

▲ FIG. 1. A través del estudio de tres elementos constructivos multifuncionales, esta tesis cuantifica las ventajas medioambientales de integrar estrategias pasivas de refrigeración como la inercia térmica, el enfriamiento radiativo o la climatización geotérmica en el diseño arquitectónico.

Cooling with less

Sistemas constructivos para una arquitectura resiliente al calor y de bajo impacto ambiental

Eduardo Gascón Álvarez

Recibido 2024.10.09 :: Aceptado 2024.10.14
DOI: 10.5821/palimpsesto.27.13449
Persona de contacto: egascon@mit.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6259-1094>
Doctor arquitecto por el MIT

ABSTRACT

Este texto es un resumen de la tesis doctoral presentada el pasado día 9 de septiembre de 2024 para el programa de doctorado en Building Technology del Massachusetts Institute of Technology. La tesis, supervisada por los profesores Caitlin Mueller y Leslie Norford, es el resultado de un trabajo de cinco años de investigación centrada en el diseño de elementos constructivos que integren estrategias pasivas de refrigeración como bloques de termoarcilla con alta inercia térmica, forjados radiantes de hormigón y disipadores de calor integrados. Los resultados obtenidos demuestran como, a través de la geometría y el diseño, es posible mejorar el comportamiento térmico de dichos componentes utilizando el menor material posible, mejorando así la resiliencia al calor de los edificios al mismo tiempo que se mitiga su impacto ambiental.

PALABRAS CLAVE: resiliencia; impacto ambiental; sistemas constructivos.

Introducción

Las ciudades de todo el mundo son más cálidas y densas a medida que las temperaturas globales aumentan y los procesos de migración de zonas rurales a urbanas se intensifican. Esta realidad es particularmente crítica en África y Asia, donde se concentra el 90% de la urbanización mundial prevista para 2050¹ y la mayor proyección de eventos de calor extremo². En contextos urbanos más consolidados como los de Europa, América del Norte y América del Sur, un entorno construido obsoleto (diseñado, en algunos casos, exclusivamente para climas fríos) se muestra cada vez más vulnerable al calor, requiriendo procesos de rehabilitación que mejoren su eficiencia energética y adaptabilidad a las altas temperaturas.

Estos dos fenómenos concurrentes (urbanización y aumento de las temperaturas globales) a menudo se retroalimentan, formando ciclos peligrosos. A medida que las ciudades se densifican, aumenta la generación de calor antropogénico (que incluye el calor residual expulsado por los sistemas de climatización), agravando el efecto isla de calor urbano (UHI, por sus siglas en inglés) y, por lo tanto, incrementando la demanda de refrigeración en los edificios. A una escala más global, la construcción y el uso de edificios conllevan considerables emisiones de gases de efecto invernadero (9% y 28% de las emisiones globales de CO₂eq, respectivamente), contribuyendo al aumento de las temperaturas y, nuevamente, a una mayor demanda de refrigeración³. El exceso de calor generado por las emisiones acumuladas y la actividad urbana puede

impactar negativamente en la movilidad y productividad de las ciudades y, en su forma más extrema, provocar migraciones climáticas forzadas o incluso aumentar las tasas de mortalidad⁴.

Esta realidad pone en evidencia un desafío complejo: es necesario construir (y rehabilitar) sin seguir contribuyendo al calentamiento del planeta, idealmente mediante una arquitectura capaz de responder a los episodios de calor extremo. Proporcionar viviendas asequibles, de bajas emisiones y resilientes al calor es, por lo tanto, una cuestión urgente que podría ayudar a revertir las tendencias mencionadas, minimizando las emisiones asociadas con el sector de la construcción y, lo más importante, mejorando el confort térmico y condiciones de habitabilidad de sus futuros usuarios. Evidentemente, la respuesta a esta compleja tarea requiere esfuerzos transversales desde diversos sectores y soluciones que abarquen múltiples escalas. La tesis doctoral resumida en este artículo se centra en el estudio de elementos constructivos que integran estrategias de refrigeración y, más concretamente, en su optimización geométrica como una oportunidad para hacer (enfriar) más con menos.

Elementos constructivos multifuncionales: legado histórico y oportunidades de futuro

Los elementos constructivos multifuncionales se pueden definir como aquellos componentes (losas, muros, cimentaciones) diseñados explícitamente para integrar dos o más funciones (estructural, térmica, acústica, etc). Históricamente, este proceso de integración se ha percibido como una estrategia que permite un uso más eficiente de los recursos materiales y un mejor rendimiento conjunto de dichas funciones. La Gloria, por ejemplo, fue un sistema de calefacción originado en la Península Ibérica durante la Edad Media que aprovechaba la cimentación elevada de las casas como sistema de distribución del aire caliente⁵. En climas más cálidos como las regiones desérticas de Irán, los yakhchal (literalmente, “fosos de hielo”) utilizaban muros de mampostería que servían tanto de estructura portante como de sistema de producción de hielo, generando sombra y potenciando el enfriamiento por radiación nocturna. Este mismo hielo luego se almacenaba en grandes cúpulas que integraban un eficiente sistema de ventilación⁶.

En el contexto de la actual crisis climática, la integración de funciones supone una oportunidad para reducir simultáneamente el carbono incorporado (aquellas emisiones asociadas a la fabricación y transporte de los materiales) y el carbono operacional (aquellas emisiones asociadas al uso de los edificios). Estudios recientes demuestran, por ejemplo, la posibilidad de diseñar exoesqueletos que combinan de manera óptima funciones estructurales y de control lumínico⁷ o forjados aligerados de hormigón armado que ofrecen un elevado aislamiento acústico⁸. Hallazgos como estos ejemplifican como un uso inteligente de la forma y su geometría permite mejorar el rendimiento térmico/acústico/lumínico del componente en cuestión con el menor material posible. Al mismo tiempo, el uso de nuevas técnicas de diseño computacional facilita la identificación de aquellas soluciones óptimas en función del contexto urbano y climático del edificio.

En el marco de estas ideas, la tesis estudia la integración de sistemas pasivos de refrigeración (como la inercia térmica o la climatización geotérmica) dentro de componentes estructurales como muros, losas o cimentaciones. Una vez más, la idea prevalente es hacer más con menos: activar térmicamente la estructura de un edificio (una parte indispensable y necesaria en cualquier edificio) permite aprovechar al máximo sus propiedades y potenciales usos. Las zapatas de hormigón, por ejemplo, son excelentes candidatas para disipar calor al terreno y enfriar así el edificio de manera eficiente; los forjados de hormigón expuestos proporcionan una gran superficie ideal para funcionar como techo radiante. Así, este trabajo cuantifica por primera vez las ventajas de integrar funciones en un solo componente constructivo para reducir el impacto ambiental de los edificios y, al mismo tiempo, mejorar su comportamiento frente a las altas temperaturas. El trabajo se centra en el diseño y la optimización de tres elementos constructivos: (1) bloques de termoarcilla con alta inercia térmica, (2) forjados radiantes de hormigón y (3) disipadores de calor integrados.

Diseño y dimensionado de elementos constructivos para una arquitectura resiliente al calor

Este apartado resume el contexto y los resultados para cada uno de los tres elementos de estudio cerámicos o de hormigón, materiales que se utilizan habitualmente en regiones con climas cálidos gracias a su relativo bajo coste y propiedades estructurales y térmicas favorables (alta resistencia a compresión, densidad, y calor específico). Desde un punto de vista medioambiental, su fabricación conlleva grandes emisiones de carbono, principalmente debido al calcinado de piedra caliza y la cocción de arcilla. Por lo tanto, esta tesis se vertebra a partir de la idea de cómo aprovechar al máximo dichas propiedades al mismo tiempo que se reduce el material utilizado y las emisiones asociadas.

1. Bloques de termoarcilla con alta inercia térmica

Con casi 2 billones de unidades vendidas al año, los ladrillos cerámicos y de hormigón son una solución constructiva omnipresente en edificios residenciales de todo el mundo, particularmente en regiones donde materiales alternativos como la madera o el acero son menos accesibles⁹. En su formato más básico como ladrillos sólidos o bloques huecos, estos elementos suelen necesitar capas adicionales de aislamiento para garantizar un comportamiento térmico adecuado. Los bloques de termoarcilla ofrecen una mejora significativa en su rendimiento gracias a la inclusión de pequeños huecos de aire que aumentan la resistencia térmica del elemento al tiempo que reducen su peso¹⁰. Pese a las evidentes ventajas, su diseño no tiene en cuenta la capacidad de estos bloques para almacenar calor (su inercia térmica), un aspecto clave para enfriar edificios de manera pasiva.

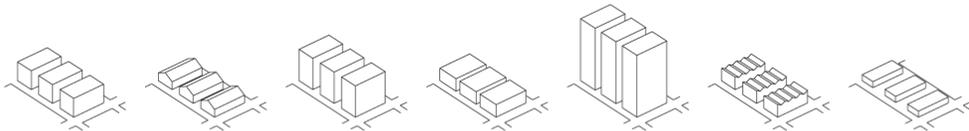
La motivación detrás de esta investigación, por lo tanto, parte de la idea de conseguir más inercia térmica con menos material – dos objetivos, a priori, contrapuestos. Más concretamente, se busca modificar la geometría interna de los bloques de termoarcilla para conseguir una distribución óptima del material que permita almacenar calor de una manera más eficiente. Partiendo de un bloque de termoarcilla estándar como referencia (ilustración 2, primero desde la izquierda), los resultados obtenidos demuestran que una disposición asimétrica de los huecos de aire permite conseguir bloques que almacenan hasta dos veces más energía sin necesidad de añadir más arcilla (ilustración 2, segundo desde la derecha). Otras geometrías mejoran su inercia térmica un 23% además de ser un 33% más ligeras. Estos



▲ FIG. 2. Optimizar la geometría interna de los bloques de termoarcilla (vista aquí en planta) permite mejorar su habilidad para almacenar calor (su inercia térmica) sin necesidad de añadir más material.



▲ FIG. 3. Mediante un diseño más eficiente a sus superficies, es posible obtener forjados radiantes de hormigón más ligeros y eficientes térmicamente que una losa prismática convencional.



▲ FIG. 4. La habilidad de los edificios para disipar calor a través del terreno o el cielo nocturno está íntimamente relacionada con su entorno urbano y las condiciones climáticas locales.

resultados abren la posibilidad de diseñar bloques de termoarcilla específicamente diseñados para climas cálidos y templados como el Mediterráneo y sin que ello conlleve un consumo excesivo de material¹¹.

2. Forjados radiantes de hormigón

El segundo capítulo de esta tesis se centra en la optimización geométrica de forjados radiantes de hormigón (aquellas losas portantes que funcionan como techos radiantes mediante la integración de un sistema de tuberías de agua). Mejorar el rendimiento de estos elementos multifuncionales permite responder a dos de los desafíos más urgentes del sector de la construcción: primero, reducir el impacto ambiental asociado a la producción de hormigón (responsable del 8% de las emisiones globales de carbono) y segundo, proporcionar soluciones de refrigeración de bajo consumo energético que ofrezcan alternativas a los sistemas convencionales de aire acondicionado. Este trabajo concretamente estudia cómo modificar la superficie inferior de estos forjados radiantes puede ayudar a mejorar su rendimiento estructural y térmico de manera simultánea.

Por un lado, estudios recientes en optimización estructural demuestran que es posible ahorrar hasta el 60% del material en una losa maciza convencional a través de un uso más eficiente de la geometría y sin necesidad de reducir su capacidad portante¹². Térmicamente, una mayor superficie de techo mejora la eficiencia de los sistemas radiantes al aumentar el intercambio de calor por convección entre el techo y el aire. Esta investigación, por lo tanto, combina ambos principios para diseñar forjados radiantes de hormigón

más ligeros y eficientes térmicamente¹³. Los diseños obtenidos pueden lograr hasta un 50% de ahorro de material al mismo tiempo que reducen el consumo energético de refrigeración en un 14% en comparación a una losa maciza convencional (ilustración 3, izquierda). Otros diseños con mayor superficie de techo (ilustración 3, derecha) permiten disminuir el consumo energético hasta un 32% con un ahorro material del 30%. Este abanico de opciones permite elegir el diseño óptimo en función de los requisitos y prioridades de cada proyecto.

3. Disipadores de calor integrados

Los sistemas de aire acondicionado suelen verter el calor extraído de los edificios directamente a la vía pública, lo que conlleva un incremento de las temperaturas urbanas y, paradójicamente, un incremento de la demanda de refrigeración. Múltiples tecnologías como las bombas de calor geotérmicas o las cubiertas reflejantes ofrecen alternativas a este círculo vicioso utilizando dos de los disipadores de calor habitualmente disponibles en áreas urbanas: el terreno y el cielo nocturno. Una forma sencilla y a menudo efectiva de aprovechar estos disipadores consiste en bombear agua caliente expuesta al terreno o al cielo nocturno cuando las condiciones son favorables, es decir, cuando la temperatura de los disipadores está por debajo de la temperatura requerida en el interior del edificio.

Esta investigación, por lo tanto, explora la posibilidad de activar térmicamente cimentaciones y cubiertas para así aprovechar estas técnicas de refrigeración (la climatización geotérmica y el enfriamiento radiativo) de manera eficiente y a bajo coste¹⁴. Más concretamente,

el trabajo se centra en estudiar las relaciones entre la forma urbana y su capacidad para disipar calor (por ejemplo, bloqueando la visibilidad del cielo nocturno entre edificios colindantes o modificando la temperatura del terreno). Los métodos de diseño generados permiten identificar, para un determinado clima, la densidad crítica a partir de la cual toda la demanda de refrigeración se puede satisfacer solamente a través de las cimentaciones y las cubiertas como disipadores de calor integrados. En climas templados con veranos cálidos, este fenómeno es posible hasta índices de edificabilidad de 4.5 (expresados como la relación entre las superficies total construida y el área de parcela).

Conclusiones

Este artículo ha presentado una manera alternativa de enfriar los edificios que, a diferencia de los sistemas convencionales de climatización, se centra en aprovechar las propiedades térmicas de la envolvente y la estructura. La integración de estrategias de refrigeración presenta una oportunidad única para mejorar la respuesta pasiva de los edificios al calor extremo sin que ello suponga un consumo adicional de recursos materiales. Este aspecto es especialmente relevante en contextos donde los sistemas activos no están operativos debido a, por ejemplo, un corte de suministro eléctrico. Al mismo tiempo, los resultados evidencian cómo la geometría y el diseño son herramientas indispensables para reducir las emisiones de carbono asociadas al sector de la edificación. El uso de nuevas técnicas de diseño computacional y simulación permiten encontrar aquellas soluciones que establezcan un balance óptimo entre los recursos materiales necesarios y el consumo energético durante el uso de los edificios, minimizando así el impacto medioambiental de la arquitectura a lo largo de su ciclo de vida.

¹ United Nations. 2019. "World Urbanization Prospects: The 2018 Revision." New York: United Nations.

² Liu, Zhao, Bruce Anderson, Kai Yan, Weihua Dong, Hua Liao, and Peijun Shi. 2017. "Global and Regional Changes in Exposure to Extreme Heat and the Relative Contributions of Climate and Population Change." *Scientific Reports* 7 (1): 43909. <https://doi.org/10.1038/srep43909>.

³ United Nations. 2022. "2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector." Nairobi.

⁴ Tuholkske, Cascade, Kelly Caylor, Chris Funk, Andrew Verdin, Stuart Sweeney, Kathryn Grace, Pete Peterson, and Tom Evans. 2021. "Global Urban Population Exposure to Extreme Heat," October, e2024792118.

⁵ Timón Tiemblo, María Pía. 1979. "Las Glorias': derivación de los Hipocaustos romanos." <https://repositorio.uam.es/handle/10486/8008>.

⁶ Dehghani-Sanji, Alireza, and Mehdi N. Bahadori. 2021. "Ice-Houses: Energy, Architecture, and Sustainability."

⁷ Weber, Ramon Elias, Caitlin Mueller, and Christoph Reinhart. 2022. "Solar Exoskeletons—An Integrated Building System Combining Solar Gain Control with Structural Efficiency." *Solar Energy* 240:301–14.

⁸ Broyles, Jonathan M., Micah R. Shepherd, and Nathan C. Brown. 2022. "Design Optimization of Structural-Acoustic Spanning Concrete Elements in Buildings." *Journal of Architectural Engineering* 28 (1): 04021044. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000520](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000520).

⁹ Global Industry Analysts, Inc. 2021. "Global Concrete Block and Brick Manufacturing Report 2021."

¹⁰ Kočí, Jan, Jiří Maděra, Miloš Jerman, and Robert Černý. 2015. "Computational Assessment of Thermal Performance of Contemporary Ceramic Blocks with Complex Internal Geometry in Building Envelopes." *Energy and Buildings* 99 (July):61–66. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.017>.

¹¹ Curth, Alexander, E. Gascón Alvarez, L. Saas, L. Norford, C. Mueller "Additive Energy: 3D printing thermally performative building elements with low carbon earthen materials" Book chapter in 3D printing for construction in the transformation of the building industry (Taylor and Francis, 2024). <https://doi.org/10.1201/9781003403890>

¹² Ismail, Mohamed A., and Caitlin T. Mueller. 2021. "Minimizing Embodied Energy of Reinforced Concrete Floor Systems in Developing Countries through Shape Optimization." *Engineering Structures* 246 (November):112955. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112955>.

¹³ Gascón Alvarez, Eduardo, Natasha L. Stamler, Caitlin T. Mueller, and Leslie K. Norford. 2022. "Shape Optimization of Chilled Concrete Ceilings – Reduced Embodied Carbon and Enhanced Operational Performance." *Building and Environment* 221 (August): 109330. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109330>.

¹⁴ Gascón Alvarez, Eduardo, Kiley Feickert, Mohamed A. Ismail, Caitlin T. Mueller, and Leslie K. Norford. 2023. "Integrated Urban Heat Sinks for Low-Carbon Neighbourhoods: Dissipating Heat to the Ground and Sky through Building Structures." *Journal of Building Performance Simulation* 0 (0): 1–21. <https://doi.org/10.1080/19401493.2023.2265335>.

▼ FIG. 5. la geometría óptima (aquella que encuentra un mejor balance entre el comportamiento estructural y térmico) depende del contexto y la tipología del edificio analizado. Este gráfico resume las ciudades analizadas en esta tesis y los resultados asociados a cada elemento y contexto.



EDUARDO GASCÓN ALVAREZ es Doctor Arquitecto por el MIT.