

Investigación mecánica y térmica de un componente para cubierta prefabricada de la vivienda

Mechanical and Thermal Investigation of a Component for Prefabricated Housing Roofing

Neín Farrera-Vázquez, Universidad Autónoma de Chiapas, nfarrera@uvmnet.edu

Gabriel Castañeda-Nolasco, Universidad Autónoma de Chiapas, gnolasco2@gmail.com

José Eduardo Aguilar-Joo, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, jose.aguilarj@e.unicach.mx

Edgar Fabricio Torija-Gutiérrez, Universidad Autónoma de Chiapas, edgar.torija@unach.mx

José Luis Jiménez-Albores, Universidad Autónoma de Chiapas, luis.jimenez@unach.mx

Fecha de recepción: 10/09/2024

Fecha de aceptación: 12/11/2024

<https://doi.org/10.25009/e-rua.v17i07.281>

Resumen

El estudio experimental aborda el diseño, construcción y evaluación de un componente de cubierta prefabricada destinado a su implementación en vivienda. Este componente modular, que forma la superficie techada de la casa, está compuesto por materiales convencionales, entre ellos mortero y ladrillo rojo cocido, este último producido típicamente en la meseta central de Chiapas, México. Sus dimensiones estándar son 76 cm x 81 cm x 3 cm, con un peso promedio de 46 kilogramos. Las pruebas mecánicas y térmicas arrojaron resultados significativos, con una capacidad estructural robusta y un desempeño térmico favorable del componente prefabricado, posicionándolo como una opción prometedora para la construcción de vivienda en la región. Este enfoque innovador ofrece un potencial considerable para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las soluciones de vivienda en contextos similares, destacando la importancia de la investigación experimental en la optimización de materiales y técnicas de construcción en el sector de la vivienda.

Palabras clave:

prefabricado, techo, plataforma, mampostería.

Abstract:

The experimental study focuses on the design, construction, and evaluation of a prefabricated roof component intended for implementation in housing. This modular component, which forms the roofed surface of the house, is made of conventional materials, including mortar and fired red bricks, the latter typically produced in the central plateau of Chiapas, Mexico. Its standard dimensions are 76 cm x 81 cm x 3 cm, with an average weight of 46 kilograms. Mechanical and thermal tests yielded significant results, demonstrating a robust structural capacity and favorable thermal performance of the prefabricated component. This positions it as a promising option for housing construction in the region. This innovative approach offers considerable potential to enhance the efficiency and sustainability of housing solutions in similar contexts, highlighting the importance of experimental research in

optimizing materials and construction techniques within the housing sector.

Keywords:

prefabricated, roof, deck, brickwork

Introducción

Los sistemas constructivos de vivienda han ido evolucionando, utilizando consistentemente materiales convencionales como cemento, agregados y elementos metálicos. Sin embargo, su demanda ha provocado un aumento significativo en el consumo energético, impulsado exponencialmente por el crecimiento poblacional. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (AIE), las emisiones de CO₂ relacionadas con la industria de la construcción aumentaron a 10 gigatoneladas, representando el 37% de todas las emisiones globales en 2022, ya que este sector fue responsable de más del 34% de la demanda energética. En México, un problema importante son los costos de la construcción, los cuales han aumentado fuertemente debido al aumento en los precios de los insumos, registrándose una inflación anual de hasta 8.56% en

este sector durante 2022, siendo los más afectados los precios del cemento (18.5%), arena (16.7%), grava (16.3%) y mampostería (9.5%).

Cabe mencionar que en la región sureste de México, el uso de láminas metálicas para techos ha sustituido significativamente a las tradicionales tejas. Este cambio se ha observado principalmente en zonas rurales y periurbanas. Las láminas metálicas se caracterizan por absorber y transmitir el calor al interior de las viviendas, afectando negativamente el confort térmico. Además, son susceptibles a sufrir daños por fuertes vientos, ciclones y otros fenómenos naturales que se presentan en la región.

Por ello, es imprescindible reconsiderar soluciones basadas en sistemas que permitan el desarrollo de elementos constructivos eficientes mediante la adopción de diseños de materiales y técnicas innovadoras. Según Peter et al. (2010), los métodos convencionales in situ para construir viviendas asequibles requieren mucho tiempo, mientras que la tecnología prefabricada permite una construcción más rápida y ofrece una mejor eficiencia económica. Desde esta perspectiva, surge la prefabricación, definida como la producción de elementos constructivos lejos de su destino. Este método se ha observado en construcciones de edificaciones que datan de mediados del siglo XX, donde los informes técnicos a menudo indican que estas estructuras están en buenas condiciones, mostrando solo tipos específicos de daños.

En el campo de la construcción prefabricada, se han propuesto diversas estrategias para mejorar la fabricación de elementos prefabricados. Un ejemplo notable es el trabajo de Thanoon et al. (2010) [5], quienes introdujeron un sistema de losa de piso prefabricada

compuesto por componentes de ferrocemento y ladrillo unidos con mortero. Su estudio evaluó la respuesta estructural bajo condiciones de carga de flexión, produciendo una capacidad de momento de 15 kN-m/m con una carga de iniciación de grieta al 30% de la carga de falla última. Este desempeño es muy similar al de una losa de hormigón armado unidireccional.

Asimismo, Lakshmikandhan et al. (2017) diseñaron y analizaron mecánicamente un panel vertical construido de hormigón liviano infundido con microesferas de poliuretano. Su investigación reveló una resistencia máxima a la compresión de 12,87 N/mm² y una deformación correspondiente de aproximadamente 4,25 mm. En particular, el inicio del agrietamiento inicial ocurrió alrededor del 45% de la carga última. Estos hallazgos subrayan la efectividad de las formulaciones de hormigón liviano para lograr la integridad estructural al tiempo que brindan información sobre las capacidades de carga y el desempeño de deformación bajo estrés mecánico. En este sentido, es evidente que los elementos prefabricados pueden encontrarse con escenarios específicos que comprometan su respuesta estructural, lo que motiva la implementación de nuevas configuraciones para mejorar su respectivo comportamiento. Esto fue ejemplificado por Mahdi et al. (2022) a través del desarrollo de estructuras compuestas en forma de caja diseñadas para su uso como sistemas de techado resistentes al viento. Estas estructuras utilizan hormigón reforzado con fibra de ultra alto rendimiento (UHP-FRC) junto con láminas de acero galvanizado perfiladas para techos, ancladas con tornillos, y espuma de poliestireno expandido (EPS) instalada in situ para producir un sistema liviano. Esta solución propuesta logró una deformación máxima de 60,1 mm, lo que evitó de

manera efectiva el agrietamiento por flexión en relaciones de profundidad de corte significativas.

Vale la pena señalar que la prefabricación pretende conservar ciertos materiales, como el acero. Bernardi et al. (2020) [8] demostraron que el modo de falla de un elemento de techo de placa plegada prefabricada está fuertemente influenciado por la cantidad de refuerzo transversal, lo que en ciertos casos conduce a un sobrediseño, lo que requiere optimización. En consecuencia, ha surgido un nuevo sistema de paneles de ladrillo prefabricados para su uso en la construcción de viviendas de bajo costo, viable debido a su simplicidad, facilidad de adopción y rentabilidad [9]. La propuesta más estudiada con estas características es la propuesta conocida como Domotej, desarrollada por Castañeda-Nolasco (2020), logrando una carga a primera fisura de 1763 kg-fuerza, aproximadamente el 20% de la capacidad de carga de ruptura de 8588 kg-fuerza, indicando un comportamiento similar al de una losa nervada en una dirección. Bajo esta configuración, se ha demostrado que los ladrillos sirven como material aislante ligero, natural, económico y efectivo, resistiendo parcialmente de manera simultánea fuerzas de compresión y flexión dentro del esquema de configuración compuesta.

Sin embargo, para contribuir a la economía circular, se incluyen otros elementos que permiten reducir costos al tiempo que se implementa el concepto de reciclaje. Así lo demostraron Vargas et al. (2014), con la propuesta de utilizar envases reutilizables a base de botellas PET, latas de aluminio y tetra pak en lugar de componentes cerámicos para las losas. Lograron una resistencia a la flexión de 36-38 kN y una reducción del 20% en la densidad media, resultando en beneficios en fabricación,

transporte, costo y peso total de la estructura. En un caso similar, Lima et al. (2018) evaluaron el desempeño estructural de un bloque liviano para losas prefabricadas unidireccionales de concreto reforzado con fibra corta de sisal (SSFRC) que contiene agregados naturales y reciclados. Los resultados mostraron un desempeño estructural mejorado con una carga máxima de 1.8 kN en una deflexión central cercana a 13 mm. Con base en lo anterior, el objetivo de la investigación es realizar un estudio experimental de una cubierta prefabricada hecha con ladrillos de arcilla roja cocida y mortero como relleno, para demostrar su funcionalidad para reemplazar láminas metálicas de uso común, así como promover el uso de tejas modificadas en términos de tipo, tamaño, peso y resistencia, apuntando a características que brinden un confort térmico aceptable al interior de la vivienda.

Materiales y métodos

Para desarrollar el trabajo experimental encaminado al estudio estructural de un componente propuesto para cubiertas prefabricadas denominado "Tejuelón", se requiere un análisis de sus elementos constitutivos, como son los ladrillos rojos cocidos y el mortero. Esto se realizará con base en la metodología de Vargas et al. (2014) y Castañeda-Nolasco (2020).

• Caracterización de Materiales para Cubiertas Prefabricadas

Se realiza el estudio mecánico de los elementos individuales del componente de cubierta prefabricada. Las dimensiones de los ladrillos rojos cocidos son de 130 x 260 x 25 mm, bajo la NMX-C-038-ONNCE-2014. A su vez, el mortero está constituido por una composición de cemento en una relación volumétrica de 1:3. En ambos casos, se realizarán pruebas de resistencia a la compresión y absorción



Figura 1. Máquina de ensayo a compresión.



Figura 2. Componentes del componente de techado prefabricado (Tejuelón): A) ladrillo rojo cocido y B) mortero de cemento y arena.

de agua, tomando como referencia las normas mexicanas vigentes.

• Ensayo de Resistencia a la Compresión

Para determinar la resistencia a la compresión de los elementos del componente utilizado en la cubierta prefabricada, se considera la carga que puede soportar hasta que se presente la falla, de acuerdo a la NMX-C-036-ONNCE-2013. El equipo utilizado en este experimento consistió en una máquina de ensayos a compresión marca ELVEC modelo E660-5, como se muestra en la Figura 1.

En el caso del mortero, se tomaron mediciones con probetas cúbicas con dimensiones de 50 mm por lado, realizadas a los 3, 7 y 28 días para conocer



Figura 3. Especímenes sumergidos en un recipiente con agua.

su comportamiento en el tiempo. Adicionalmente, las muestras de ladrillo rojo cocido se almacenaron durante 48 horas sin apilar y separadas por no menos de 13 mm, a una temperatura ambiente de 24°C y una humedad relativa inferior al 80%. Cabe destacar

que se tomaron cinco especímenes de cada material, previamente sometidos a un recubrimiento con una capa de pasta de yeso para asegurar una distribución uniforme de la carga durante el ensayo, como se muestra en la Figura 2. La resistencia promedio a la compresión se obtiene mediante la:

$$R = \frac{P_{max}}{A}$$

Donde R es la resistencia a la compresión (kg/cm²), P_{max} es la carga máxima (kg) y A es el área de la sección transversal de la muestra (cm²).

• **Prueba de Absorción de Agua**

Los componentes del elemento propuesto se caracterizaron utilizando la técnica de absorción de agua prescrita por la norma mexicana NMX-C-037-ONNCE-2005. Cabe destacar que cada muestra se secó en horno, se retiró periódicamente y se pesó hasta que la diferencia no fuera mayor al 0.2% de la masa de las piezas. Posteriormente, las muestras secas se sumergieron en agua durante 24 horas, como se muestra en la Figura 3.

Después de este período, se retiran y se limpia el agua superficial con un paño; también se secan los interiores de las celdas y se vuelve a determinar su masa. Luego, se calcula el porcentaje de absorción de agua utilizando la ecuación (2):

$$A = \frac{M_{sss} - M_s}{M_s}$$

Donde A es el porcentaje de absorción (%), MSSS es la masa saturada y superficialmente seca (kg), y MS es la masa seca de la muestra (kg).

• **Elaboración del componente para techo prefabricado**

La construcción del componente prefabricado de techo mide 84 x 76 cm,



Figura 4. Refuerzo del componente prefabricado de techo denominado "Tejuelon"

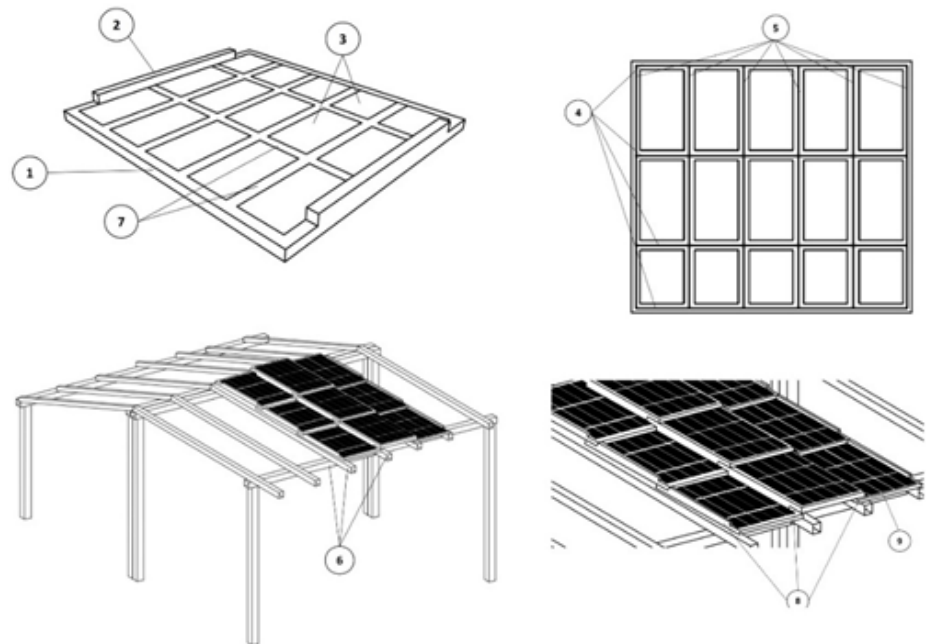


Figura 5. Vista esquemática del molde e instalación del componente de cubierta prefabricada



Figura 6. Colocación del extensómetro en la parte inferior central del componente de cubierta prefabricada

con un espesor de base de 3 cm. Este sistema consiste en ladrillos de arcilla roja cocida unidos con cemento y arena en una proporción de 1:3, reforzados en ambos sentidos con varillas de 3/8", como se muestra en la Figura 4.

Para su elaboración se requiere del uso de un molde metálico que defina el perímetro de la base y permita la elaboración de las piezas (Figura 5). Su componente modular (1) tiene forma rectangular y consta de 15 piezas de ladrillo de arcilla cocida (3) separadas

adecuadamente en una matriz de 5 x 3, donde se coloca una malla metálica que contiene cuatro hileras (4) y seis columnas (5) en las separaciones o canales, sirviendo como soporte o esqueleto asegurando la dureza, resistencia, flexibilidad y resiliencia del elemento. Los elementos se unen mediante mortero con las características y proporciones antes mencionadas para formar una sola pieza. En la práctica, el componente modular se coloca sobre estructuras (6) preferentemente metálicas a una distancia adecuada que permita sellar las juntas (8), impidiendo así la entrada de polvo, agua u otros factores externos al edificio. La unión de los elementos (1) al integrarse forma una cubierta con las dimensiones requeridas que tiene la pendiente adecuada para permitir el flujo del agua de lluvia a través de los canales (9), los cuales están delimitados por las bridas o salientes de unión (2).

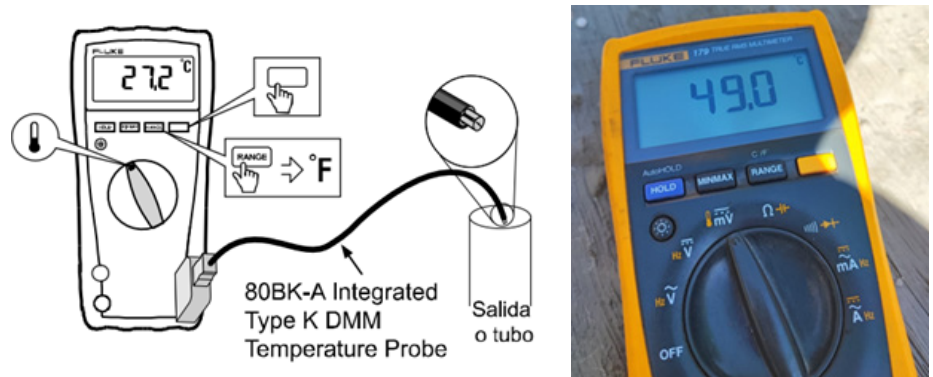


Figura 7. Medición de temperatura superficial en las partes superior e inferior del prototipo.

Elementos	Edad de la muestra	Resistencia a la compresión (kp/cm ²)
Mortero cemento: arena (1:3)	3 días	63.877 ± 4.063
	7 días	112.056 ± 19.866
	28 días	234.801 ± 25.342
Tabique rojo	----	169.443 ± 48.589

Table 1. Results of compressive strength for prefabricated roof component elements.

Es fundamental que los resultados de la construcción de la cubierta prefabricada puedan evaluarse a través de diversos factores, como la calidad y precisión de las piezas, la resistencia y durabilidad de los materiales utilizados y la correcta instalación de los componentes en obra.

• **Caracterización experimental de la cubierta prefabricada**

Ensayo experimental de flexión

La deformación de un elemento estructural es un cambio en su estado físico debido a una fuerza mecánica externa. En este ensayo, la probeta se colocará sobre dos vigas de PTR de 4 pulgadas, y se posicionará un extensómetro digital en la parte inferior central del componente de cubierta prefabricada, como se muestra en la Figura 6.

Luego, se simulan cargas externas para el monitoreo de la deformación por flexión, colocando bolsas de 20 kg

Elemento	Masa saturada (g)	Masa seca (g)	Porcentaje de absorción (%)
Tabique rojo	1180.34 ± 14.41	1426.65 ± 14.46	20.87 ± 0.146

Tabla 2. Resultados de la absorción de agua

de manera incremental hasta 100 kg. Posteriormente, se agregan bolsas de 10 kg, superando hasta 120 kg. Finalmente, se realizaron ensayos por triplicado para obtener los resultados.

• **Medición de temperatura superficial**

Durante la prueba, se tomaron mediciones de temperatura superficial en la parte superior e inferior del componente de cubierta prefabricada durante días de radiación solar directa, durante 12 horas (7 – 19 horas). Se utilizó un multímetro Fluke 179 con sensor de temperatura de contacto y se corroboró con una cámara termográfica. Los registros de temperatura se realizarán cada 30 minutos para una mejor comprensión del fenómeno.

Resultado y discusión

Characterization of Materials for Prefabricated Roofs

En la Tabla 1 se presentan los resultados del mortero a los 3, 7 y 28 días, así como el del ladrillo rojo cocido, cada uno obtuvo sus respectivos errores estándar con un intervalo de confianza del 95%.

En la Tabla 2 se muestra la absorción de agua del ladrillo rojo cocido para analizar su función impermeable al fuego, considerado el principal elemento componente de las cubiertas prefabricadas.

En este contexto, cabe señalar que estos materiales fueron investigados por su significativa resistencia a la



compresión y facilidad de manipulación para la construcción de losas y techos prefabricados. Se reconoce que estos materiales son relativamente livianos en comparación con el hormigón armado, lo que es ventajoso para el transporte, el ensamblaje y la eficiencia estructural general. Por lo tanto, la elección de los materiales permite prácticas de construcción eficientes, garantiza la integridad estructural bajo cargas variables y logra un rendimiento óptimo en sistemas de losas prefabricadas.

3.2. Prueba experimental de flexión

El rendimiento estructural de las losas se analizó a través de la resistencia a la flexión. Los resultados de carga y desplazamiento por flexión para cada prototipo y los promedios para diferentes cargas se muestran en la Tabla 3. Este ligero incremento en el desplazamiento se debe a la cantidad de carga aplicada al componente debido a la composición del material de relleno utilizado, como se muestra en la Figura 8.

Con base en los resultados obtenidos de la caracterización por flexión de la cubierta prefabricada, se observa una tendencia de desplazamiento polinomial con un coeficiente R² de 0.9946, asegurando un óptimo cumplimiento de su función estructural bajo las normas mexicanas de construcción. Además, es importante señalar que la cubierta prefabricada propuesta presenta una relación proporcional de 0.049 mm/kp de carga aplicada, lo cual es satisfactorio en comparación con lo encontrado por Vargas et al. (2014), que permitía hasta 0.071 mm/kp. Esta discrepancia puede atribuirse a la geometría y diseño inherente de los componentes del sistema de cubierta. En este punto, los componentes del sistema de cubierta pueden tener sus elementos de relleno compuestos de cualquier material, siempre y cuando resista las tensiones del recubrimiento

Carga (kp)	Desplazamiento (mm)			
	T-1	T-2	T-3	Average
20	0.06	0.53	0.14	0.243 ± 0.285
40	0.87	1.91	0.91	1.230 ± 0.667
60	1.31	2.88	1.99	2.060 ± 0.891
80	2.82	3.39	2.88	3.030 ± 0.354
100	4.28	4.31	4.18	4.257 ± 0.077
110	4.70	4.85	4.64	4.730 ± 0.122
120	6.16	6.40	5.09	5.883 ± 0.789

Tabla 3. Desplazamientos por flexión respecto a la carga aplicada en los prototipos

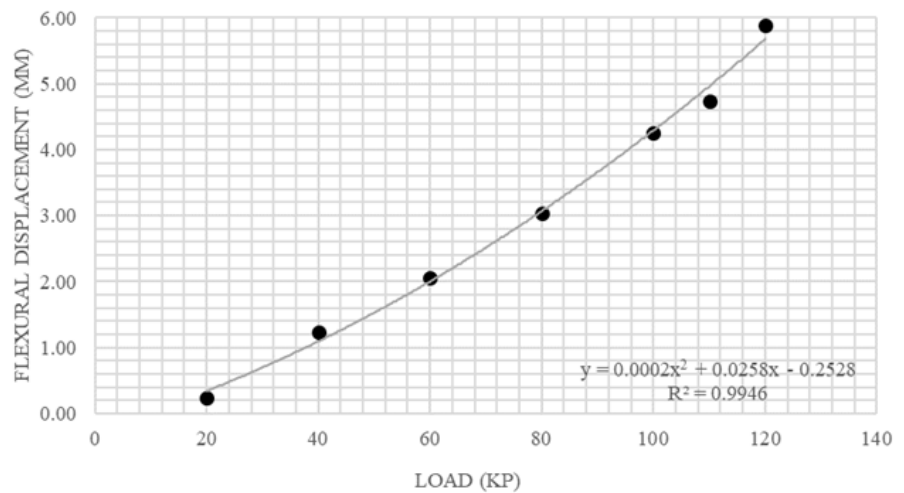


Figura 8. Desempeño por flexión debido a la carga aplicada

aplicado sobre la losa y no induzca irregularidades durante la instalación de la cubierta, cumpliendo así la función de encofrado temporal. Esta adaptabilidad subraya la versatilidad del sistema de cubierta prefabricada, permitiendo flexibilidad en la selección de materiales al tiempo que garantiza la integridad estructural y la facilidad de instalación según los requisitos de construcción [9].

Con base en los resultados obtenidos de la caracterización por flexión de la cubierta prefabricada, se observa una tendencia de desplazamiento polinomial con un coeficiente R² de 0.9946, asegurando un óptimo cumplimiento de su función estructural bajo las

normas mexicanas de construcción. Además, es importante señalar que la cubierta prefabricada propuesta presenta una relación proporcional de 0.049 mm/kp de carga aplicada, lo cual es satisfactorio en comparación con lo encontrado por Vargas et al. (2014), que permitía hasta 0.071 mm/kp. Esta discrepancia puede atribuirse a la geometría y diseño inherente de los componentes del sistema de cubierta. En este punto, los componentes del sistema de cubierta pueden tener sus elementos de relleno compuestos de cualquier material, siempre y cuando resista las tensiones del recubrimiento aplicado sobre la losa y no induzca irregularidades durante la instalación de

la cubierta, cumpliendo así la función de encofrado temporal. Esta adaptabilidad subraya la versatilidad del sistema de cubierta prefabricada, permitiendo flexibilidad en la selección de materiales al tiempo que garantiza la integridad estructural y la facilidad de instalación según los requisitos de construcción [9]. Por otro lado, el alto coeficiente de correlación indica una fuerte relación entre la carga aplicada y el desplazamiento, demostrando la confiabilidad y previsibilidad del comportamiento estructural de la cubierta prefabricada bajo diferentes condiciones de carga. Esta validación empírica, junto con el cumplimiento de las normas de construcción establecidas, infunde confianza en el desempeño y durabilidad del sistema de cubierta prefabricada, facilitando así su adopción generalizada en proyectos de construcción en diversos contextos.

Surface Temperature Measurement Test

La Figura 9 muestra el comportamiento de la temperatura medida entre las partes superior e inferior del componente de cubierta prefabricada.

La temperatura máxima alcanzada en la superficie superior del componente es de 63.1°C, mientras que en su superficie inferior es de 53.8°C, ambas registradas a las 13:30 horas. Sin embargo, el gradiente máximo de temperatura registrado fue $\Delta T = 10.5^\circ\text{C}$ a las 12:30 horas; en otras palabras, se observa un diferencial de confort significativo cuando se alcanza la temperatura máxima del día, considerando que Tuxtla Gutiérrez, Chiapas experimenta un clima cálido subhúmedo.

Estas mediciones de temperatura proporcionan información valiosa sobre el desempeño térmico del componente de cubierta prefabricada, lo que indica su

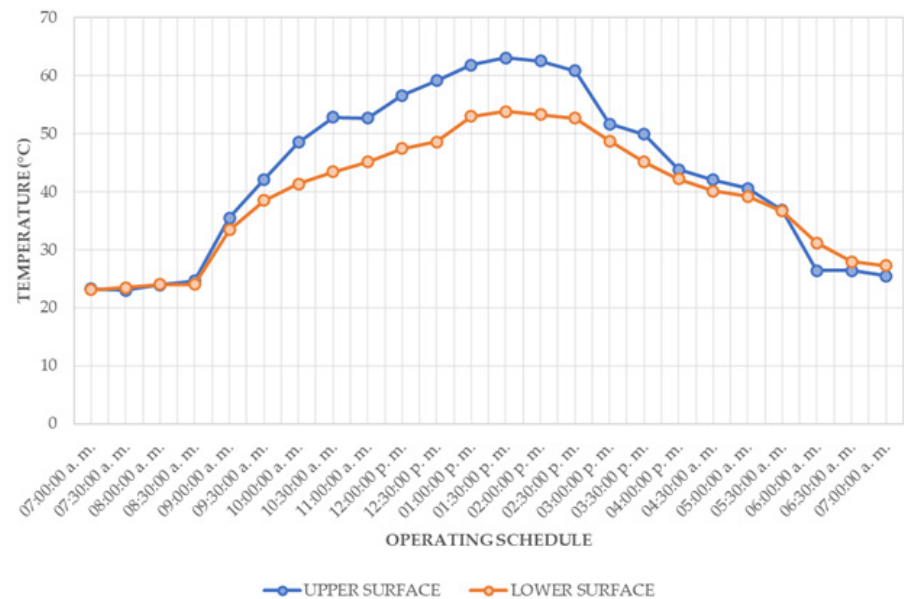


Figura 9. Curvas de temperatura de la superficie superior e inferior de la cubierta prefabricada capacidad para mitigar la transferencia de calor y mantener condiciones interiores confortables. Los diferenciales de temperatura observados entre las superficies superior e inferior del elemento subrayan sus propiedades de aislamiento térmico, que son cruciales para mejorar el confort de los ocupantes y la eficiencia energética en los edificios. Este hallazgo coincide con Castañeda-Nolasco (2020) [10], que enfatiza las estrategias sustentables como consideraciones integrales en la envolvente del edificio para demostrar la viabilidad térmica al reducir la transferencia de calor y mantener el confort térmico interior al mismo tiempo que se reduce el consumo de energía.

Sin embargo, es esencial considerar materiales locales que complementen la propuesta para mejorar aún más su eficiencia térmica, como aislantes orgánicos o inorgánicos. Estos materiales pueden contribuir a minimizar la transferencia de calor, optimizar el confort térmico y potencialmente reducir el consumo de energía para fines de calefacción y refrigeración. La integración de estos materiales en el diseño del techo prefabricado podría mejorar su desempeño térmico

general y alinearse con las prácticas de construcción sustentable destinadas a mejorar la comodidad de los ocupantes y reducir el impacto ambiental.

Conclusiones

El componente de cubierta prefabricada propuesto surge como una alternativa prometedora y viable para su aplicación en viviendas sociales, debido a sus características de fabricación. Se llevaron a cabo estudios exhaustivos que incluyeron análisis de constituyentes y pruebas en sitio para determinar el rendimiento y la idoneidad.

Después de examinar las propuestas, se determina que el componente exhibe una deformación despreciable, con un desplazamiento de solo 5,883 mm observado bajo una carga de 120 kg, alineándose así con los estándares regulatorios actuales y respaldando su aplicabilidad práctica. Además, vale la pena destacar el desempeño térmico encomiable demostrado por el componente propuesto. En un entorno de clima cálido subhúmedo, manifiesta un rendimiento térmico superior en comparación con los techos de hormigón armado, como lo demuestra un diferencial de temperatura máximo observado de $\Delta T = 10.5^\circ\text{C}$.

