

Ladrillos Eco-Lux fotoluminiscentes con carga solar para seguridad urbana pasiva

Nelida Alarcon Benavente¹; Rosa Concepcion Laqui Cutipa²; Valkiria Ibárcena Ibárcena³

^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U20221270@utp.edu.pe, U21221437@utp.edu.pe, valkiria.ibarcena@gmail.com

Resumen– La deficiente implementación de guías iluminadas en los bordillos de los espacios públicos, genera inseguridad en los transeúntes. En respuesta a ello, surge la creación de los ladrillos Eco-Lux con carga solar a partir de piedras fotoluminiscentes de aluminato de estroncio. Mediante una metodología experimental con enfoque cuantitativo, desarrollada en dos etapas, de diseño y ensayos. Los resultados demostraron la viabilidad del producto alcanzando una iluminancia estable por 10 horas, bajo condiciones reales, se demostró una ganancia térmica favorable durante el día lo que conlleva a que este sea un material con alta eficiencia energética. Además, supero la prueba de absorción de agua demostrando su viabilidad en zonas cálidas y con lluvias, e incluso húmedas. En cuanto a la resistencia, demostró cumplir su propósito en cuanto a su uso. Mientras que, a nivel de luminancia se obtuvieron favorables resultados las 3 primeras horas bajo condiciones reales con el ladrillo Eco-Lux 1. Se concluye que el ladrillo Eco-Lux con piedras fotoluminiscente de 1 mm es técnicamente viable como señalizador pasivo urbano, con buen rendimiento lumínico, especialmente en contextos de clima soleado durante el día.

Palabras clave– Clima soleado, iluminación nocturna, espacio público, señalización urbana, eficiencia energética.

I. INTRODUCCIÓN

La deficiente iluminación de los espacios públicos es considerada por el 56,8 % de la población como uno de los principales factores que contribuyen a la percepción de inseguridad en un entorno barrial [1], como consecuencia el 50% de los ciudadanos evitan frecuentar este tipo de espacios [2], siendo las mujeres y las personas mayores los grupos más afectados, en horarios nocturnos [3].

Ante esta problemática, [4] y [5] han creado materiales fotoluminiscentes con capacidad de absorber luz solar y, posteriormente, liberar dicha energía luminosa durante la noche [6], [7], [8], [9] haciendo uso del luxómetro [10] y luminancímetro, para medir la iluminancia y la luminancia, lo que permite cuantificar la intensidad de luz recibida en una superficie y el brillo percibido por el observador, fundamentales para analizar el rendimiento fotoluminiscente de los materiales.

Para los ensayos de durabilidad superficial se implementó una simulación de lluvia, útil para reproducir condiciones de exposición a la intemperie y evaluar la resistencia de los recubrimientos y materiales frente a la humedad y el desgaste hídrico [11], [12], [8]. En el análisis mecánico, utilizaron una máquina de ensayo universal para determinar la resistencia a

la compresión, midiendo la carga máxima que el material puede soportar antes de fallar, lo cual es un parámetro esencial para validar su aplicación estructural [8], [13], [14], [15], [16]. Por otro lado, la estabilidad térmica de las muestras fue evaluada mediante un análisis térmico [17] y calorimetría diferencial de barrido para identificar los cambios de fase, reacciones térmicas y capacidad de disipación de calor en condiciones controladas [12], [8].

Si bien existe abundante literatura científica que respalda el uso de materiales de construcción con propiedades fotoluminiscentes, su implementación en ladrillos peatonales de señalización en senderos urbanos es escasa. Debido a ello, esta investigación pretende innovar con ladrillos incorporando piedras fotoluminiscentes en la búsqueda de reducir el consumo energético en iluminación pública y fortalecer la seguridad ciudadana en espacios públicos

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque experimental cuantitativo, el cual contempla 2 fases: fabricación y ensayos. Para la primera fase, se consideró 2 tamaños de piedras fotoluminiscentes a partir de 4 pruebas pre experimentales. Y en la segunda fase, se realizaron 5 ensayos en laboratorio e in situ.

A. Fase 1: Fabricación de ladrillos Eco Lux

Se llevo a cabo 2 pruebas pre experimentales (Tabla 1) basadas en un proceso de mezclado manual con técnicas de dosificación derivadas de la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.114:2022 [18], las cuales emplearon el cemento Portland Tipo I, ya que garantiza buena trabajabilidad, fraguado controlado y resistencia mecánica progresiva (NTP 334.009:2020) [19]. Además, se añadió arena gruesa limpia de procedencia local, tamizada con una malla de 3 mm, así como agua potable para el moldeado y curado. Estas pruebas permitieron llegar a la dosificación exacta para la fabricación del ladrillo.

Posterior a ello para las 2 pruebas siguientes, se añadieron piedras de silicona fotoluminiscentes compuestas de aluminato de estroncio dopado con europio, disprosio, sodio, vidrio, resina acrílica encapsulante y óxidos metálicos menores; en dos tamaños de 1 mm y 3 mm, las cuales almacenan energía luminosa cuando están expuestos a la luz solar o artificial, y luego liberan esa energía en forma de luz visible cuando está oscuro. Por otro lado, para el acabado se utilizó resina natural compuesta en un 40 % por componentes de origen vegetal, complementada con materiales de origen sintético.

Finalmente, se evaluó la fijación efectiva de las partículas lumínicas, para que luego puedan *ser mejoradas a nivel de diseño en la etapa de resultados*.

TABLA I
PRUEBAS PREEXPERIMENTALES

Prueba	Dimensión (m)	Dosificación/ Materiales	Conclusión técnica
1	0.085 x 0.05 x 0.03	0.4 kg arena 0.2 kg cemento 0.1.5 ml agua + aplicación de piedras fotoluminiscentes (1–3 mm)	Alta porosidad y baja cohesión; necesidad de mejorar mezcla y compactación.
2	0.20 x 0.10 x 0.04	0.8 kg arena 0.4 kg cemento 0.35 ml agua	Dosificación adecuada; aún debe mejorarse la adherencia del fotoluminiscente
3	0.20 x 0.10 x 0.04	Misma dosificación de la segunda prueba + aplicación de piedras fotoluminiscentes (1–3 mm)	Se logró mejorar la estructura, pero no la fijación efectiva de las partículas lumínicas.
4	0.20 x 0.10 x 0.04	Incorporación de resina natural (40%) + fotoluminiscentes (1–3 mm). Curado: 1 día.	Mejora parcial en la adherencia; se requiere rediseño para proteger el material lumínico.
5	0.085 x 0.05 x 0.03	0.4 kg arena 0.2 kg cemento 0.1.5 ml agua + aplicación de piedras fotoluminiscentes (1–3 mm)	Alta porosidad y baja cohesión; necesidad de mejorar mezcla y compactación.
6	0.20 x 0.10 x 0.04	0.8 kg arena 0.4 kg cemento 0.35 ml agua	Dosificación adecuada; aún debe mejorarse la adherencia del fotoluminiscente

B. Fase 2: Ensayos

1) *Ensayo de iluminación*: Para este ensayo se utilizó un luxómetro marca Extech Light Meter LT300, a partir de 3 puntos de medición (a, b, c) en el ladrillo (Figura 1), tomándose la medición cada hora en el transcurso de 6:00 p.m. a 4:00 a.m., en espacios reales y controlados. Los resultados fueron comparados con los rangos establecidos por la Illuminating Engineering Society (IES), en su guía técnica IES G-1-16 [20], la cual recomienda niveles de iluminancia entre 1 lux y 5 lux para parques y senderos peatonales de baja actividad, específicamente para garantizar seguridad visual en condiciones nocturnas.

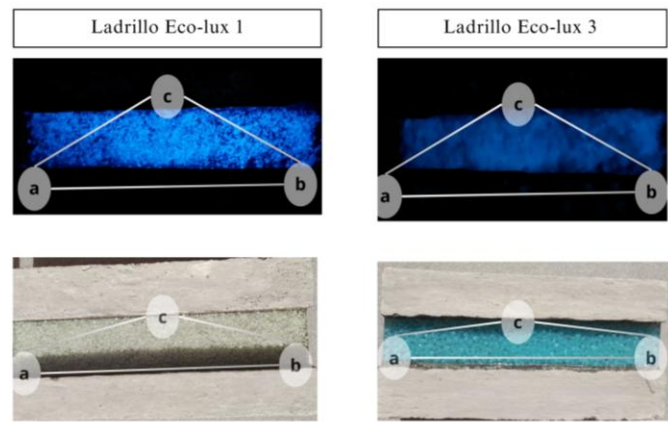


Fig. 1 Puntos de control para ensayo de iluminancia

2) *Ensayo de luminancia*: A partir de los datos obtenidos de la iluminancia, se estimó la luminancia (cd/m^2), utilizando la relación establecida en la fotometría, donde la luminancia L puede calcularse a partir de la iluminancia E mediante la ecuación 1:

$$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi} \quad (1)$$

donde ρ representa el factor de reflectancia de la superficie del material.

Estos resultados, posteriormente fueron comparados con la norma ASTM D4280-18 [21], la cual recomienda una luminancia entre 0.225cd/m^2 y 0.30cd/m^2 para señalización pasiva en bordillos o tachas viales.

3) *Ensayo de absorción de agua mediante método de simulación de lluvia*: Se fabricaron 6 muestras (3 ladrillos Eco-Lux 1 y 3 ladrillos Eco-Lux 3) durante el ensayo se utilizó una cubeta de Policloruro de vinilo de 2 litros de agua para sumergir solo la cara principal del ladrillo Eco-Lux con la finalidad de simular las condiciones de lluvia y riego típicas de los espacios públicos. El procedimiento se realizó conforme a la NTP 399.613:2017, la cual establece un valor máximo permitido para el índice de absorción inicial de 5 g/min/8 cm^2 . aplicable a materiales destinados a revestimientos o acabados en espacios públicos.

4) *Ensayo de resistencia a la compresión*: Esta prueba se realizó mediante simulación virtual en Autodesk Inventor 2021, para de esta manera comparar los resultados con la NTP 399.611:2017, la cual indica una resistencia mínima para adoquines de $\geq 35 \text{ MPa}$. En este estudio se aplicó de 78 MPa y 250 MPa , para demostrar su resistencia máxima.

5) *Ensayo de ganancia térmica*: La evaluación térmica de los ladrillos fotoluminiscentes se realizó mediante capturas infrarrojas utilizando la cámara termográfica HT-175 *Thermal Imaging Revolution*, con una resolución de $32 \text{ píxeles} \times 32$

píxeles y rango de temperatura de -20°C a 300°C , marca RoHS, registrándose los datos cada hora desde las 7:00 a.m. hasta las 5.00 p.m. Esta herramienta permitió registrar la distribución de temperatura superficial, con el fin de analizar la ganancia térmica que conlleva a la activación lumínica del material. Las mediciones se efectuaron en un entorno real, con el objetivo de identificar posibles acumulaciones de calor o variaciones térmicas asociadas al proceso de fotoluminiscencia.

II. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Diseño del ladrillo Eco-Lux

El diseño del ladrillo Eco-Lux, se basó en contener una concavidad protectora de las piedras fotoluminiscentes, además de contemplarse como un elemento de señalización funcional para espacios públicos. Sus dimensiones (Figura 2) se asocian al tamaño de un adoquín.

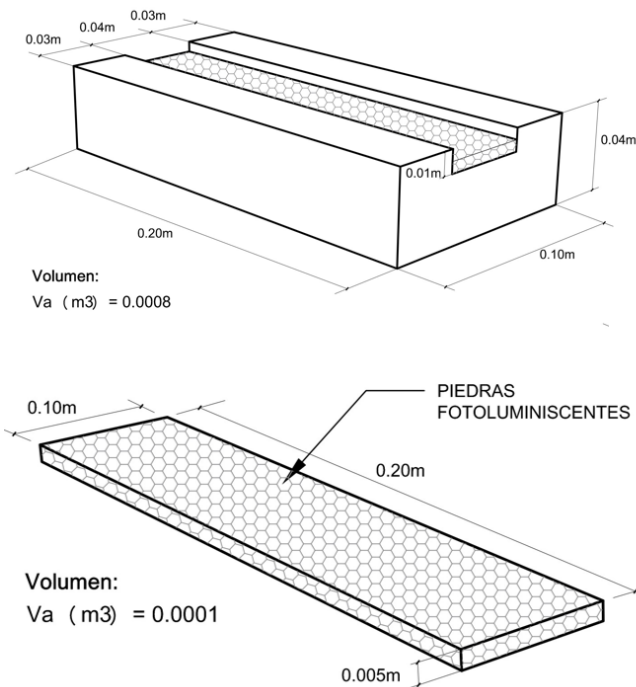


Fig. 2 Diseño isométrico del ladrillo.

Este mismo puede ser replicado en cualquier espacio público, como se detalla en la Figura 3, siguiendo el proceso constructivo de cualquier pavimento, en forma lineal.

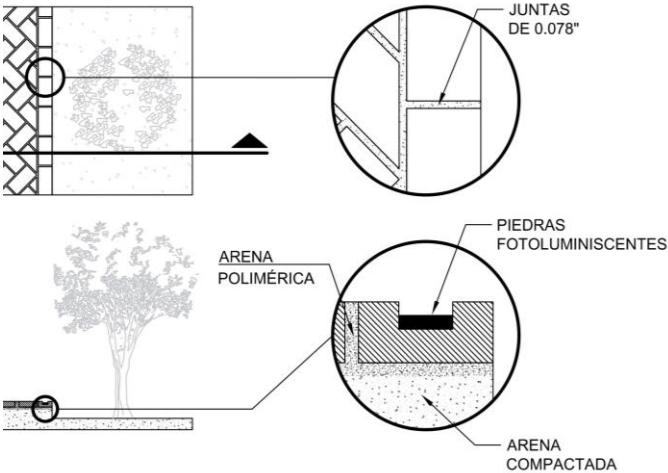


Fig. 3 Detalle constructivo para la inserción en el espacio público

B. Proceso de fabricación

A partir de las pruebas pre experimentales, se obtuvo el proceso de fabricación de los ladrillos Eco-Lux (Figura 4). En la etapa 1, una vez homogeneizada la mezcla seca, se añadió agua de forma gradual hasta alcanzar una masa consistente para luego ser llevado al molde metálico de $0.20\text{ m} \times 0.10\text{ m} \times 0.04\text{ m}$. Se aplicó compactación manual, aplicando presión de forma directa sobre la mezcla colocada en el molde, con el fin de reducir los vacíos. Los ladrillos se desmoldaron después de 24 horas de reposo. Posteriormente, se trasladaron a un área sombreada y se mantuvieron en proceso de curado húmedo mediante aplicación diaria de agua durante un periodo de 15 días, con el fin de garantizar el desarrollo de la resistencia mecánica del material. Una vez curado, pasa por un proceso de lijado y limpieza del ladrillo.



Fig. 4 Proceso básico de proceso de fabricación de Ladrillos Eco-Lux

Luego, en la etapa 2 se aplican las piedras luminiscentes, apoyándose de dos cintas a los laterales, se añadieron las piedras y enseguida una capa delgada de resina natural de manera uniforme con brocha, permitiendo una fijación más duradera sin alterar la capacidad de absorción y emisión de luz de las piedras, como se aprecia en la Figura 5. Obteniéndose de esta manera 2 tipos de muestra, Eco-Lux 1, denominada a aquella muestra con piedras de 1mm y Eco-Lux 3, para la de 3mm.



Fig. 5 Fotografía nocturna, aplicación de los prototipos en un espacio público real

C. Iluminación del ladrillo Eco-Lux en condiciones reales y controladas

Los resultados evidencian que Eco-Lux 1 en condiciones reales destaca con 3 luxes (Figura 6), absorbiendo mayor fuente de luz durante el día a diferencia de Eco-Lux 3. Además, la exposición a las condiciones reales permite emitir mayor iluminación, siendo 1 lux mayor que la misma muestra expuesta en condiciones controladas, esto podría deberse a los factores externos y tipo de cielo durante las 6:00 p.m. Lo cual, se valida en Eco-Lux 3, ya que se produce el mismo efecto, obteniéndose mayores luxes en condiciones reales a diferencia del que se encuentra bajo condiciones controladas. Esto demuestra su viabilidad en los espacios exteriores en situaciones reales.

Además, de su estabilidad lumínica después de 4 horas, en el que se mantiene estable, ofreciendo una demanda energética durante 10 horas de iluminación. A diferencia de [11] y [14] quienes obtuvieron una transmitancia del 71.9 % es decir aproximadamente 0.00157 lux, con un brillo visible tras 8 horas de oscuridad y niveles de iluminación útiles superiores a 2 lux tras recarga con LED blanco de 3,5 W.

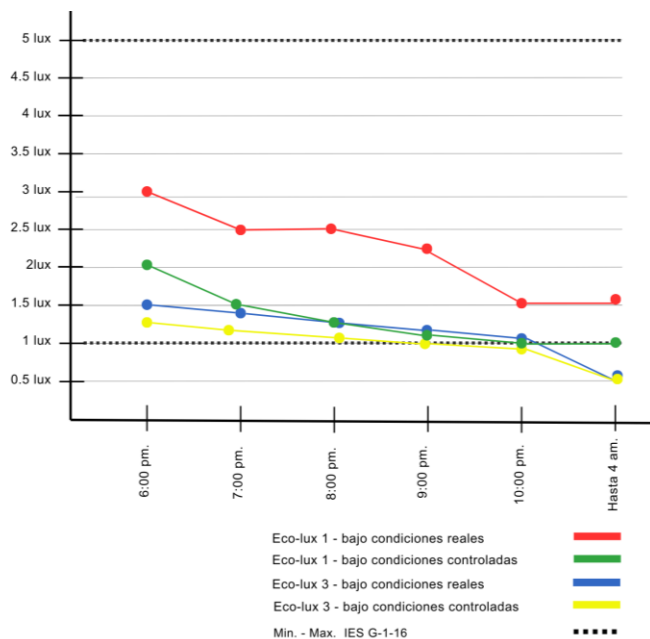


Fig. 6 Comparativa de resultados obtenidos del ensayo de iluminancia

Así mismo, cabe resaltar que las muestras estudiadas cuentan con una protección de polvo de resina natural al 40%, el cual actúa como una barrera óptica, impidiendo que la luz UV o visible penetre eficazmente al fósforo, lo cual reduce su carga energética. Sin embargo, a pesar de ello, ambos ladrillos han cumplido normativamente con la IES, obtenido el mínimo de 1 lux para espacios públicos, hasta las 10 p.m. para las muestras bajo condiciones controladas y hasta las 4 a.m. para las muestras expuestas a condiciones reales. Resaltando el Eco-Lux 1 con una estabilidad de 1.5 luxes.

D. Luminancia en condiciones reales y controladas

Los resultados evidencian que Eco-Lux 1, presenta mejor comportamiento las 3 primeras horas de la tarde en condiciones reales y la primera hora bajo condiciones controladas (Figura 7), cumpliendo la norma ASTM (2018) D4280-18, la cual recomienda una luminancia entre 0.225 cd/m^2 y 0.30 cd/m^2 . Sin embargo, durante las siguientes horas disminuye progresivamente.

Este reducido rendimiento lumínico se debe a la absorción de la radiación de activación por aditivos y pigmentos presentes en la resina, los cuales compiten con el aluminato de estroncio lumínico por la energía UV. En contraste, [8] muestran que cuando esta resina contiene estabilizadores UV, colorantes u otras impurezas orgánicas, dichos compuestos filtran y atenúan las longitudes de onda óptimas para el fósforo fotoluminiscente, reduciendo así la eficiencia de carga de sus centros emisores.

También se han demostrado que materiales fotoluminiscentes con mejor integración superficial con los

ladrillos recubiertos con fósforo fotoluminiscente sin barreras ópticas significativas, alcanzan luminancias superiores a 0.225 cd/m^2 , con visibilidad eficaz durante más de 8 horas [6], [9].

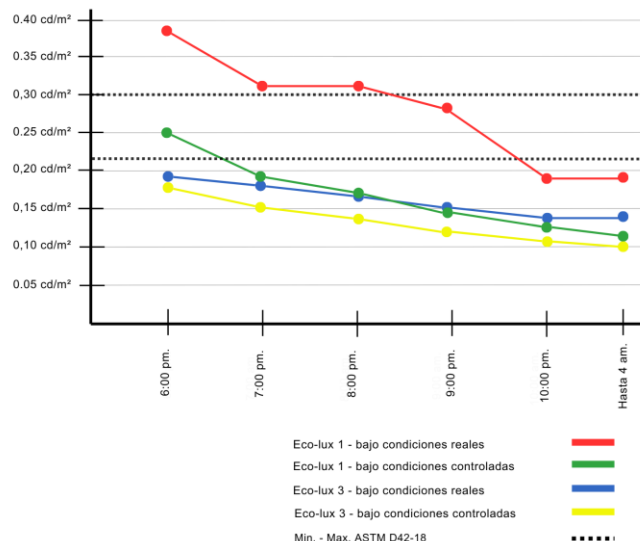


Fig. 7 Comparativa de resultados obtenidos del ensayo de luminancia

E. Efecto de la absorción de agua en los ladrillos Eco-Lux

Los resultados evidencian el cumplimiento de la NTP 399.613:2017 considerando que el índice de absorción rápida no debe superar los 5 g/min/8 cm^2 . Teniendo en cuenta que el ladrillo tiene un área de 200 cm^2 , el máximo de gramos en esta prueba que puede superar es de 125 gramos. Siendo los resultados iguales a 10 gramos, en las 6 pruebas ejecutadas (Tabla 2).

TABLA II
ENSAYO DE SIMULACIÓN DE LLUVIA

Muestra	Peso seco (Kg)	Peso húmedo (kg)	Diferencia (gr)
E-1	1.300	1.310	10
E-2	1.305	1.315	10
E-3	1.303	1.313	10
L-1	1.302	1.312	10
L-2	1.300	1.310	10
L-3	1.305	1.315	10

Esto indica que, independientemente del tipo de recubrimiento de la resina en el Eco-Lux 1 y Eco-Lux 3, poseen una estructura interna densa y homogénea, lo que favorece la resistencia a la penetración de humedad. Esta baja absorción no solo mejora la durabilidad del producto frente a la degradación por humedad, sino que también favorece la estabilidad de las propiedades fotoluminiscentes en exteriores, siendo la resistencia a la humedad un determinante para el mantenimiento del brillo y la eficiencia lumínica [11], [7].

F. Resistencia a la compresión mediante simulación virtual

El ladrillo al ser sometido a 78 MPa permanece dentro de su rango seguro de operación, el cual es adecuado para aplicaciones no portantes. No se evidencian fisuras estructurales ni deformaciones críticas en ese rango, lo que indica que su resistencia mecánica es satisfactoria para su uso previsto. Al ser llevado a un esfuerzo máximo de 250 MPa, se identificó 6 fisuras (Figura 8), con daño leve a moderado quedando afectado el 5.9 % de la cara superior con fisuración múltiple y ramificada por sobrecarga estructural.

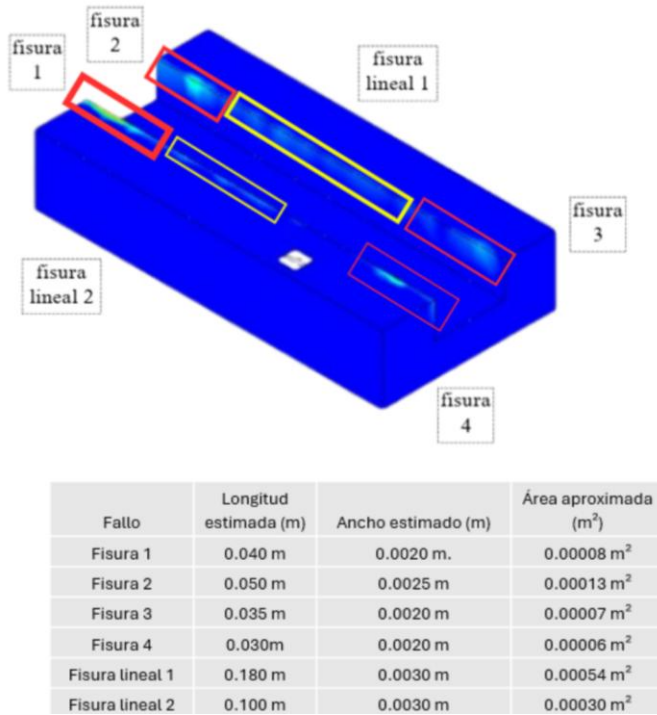


Fig. 8 Ensayo digital de resistencia a la compresión máxima 250 MPa

La causa de esto es la redistribución interna de esfuerzos de tracción generados durante la compresión axial. Aunque el ladrillo fue sometido a una carga vertical, el material experimenta tensiones transversales que superan su capacidad de tracción, generando fisuras visibles en la superficie. Asimismo, la naturaleza rígida y poco dúctil del concreto contribuye a la aparición de microgrietas una vez superado su límite elástico. Debido a ello, [14] utiliza una fuerza de 22.06 MPa, lo que permite conseguir una mayor resistencia a la tracción, presentando un módulo elástico de 3.92 GPa. Para esta investigación, estas fisuras, aunque evidentes a 250 MPa, no comprometen el comportamiento del ladrillo a niveles funcionales de carga como a 78 MPa, confirmando su idoneidad para aplicaciones no estructurales en espacios urbanos.

G. Ganancia térmica en ladrillos Eco-Lux

Los resultados evidencian mínimas diferencias de temperatura entre el ladrillo Eco-Lux 1 y Eco-Lux 3, excepto a las 3 pm, en el que se produce la máxima diferencia de 2°C, a favor de Eco-Lux 1 (Figura 9). Sin embargo, en la mayoría de las horas de medición, el Eco-Lux 3, tiende a tener mayor ganancia térmica. A pesar de ello, sus piedras fotoluminiscentes al ser de mayor tamaño no retienen la luz, como lo realiza Eco-Lux 1. Concordando con [5] y [22] quienes manifiestan que, los materiales con propiedades luminiscentes son sensibles a la temperatura, donde las respuestas fotoluminiscentes varían en función de la absorción térmica, lo que podría influir en el comportamiento de materiales expuestos a ciclos térmicos prolongados. Además, es importante mencionar que las muestras fueron expuestas a un clima donde las temperaturas alcanzadas durante el día son mayores a 25°C a lo largo del año, lo cual favorece la carga solar.

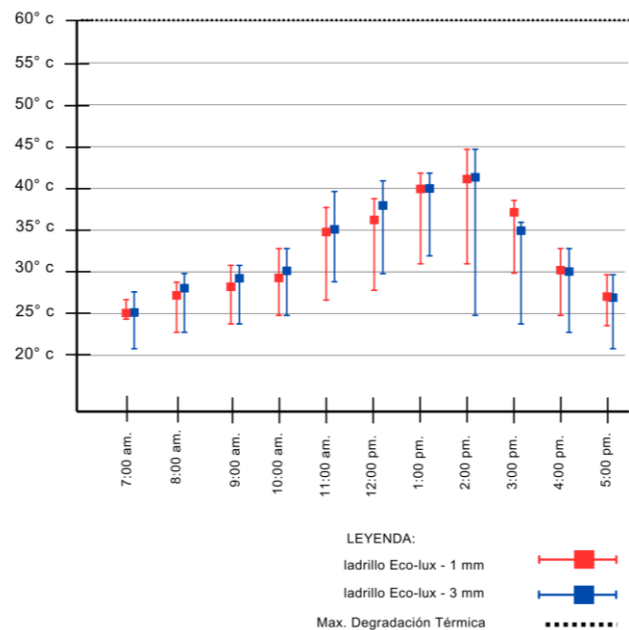


Fig. 9 Ensayo de temperatura

III. CONCLUSIONES

Se consiguió demostrar la viabilidad del uso del Ladrillo Eco-Lux para la aplicación de los bordillos en espacios públicos en sus dos presentaciones, destacándose el ladrillo que presentó partículas de 1 mm de piedras fotoluminiscentes. Esta solución técnica, es sostenible y de bajo mantenimiento, con potencial de implementación replicable en proyectos urbanos de señalización y seguridad nocturna.

La prueba de iluminancia, absorción de agua y resistencia a la compresión cumplió la norma sin complicaciones. Sin

embargo, en el ensayo de luminancia solo destaco el Ladrillo Eco-Lux 1 las tres primeras horas desde las 6:00 pm., lo cual podría atribuírsele al uso de la resina, por lo cual en futuras investigaciones podría utilizarse otra resina diferente o realizar las pruebas sin resina, para evaluar estas diferencias.

Finalmente, también se podría explorar formulaciones con pigmentaciones claras o contrastantes que potencien la visibilidad del ladrillo en condiciones diurnas, sin afectar negativamente su comportamiento lumínico. Adicionalmente, podrían existir variaciones en el diseño, forma y coloración de las partículas fotoluminiscentes, evaluando su rendimiento mediante simulaciones ópticas avanzadas y pruebas de espectrofotometría bajo distintas fuentes de radiación, en diferentes estaciones.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), *Percepción de inseguridad ciudadana en zonas urbanas y rurales del Perú*, Lima, Perú: Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2022.
- [2] M. Rau, F. Gatica, I. Cartes, T. Pascoe y V. Carrasco, "Perception of Criminal Insecurity in Vulnerable Districts in Latin America," *Urban and Regional Planning*, vol. 4, no. 4, pp. 121–135, 2019. M. King, B. Zhu, and S. Tang, "Optimal path planning," *Mobile Robots*, vol. 8, no. 2, pp. 520–531, March 2001.
- [3] Organización de las Naciones Unidas [ONU Mujeres], *Ciudades seguras para todas y todos: experiencias en América Latina*, Nueva York, NY, EE. UU.: ONU Mujeres, 2019. Disponible en: <https://www.unwomen.org/es/digital-library/publications/2019/10/ciudades-seguras-para-todas-y-todos>.
- [4] H. M. Abd El-Lateef, M. M. Khalaf, M. F. Abou Taleb y M. Gouda, "Development of photoluminescent concrete from polystyrene plastic reinforced with electrospun polypropylene nanofibers," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 449, art. 115419, 2024, doi: 10.1016/j.jphotochem.2023.115419.
- [5] Y. Hu, G. V. Baryshnikov, X. Shan, W. Zhang, S.-y. Zhao, L. Zhu y H. Wu, "Visible light excited and temperature-responsive phosphorescent system in a phase-changing matrix," *Materials Advances*, vol. 5, no. 13, pp. 5572–5578, 2024, doi: 10.1039/D4MA00318G.
- [6] O. Gencel, A. Danish, M. Yilmaz, E. Erdogmus, M. Sutcu, T. Ozbakkaloglu y A. Gholampour, "Experimental evaluation of the luminescence performance of fired clay brick coated with SrAl₂O₄:Eu/Dy phosphor," *Ceramics International*, vol. 48, no. 22, pp. 33167–33176, 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.07.255.
- [7] O. Gencel, A. Danish, M. Yilmaz, E. Erdogmus, M. Sutcu, F. Sadak y T. Ozbakkaloglu, "Performance evaluation of phosphor-based luminescent bricks using different coating methods," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 191, art. 113868, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.113868.
- [8] W. Wang, A. Sha, A. C. Falchetto, D. Wang, W. Jiang y X. Li, "Properties analysis of self-luminous cement-based materials with different colors and their visual comfort evaluation on pavement," *Solar Energy*, vol. 247, pp. 214–227, 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.10.013.
- [9] W. Wu, Z. Fu y W. Jiang, "Developing a novel sustainable and durable self-luminous pavement material with solar energy absorption capability," *Construction and Building Materials*, vol. 445, art. 137934, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137934.
- [10] A. N. Alvarez-Valdivia, D. A. Huertas-Contreras y V. R. Ibárcena Ibárcena, "Use of natural light to achieve lighting comfort inside the house," en *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024)*, Costa Rica, 17–19 Jul. 2024. [En línea]. Doi: [10.18687/LACCEI2024.1.1.1322](https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1322)
- [11] R. Guo y S. Liu, "Design and experiment of self-luminescent asphalt-based pavement materials," *Construction and Building Materials*, vol. 342, art. 127991, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127991.
- [12] E. I. Gutierrez-Velasquez y H. A. Colorado, "Photoluminescent asphalt coating made from recycled EPS and strontium aluminate particles for improved road safety and waste management: a characterization study using ethyl acetate and acetone diluents," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 26, pp. 1397–1411, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.08.001.
- [13] S. Abu-Melha, "Preparation of photochromic and afterglow concrete from recycled polystyrene plastic waste immobilized with strontium aluminate nanoparticles," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 450, art. 115435, 2024, doi: 10.1016/j.jphotochem.2023.115435.
- [14] Z. A. Al-Ahmed, N. M. Alatawi, K. Alkhamis, N. D. Alkhatami, A. M. Binyaseen, H. M. Abumelha y N. M. El-Metwaly, "Development of glow-in-the-dark and color-tunable poly(methyl methacrylate) plastic concrete immobilized with rare-earth aluminate," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 444, art. 114959, 2023, doi: 10.1016/j.jphotochem.2023.114959.
- [15] O. Gencel, A. Danish, M. Yilmaz, E. Erdogmus, M. Sutcu, T. Ozbakkaloglu y A. Gholampour, "Experimental evaluation of the luminescence performance of fired clay brick coated with SrAl₂O₄:Eu/Dy phosphor," *Ceramics International*, vol. 48, no. 22, pp. 33167–33176, 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.07.255.
- [16] L. Hanco Chire, I. Mansilla Cárdenas, P. Delgado Meneses y V. Ibárcena Ibárcena, "Comparison of thermal conductivity of traditional and PET reinforced adobe masonry units to improve thermal comfort in buildings," en *Proceedings of the 4th LACCEI International Multiconference on Entrepreneurship, Innovation and Regional Development (LEIRD 2024)*, Virtual Edition, 2–4 dic. 2024. [En línea]. Doi: [10.18687/LEIRD2024.1.1.755](https://doi.org/10.18687/LEIRD2024.1.1.755)
- [17] L. I. Paredes, J. C. Quispe y V. I. Ibárcena, "Eco-Friendly Thermal Panel for Low-Cost Housing in Cold Climates," en *Proceedings of the 2025 IEEE XXXII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Arequipa, 2025, pp. 1–7, doi: 10.1109/INTERCON67304.2025.11244694.
- [18] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 339.114:2022. Concreto. Concreto premezclado. Requisitos*, Lima, Perú: INACAL, 2022.
- [19] Instituto Nacional de Calidad (INACAL), *NTP 334.009:2020. Cementos. Cementos Portland. Requisitos*, Lima, Perú: INACAL, 2020.
- [20] Illuminating Engineering Society (IES), *Guideline for security lighting for people, property, and public spaces (IES G-1-16)*, New York, NY, USA: Illuminating Engineering Society, 2016.
- [21] ASTM International, *ASTM D4280-18: Standard specification for high-visibility yellow traffic control signs, delineators, barricades, and barrels*, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2018, doi: 10.1520/D4280-18.
- [22] H. Xiang, J. Cheng, X. Ma, X. Zhou y J. J. Chruma, "Near-infrared phosphorescence: materials and applications," *Chemical Society Reviews*, vol. 42, no. 14, pp. 6128–6185, 2013, doi: 10.1039/C3CS60029G.