estudio para pruebas experimentales consiste en colocar la teja sobre dos vigas de madera, quedando libre toda la parte media de la teja. El sistema fue colocado en la azotea de una casa en Juventino Rosas, Gto., donde se realizaron mediciones de radiación con un radiómetro marca Solar Power Meter modelo SM206-SOLAR y cambios de temperatura en la superficie superior e inferior de la teja. Se midió también la velocidad del viento con un anemómetro de la marca BENETECH modelo GM8902. Las mediciones se

realizaron cada dos minutos la primer media hora, después se realizaron cada 0.5 h por un lapso de 6 h. El sistema de estudio se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Sistema de estudio para radiación sobre la teja de PP reciclado.

4. Resultados

4.1. Diseño del molde y fabricación de la teja

El molde de acero para fabricar tejas fue manufacturado con materiales reciclados, buscando que se pudiera comprimir el material fundido para garantizar que la teja presente un acabado liso y sin poros, este se puede apreciar en la Figura 7a.

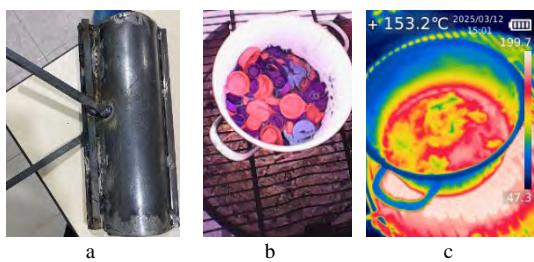


Figura 7. a) Molde para fabricar tejas, b) Tapas de gaseosa (PP) y c) Fotografía térmica de PP fundido.

Se recolectaron tapas de bebidas gaseosa y se lavaron con agua y jabón para retirar el polvo y los contaminantes que pudiera tener. Estas tapas se fundieron en un recipiente de acero (Figura 7b) alcanzando una temperatura máxima de 473 K (Figura 7c), la cual fue medida con una cámara térmica UNI-T modelo UTi2608. El proceso de fundición del PP reciclado duró un aproximado de 0.66 h y se dejó enfriar por 2 horas, alcanzando una temperatura final de 313 K.

La teja fabricada tiene un espesor de 0.005 m y un peso de 0.315 kg, esta es mostrada en la Figura 8.



Figura 8. Teja fabricada de PP reciclado.

4.2. Resultados experimentales

Se realizaron mediciones de temperatura sobre las superficies inferior y superior, iniciando con una temperatura de 310.25 K esto se puede observar en la Figura 9. Las temperaturas se incrementaron de forma acelerada debido al aumento de radiación solar. La superficie superior (línea azul)



alcanzó una temperatura máxima de 332.25 K a las 14:30 h, mientras que la temperatura mínima medida sobre esta superficie fue de 301.45 K a las 10:30 h. Las mediciones de temperatura máxima y mínima en la parte inferior (línea naranja) fueron de 329.65 K y 299.05 K respectivamente. Estas mediciones muestran que la parte expuesta directamente a la radiación solar se calienta más rápidamente. La temperatura promediada de la teja fue de 319.10 K, lo que indica que el calor generado provoca un incremento de temperatura de 8.85 K a partir de iniciado el experimento. Estos resultados indican que la teja puede funcionar como un buen aislante ya que la transferencia de calor del exterior hacia el interior es muy baja.

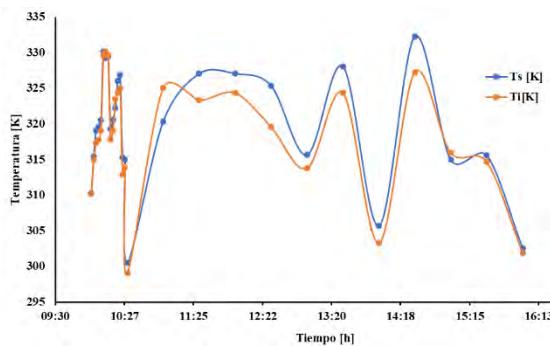


Figura 9. Gráfico de temperatura [K] contra tiempo [h] en las superficies superior (Ts) e inferior (Ti).

El gráfico muestra que la temperatura no se mantiene constante, sino que presenta

incrementos y disminuciones, esto debido a la presencia de nubosidad, lo cual limitó la ganancia de energía térmica, además de que también se presentan ventarrones, lo que provoca que la temperatura disminuya por efecto convectivo.

Se realizaron mediciones de la radiación solar que incide sobre la teja y es presentada en la Figura 10. La medición inicial de la radiación fue de 271.9 W/m², alcanzando un máximo de 490.3 W/m² a las 12:00 h y un mínimo de 111.3 W/m² a las 15:00 h. La disminución de la radiación se debió a la presencia de nubes. La radiación medida promediada fue de 292.38 W/m². La radiación solar mostró una correlación directa con la variación de temperatura, siendo el factor dominante en el comportamiento térmico observado.

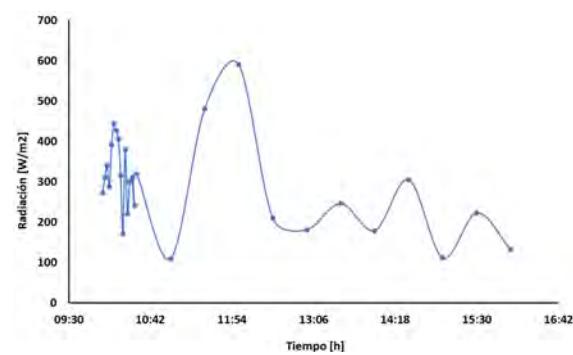


Figura 10. Gráfico de radiación solar [W/m²] contra tiempo [h].

El efecto del movimiento del aire sobre la temperatura de la teja desempeña un papel

importante, pues se genera transferencia de calor por convección. Por esta razón se midió la velocidad del aire junto con las temperaturas y la radiación. Las mediciones se presentan en la Figura 11. Las velocidades bajas favorecen el calentamiento de la teja, inclusive si la radiación es baja. La velocidad máxima registrada fue de 4.05 m/s a las 16:00 h, mientras que la más baja fue de 0.101 m/s a las 13:00 h. El promedio de velocidad durante experimento fue de 1.47 m/s. El aumento de la velocidad del viento intensificó la disipación de calor en las superficies, favoreciendo la convergencia de T_s y T_i hacia valores muy próximos entre sí. De manera general, se observa que el viento tuvo un papel secundario en las primeras horas del día, pero se volvió determinante en la fase final al acelerar el enfriamiento de la teja.

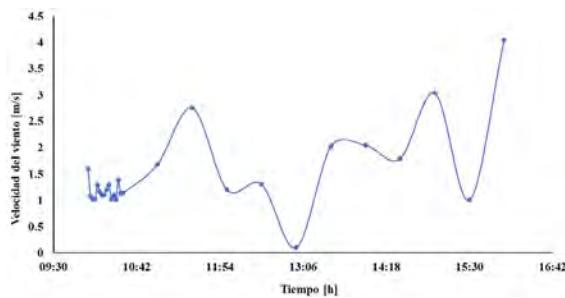


Figura 11. Gráfico de velocidad del viento [m/s] contra tiempo [h].

4.3. Resultados numéricos

Se graficaron los contornos de temperatura generados por la radiación solar sobre la teja, estos se pueden apreciar en la Figura 12. Los contornos muestran cómo se distribuye la temperatura de la teja sobre el ambiente. La parte que está en la zona 2 es la más caliente alcanzando una temperatura de 294.48 K y disminuye conforme se aleja de esta zona, hasta llegar a la temperatura ambiente (293.15) en la parte más alejada de la teja. La diferencia entre la temperatura ambiente y la parte más caliente de la teja es de 1.31 K, con las mediciones obtenidas se puede determinar que aunque la incidencia de los rayos solares sea perpendicular, la distribución de la temperatura no será homogénea.

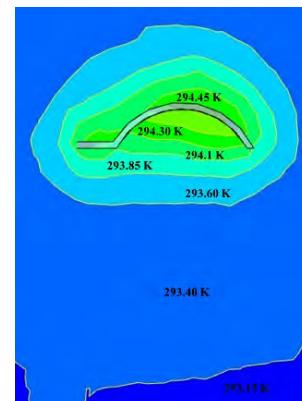


Figura 12. Contornos de temperatura de la teja sobre el plano YZ.

La grafica mostrada en la Figura 13 presenta las mediciones de temperatura realizadas en

el punto más cercano a la teja, en la parte media y en el punto más alejado, esto para los 3 lugares donde se realizó el muestreo. La temperatura inicial del sistema fue de 293.15 K. Cuando inicia el proceso de radiación sobre la teja, esta se comienza a calentar de forma casi lineal, su calentamiento es muy poco pues en punto que más se calienta alcanza los 294.09 K (línea amarilla), es decir, una diferencia de 0.95 K. el punto central es donde se mide la temperatura más alta, esto debido a que la incidencia de la radiación es perpendicular a este punto. En el punto más cercano en la zona 3, se alcanzó una temperatura de 293.98 K (línea azul) y la zona 1 reporto las temperaturas más bajas, con un máximo de 293.81 K (línea roja). Los puntos medios la temperatura máxima alcanzada fue de 293.71 K (línea azul cielo), lo que indica que se calentó 0.56 K, y en el punto medio que menos se calentó fue el de la zona 1 teniendo una diferencia de 0.25 K. Los puntos bajos no presentaron diferencias significativas, pues en la zona 3 solo se ascendió la temperatura 0.01 K. Aunque la distribución de temperaturas no es homogénea, se puede definir a la teja fabricada con material reciclado como un buen aislante, por lo que puede ser utilizado este material en construcciones civiles.

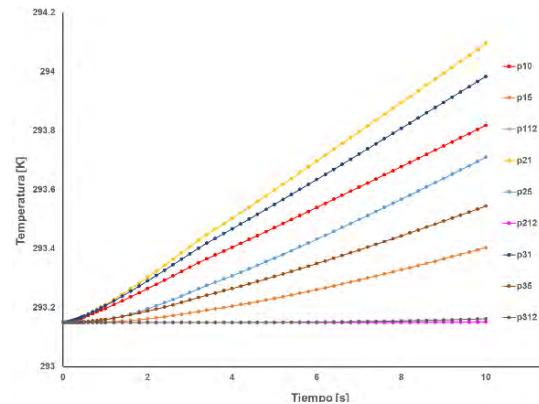


Figura 13. Gráfico de contra Temperatura [K] contra tiempo [s], en los puntos de medición.

La Figura 14 muestra un gráfico de tiempo contra temperatura de las superficies inferior y superior de la teja. Las mediciones muestran un calentamiento casi lineal, en el cual la temperatura inicial es de 393.15. La superficie inferior de la teja (línea naranja) se calentó 1.18 K, pues su temperatura final fue de 294.33 K, mientras que la superficie superior alcanzo una temperatura de 294.48 K, es decir, se obtuvo un incremento de 1.31 K. esto significa que la diferencia de temperatura entre las zonas más calientes fue de 0.15 K.



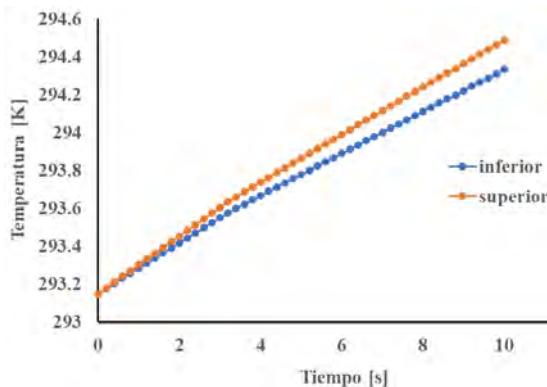


Figura 14. Gráfico de Temperatura [K] contra tiempo [s], medidos en la superficie superior e inferior de la teja.

Se realizaron además mediciones de presión y velocidad del aire. La presión no obtuvo variaciones respecto al tiempo, esto también sucedió con las mediciones de velocidad, ya que el aire solo tendría movimiento provocado por el gradiente de temperatura, el cual es muy pequeño y no tiene efecto sobre el movimiento del aire.

5. Conclusiones

Se diseñó y fabricó el molde de acero para fabricar una teja de PP reciclado. Se manufacturó una teja con un peso de 0.315 kg y con un espesor de 0.005 m. El PP fundido se adapta de forma adecuada al molde, por lo que la teja obtuvo la forma deseada. El proceso de fabricación duro un tiempo aproximado de 2.66 h, pues el proceso se

realizó de forma artesanal y el enfriamiento fue por convección libre.

Se realizó el experimento de calentamiento en la ciudad de Juventino Rosas Gto. Se midió la temperatura, la radiación y la velocidad del viento. Se determinó que la radiación es el principal factor que provoca el calentamiento de la teja, aunque el aire también influye debido al efecto de la convección. La temperatura máxima medida fue de 332.25 K, promediando una temperatura de 319.76 K en la parte superior de la teja y una temperatura promedio de 318.10 K en la parte inferior. La radiación solar promediada fue de 292 W/m² y el promedio de velocidad registrada fue de 1.47 m/s. Se presentaron nubosidades en el transcurso de las mediciones, lo cual afecta en las mediciones de las temperaturas.

El modelo simulado mediante técnicas CFD consideró las condiciones de radiación de la zona de Juventino Rosas, Gto., pero no se consideró velocidad del viento. El modelo de radiación P1 fue adecuado para simular la radicación solar ejercida sobre la teja. La temperatura se incrementó en 1.31 K en la parte superior de la teja y se obtuvo una diferencia de 0.15 K respecto a la parte inferior de la teja. Los contornos de temperatura muestran que el calentamiento

no es uniforme, sino que tiene a calentarse más hacia la zona 3 de la teja, esto significa que la ceja que tiene como soporte afecta la distribución de temperatura.

Referencias bibliográficas

Albores-González, M. L., Jiménez-Reyes, A., Cimadevilla-Cervera, A., Tena-Gutierrez, F. (2023). National Inventory of Sources of Plastic Pollution (INFCP). At <http://www.gob.mx/semarnat>. Ministry Of Environment and Natural Resources. Retrieved March 4, 2025, from https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2023/NFCP_2023.pdf.

Alsabri, A., Tahir, F., Al-Ghamdi, S.G. (2022). Environmental impacts of polypropylene (PP) production and prospects of its recycling in the GCC region. Materialstoday: Proceedings, 56, 4, 2245-2251.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.574>

ANSYS FLUENT, 2021, User's and theory guide. Canonsburg, Pennsylvania, USA: ANSYS, Inc.

Ayeleru, O.O., Dlova, S., Akinribide, O.J., Ntuli, F., Kupolati, W.K., Marina, P.F., Olubambi, P.A. (2020). Challenges of plastic waste generation and management in sub-

Saharan Africa: a review. Waste Management, 110, 24-42. 10.1016/j.wasman.2020.04.017

Bora, R.R., Wang, R., You, F. (2020). Waste Polypropylene Plastic Recycling toward Climate Change Mitigation and Circular Economy: Energy, Environmental, and Technoeconomic Perspectives. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8, 43, 16350-6363.

<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.0c06311>

Chia, E., Nguyen, H.B.K., Le, K.N., Bi, K., Pham, T.M. (2025). Performance of hybrid basalt-recycled polypropylene fibre reinforced concrete. Structures, 75, 108711. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108711>

Eriksen, M.K., Damgaard, A., Boldrin, A., Astrup, T.F., (2018). Quality assessment and circularity potential of recovery systems for household plastic waste. Journal of Industrial Ecology, 23, 1, 156-168. <https://doi.org/10.1111/jiec.12822>

Gijsman, P., Fiorio. R. (2023). Long term thermo-oxidative degradation and stabilization of polypropylene (PP) and the implications for its recyclability. Polymer Degradation and Stability, 208, 110260.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110260>

Holman, J.P. (1999). Heat Transfer. Ed. McGraw Hill. ISBN: 0-07-0229618-9

Kulkarni, P., Ravekar, V., Rama-Rao, P., Waigokar, S., Hingankar, S. (2022). Recycling of waste HDPE and PP plastic in preparation of plastic brick and its mechanical properties. Cleaner Materials, 5. 100113.

<https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100113>

Mannheim, V., Simenfalvi, Z. (2020). Total Life Cycle of Polypropylene Products: Reducing Environmental Impacts in the Manufacturing Phase. Polymers (Basel), 12, 9, 1901.

<https://doi.org/10.3390/polym12091901>

Mohan, H.T., Jayanarayanan, K., Mini, K. (2022). A sustainable approach for the utilization of PPE biomedical waste in the construction sector. Engineering Science and Technology, an International Journal, 32, 101060.

<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.09.006>

Qian, K., Wang, L., Teng, J., Liu., G. (2024). Strategies and technologies for sustainable plastic waste treatment and recycling.

Environmental Functional Materials, 19.

<https://doi.org/10.1016/j.efmat.2025.01.004>

Ragaert, K., Delva, L., Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. Waste Management, 69, 24-58.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>

Sharma, P., Sharma, P., Abhishek, K. (2024). Sampling, separation, and characterization methodology for quantification of microplastic from the environment, Journal of Hazard. Materials Advances, 14, 100416.
<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100416>

Vanapalli, K.R., Samal, B., Dubey, B.K., Bhattacharya, J. (2019). Emissions and Environmental Burdens Associated with Plastic Solid Waste Management. Plastic to Energy, Fuel, Chemicals, and Sustainability Implications Plastics Design Library, 313-342. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813140-4.00012-1>

Wu, W., Shah, F., Ahmad, A., Ma, C., Chan, F.K.S., Zou. G. (2025). Challenges and solutions for global plastic governance. The Innovation, 6, 8, 100943.
<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100943>