

# MATERIALES en la EDIFICACIÓN

Propiedades térmicas y ópticas

Procesos de fabricación

Consideraciones ambientales



la  
fa

Naoki E. Solano García





# Materiales en la edificación

Material complementario para  
las asignaturas de Sistemas Ambientales I y II

Propiedades térmicas y ópticas  
Procesos de fabricación  
Consideraciones ambientales



fa



**Nombre:** Solano Naoki E. (2022).

**Título:** Materiales para la edificación. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Arquitectura, Instituto de Investigaciones Bibliográficas.

Material complementario para las asignaturas de Sistema Ambientales I y II

**Identificadores:** LIBRUNAM 2171878 (libro electrónico) ISBN: 978-607-30-6197-1

**Temas:** Materiales de construcción – Propiedades térmicas – Propiedades ópticas – Aspectos ambientales – Arquitectura – Estudio y enseñanza

Clasificación: LCC TA418.5 | DDC 620.1129—dc23

Disponible en <https://repositorio.fa.unam.mx>.

Primera edición: octubre de 2022



D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Arquitectura, Circuito escolar s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, México, Ciudad de México.

Hecho en México.

Excepto donde se indique lo contrario, esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución-No comercial- Compartir igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0 Internacional). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.es>

Correro electrónico: [oficina.juridica@fa.unam.mx](mailto:oficina.juridica@fa.unam.mx).

Con la licencia CC-BY-NC-SA usted es libre de:

- Compartir: copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato.
- Adaptar: remezclar, transformar y construir a partir del material.

Bajo los siguientes términos:

- Atribución: usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.
- No comercial: usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.
- Compartir igual: Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original.

En los casos que sea usada la presente obra, deben respetarse los términos especificados en esta licencia. Esta publicación se realizó gracias al Programa UNAM-DGAPA-PAPIME Proyecto PE108820.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

RECTOR

Enrique Graue Wiechers

FACULTAD DE ARQUITECTURA

DIRECTOR

Juan Ignacio del Cueto Ruiz-Funes

COORDINADOR EDITORIAL

Xavier Guzmán Urbiola

EDITOR EN JEFE

Armando López Carrillo

EDITORA ASOCIADA

Guadalupe Elizabeth Luna Rodríguez

Bonilla editores

DISEÑO EDITORIAL Y FORMACIÓN

Jocelyn G. Medina

CORRECCIÓN DE ESTILO

Mauro Alberto Mendoza Posadas

REVISIÓN DE PRUEBAS

Gil del Valle

# Materiales en la edificación

Material complementario  
para las asignaturas  
de Sistemas Ambientales I y II

Propiedades térmicas y ópticas

Procesos de fabricación

Consideraciones ambientales

Naoki E. Solano García



fa



# Índice



|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| LOS MATERIALES Y SUS IMPACTOS                  | 55  |
| LOS MATERIALES Y SUS PROCESOS                  | 57  |
| LA ARQUITECTURA Y LOS MATERIALES               | 58  |
| PERFILES DE ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN | 62  |
| Concreto armado                                | 62  |
| Acero al carbono                               | 65  |
| Aleaciones de aluminio                         | 70  |
| Vidrios                                        | 72  |
| Tabique rojo recocido                          | 75  |
| Tabique de cemento-arena                       | 78  |
| Adobe                                          | 80  |
| Madera                                         | 83  |
| Bambú                                          | 88  |
| Cobre                                          | 91  |
| PVC                                            | 93  |
| MATERIALES AISLANTES TÉRMICOS                  | 95  |
| Poliestireno expandido (EPS)                   | 97  |
| Poliestireno extruido (XPS)                    | 98  |
| Espuma rígida de poliuretano (PUR)             | 100 |
| Lana mineral (lana de vidrio y lana de roca)   | 102 |
| Fibra de celulosa (papel y cartón)             | 103 |
| Paja                                           | 105 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| NUEVOS MATERIALES               | 106 |
| Espumas metálicas               | 107 |
| Metales amorfos                 | 108 |
| Aleaciones de memoria de forma  | 108 |
| Materiales cambio de fase (MCF) | 109 |
| Nanomateriales                  | 109 |

**119**

**123**

**128**

**130**



# Prólogo

Gran parte del nuevo estudiantado de las carreras de arquitectura y diseño desconocen el origen y los impactos de los materiales utilizados en la industria de la construcción. Se desconoce de dónde vienen o cómo se fabrican, qué impacto tiene su manufactura en el ambiente, cómo influyen en el bienestar térmico y qué propiedades y capacidades tienen, más allá de sus cualidades mecánicas o estéticas, éstas últimas, las más abordadas en la formación académica.

Esta publicación forma parte del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME) y tiene por objetivo proveer un conocimiento complementario de los materiales, como parte de los contenidos de las asignaturas Sistemas Ambientales I y II, en las cuales se aborda el eje transversal de la sostenibilidad desde etapas tempranas de la formación académica. Se pretende que estos conocimientos sean discutidos, aplicados, ampliados y profundizados en las asignaturas subsecuentes, sobre todo en el Taller Integral de Arquitectura, donde se aborda como tal el diseño del entorno construido.

En las siguientes páginas conocerás una carta de presentación de cada uno de los materiales que probablemente utilices durante el resto de tu formación académica y profesional, tomando como punto de partida el contexto actual del entorno construido del país. Podrás identificar cuáles son los procesos de extracción, transformación, manufactura y uso de los materiales, sus propiedades térmicas y ópticas hacia un bienestar térmico, eficiencia energética, así como sus principales impactos ambientales en términos de sus emisiones.

Esta obra se enfoca mayoritariamente a las propiedades térmicas y ópticas de los materiales debido a que las propiedades mecánicas y estéticas son abordadas desde etapas tempranas con asignaturas dedicadas a ellas, no así las propiedades termofísicas, las cuales se abordan casi siempre sólo hasta llegar a la mitad de la carrera.

Al empezar a conocer, desde los primeros semestres, las propiedades térmicas y la manufactura de los materiales en los procesos de planeación y diseño de los edificios, se pretende que el estudiantado adquiera una mayor sensibilidad hacia elecciones responsables en las envolventes arquitectónicas que propongan, lo cual derive en mejores soluciones técnicas, mayor variedad de materiales, una reflexión concienzuda alrededor del ciclo de vida de los mismos, bienestar psicofisiológico para los usuarios, además de un declarado compromiso hacia el ambiente. La sostenibilidad comienza con el dibujo de una raya en un croquis, un cúmulo de necesidades a satisfacer, un sitio, un presupuesto espacial, un concepto detonador y un repertorio de opciones informadas para poner manos a la obra.

# **Cambio climático y el entorno construido**

## EL EFECTO INVERNADERO

Para comenzar, es pertinente mencionar el papel del efecto invernadero. Es importante reconocer de qué manera la especie humana ha contribuido a alterar este proceso natural, el cual, cabe mencionar, no es malo por sí mismo, y por qué es importante que se hagan esfuerzos por mitigar sus efectos en el clima global.

El efecto invernadero sucede cuando la energía, en forma de radiación proveniente del Sol, pasa a través de la atmósfera. La energía es absorbida en esta capa calentando los gases que ahí se encuentran emitiendo radiación infrarroja en varias direcciones. Estos son los Gases de Efecto Invernadero (GEI), que absorben gran parte de esta radiación, y luego la irradian hacia arriba y hacia abajo. Parte de esta energía es reflejada al espacio, y otra parte es reflejada hacia la superficie terrestre. La superficie terrestre y la atmósfera baja son calentadas por esta energía irradiada hacia abajo haciendo posible la vida en la Tierra. Sin la presencia de los GEI, la temperatura de la Tierra sería demasiado baja para albergar la vida como la conocemos.

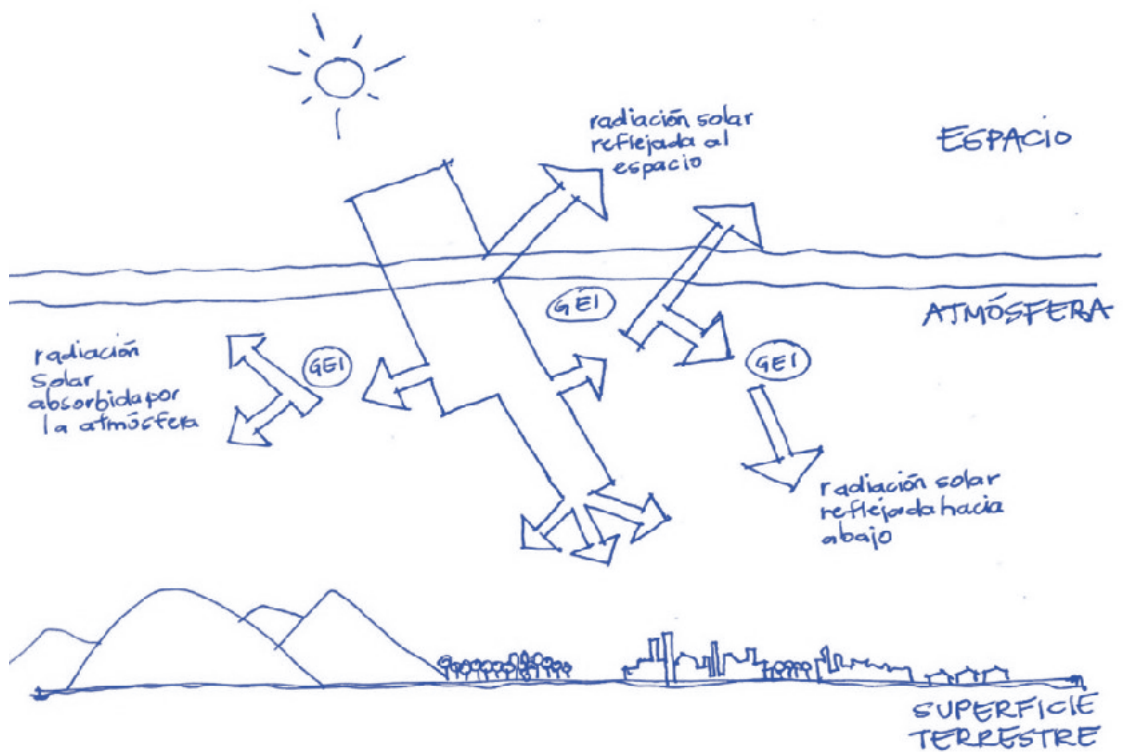


Imagen 1. El efecto invernadero. Elaboración propia, basado en La Roche.

Algunos GEI se generan naturalmente y son descargados a la atmósfera a través de procesos naturales y de actividades humanas. Otros GEI son creados y emitidos sólo por las actividades humanas. Los GEI que entran a la atmósfera y que son producidos por actividades humanas son: el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), los gases hidrofluorocarbonos y los hexafluoruros de azufre.<sup>1</sup>

Las emisiones antropogénicas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) surgen a partir de una gama de actividades como la industria, el transporte, la agricultura y la operación del entorno construido. Las emisiones de dióxido de carbono antropogénico se derivan principalmente de la quema de combustibles fósiles: el carbón, el petróleo y el gas natural. En segundo lugar, se encuentra la deforestación, la cual libera emisiones al talar los bosques para reconvertir el suelo en tierra agrícola, convirtiendo el carbono almacenado en la celulosa de los árboles en dióxido de carbono al descomponerse o quemarse.<sup>2</sup> La presencia de estos gases en la atmósfera se ha incrementado en niveles nunca vistos en tres millones de años.<sup>3</sup>

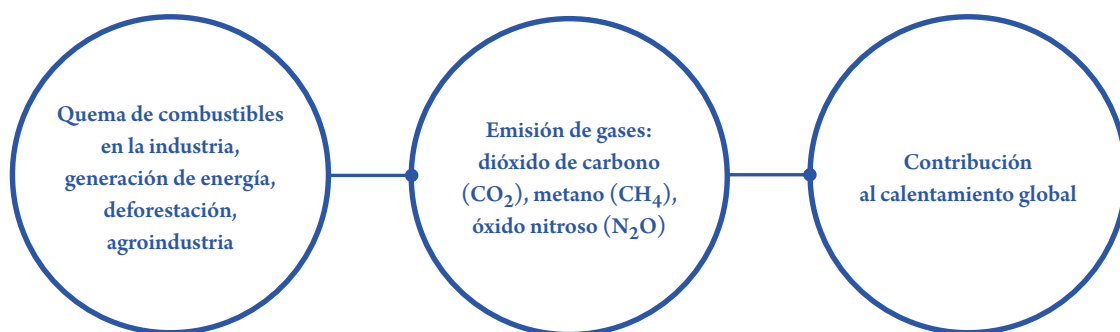


Figura 1. Causas principales del calentamiento global. Fuente: ONU, Cambio climático.

Esta producción masiva y sin precedentes de GEI por parte del humano provoca su acumulación en nuestra atmósfera e impide que un determinado espectro de la radiación procedente del Sol pueda ser reflejada y disipada al es-

1. Pablo La Roche, "The Greenhouse Effect", *Carbon Neutral Architectural Design* (Boca Raton: CRC Press, 2017).
2. Daniel Kirk-Davidoff, *The Greenhouse Effect, Aerosols, and Climate Change, Green Chemistry: An Inclusive Approach* (Amsterdam: Elsevier, 2018). DOI: 10.1016/B978-0-12-809270-5.00009-1.
3. "Desafíos globales. Cambio climático", <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change#:~:text=Convención>



pacio como normalmente siempre había sucedido, manteniendo con ello el equilibrio en los ecosistemas y los ciclos vitales de agua y carbono. Ahora, esta energía solar ha comenzado a quedar “atrapada” dentro de nuestra atmósfera provocando el lento, pero demostrado,<sup>4</sup> aumento de la temperatura global del planeta. La rapidez con que estos cambios están sucediendo pone en duda si nuestros ecosistemas resistirán un cambio tan abrupto, poniendo en riesgo los servicios ambientales de los ecosistemas de los cuales dependemos para sobrevivir como especie.

## MITIGACIÓN Y ADAPTACIÓN

Desafortunadamente, ante este escenario ya no es posible revertir los efectos nocivos del cambio global actual. Lo único que nos queda por hacer es mitigar y disminuir la emisión de estos gases, así como adaptarnos a las nuevas condiciones del planeta de forma resiliente.

El Panel Internacional sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define mitigación como una intervención antropogénica para reducir las fuentes o potenciar los sumideros de GEI. En cuanto a la adaptación, se refiere al ajuste de los sistemas naturales o humanos en respuesta a estímulos climáticos reales o esperados, que aminoren el daño o aprovechen oportunidades beneficiosas. Para esto, se pueden distinguir diferentes tipos de adaptación: anticipatoria y reactiva, pública y privada, autónoma, y planeada, entre otras.

La mitigación climática es una acción específica para eliminar o reducir permanentemente los riesgos y peligros a largo plazo del cambio climático para la vida humana o la propiedad. La implementación de alteraciones específicas en los patrones de vida, o bien, el modo en que edificamos y operamos el entorno construido entran en esta categoría.

La adaptación climática se refiere a la habilidad de un sistema para adaptarse al cambio climático, incluida la variabilidad climática y los extremos, para moderar el daño potencial, así como aprovechar las oportunidades o hacer frente a las consecuencias. Las iniciativas estratégicas, leyes y políticas nacionales e internacionales entran en esta categoría.<sup>5</sup>

4. *Calentamiento Global de 1.5 °C* (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019).

5. Brian C. Black *et al.*, *Climate Change: An Encyclopedia of Science and History* (Westport: ABC-CLIO-LLC, 2013), <http://ebookcentral.proquest.com/lib/unam/detail.action?docID=1122577>

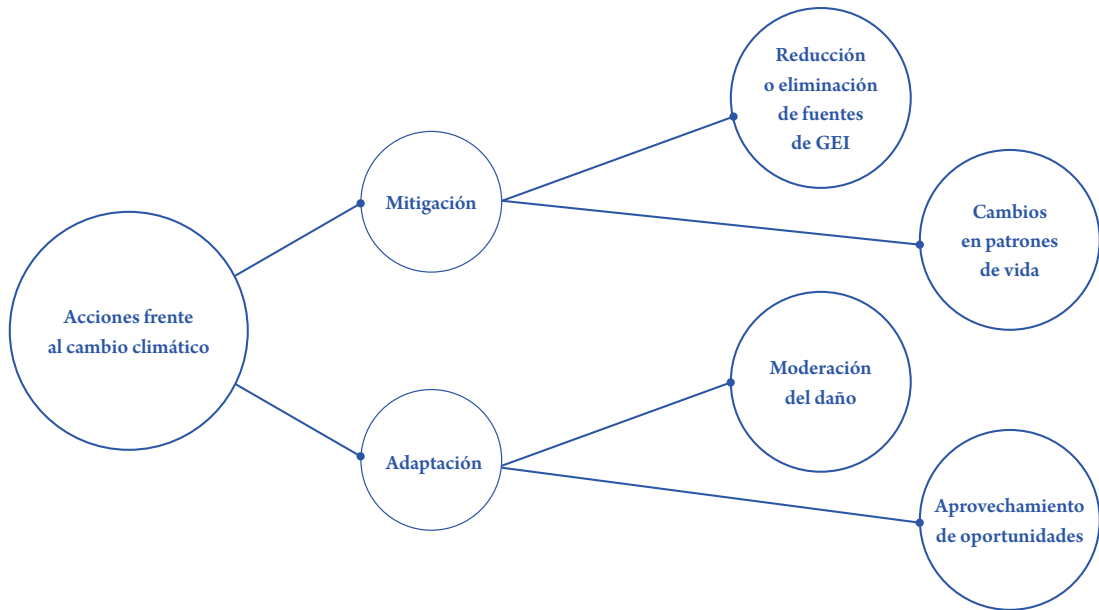


Figura 2. Acciones frente al cambio climático. Fuente: Climate Change: An Encyclopedia of Science and History.

Es importante conocer los impactos directos e indirectos de nuestro quehacer profesional para poder actuar con ética y responsabilidad ante este escenario mundial. El entorno construido emite, tanto de forma directa como indirecta, una gran cantidad de emisiones de GEI a la atmósfera. Éstas incluyen las que son consecuencia de la extracción, manufactura o producción de los materiales de construcción, así como la producción y consumo de energía para operar los edificios a lo largo de su vida útil. Es difícil determinar la cantidad exacta de energía utilizada por el sector de la industria de la construcción debido a que, en términos generales, se le considera como parte del gran sector industrial y no como un sector independiente con sus propios datos. Aun así, se estima que las emisiones de GEI del sector de la construcción representan alrededor de un tercio de las emisiones mundiales, esto de acuerdo con el Programa de Medio Ambiente de Naciones Unidas.

### **EL ENTORNO CONSTRUIDO, LOS EDIFICIOS Y SUS CONSUMOS**

El entorno construido requiere de grandes cantidades de energía para poder funcionar. Las ciudades han modificado al paisaje de forma permanente y la vida de la mitad de los seres humanos en el planeta se llevará a cabo en las ciu-

dades, las cuales son impulsores del consumo mundial de materiales. Este consumo se hace típicamente de manera lineal al extraer recursos fuera de las ciudades, para ser utilizados dentro de las ciudades y, finalmente, ser desechados fuera de sus límites. Esta dinámica altera los ciclos ecológicos biogeoquímicos de los alrededores. Por ello, los asentamientos humanos se dividen en dos escalas: la de los edificios individuales y la del entorno construido, en el entendido que el entorno construido es una colección de edificios autónomos junto con sus infraestructuras y actividades humanas.<sup>6</sup>

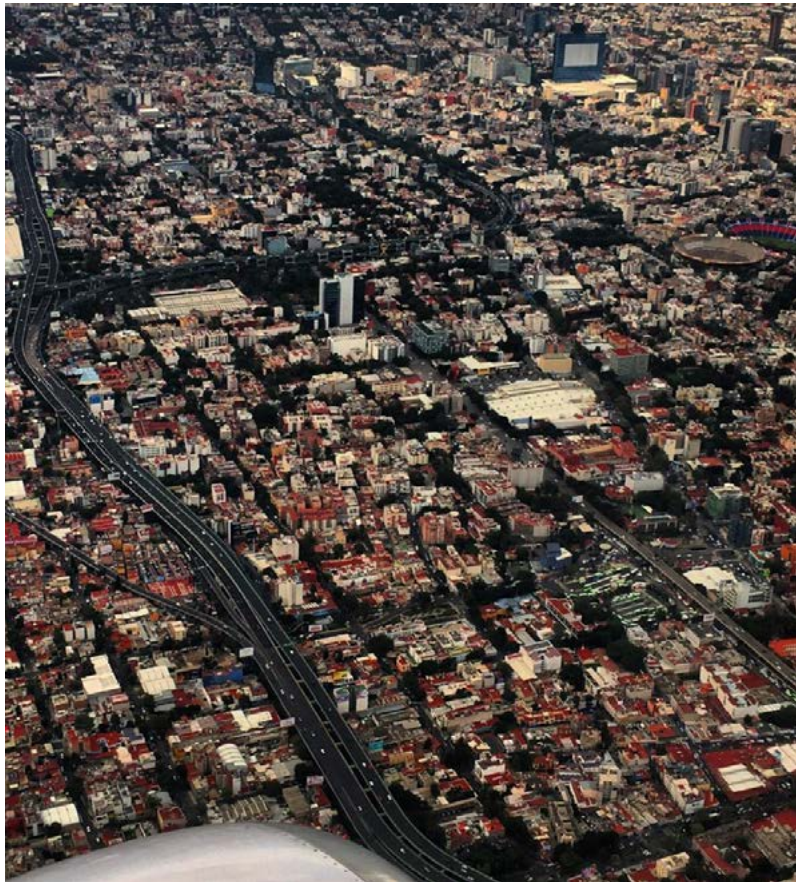


Imagen 2. Entorno construido de la Ciudad de México. Imagen del autor.

6. Benjamin Goldstein y Freja Rasmussen, "LCA of Buildings and the Built Environment", *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, Michael Hauschild, Ralph Rosenbaum y Stig Olsen (eds.) (Nueva York: Springer, 2018), <https://doi.org/10.2134/csa2019.64.0706>

Una metodología muy útil para poder medir y evaluar el impacto de los materiales, los edificios y las ciudades es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). La aplicación del ACV en los edificios y el entorno construido ha desarrollado un interés creciente en los últimos años por parte de arquitectos, ingenieros, diseñadores y tomadores de decisiones en los sectores públicos y privados. Aun así, es preocupante ver que los impactos ambientales de las ciudades no disminuyen: el consumo de energía y materiales sigue en aumento en el sector de la construcción al mismo tiempo que se incrementa la expansión y urbanización de más territorio.

#### Consumos del entorno construido

- Materiales de construcción para infraestructura urbana: producción y transporte
- Electricidad
- Agua
- Movilidad
- Tratamiento de desechos sólidos

#### Consumos de los edificios

- Materiales de construcción para los edificios: producción y transporte
- Servicios y sistemas para construir edificios
- Servicios y sistemas para operar edificios
- Acondicionamiento de espacios para el bienestar térmico, acústico y psicofisiológico
- Electricidad
- Agua
- Tratamiento de desechos sólidos

Tabla 1. Yuxtaposición de consumos del entorno construido y los edificios dentro del tejido urbano. Elaboración propia, adaptado de Goldstein y Rasmussen.

Uno de los roles del ACV es proveer de información futura para el diseño de edificios y entornos urbanos durante la transición hacia un futuro sostenible, y ayudar a garantizar que los beneficios del crecimiento económico no perjudiquen el funcionamiento de los ecosistemas globales. Los ACV de los edificios y el entorno construido son diferentes en metodología y tienen marcos distintos de los sistemas que evalúan, los cuales se resumen en la tabla 2.

Como se puede apreciar, la escala de edificio tiende a requerir datos para medir impactos más precisos de acuerdo con su escala, mientras que en la escala de entorno se trata sólo de identificar a los principales impulsores de los impactos.

| Tipo de evaluación | Entorno construido                                                                                                         | Edificios                                                                                                                      |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Escala             | Aglomeración de edificios (barrio, ciudad, conurbación)                                                                    | Edificio independiente o tipo de edificio                                                                                      |
| Temporalidad       | Medición de consumos en intervalos anuales                                                                                 | Medición de consumos durante el tiempo de vida total de un edificio, típicamente desde intervalos mensuales hasta por décadas. |
| Componentes        | Categorías de consumo general:<br>Materiales<br>Alimento<br>Combustibles<br>Agua<br>Electricidad<br>Generación de residuos | Materiales<br>Patrones de consumo de energía<br>Agua<br>Procedimientos de construcción<br>Disposición de desechos              |
| Datos              | Encuestas, censos, estadísticas, reportes de industria                                                                     | Ajustados a la medida del edificio                                                                                             |

Tabla 2. Diferencias entre la aplicación del ACV para edificios y el entorno construido. Elaboración propia, basado en Goldstein y Rasmussen.

Dentro de las aplicaciones del ACV para edificios se encuentra la comparación de diferentes opciones de formas, diseño o materiales a nivel de un solo edificio. Es posible hacer una comparación con los impactos potenciales de soluciones de diseño, o bien, someter los resultados a evaluación contra una línea de referencia de desempeño específico de acuerdo con el tipo de edificio y su uso.<sup>7</sup>

Pese a que los arquitectos idealmente pensamos que los edificios son eternos una vez construidos, esto está muy lejos de ser verdad. Para ello, es necesario que reflexionemos desde etapas tempranas de diseño cómo sería el ciclo de vida del edificio o producto que estamos diseñando. Las etapas del ciclo de vida de un edificio se dividen en tres: pre-uso, uso y post-uso. Dentro de estas tres grandes categorías, es posible desglosar subcategorías, como se detalla en el siguiente esquema:

7. Goldstein y Rasmussen, *op. cit.*

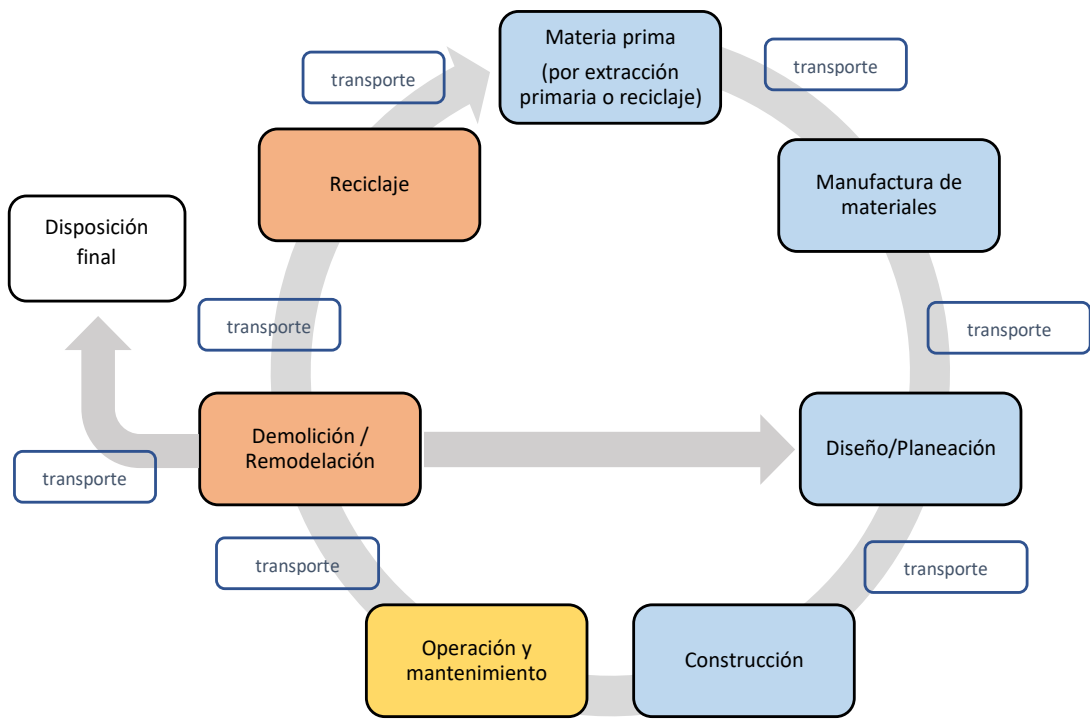


Figura 3. Etapas del Ciclo de Vida de una edificación individual. Las subcategorías de pre-uso se encuentran en azul, las de uso en amarillo y las de post-uso en rojo. Fuente: Elaboración propia, basado en Life Cycle Assessment.

Estas etapas tienen diferentes periodos de duración, siendo la etapa de operación (uso) y mantenimiento de las más largas, la cual dura generalmente décadas. Esta etapa tiende a dominar los impactos ambientales por concepto de utilización de energía, aunque, a medida que los edificios se vuelven cada vez más energéticamente eficientes, los impactos se desplazan hacia otras etapas, como la de la manufactura de materiales. Por ello, el consumo de energía total durante el ciclo de vida de un edificio se clasifica en dos componentes principales: energía embebida y energía operacional.<sup>8</sup>

La *energía embebida* es aquella consumida en los procesos de manufactura de los materiales de construcción, lo cual incluye la energía usada desde la extracción de las materias primas, su proceso de transformación y manufac-

8. Manish Dixit et al., "Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (Texas: College of Architecture, 2012). DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.021.

tura, así como su transporte hasta el sitio de la obra, entre otras cosas. Hoy, la mayor parte de los materiales de construcción que utilizamos los arquitectos en nuestros diseños se consideran como industrializados; esto significa que en su proceso de manufactura se quemaron cantidades importantes de combustible para poder producirlos.

Por otro lado, la *energía operacional* es aquella consumida, o por consumir, durante el uso y operación de los edificios a lo largo de su vida útil. Esta energía es consumida, entre otras cosas, en forma de iluminación artificial, uso de aparatos eléctricos y electrónicos, equipos, aparatos de gas u otros combustibles, así como en sistemas de ventilación mecánica o climatización artificial (aire acondicionado y/o calefacción) para mantener las condiciones óptimas de bienestar térmico al interior de los edificios.

El consumo de energía se relaciona inherentemente con las emisiones de carbono de un edificio. Estos consumos energéticos se traducen en emisiones de carbono provocados por la quema de combustibles, ya sea para la manufactura de los productos, o bien, para generar la energía eléctrica utilizada en los edificios durante su vida útil. Por lo tanto, las emisiones de carbono se clasifican en emisiones de *carbono incorporado* y de *carbono operacional*.

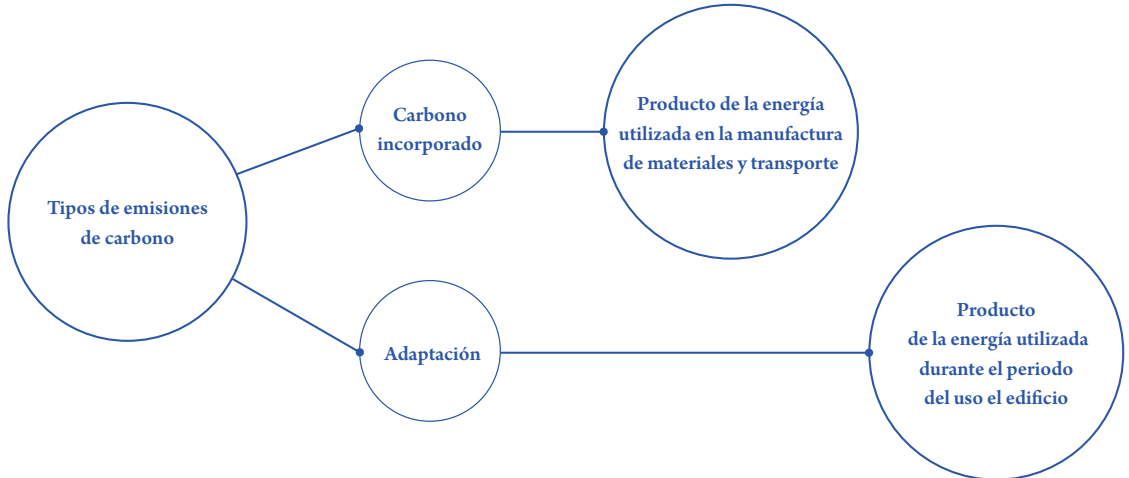


Figura 4. Tipos de emisiones de carbono. Fuente: Need for an Embodied Energy Measurement Protocol for Buildings.

A mayor energía consumida, ya sea embebida u operacional, mayores serán las emisiones de GEI a la atmósfera.

Existen correlaciones entre la energía embebida y operacional en un edificio. Por ejemplo, en climas extremos (muy calurosos o fríos) los edificios con envolventes energéticamente más eficientes tienden a tener una mayor huella de carbono embebido, pero tienen una huella de carbono operacional mucho menor en comparación a un edificio en el mismo sitio sin una envolvente eficiente.<sup>9</sup> Sin embargo, esta y otras suposiciones no pueden ser aplicadas de manera universal o en forma de receta. Cada proyecto o edificio tiene sus propias condicionantes climáticas, físicas, económicas y sociales dentro de sus contextos.

Como referencia, la metodología de ACV de una edificación se basa en dos normas de la Organización Internacional de Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés):

- ISO 14040: Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida: principios y marco de referencia.
- ISO 14044: Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida: requerimientos y directrices.

## ENERGÍA Y DISEÑO

Una de las funciones de la arquitectura es proveer las condiciones internas de bienestar psicofisiológico (térmico, lumínico, acústico, emocional) del usuario. Dentro del bienestar térmico y lumínico, se recurre básicamente a dos estrategias: aprovechar, o bien, rechazar la energía ambiental, en forma de luz y calor, mediante sus envolventes arquitectónicas.

En las imágenes 3 y 4 podemos ver un edificio que “rechaza” la energía ambiental mediante el uso de materiales regionales y un techo entretejido de carrizos, madera y teja de barro para amortiguar la entrada de calor al interior. También utiliza muros de adobe, los cuales tienen excelentes propiedades termofísicas cuando se utilizan en lugares cálidos y secos. Además, tiene una fachada de tabiques cuatrapeados en forma de celosía con el fin de mitigar la entrada de luz al interior. Todas estas estrategias se idearon de forma vernácula sin la necesidad de un sistema de enfriamiento artificial. Sin embargo, podemos apreciar la introducción de “nuevos” materiales industrializados como las láminas prefabricadas en algunas cubiertas en ampliaciones hechas de manera reciente.

9. Igor Sartori y Anne Grete Hestnes, “Energy Use in the Life Cycle of Conventional and Low-Energy Buildings: Review Article”, *Energy and Buildings* 39 (Trondheim: NTNU, 2007). DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.07.001.





Imagen 3. Casa que modera la entrada de energía solar a través de una celosía y un techo entretejido de carrizos, madera y barro. Guerrero, México. Imagen del autor.



Imagen 4. Detalle del techo interior entretejido de carrizos, madera y tejas de barro. Guerrero, México. Imagen del autor.

Por otro lado, en la imagen 5 tenemos un edificio muy al norte de Europa que “aprovecha” la energía ambiental mediante las propiedades ópticas de los materiales (uso de colores oscuros) y ventanas grandes orientadas al sur y poniente para permitir la entrada controlada de calor al interior, con el objetivo de disminuir la climatización artificial por medio de calefacción.



Imagen 5. Edificio “Passivhaus” que aprovecha la energía del ambiente. Escocia, Reino Unido.  
Imagen del autor.

Una elección incorrecta de los materiales en la envolvente arquitectónica en el contexto incorrecto, probablemente por desconocimiento de sus propiedades térmicas y ópticas, puede derivar en la implementación innecesaria de sistemas activos de climatización artificial, los cuales pudieron evitarse desde un principio con materiales adecuados que respondieran al clima del sitio. Con ello, se lograría una disminución importante de la energía operacional del edificio.

Sin embargo, en algunos lugares no es posible prescindir de sistemas activos de calefacción o enfriamiento artificial debido a las condiciones extremas de clima local para lograr el bienestar térmico interior. De igual manera, una correcta especificación de materiales hará que la envolvente se vuelva energéticamente eficiente y permita que estos sistemas funcionen durante un menor tiempo generando ahorros significativos de energía y emisiones a lo largo de su periodo de uso.

Cabe mencionar que la cuestión no es tan simple. Los materiales por sí mismos no pueden lograr estos ahorros energéticos ni el bienestar psicofisiológico del usuario. Sólo un diseño arquitectónico bioclimático óptimo logrará los ahorros deseados de manera integral, junto con una correcta elección de los materiales.

## **EXPECTATIVAS DE BIENESTAR TÉRMICO**

Contrario a lo que sucede en los climas fríos, históricamente no había la necesidad de utilizar energía adicional para el bienestar térmico interior de los edificios en zonas áridas y tropicales del planeta, al menos no con las expectativas de bienestar de hoy en día. Con la invención de las tecnologías de enfriamiento artificial del aire comenzamos a hacerlo y con ello empezamos a incrementar la huella de carbono operacional donde antes no había tal. Esto ha tenido ventajas, como el desarrollo y la mejora en la calidad de vida de las personas. La principal desventaja es que, al hacerlo, estamos contaminando más a cambio de nuestras altas expectativas de bienestar térmico.

Todas y todos tenemos derecho al bienestar térmico al interior de los edificios que habitamos, para lo cual, las y los arquitectos somos actores primordiales al ejercer la profesión con pleno conocimiento de los materiales, sistemas constructivos, diseño bioclimático, limitantes normativas y económicas, así como los procesos de diseño y edificación del entorno construido. Por otro lado, es una realidad que una gran parte de la vivienda en México y el mundo se produce por medio de la autoconstrucción sin la intervención de arquitectos, lo cual conlleva a algunas problemáticas derivadas de este fenómeno.

En el ánimo de mejorar de manera legítima sus condiciones de vida, muchas personas, en climas áridos y tropicales, optan por instalar sistemas de climatización artificial en viviendas de autoconstrucción sin un adecuado conocimiento u orientación especializada al respecto. Muchas de estas casas

están construidas con materiales que resultan no ser los mejores para mantener un funcionamiento óptimo o eficiente de estos equipos, provocando un incremento en la huella de carbono operacional de sus viviendas, además de un mayor costo económico para las familias por el consumo excesivo de electricidad.



Imagen 6. Equipo de aire acondicionado para una envolvente arquitectónica con un aislamiento térmico pobre. Oaxaca, México. Imagen del autor.

De acuerdo con la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares 2018, se estima que el 60% de las viviendas en México tiene algún tipo de ventilación o sistema artificial de climatización, con poco más de 7 millones de equipos en uso.<sup>10</sup> La gran mayoría de estos equipos son utilizados hasta 9 o más horas al día. De ahí la importancia de disminuir el tiempo de uso de estos aparatos mediante la implementación de envolventes arquitectónicas energéticamente eficientes.

10. "Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares. Presentación de Resultados", [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/encevi/2018/doc/encevi2018\\_presentacion\\_resultados.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/encevi/2018/doc/encevi2018_presentacion_resultados.pdf)

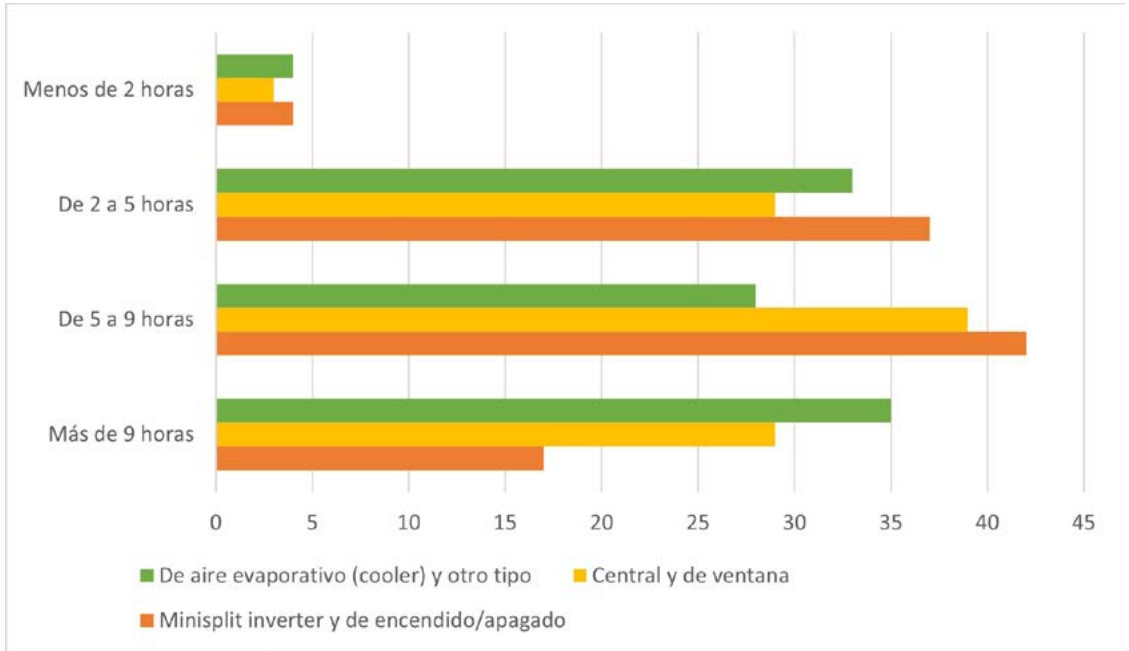


Figura 5. Distribución porcentual de equipos de aire acondicionado en uso en viviendas particulares por tiempo de uso al día, según tipo de equipo. Fuente: Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares.

Es momento de reflexionar en los procesos de diseño cómo podemos seguir proveyendo un bienestar térmico razonable en zonas cálidas de manera eficiente sin incrementar los consumos de energía asociados a ello. De cara al cambio global, es altamente probable que los niveles climáticos en el futuro sean más cálidos que los actuales, por lo cual tendremos que diseñar edificios que respondan de manera integral a esta nueva condición. No podemos dejar de construir, la demanda de edificios es enorme, pero sí podemos construir mejor mediante un mayor conocimiento de nuestros materiales de construcción.

# **El entorno construido de México**

De acuerdo con el último censo, México tiene una población de 126 millones de habitantes. Cerca del 60% de esa población vive en lugares de clima árido o tropical donde los sistemas de ventilación mecánica o enfriamiento artificial son utilizados de manera cada vez más común para mantener las condiciones interiores de bienestar térmico. Según datos de la Secretaría de Energía, la región del norte de México es la que tiene el mayor incremento en la demanda de electricidad asociado al uso de sistemas artificiales de enfriamiento. Cada tonelada de refrigeración adicional requiere de enormes inversiones en infraestructura eléctrica y, en consecuencia, un mayor impacto por emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

La construcción de la gran mayoría de edificios de escala pequeña y mediana en el país ha estado basada principalmente en un sistema de envolvente arquitectónica: muros de mampostería confinada y losas de concreto armado. Estos edificios fueron construidos de esta manera, independientemente de las condiciones climáticas locales.

## **UN PAÍS CONSTRUIDO EN CONCRETO Y ACERO**

De acuerdo con cifras de la Cámara Nacional del Cemento, México es uno de los mayores productores de cemento a nivel mundial con cerca de 50 millones de toneladas por año.<sup>1</sup> Sin embargo, esta producción resulta ser bastante menor a la reportada por otros países como China, con 2 400 millones de toneladas; India, con 340 millones de toneladas; o Estados Unidos, con 90 millones de toneladas producidas en 2020. Aun así, se considera a México como un gran productor, con una sólida y desarrollada industria del cemento. Esta situación se ve directamente reflejada en el entorno construido que habitamos como país, donde una grandísima cantidad de viviendas y edificios civiles en zonas rurales y urbanas son construidas utilizando sistemas de mampostería confinada, muros, losas y cimentaciones de concreto. Las estructuras basadas en concreto comenzaron a sustituir al inventario de edificios construidos con sistemas tradicionales de adobe y madera de forma masiva en la década de los setenta, probablemente al estar ya muy deterioradas, y también, para satisfacer la demanda de edificios en concordancia con el auge económico e industrial sin precedentes de la época. A partir de entonces, el país se ha construido utilizando concreto para la gran mayoría de tipologías arquitectónicas y obras de ingeniería.

1. “Cemento y productos a base de cemento. Reporte de fabricación” (Cámara Nacional del Cemento, 2019), <https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion/>

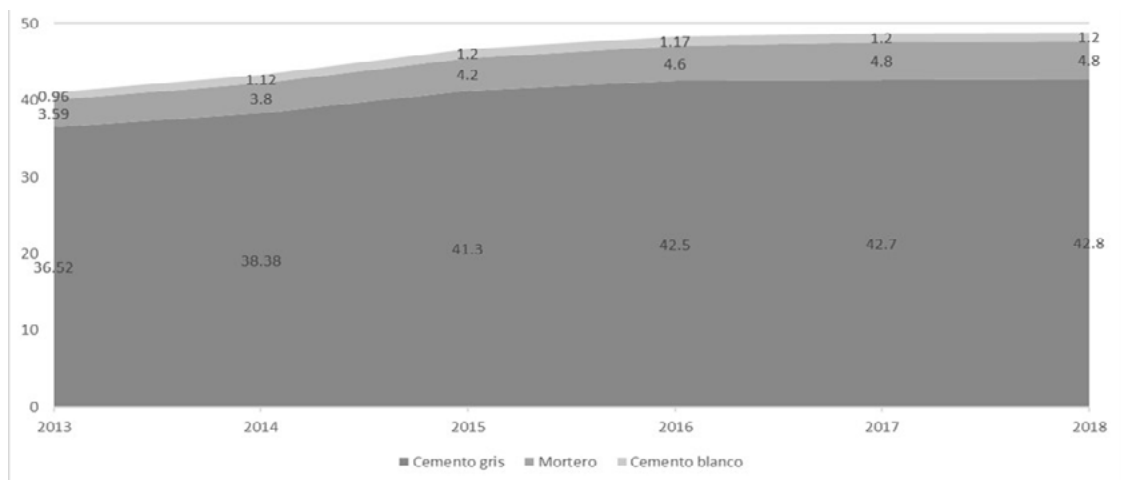


Figura 6. Producción anual de cemento en México de 2013 a 2018, en millones de toneladas.  
Fuente: Reporte de fabricación Canacem.

El acero es otro de los materiales más comúnmente utilizados en la construcción en México ocupando el lugar número 15 de producción a nivel mundial con 16.8 millones de toneladas en 2020. Se espera que la demanda de acero siga incrementándose a un ritmo de 3.8% anual.<sup>2</sup> Debido a sus múltiples usos, el acero es considerado como el material de ingeniería y construcción más importante del mundo, además es un metal que puede reciclarse una y otra vez sin perder sus propiedades. En México, de acuerdo con cifras de la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (Canacero), 38% de la producción de acero nacional está basada en el reciclaje.

## SISTEMAS CONSTRUCTIVOS Y MATERIALES MÁS USADOS

De acuerdo con el Censo 2020 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), existen hoy 35.2 millones de viviendas en México. Se estima que casi el 90% de ellas están construidas en tabique, ladrillo, block, cemento o concreto; 9% en madera o adobe; y el resto en bahareque, carrizo, bambú, palma, cartón, lámina metálica y materiales de desecho.<sup>3</sup>

2. "Radiografía de la industria del acero en México", (CANACERO, 2020), [https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/Radiografia\\_de\\_la\\_Industria\\_del\\_Acero\\_en\\_Mexico\\_2020.pdf](https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/Radiografia_de_la_Industria_del_Acero_en_Mexico_2020.pdf)
3. "Viviendas particulares habitadas por tipo de material en paredes, 2015", *Encuesta Intercensal 2015*, (INEGI, 2015), [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2016/archivos/o4\\_empleovivienda/D1\\_EMPVIVO2\\_o2.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2016/archivos/o4_empleovivienda/D1_EMPVIVO2_o2.pdf)



Estos datos sugieren que la mayoría de las viviendas en entornos urbanos y rurales recurren al sistema constructivo de *muros de mampostería confinada*, lo que significa que utilizan muros de tabique o block, los cuales son reforzados con elementos de concreto armado verticales y horizontales, como lo son cerramientos, dadas y castillos. Las losas de techo serían en su mayoría utilizando el sistema de losa plana de concreto armado u otros sistemas afines como viga y bovedilla, debido a su bajo costo y amplia oferta en el mercado.

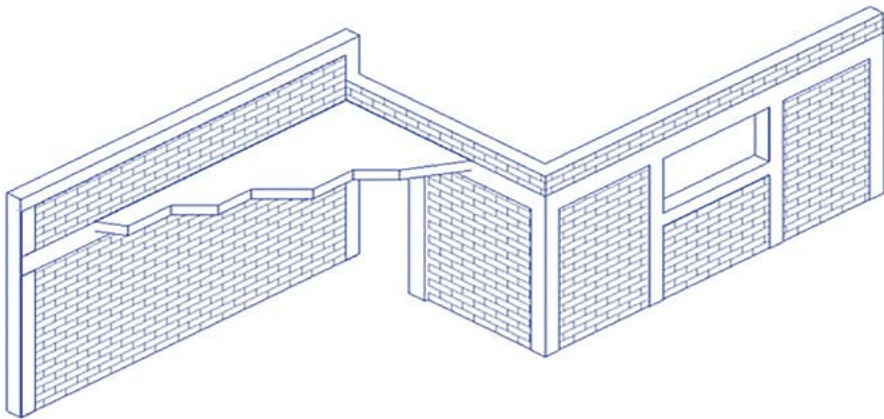


Imagen 7. Sistema de muros de mampostería confinada. Imagen del autor.



Imagen 8. Proceso constructivo de muros de mampostería confinada previo al cimbrado y colado de los castillos. Ciudad de México. Imagen del autor.



Imagen 9. Tabiques rojos recocidos de barro en una obra. Ciudad de México. Imagen del autor.



Imagen 10. Tabiques de cemento-arena en una obra de autoconstrucción. Ecatepec, Estado de México. Imagen del autor.

Este sistema es óptimo para climas templados o con altas variaciones de temperatura entre el día y la noche, debido a sus propiedades de masa térmica.

Sin embargo, sin las adaptaciones pertinentes, resulta ser un tanto inadecuado en climas cálidos y tropicales ya que permite muy fácilmente la entrada y almacenamiento de calor en el interior de las envolventes arquitectónicas, creando una potencial dependencia a los sistemas artificiales de climatización interior.

A continuación, se hará una breve reseña de los elementos constructivos más populares de la construcción de vivienda en México.

### **Muros**

Construir con muros de mampostería confinada tiene varias ventajas térmicas en determinados climas, ya que permiten la absorción de energía por parte del tabique liberándola de manera paulatina durante un determinado tiempo mediante un fenómeno llamado retardo térmico. Esto se debe a su capacidad de calor específico, lo cual lo vuelve idóneo para almacenar energía liberándola durante el curso de la noche. Además, se acostumbra a poner un aplanado en sus caras interiores (normalmente yeso) y exteriores (normalmente de mortero de cemento), los cuales tienen la función de proteger el muro de la humedad, además de darle una apariencia estética terminada. El



Imagen 11. Muro de tabique rojo recocado siendo aplanado en su exterior con una capa de mortero de cemento-arena. Ciudad de México. Imagen del autor.

tabique cuenta con una alta capilaridad y permanece básicamente sin afectaciones aun cuando sea afectado por humedad severa. De no haber una fuente de humedad constante, el tabique se secará de manera relativamente rápida y sin mayor problema. El aplanado de mortero de cemento en la cara exterior de la pared protege al tabique contra el agua y humedad al tener una capilaridad limitada y, aunque no es del todo una capa impermeabilizante, protege eficazmente al tabique siendo una primera capa de secado. Los tabiques pueden absorber más agua por su capilaridad que por su higroscopicidad. Al momento de utilizarse en la construcción de un muro, estos deben ser sumergidos en una cubeta o tina con agua antes de ser colocados en las hiladas, de lo contrario absorberán el agua presente en el mortero de las juntas debilitando la mezcla y la estructura del muro.

### **Losas**

La mayoría de los entresijos y techos para vivienda en México se construyen utilizando al concreto como material principal, siendo la losa de concreto armado (losa plana maciza) y la losa de viga y bovedilla con capa de compresión de concreto armado las más populares. Estas opciones se edifican debido a su costo relativamente bajo y su facilidad constructiva, lo que permite que una mano de obra económica y poco calificada los edifique con razonable confianza en el resultado.

Utilizando un sistema de muros de carga, estos sistemas se construyen levantando paredes de tabique (mampostería confinada). Luego, se colocan cimbras de madera provisionales y soportes de madera de pino para permitir la instalación del armado y los accesorios eléctricos primarios en la parte superior. Después de tratar la cimbra con un producto a base de aceite, para evitar la absorción de humedad por parte de la madera, se vierte el concreto sobre la cimbra y el armado previamente preparados conformando con esto la losa monolítica resultante.

Posteriormente, el concreto se deja endurecer mediante un proceso de curado hasta alcanzar su máxima capacidad mecánica al cabo de varias semanas. En el caso de las cubiertas planas, adicionalmente se realiza un entortado con capas de algún material mineral natural ligero, normalmente grava de tezontle, tepojal o tepetate, y una capa extra de mortero de cemento-arena para dar las pendientes adecuadas a la losa y con ello lograr el desalojo eficiente de agua pluvial que caiga en la superficie.



Imagen 12. Cimbra y armado de varillas de acero previo a colado de concreto de una losa maciza. Ciudad de México. Imagen del autor.

## **DESEMPEÑO TÉRMICO DE ENVOLVENTES ARQUITECTÓNICAS PREDOMINANTES EN MÉXICO**

El entorno construido de México se encuentra edificado utilizando principalmente sistemas constructivos basados en mampostería confinada en concreto armado. Es relevante e importante estudiar su comportamiento y desempeño térmico como parte de la envolvente arquitectónica para asegurar el bienestar interior. Si bien el uso de estos sistemas puede ser cuestionado, es innegable que el entorno construido del país está edificado de esta manera.

Un estudio reciente mostró que el desempeño térmico de los elementos constructivos de los sistemas previamente mencionados no es del todo óptimo, salvo en un par de casos. En términos generales, su transmitancia térmica es muy alta, lo cual significa que permiten el flujo de calor de manera no controlada. Esto implica que no pueden gestionar adecuadamente los flujos de energía entre el ambiente exterior e interior, especialmente en climas cálidos y áridos, dando como resultado envolventes que no alcanzan un adecuado bienestar térmico interior. Sin embargo, este sistema resulta ser más idóneo para climas templados

debido a las propiedades de masa térmica de algunos de sus materiales, como el tabique rojo recocido. En la tabla 3 se ilustran los resultados de este estudio.<sup>4</sup>

| Elemento constructivo | Descripción                                                                                                                                                                           | Espesor mm | Transmitancia térmica (Valor-U) W/m <sup>2</sup> K |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------|
| Muros                 | Muro de tabique rojo recocido, con acabado interior de aplanado de yeso y acabado exterior de mortero de cemento-arena                                                                | 150        | 2.996                                              |
|                       | Muro de tabique rojo recocido, sin acabados interiores o exteriores                                                                                                                   | 120        | 2.967                                              |
|                       | Muro de tabique de cemento-arena, con acabado interior de aplanado de yeso y acabado exterior de mortero de cemento-arena                                                             | 150        | 2.597                                              |
|                       | Muro de concreto armado, con acabado interior de aplanado de yeso.                                                                                                                    | 215        | 4.132                                              |
| Cubiertas             | Losa de concreto armado, con acabado interior de yeso.                                                                                                                                | 120        | 4.90                                               |
|                       | Losa de concreto armado, con acabado interior de aplanado de cemento y acabado exterior de relleno de tepetate o tezontle y entortado de cemento-arena                                | 215        | 0.968                                              |
|                       | Losa de vigueta y bovedilla de poliestireno expandido, con acabado interior de aplanado de cemento y acabado exterior de relleno de tepetate o tezontle y entortado de cemento-arena. | 355        | 0.578                                              |

Tabla 3. Desempeño térmico de envolventes arquitectónicas normalmente utilizadas para la construcción en México.  
Fuente: Improvement of Traditional Building Procedures in Mexico.

4. Naoki Enrique Solano García, "Improvement of Traditional Building Procedures in Dwellings towards an Energy-Efficient and Low-Carbon Architecture Practice in Mexico", *Academia XXII* 10, 20 (Ciudad de México, UNAM: 2019), p. 27.

Los elementos constructivos de muros, en lo general, tienen un desempeño térmico pobre. El calor ambiental penetra con facilidad hacia el interior de las envolventes arquitectónicas (tabla 3).

La losa de techo de concreto armado sin ningún tipo de entortado al exterior tiene el peor desempeño térmico de todos. No solamente permite el paso de calor del exterior de manera descontrolada y constante a lo largo del día, también libera calor a lo largo de la noche.

Los elementos constructivos de cubierta más populares, el sistema de losa plana con entortado y el sistema de vigueta y bovedilla de poliestireno con entortado, tuvieron un buen desempeño térmico. Es importante mencionar que este buen resultado obedece a la presencia de tezontle, tepojal o tepetate dentro de los entortados. Estos materiales son buenos aislantes térmicos de origen natural mineral y cuentan con una conductividad térmica baja. Desde luego, es importante aclarar que el valor de transmitancia térmica no es el único que debe ser considerado para hacer una evaluación completa de desempeño térmico, pero resulta ser muy indicativo en cuanto a qué capacidad tiene la envolvente para transmitir el calor.

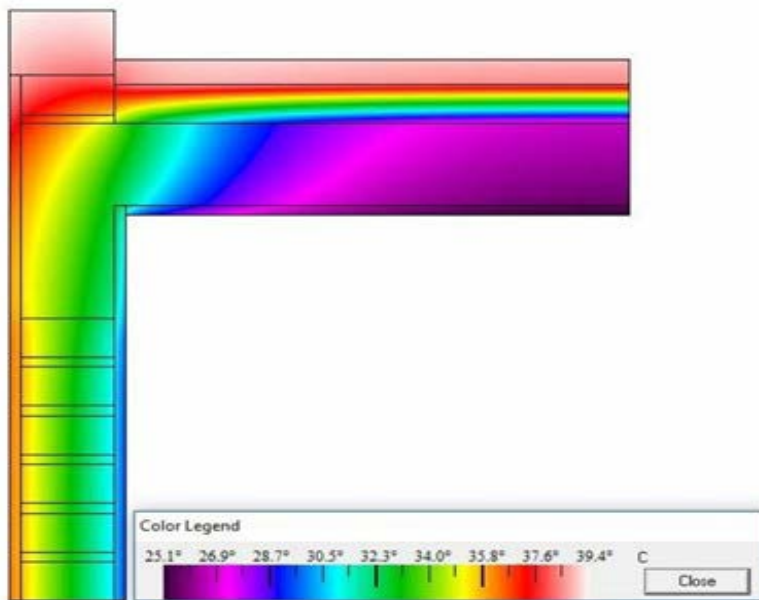


Imagen 13. Modelado de flujo de calor de una envolvente con muro de mampostería confinada y losa plana de concreto armado con entortado, mediante un programa de flujo de calor (THERM). Fuente: Improvement of Traditional Building Procedures in Mexico.

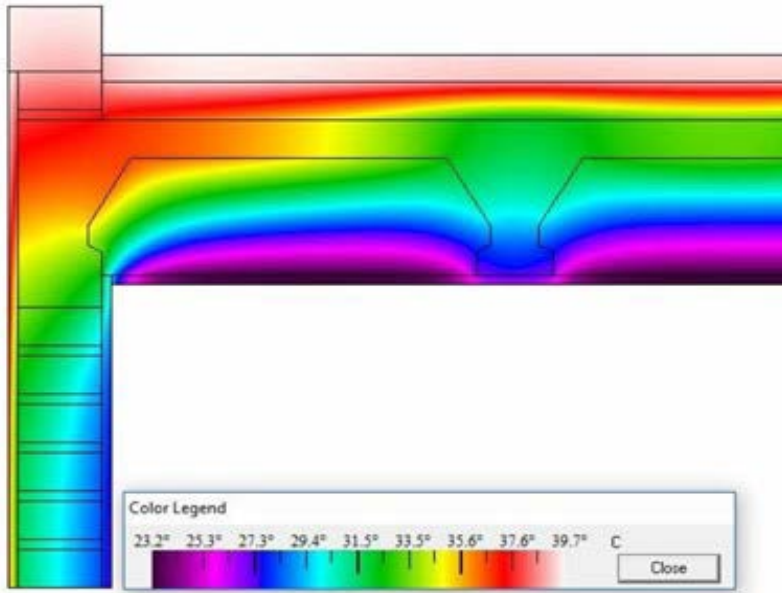


Imagen 14. Modelado de flujo de calor de una envolvente con muro de mampostería confinada y losa de vigueta y bovedilla de poliestireno expandido con entortado, mediante un programa de flujo de calor (THERM). Fuente: Improvement of Traditional Building Procedures in Mexico.

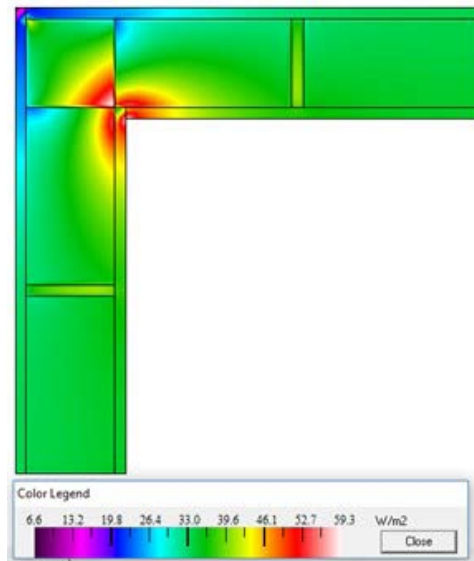


Imagen 15. Modelado de flujo de calor de un muro de mampostería confinada (vista en planta) en su intersección con un castillo de concreto armado mediante software, THERM. Fuente: Improvement of Traditional Building Procedures in Mexico.



En las anteriores imágenes podemos apreciar la facilidad con la que el calor penetra la envolvente arquitectónica de una vivienda común en México. El color morado representa una temperatura óptima interior de superficie de 25°C, mientras que el color rojo y blanco representan una temperatura exterior de superficie de 40°C (nótese la escala de temperaturas en cada diagrama).<sup>5</sup>

En el Anexo 1 podrás encontrar unas fichas con los resultados completos de este estudio.

5. Naoki Solano, "Improvement of Traditional Building Procedures in Dwellings towards an Energy-Efficient and Low-Carbon Architecture Practice in Mexico", *Academia XXII* 10 (2019). DOI: 10.22201/fa.2007252Xp.2019.20.72354.

# **Los materiales y sus propiedades físicas**

## CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales se pueden clasificar de muy diversas formas considerando diversos aspectos.<sup>1</sup> Algunas clasificaciones se dan por:

- Nivel de procesado: materia prima, material de uso técnico, producto final.
- Origen de la materia prima: vegetal, animal, mineral, orgánico, inorgánico.
- Tipo de material: aislantes, no aislantes, plásticos, metálicos.
- Estructura atómica y propiedades: metales, cerámicos, polímeros, compuestos.
- Por impacto al ambiente: renovables, no renovables, tóxicos.
- Uso en una determinada industria.

Estas clasificaciones no son todas, existen muchísimas más. Cada material está formado por elementos, con composiciones y estructuras únicas. Además, tienen la capacidad de ser utilizados con fines específicos.

Para el propósito de esta guía, se analizarán los materiales de acuerdo con su materia prima, ya sea *orgánica* (materia orgánica) o *inorgánica* (mineral). Estos a su vez se encuentran subdivididos en “naturales” y “sintéticos” dependiendo del nivel de procesamiento de las materias primas originales.<sup>2</sup>

En los llamados materiales “naturales” (orgánicos o inorgánicos), la materia prima permanece básicamente sin cambios. Sin embargo, si la composición de la materia prima es modificada significativamente por algún tipo de procesamiento, entonces se habla de un material “sintético”.

Algunos materiales naturales contienen relativamente grandes cantidades de aditivos como retardantes de fuego, sustancias impregnadas, aglutinantes o fibras para fortalecer la estructura del material, los cuales no son materiales naturales. Para que estos materiales sigan clasificándose como “naturales”, estos aditivos no deben constituir más del 25% del material en cuestión.<sup>3</sup>

En la tabla 4 podemos ver en lo general la clasificación de algunos materiales utilizados en la construcción con diferentes finalidades: estructurales, acabados y aislantes térmicos, entre otros. Cabe destacar que, dentro de esta lista, se encuentran tanto materiales simples como compuestos.

1. Donald Askeland, Pradeep Fulay y Wendelin Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales*, (México: Cengage Learning Editores, 2012).
2. Margit Pfundstein *et al.*, *Insulating Materials: Principles, Materials, Applications* (Basel: Birkhäuser, 2008), pp. 17-20, edición electrónica.
3. Margit Pfundstein, *op. cit.*, pp. 17-19.

**Materiales Inorgánicos**

**Sintéticos**

- > Lana de vidrio
- > Lana de roca
- > Vidrio celular
- > Cemento
- > Acero
- > Vidrio
- > Tabique de cemento-arena
- > Losetas cerámicas
- > (Aleación) Aluminio extruido
- > Plásticos (acrílicos, polímeros)
- > Grafeno

**Naturales**

- > Perlita expandida
- > Vermiculita exfoliada
- > Barro
- > Grava
- > Tezontle, tepojal
- > Tabique rojo recocido
- > Ladrillos
- > Adobe
- > Tierra cruda

**Materiales Orgánicos**

**Sintéticos**

- > Poliestireno expandido
- > Poliestireno extruido
- > Espuma rígida de poliuretano
- > Espuma fenólica
- > Fibra de poliéster
- > Linóleo

**Naturales**

- > Madera
- > Fibra de madera
- > Corcho
- > Celulosa
- > Cáñamo
- > Lana de oveja
- > Algodón
- > Bambú
- > Junco
- > Fibras de coco
- > Algas marinas
- > Pacas de paja

Tabla 4. Clasificación de los materiales por su composición orgánica o inorgánica (mineral). Fuente: Pfundstein et al.

## MATERIALES DESDE UN PUNTO DE VISTA ECOLÓGICO Y DE RECICLAJE

La principal desventaja para la adopción de materiales orgánicos, ya sean naturales o sintéticos, de manera generalizada, en la industria de la construcción, es que pueden llevar a un problema de agotamiento del recurso al no poder establecer un ritmo sostenible de capacidad de regeneración, o bien, de extracción o vaciado sostenible frente a la demanda. Este es el caso de algunos carrizos, maderas o componentes de base mineral como el tezontle, arcilla, etc. Además de lo anterior, algunos materiales no se utilizan debido a su limitada aplicación en la industria de la construcción. El corcho, por ejemplo, es un excelente material aislante térmico, sin embargo, este crece muy lentamente y su corteza sólo puede ser removida en periodos muy largos, lo cual hace que su precio sea muy elevado como para considerar su aplicación en un edificio. Otro ejemplo es la fibra de poliéster, utilizada ampliamente para fabricar cobijas y edredones. Esta fibra sería una excelente opción de aislante térmico, pero su uso no está considerado en la construcción porque su aplicación en un edificio no ha sido lo suficientemente probada para ser instalado de manera segura y estable.

Pese al potencial reciclamiento de la materia prima de algunos materiales, muchos no pueden ser reciclados o reutilizados ya que son mezclados con otros agentes estabilizadores, resinas, adhesivos o retardantes de fuego en su proceso de manufactura o de montaje en la construcción, lo cual hace difícil su reciclamiento. Esto pasa incluso en materiales de origen natural.

El poliestireno expandido, por ejemplo, es posible reciclarlo en forma aislada. Pero esto no es posible cuando se mezcla con concreto y acero durante el procedimiento constructivo. Para poder reciclarlo, se necesitaría de una metodología especializada para poder separarlo adecuadamente en la etapa de demolición. Desafortunadamente en la práctica, esto no se hace de forma común y en realidad es muy poco lo que llega a rescatarse; por lo tanto, la gran mayoría de estos residuos terminan en un vertedero de desechos de la construcción.

## PROPIEDADES TÉRMICAS Y FÍSICAS DE LOS MATERIALES

Los materiales utilizados en la industria de la construcción tienen diferentes propiedades y capacidades como la *densidad*, *conductividad térmica*, *capacidad de calor específico*, *capacidades mecánicas*, *permeabilidad de vapor de agua*, *reacción al fuego*, etc. Estas propiedades hacen que los materiales se desempeñen mejor o peor para una determinada función como parte de la

estructura, tejido o recubrimiento de una envolvente arquitectónica. Conocer estas propiedades y sus correlaciones resulta muy útil en la etapa de diseño ya que podemos determinar con mayor seguridad los materiales más adecuados, así como su correcta aplicación dentro de una edificación. Podemos explorar cuáles materiales resultan más idóneos para una determinada aplicación estructural, de eficiencia energética, de control de las humedades, aplicaciones acústicas, todo esto en concordancia con las necesidades del proyecto, características del sitio, complejidad técnica y la disponibilidad de recursos materiales, económicos y humanos. El desconocimiento de estas propiedades puede tener resultados indeseados ya que se corre el riesgo de no poder solucionar de manera óptima las condiciones de habitabilidad, firmeza y mantenimiento de las edificaciones durante el periodo de vida útil.

A continuación, se describen algunas propiedades térmicas y físicas relevantes en términos del bienestar térmico de una envolvente.

### **Densidad**

La densidad es definida como el cociente de la masa de un material y un determinado volumen, y se mide en  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Los materiales con baja densidad tienden a tener mejores propiedades de aislamiento térmico en comparación con materiales de alta densidad. En este sentido, los valores de densidad más favorables para un material aislante se ubican entre los 20 y  $100 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Una densidad baja implica una alta porosidad, o bien, un alto contenido de vacíos al interior del material, lo que se traduce en una disminución en su valor de conductividad térmica. De manera contraria, una alta densidad implica mayor conductividad térmica,<sup>4</sup> además de una mayor resistencia frente a las cargas y fuerzas que actúan sobre ellos. Por esta razón, los materiales considerados como estructurales poseen altas densidades. En la tabla 5 se puede ver que los materiales aislantes se muestran con bajas densidades, mientras que los estructurales cuentan con mayores densidades en comparación.

Es importante hacer notar que los materiales inorgánicos sintéticos, además de tener una baja densidad y conductividad térmica, tienden a ser más resistentes frente a la humedad, el moho y el desarrollo de plagas.

4. Margit Pfundstein *et al.*, *op. cit.*, pp. 21-57.

| Material                                      | Densidad |                                        |
|-----------------------------------------------|----------|----------------------------------------|
| Poliestireno expandido (eps)                  | 15       | Materiales aislantes                   |
| Lana de vidrio                                | 15       |                                        |
| Lana de roca                                  | 23       |                                        |
| Poliestireno extruido (XPS)                   | 25       |                                        |
| Espuma fenólica (PF)                          | 30       |                                        |
| Espuma rígida de poliuretano (PUR)            | 30       |                                        |
| Celulosa                                      | 43       |                                        |
| Caña                                          | 120      |                                        |
| Alfombra sintética                            | 160      |                                        |
| Piedra pómez                                  | 175      |                                        |
| Arcilla expandida                             | 260      | Materiales estructurales y de acabados |
| Adhesivo base cemento                         | 350      |                                        |
| Panel de fibras de madera y cemento           | 350      |                                        |
| Madera dura                                   | 510      |                                        |
| Triplay                                       | 540      |                                        |
| Madera (general)                              | variable |                                        |
| Concreto celular de baja densidad (AAC)       | 750      |                                        |
| Tabique de barro aislante                     | 1120     |                                        |
| Block de concreto, 150 mm                     | 1760     |                                        |
| Tabique de barro                              | 2000     |                                        |
| Concreto reforzado 200/250 kg/cm <sup>2</sup> | 2300     |                                        |
| Acero al carbono (acero de construcción)      | 7800     |                                        |

Tabla 5. Densidades de algunos materiales utilizados en la industria de la construcción. Fuente: ICE.

## Conductividad térmica

La conductividad térmica es la capacidad de un material de transmitir o transportar energía térmica. En otras palabras, es la capacidad de conducir calor, sin importar si el material está en estado sólido, líquido o gaseoso. Todos los materiales tienen esta capacidad. *A menor conductividad térmica de un material, significa que transmite un menor flujo de energía a través de él.* Los materiales aislantes, por ejemplo, conducen la energía con dificultad, lo que impide en gran medida la pérdida o ganancia de calor en una envolvente arquitectónica. La conductividad térmica para un material en específico se mide en W/mK (Watt sobre metro Kelvin), una unidad que especifica la cantidad de energía que pasaría a través de un cubo de 1 x 1 x 1 metro de cierto material con una diferencia de temperatura de 1 Kelvin entre un lado y el otro.

Se considera a un material como aislante térmico cuando su valor de conductividad térmica es igual o menor que 0.10 W/mK. De acuerdo con esta clasificación, pueden ser reclasificados en aislantes térmicos excelentes, muy buenos, buenos y moderados, como se muestra en la tabla 6.

Conocer esta característica es muy importante en el diseño ya que una correcta elección de un material en la envolvente arquitectónica del edificio permitirá tener mayores o menores ahorros de energía a lo largo del ciclo de vida de la edificación. Sin embargo, esta propiedad no debe considerarse como la única en el diseño térmico de una envolvente, como veremos el caso más adelante de la propiedad de masa térmica y capacidad de calor específico.

## Resistencia térmica, resistencia térmica total y transmitancia térmica

La resistencia térmica, resistencia térmica total y la transmitancia térmica no son valores específicos de un material, pero sí son variables para determinar un parámetro de desempeño térmico en un material dentro de un elemento constructivo.<sup>5</sup> La *resistencia térmica R* de un material se calcula considerando su conductividad térmica en relación con su espesor. A mayor resistencia térmica, mayor será el efecto aislante térmico.

5. Margit Pfundstein *et al.*, *op. cit.*, pp. 8-15.



|                         | Material                                | Conductividad térmica | Clasificación |
|-------------------------|-----------------------------------------|-----------------------|---------------|
|                         |                                         | W/mK                  |               |
| Materiales aislantes    | Poliisocianurato rígido (PIR)           | 0.028                 | < 0.03        |
|                         | Espuma rígida de poliuretano (PUR)      | 0.028                 | Excelente     |
|                         | Poliestireno expandido (EPS)            | 0.038                 |               |
|                         | Poliestireno extruido (XPS)             | 0.039                 |               |
|                         | Fibras de celulosa                      | 0.04                  |               |
|                         | Espuma fenólica (PF)                    | 0.04                  | 0.03 a 0.05   |
|                         | Lana de roca                            | 0.042                 | Muy bueno     |
|                         | Lana de vidrio                          | 0.044                 |               |
|                         | Pacas de paja                           | 0.045                 |               |
|                         | Alfombra sintética                      | 0.06                  | 0.05 a 0.07   |
|                         | Panel de fibras de madera y cemento     | 0.07                  | Bueno         |
|                         | Piedra pómez                            | 0.08                  |               |
|                         | Adhesivo base cemento                   | 0.082                 | 0.071 a 0.1   |
|                         | Caña                                    | 0.09                  | Moderado      |
| Materiales no aislantes | Barro expandido                         | 0.1                   |               |
|                         | Tabique de barro aislante               | 0.12                  | Estructural   |
|                         | Madera (general)                        | 0.12                  | Estructural   |
|                         | Madera laminada                         | 0.12                  | Estructural   |
|                         | Medium Density Fibreboard (MDF)         | 0.12                  |               |
|                         | Oriented Strand Board (OSB)             | 0.12                  |               |
|                         | Triplay                                 | 0.12                  |               |
|                         | Madera densa                            | 0.18                  |               |
|                         | Linoleum                                | 0.19                  |               |
|                         | Concreto celular de baja densidad (AAC) | 0.24                  | Estructural   |
|                         | Panel de yeso                           | 0.25                  |               |
|                         | Aplanado de yeso                        | 0.56                  |               |
|                         | Agua a 20°C                             | 0.6                   |               |
|                         | Block de concreto ligero 150 mm         | 0.66                  | Estructural   |
|                         | Aplanado de cemento-arena               | 0.72                  |               |
|                         | Panel de barro                          | 0.85                  |               |
|                         | Vidrio                                  | 0.96                  |               |
|                         | Tabique de barro                        | 1.2                   | Estructural   |
|                         | Acero al carbon                         | 50.2                  |               |
|                         | Cobre                                   | 385.0                 |               |

Tabla 6. Conductividades térmicas de diferentes materiales y su clasificación. Fuentes: ICE, CES Selector y LES.

Por otro lado, la *resistencia térmica total* ( $R_t$ ) especifica la resistencia al flujo de calor que hay en un determinado elemento constructivo (muro, losa, techo) considerando todas las capas de materiales (y sus respectivas resistencias térmicas) dentro un elemento constructivo, incluidas las resistencias superficiales entre el aire y las superficies de cada componente de forma interna y externa.

Finalmente, la *transmitancia térmica*, conocida como *Valor-U*, es el recíproco de las resistencias térmicas totales ( $1/R_t$ ). Este valor especifica, en términos muy generales, la cantidad de calor intercambiada en un elemento constructivo por segundo por metro cuadrado y se mide en  $W/m^2K$  (Watt sobre metro cuadrado Kelvin). A mayor transmitancia térmica, mayor la capacidad de un elemento constructivo (muro, losa, techo) de transmitir calor.

Estos conceptos pueden sonar complicados, pero en realidad son muy simples y la intención de que los conozcas es para tener claro el parámetro final para evaluar el desempeño térmico de un determinado elemento constructivo.

### **Capacidad de calor específico (c<sub>ce</sub>)**

La capacidad de calor específico describe la habilidad específica de un material de absorber energía dependiendo de su masa. Especifica la cantidad de calor  $Q$  requerida para incrementar la temperatura de la masa  $m$  de una sustancia por una diferencia de temperatura de 1 Kelvin. Se mide en  $J/kgK$  (Joule sobre kilogramo Kelvin).

Materiales pesados como el tabique, la piedra y el concreto tardan más en calentarse y, al mismo tiempo, tienen una capacidad para almacenar calor que reciben a lo largo del día. Esto quiere decir que los materiales con altos valores de CCE actúan como reservorios de energía, siendo muy útiles en lugares donde las temperaturas son altas durante el día y bajas durante la noche. En este caso, el material liberará todo el calor almacenado durante el día a lo largo del curso de la noche actuando como una especie de “sistema pasivo” de calefacción. Los mayores valores de CCE (tabla 7) corresponden mayoritariamente a materiales derivados de la madera, aunque los materiales como los tabiques y el concreto se comportan de manera satisfactoria.

| Material                                   | Capacidad de calor específico<br>J/kgK |             |
|--------------------------------------------|----------------------------------------|-------------|
| Acero al carbono                           | 480                                    |             |
| Lana de roca                               | 710                                    | Aislante    |
| Concreto celular<br>de baja densidad (AAC) | 750                                    | Estructural |
| Block de concreto ligero 150 mm            | 840                                    | Estructural |
| Concreto reforzado 20/25 MPa               | 840                                    | Estructural |
| Tabique de barro aislante                  | 840                                    | Estructural |
| Tabique de barro                           | 840                                    | Estructural |
| Piedra pómez                               | 920                                    | Aislante    |
| Vidrio                                     | 1000                                   |             |
| Celulosa                                   | 1380                                   | Aislante    |
| Espuma fenólica (PF)                       | 1400                                   | Aislante    |
| Espuma rígida<br>de poliuretano (PUR)      | 1470                                   | Aislante    |
| Panel de fibras de madera y<br>cemento     | 1890                                   | Aislante    |
| Pacas de paja                              | 2100                                   | Estructural |
| Madera (general)                           | 2100                                   |             |
| Madera laminada (Glue-lam)                 | 2100                                   | Estructural |
| Medium Density Fibreboard<br>(MDF)         | 2100                                   |             |
| Oriented Strand Board (OSB)                | 2100                                   |             |
| Maderas duras                              | 2810                                   | Estructural |

Tabla 7. Capacidad de calor específico de algunos materiales de construcción. Fuente: ICE.

## Resistencia a la difusión de vapor de agua

Todos los materiales tienen un nivel de permeabilidad al vapor, o resistencia al vapor, según la perspectiva. Los materiales con alta resistencia a la difusión son “herméticos al vapor”, lo que significa que no permiten el paso del vapor de agua a través de ellos. Es importante mencionar que la permeabilidad al vapor se mide en varias unidades que son relativas a un espesor dado por material, espesor especificado o aire en calma, como se muestra en la tabla 8.

| Valor de permeabilidad de vapor de agua | Unidades                         | Símbolo     | Espesor/relativo a                     |
|-----------------------------------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------------|
| Resistividad de vapor                   | MNs/gm                           | valor r     | 1 metro de espesor                     |
| Resistencia al vapor                    | MNs/g                            | valor G     | Espesor especificado                   |
| Factor de resistencia al vapor de agua  |                                  | valor $\mu$ | Espesor no especificado                |
| Espesor de la capa de aire equivalente  | metro                            | valor Sd    | Espesor especificado, relativo al aire |
| Permeabilidad al vapor                  | Gr.HO <sub>2</sub> /hr/sqft/inHg | perm        | Granos (Gr) de vapor de agua           |

Tabla 8. Tabla de medidas de la permeabilidad de vapor.  
Fuente: Cotterell y Dadeby.

La tabla 9 muestra el valor de resistencia al vapor (valor G) de algunos materiales, según su espesor y su factor de resistencia al vapor de agua. Cuanto menor sea el valor, más permeable será el material. Los valores resaltados indican los materiales más herméticos al vapor. Es importante señalar que estos tienen un bajo nivel de higroscopicidad por tener una estructura de celda cerrada.

Siempre hay una determinada cantidad de vapor de agua en el ambiente, así como dentro de los materiales. Las moléculas de vapor de agua están tratando constantemente de distribuirse de manera uniforme en todas direcciones. Los materiales de construcción presentan cierta resistencia a esta distribución de humedad, la cual depende mucho de su microestructura. Materiales poco densos y muy porosos como el yeso y las lanas minerales permiten ampliamente el paso de vapor de agua; en tanto las maderas y los

tabiques lo permiten de forma moderada, mientras que el metal, el vidrio o las capas impermeabilizantes no permiten el paso de vapor de agua.<sup>6</sup>

| Material                           | Resistencia a la difusión de vapor $\mu$ | Resistividad al vapor valor-r MNs/gm | Esesor mm → Resistencia al vapor valor-G MNs/g |
|------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------|
| Carrizo                            | 2.00                                     | 10                                   | 20 → 0.2                                       |
| Tablayeso                          | 4.00                                     | 20                                   | 12 → 0.24                                      |
| Lana de vidrio                     | 1.00                                     | 5                                    | 100 → 0.5                                      |
| Lana de roca                       | 1.00                                     | 5                                    | 100 → 0.5                                      |
| Yeso                               | 10.00                                    | 50                                   | 15 → 0.75                                      |
| Celulosa                           | 1.5                                      | 7.5                                  | 100 → 0.75                                     |
| Aplanado de arcilla                | 8.00                                     | 40                                   | 20 → 0.8                                       |
| Piedra pómez                       | 4.00                                     | 20                                   | 60 → 1.2                                       |
| Tabique                            | 10.00                                    | 50                                   | 120 → 6.0                                      |
| Espuma rígida de poliuretano (PUR) | 30.00                                    | 150                                  | 50 → 7.5                                       |
| Poliestireno expandido (EPS)       | 60.00                                    | 300                                  | 50 → 15                                        |
| Espuma fenólica (PF)               | 60.00                                    | 300                                  | 50 → 15                                        |
| Poliestireno extruido (XPS)        | 80.00                                    | 400                                  | 50 → 20                                        |
| Polietileno (barrera de vapor)     |                                          |                                      | 250-7 500                                      |

Tabla 9. Resistencia a la difusión de vapor de algunos materiales. Fuentes: Cotterell y Dadeby, Pfundstein, Kalamees.<sup>7</sup>

6. Janet Cotterell y Adam Dadeby, *The Passivhaus Handbook* (Cambridge: Green Books, 2016), pp. 144-167.
7. Targo Kalamees, Endrik Arumägi y Üllar Alev, "Performance of interiorly insulated log wall: Experiences from Estonian cold climate conditions", *The 3rd International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings. Visby Sweden, September 26-27, 2018* (Uppsala: Uppsala University, 2018), pp. 99-107, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1295314/FULLTEXT01.pdf>

## PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS MATERIALES

### Albedo y reflectancia

“Albedo se origina en una palabra latina *albus*, que significa blanco. Albedo es la cantidad de luz solar (de todas las longitudes de onda) que se refleja desde un objeto o una sustancia. Cuanto mayor sea la cantidad de luz reflejada, más brillante es el color del objeto”.<sup>8</sup> En otras palabras, es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las superficies brillantes más que las mate.

Un albedo alto enfría las superficies, porque la energía absorbida para aprovecharla y calentarla es mínima. Por otro lado, un albedo bajo calienta, porque la mayor parte de la luz es absorbida por la superficie.

La fracción reflejada de la radiación electromagnética que incidió sobre la superficie del material es la reflectancia del material. La reflectancia es una propiedad tanto de materiales opacos como de transparentes (y semi-transparentes).<sup>9</sup>



Imagen 16. Al ser color blanco, la nieve tiene un alto albedo. Escocia, Reino Unido. Fuente: imagen del autor.

8. George Phylander (ed.), *Encyclopedia of Global Warming and Climate Change* (Londres: Sage, 2008), p. 24.
9. Adriana Lira, “Transferencias de calor (cualidades térmicas de los materiales)”, *Unidades de Apoyo de Aprendizaje* (Ciudad de México CUAED, UNAM, Facultad de Arquitectura, 2018), [https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/foa34d71-c662-42f1-9913-7c189025e480/Transferencia\\_de\\_calor/index.html](https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/foa34d71-c662-42f1-9913-7c189025e480/Transferencia_de_calor/index.html)

## Absorción

Es la propiedad física de un material de absorber una fracción de la radiación electromagnética incidida en éste. La fracción absorbida de la radiación electromagnética que incidió sobre la superficie del material es la absorptancia del material.<sup>10</sup> La luz que se absorbe se convierte en calor, razón por la cual no se recomienda pintar edificios de negro en climas cálidos con alta incidencia solar.

## Emisividad

Es la propiedad de un material de emitir como radiación infrarroja de onda larga, a la radiación solar (ultravioleta, visible e infrarroja) previamente absorbida. Un cuerpo con una cierta temperatura emite radiación infrarroja (IR), por esto, los cuerpos calientes emiten calor en forma de radiación electromagnética IR. Algunos materiales pueden ser del mismo color a la vista ya que reflejan el mismo espectro de radiación visible, pero pueden emitir distintas cantidades de radiación infrarroja.<sup>11</sup>

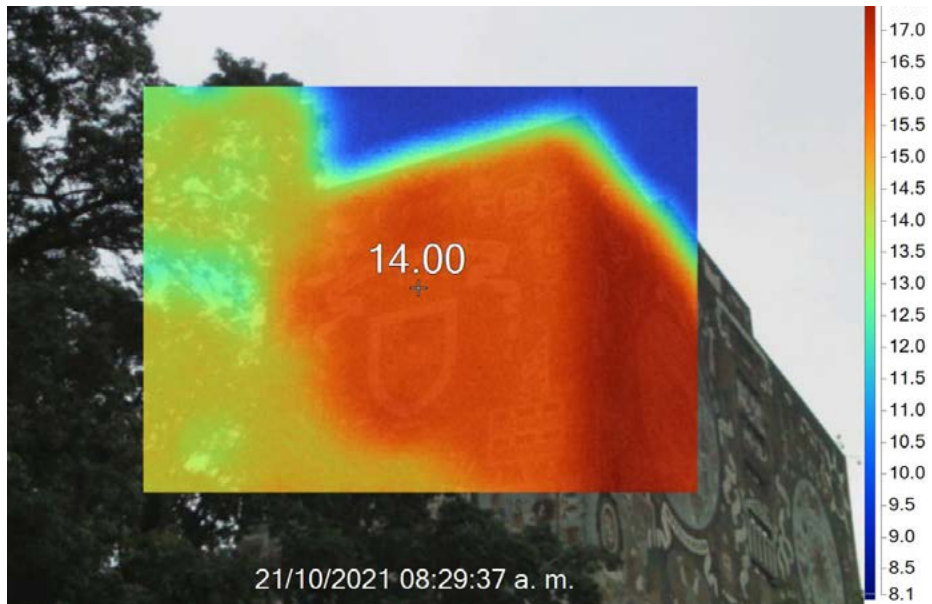


Imagen 17. Las cámaras térmicas detectan la temperatura mediante la captura de diferentes niveles de luz infrarroja, la cual es irradiada por los objetos. Captura de una lectura de cámara térmica. Fuente: Laboratorio de Entornos Sostenibles, FA, UNAM.

10. Adriana Lira, *op. cit.*

11. *Id.*

# **Los materiales, sus procesos e impactos**



En este punto ya hemos reconocido el impacto de la industria en el ambiente. De la industria provienen la gran mayoría de los materiales de la construcción. Es importante conocer sus procesos de extracción, transformación y manufactura, así como los impactos que tienen en términos de emisiones para poder reflexionar su uso en los diseños que propongamos.

## **LOS MATERIALES Y SUS IMPACTOS**

Cada vez que tomamos una decisión de diseño o de proceso, quitamos o añadimos carbono potencialmente emitido. Sin embargo, esto no se trata sólo de elegir un material que emita menos carbono, se trata también acerca de cómo se usa el material y por cuánto tiempo.

Pensemos en un edificio construido con tabique rojo recocido. Un tabique de buena calidad puede durar en una edificación 100, 200 años o hasta más. Si utilizamos tabique para un edificio cuyo periodo de vida útil es de menos de 60 años, estaremos utilizando un material que ya emitió sus gases de efecto invernadero a la atmósfera y no se está aprovechando todo su potencial de vida. Muchas viviendas de autoconstrucción se edifican con este material, pero tristemente su diseño es tan deficiente que muchas de ellas no alcanzan ni los 30 años de vida útil. Desde un punto de vista ecológico, hubiera sido más sensato construir esa vivienda con otro material más adecuado a su longevidad.

Pensemos ahora en otro edificio que, por el contrario, aprovechó al máximo sus materiales de construcción y su huella de carbono embebido en extremo. Tal es el caso del Panteón de Agripa, en Roma. Este edificio tiene cerca de 2 mil años de antigüedad y fue construido, principalmente, de tabique y cemento por los romanos. Estos materiales liberaron su huella de carbono embebido hace cerca de dos milenios. Sus emisiones ya fueron reincorporadas al ciclo natural del carbono desde hace muchísimo tiempo.

Desde luego, no es necesario diseñar y construir edificios de 2 mil años de vida útil para todas las tipologías arquitectónicas. Será suficiente con que hagamos un ejercicio de reflexión y análisis acerca de estos impactos al momento de diseñar.



Imagen 18. Panteón de Agripa. Roma, Italia. Imagen del autor.

## LOS MATERIALES Y SUS PROCESOS

Cada material tiene detrás procesos de extracción, manufactura y transporte que se traducen al final en emisiones de carbono a la atmósfera. En resumidas cuentas, todos los materiales que utilizamos en la construcción pasan por las siguientes etapas en su proceso de manufactura:

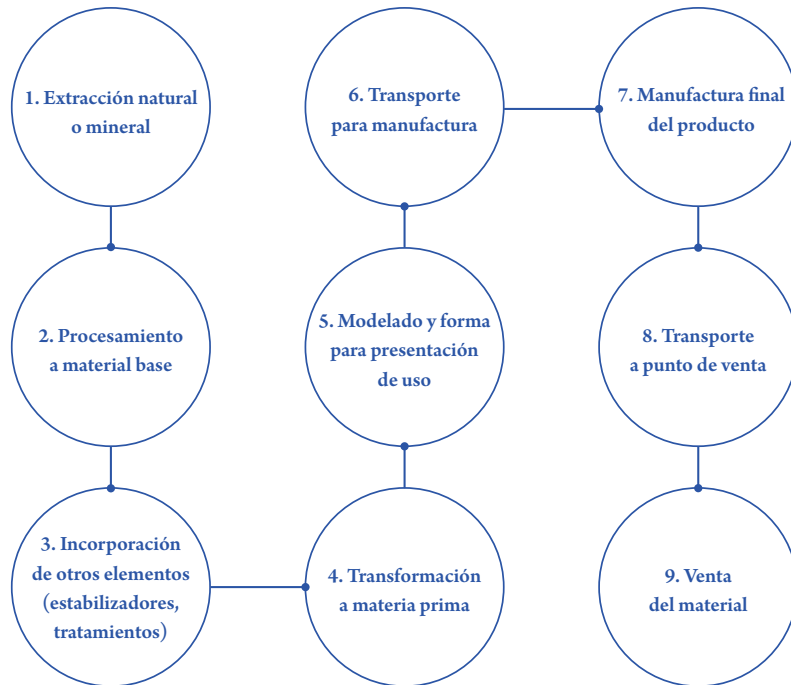


Figura 7. Proceso de manufactura general de los materiales. Fuente: Carbon Counts.

Cada una de las etapas previamente descritas implica emisiones de transporte entre ellas, operación de maquinaria, así como una compleja cadena de suministro de insumos. La extracción de los materiales de la naturaleza tiene impactos en las poblaciones donde esto se hace. Es importante que también seamos conscientes de la afectación a la calidad de vida de las personas que habitan esos lugares.

Una vez disponibles los materiales en el punto de venta, el material pasa por diversas etapas durante su periodo de vida útil, las cuales se pueden ver en la figura 8.

Al final de la vida útil de los materiales, ya sea durante la etapa de remodelación o la etapa de demolición, es posible reutilizarlos en algunos casos para que puedan volver a ser aprovechados como materia prima. Algunos tabiques pueden ser reutilizados si se encuentran en buenas condiciones, ya sea como

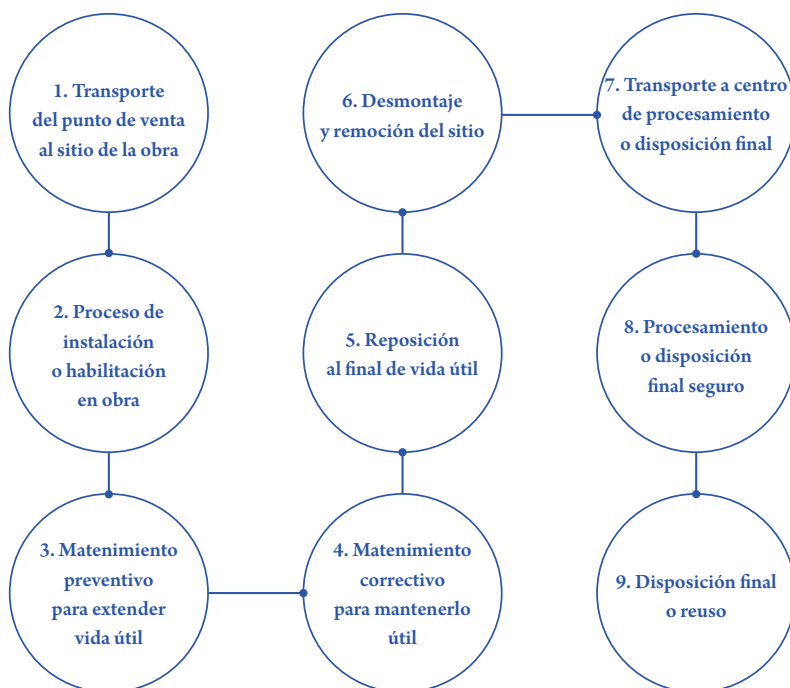


Figura 8. Proceso de uso durante vida útil del material. Fuente: Carbon Counts.

cimbra muerta o formando parte de un nuevo muro. El acero de las varillas se recicla. El vidrio y los materiales metálicos pueden reciclarse sin problema con emisiones disminuidas.

Por desgracia, gran parte de los materiales de desecho de la construcción no son reaprovechados y terminan en vertederos o tiraderos. Resulta alarmante que los materiales con más altas emisiones en sus procesos de manufactura son utilizados en edificaciones con periodos de vida muy cortos.

## LA ARQUITECTURA Y LOS MATERIALES

En su tratado *Arte de albañilería*, publicado en 1827, don Juan de Villanueva ofrece una serie de observaciones, reflexiones y conocimientos profesionales acerca de los materiales, herramientas y formas de trabajo pertenecientes al “arte de la albañilería y al buen gobierno de sus obras”.<sup>1</sup> Estaba dedicado a los jóvenes que se dedicaran a esta profesión. Villanueva describe en su capítulo 2 a los materiales que se utilizaban en la edificación en ese entonces. Indica que

1. Juan de Villanueva, *Arte de albañilería ó instrucciones para los jóvenes que se dediquen á él* (Ciudad de México: Porrúa, 2016).

“los edificios que no requieren extraordinaria magnificencia” se construían con los materiales que más abundaban, probablemente refiriéndose a las casas del grueso de la población que utilizaban mayoritariamente materiales orgánicos naturales para autoconstruir sus viviendas. Por otro lado, menciona que para la albañilería se utilizaban otros materiales: tierra, adobes, ladrillo, piedra, cal, arena y yeso. Para cada uno de estos materiales realizó una descripción de dónde venían y qué procedimientos tenían que hacerse para aplicarlos en una edificación. En el caso de la cal, menciona un proceso térmico de calcinación donde se transforma la piedra caliza en cal para la construcción. Incluso, habla de este proceso acerca de un cambio en “las propiedades de esta materia” y cuya aplicación era la de formar “una pasta llamada mezcla, la cual sirve para unir otros materiales y formar un cuerpo con ellos” mencionando, además, que el resultado final tiene una consistencia como la piedra y que es impermeable.

Estas acertadas descripciones, que datan del siglo XIX, nos recuerdan que los diseñadores y arquitectos somos “aplicadores” de los materiales de construcción producto de los descubrimientos y tecnologías del momento; y como lo mencionaba Villanueva, estos conocimientos comienzan con las y los jóvenes aprendices de la profesión.

Los materiales y la combinación en que los utilizamos no sólo resuelven técnicamente las necesidades espaciales de un proyecto. Los materiales comunican diferentes conceptos y sensaciones, imponen su presencia en el entorno, dan cuenta de las tecnologías y las últimas tendencias del momento, así como de la historia de un periodo pasado.



Imagen 19. Los paraboloides hiperbólicos de concreto armado de Félix Candela comunican un concepto de alta eficiencia: máxima superficie construida utilizando el mínimo de apoyos y el mínimo de material, en este caso, el concreto armado. Planta de Bacardí, Estado de México. Fuente: Imagen del autor.



Imagen 20. Cuando los materiales son aplicados cuidadosamente rescatando los valores de ritmo, proporción y jerarquía en la edificación, tenemos como resultado un entorno construido que no sólo provee bienestar térmico, sino también bienestar psicológico. Centro de Jojutla, MMX. Jojutla, Morelos. Fuente: Imagen del autor.

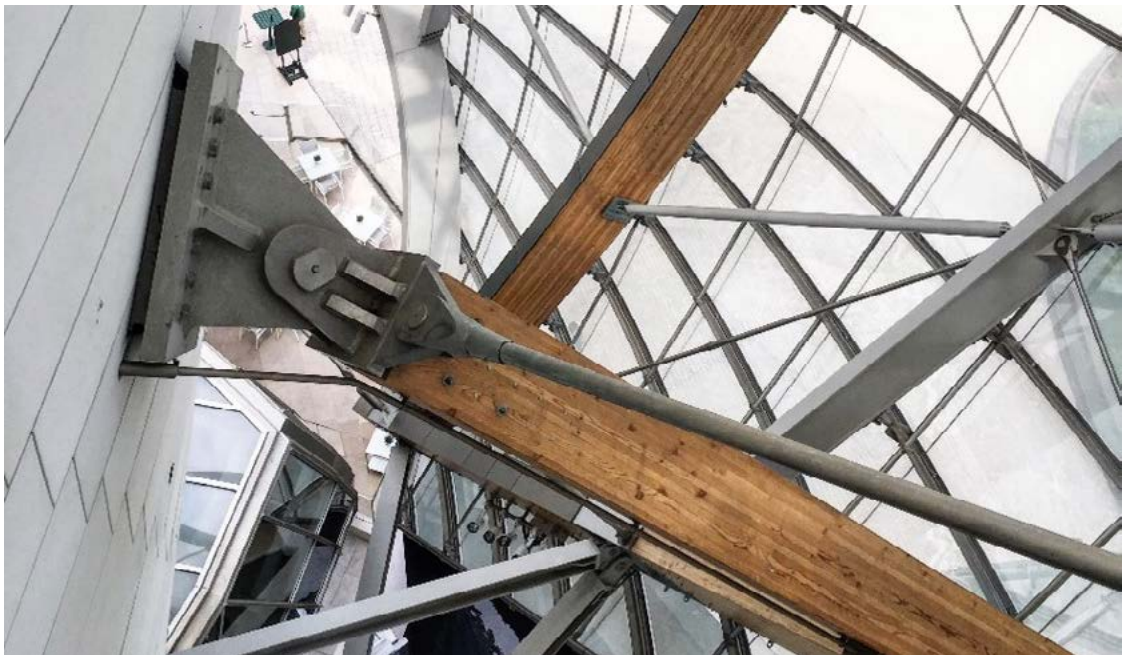


Imagen 21. El futuro de la arquitectura tenderá a utilizar menos acero sustituyéndolo por materiales que siempre han existido, pero siendo procesados de manera diferente para incrementar sus capacidades mecánicas. Tal es el caso de la madera en forma de vigas laminadas y CLT. Fundación Louis Vuitton, Frank Gehry. Francia. Fuente: Imagen del autor.



Imagen 22. La edificación del futuro tenderá a reutilizar técnicas en desuso el día de hoy, utilizando los mismos materiales. Edificio que utiliza un sistema impermeabilizante metálico en su cubierta combinando metal y vigas de madera laminadas en su interior. Maggie's Centre Dundee. Reino Unido. Fuente: Imagen del autor.



Imagen 23. La durabilidad de los materiales al desgaste seguirá siendo uno de los ejes rectores en el diseño del entorno. Cuanto más dure un edificio, menor será su huella ecológica. Fachada principal del Sagrario Metropolitano, construida en piedra chiluca. Ciudad de México. Fuente: Imagen del autor.

## PERFILES DE ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En concordancia con los objetivos del proyecto, se hará una mención de los materiales más utilizados en la construcción en México en cuanto a sus procesos generales de fabricación, algunas propiedades termofísicas, impacto de emisiones de dióxido de carbono y una serie de consideraciones ambientales. Resultaría muy extenso hacer una descripción detallada de todos los materiales existentes para la construcción. Sin embargo, estos perfiles actuarán como una carta de presentación de cada material a manera de introducción al estudiantado. Se pretende que con ello inicie la recopilación del catálogo de opciones de materiales hacia un debate informado entre alumnos y profesionales, tanto en clase como en taller, alrededor de la discusión de la sostenibilidad en arquitectura. Es momento de ampliar el debate objetivo y medible de la sostenibilidad para evitar incurrir en prácticas de “lavado verde” o *greenwashing*, las cuales pueden derivar en resultados indeseados o simulaciones acerca de la sostenibilidad en el entorno construido. La sostenibilidad es medible y cuantificable sin tratarse de únicamente implementar vegetación en los espacios. La mala aplicación de un material de construcción en la envolvente térmica puede derivar en aumento de emisiones de carbono durante las décadas que el edificio se encuentre en servicio. Sigamos discutiendo y hablando estos temas combinando historia, tecnología, arte y diseño.

La información aquí contenida sólo es indicativa, y proviene de diversas fuentes como inventarios, artículos científicos, libros de referencia y algunos experimentos de laboratorio. Podrás encontrar una tabla con estos valores de manera resumida en el Anexo 2. Los materiales están presentados de la siguiente manera:

- Materiales comúnmente presentes en el entorno construido de México.
- Materiales aislantes que comienzan a formar parte del repertorio hacia el bienestar térmico fuera de las zonas templadas del país.
- Gamas de materiales “nuevos” que se encuentran bajo desarrollo.

### Concreto armado

El concreto es el resultado de la mezcla de cemento, o cualquier material cementante, agregados (grava y arena) y agua, para formar una masa que puede ser moldeada con relativa facilidad. El proceso químico de la hidratación de esta masa reduce su plasticidad y, después de algunas horas, empieza a tomar la apariencia y las características de un sólido compacto, similar a la piedra. El producto final es un material altamente resistente mecánicamente.



### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                                                    | Unidad                | Valor                                  |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|
| Densidad                                                                     | kg/m <sup>3</sup>     | 2 300                                  |
| Conductividad térmica                                                        | W/mK                  | 0.64 (concreto sólido)<br>2.1 (armado) |
| Coefficiente de emisividad                                                   | ε                     | 0.85-0.94                              |
| Calor específico                                                             | J/kg °C               | 840                                    |
| Módulo de Young                                                              | GN/m <sup>3</sup>     | 30-50                                  |
| Fluencia                                                                     | MN/m <sup>2</sup>     | 20-30 (sin armado)                     |
| Energía embebida (producción primaria)                                       | MJ/kg                 | 1-1.3                                  |
| Energía embebida (reciclado)                                                 | MJ/kg                 | 0.758 a 0.838                          |
| Carbono embebido (producción primaria)                                       | kgCO <sub>2</sub> /kg | 0.093 a 0.099                          |
| Carbono embebido (reciclado)                                                 | kgCO <sub>2</sub> /kg | 0.063 a 0.07                           |
| Huella de agua                                                               | l/kg                  | 3.23 a 3.57                            |
| Reciclable                                                                   | Sí                    |                                        |
| Hermético                                                                    | Sí                    |                                        |
| Fracción reciclable                                                          | 12.5 a 15%            |                                        |
| Contribución de emisiones globales de CO <sub>2</sub> asociadas a producción | 6 al 8%               |                                        |
| Pronóstico de demanda                                                        | Duplicada para 2060   |                                        |

Recuadro 1. Resumen de propiedades e impactos ambientales del concreto. Consultar Anexo 2.



Imagen 24. Concreto. Imagen Creative Commons.

Al concreto se le pueden añadir aditivos, los cuales disueltos producen un efecto químico y/o físico para cambiar sus propiedades de endurecimiento, resistencia o procesos de fraguado.<sup>2</sup>

Los aditivos pueden lograr efectos plastificantes, superplastificantes, reductores de agua, incorporadores de aire, acelerantes, retardadores, impermeabilizantes y curadores químicos.

### **Fabricación**

Para fabricar cemento se extrae piedra caliza y arcillas de una cantera, se tritura y se muele hasta obtener un polvo fino; luego se calienta a 1 450°C en un horno rotativo para producir clínker, proceso que requiere de la quema de combustibles; luego se enfría y se muele con cantidades menores de yeso y hierro hasta formar el cemento comercial. El cemento se mezcla en varias proporciones con agua y agregados de una variedad de posibles fuentes, dependiendo de las propiedades deseadas del concreto. Al ser revuelto con otros materiales pétreos y agua, conforma una sustancia que se endurece al tiempo que pierde humedad hasta alcanzar un aspecto y propiedades pétreas.<sup>3</sup>



Figura 9. Proceso de producción del cemento. Elaboración: Ana Cedillo, basado en Desplazes.

Existen diferentes tipos de cemento cuyas propiedades varían dependiendo de su uso, apariencia o proceso de vertido, pero el cemento que más se fabrica a nivel mundial es el llamado cemento Portland.

### **Consideraciones ambientales**

Para disminuir los impactos ambientales del uso del concreto se pueden seguir algunas recomendaciones. Se puede diseñar con claros más cortos, siempre y cuando el proyecto lo permita. También se puede evitar el sobredimensiona-

2. Andrea Desplazes, *Construir la arquitectura: del material en bruto al edificio: un manual* (Barcelona: Gustavo Gili, 2010).
3. Alejandro Fernández del Castillo, *Certificación de materiales de construcción con principios aplicados de biomimética*, tesis para optar al grado de Maestro en Arquitectura (Ciudad de México, UNAM, 2012).

miento al crear secciones adecuadas a la carga de cada elemento, siempre tomando en cuenta los factores de seguridad en el diseño. Igualmente puede optarse por utilizar sistemas donde haya huecos internos en el concreto para disminuir el volumen de material y la carga, por ejemplo, mediante losas aligeradas, nervadas o aquellos que formen arcos o bóvedas. Como en cualquier material, es recomendable que sea surtido localmente para reducir sus emisiones en el transporte. La utilización de acero reciclado en el armado es posible, siempre y cuando cumpla con las normas técnicas de construcción vigentes. Los agregados pueden cambiarse por unos más ligeros de acuerdo con la función que el concreto vaya a desempeñar; por ejemplo, para crear la pendiente en losa de techo donde no desempeñará una función estructural. No es fácil reciclar concreto al final de su vida útil, sin embargo, existen métodos para rescatarlo y reutilizarlo.

### Acero al carbono

#### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                                                    | Unidad                | Valor         |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------|
| Densidad                                                                     | kg/m <sup>3</sup>     | 7800-7900     |
| Conductividad térmica                                                        | W/Mk                  | 45-55         |
| Coefficiente de emisividad                                                   | ε                     | 0.2-0.85      |
| Calor específico                                                             | J/kg°C                | 440-520       |
| Módulo de Young                                                              | GN/m <sup>3</sup>     | 196-207       |
| Fluencia                                                                     | MN/m <sup>2</sup>     | 260-1300      |
| Resistencia a la tracción                                                    | MN/m <sup>2</sup>     | 500-1880      |
| Temperatura de servicio                                                      | °C                    | -70-360       |
| Energía embebida (producción primaria)                                       | MJ/kg                 | 25 a 27       |
| Energía embebida (reciclado)                                                 | MJ/kg                 | 6.94 a 7.67   |
| Carbono embebido (producción primaria)                                       | kgCO <sub>2</sub> /kg | 1.2 a 1.9     |
| Carbono embebido (reciclado)                                                 | kgCO <sub>2</sub> /kg | 0.616 a 0.784 |
| Huella de agua                                                               | l/kg                  | 43.2 a 47.7   |
| Reciclable                                                                   | Sí                    |               |
| Fracción reciclable                                                          | 40 a 44%              |               |
| Contribución de emisiones globales de CO <sub>2</sub> asociadas a producción | 7-9%                  |               |
| Pronóstico de demanda                                                        | Duplicada para 2060   |               |

Recuadro 2. Resumen de propiedades e impactos ambientales del acero al carbono. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 25. Viga de acero. Imagen Creative Commons.



Imagen 26. Varillas corrugadas de acero. Imagen Creative Commons.

El acero es de los materiales más ampliamente utilizados en la construcción debido a su combinación de maleabilidad, ductilidad, dureza, durabilidad y bajo costo. Con este material se construyen tanto los armados en el concreto, como las vigas y columnas de un rascacielos, las vías de un tren, la estructura de un puente, en fin, grandes obras.

Los aceros al carbono son aleaciones de hierro con carbono. Sus propiedades, que cambian dependiendo de su contenido de carbono,<sup>4</sup> se pueden apreciar en la tabla 10.

4. Mike Ashby y Kara Johnson, *Materials and Design. The Art and Science of Material Selection in Product Design* (Oxford: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2010).

| Aceros al carbono       | Porcentaje de peso de carbono | Características generales                                                                                                                                                             | Aplicaciones principales                                                                                                                                | Clasificaciones                     |
|-------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Aceros de bajo carbono  | < 0.25%                       | Blandos y dúctiles. Fácilmente deformables, cortables, soldables. Se enrollan fácilmente en varillas o placas. Utilizados para el refuerzo. Son los más baratos. Soldabilidad óptima  | Varillas para concreto armado, perfiles de acero para estructuras de edificios y puentes, paneles de carrocería de autos, placas para corazas de barcos | AISI 1018<br>AISI 1020<br>ASTM A-36 |
| Aceros de medio carbono | 0.25-0.5%                     | Se endurece cuando se enfrían, cualidad que da gran control de sus propiedades. Más resistentes que aceros de bajo carbono, pero menos dúctiles. Soldabilidad con cuidados especiales | Piezas de alta resistencia mecánica y al desgaste: vías del tren, engranajes, ejes                                                                      | AISI 1045<br>AISI 4140              |
| Aceros de alto carbono  | 0.5-1.6%                      | Más resistentes que el acero de medio carbono, pero menos dúctil. Susceptibles al agrietamiento. Excesiva dureza y fragilidad                                                         | Herramientas de corte, manivelas, resortes, cuchillos, patines de hielo                                                                                 |                                     |
| Hierro fundido          | 1.6-4%                        | Fácil de fundir, pero con propiedades mecánicas disminuidas en comparación al acero                                                                                                   | Sartenes de hierro fundido, elementos decorativos y algunos constructivos                                                                               |                                     |

Tabla 10. Descripción de los diferentes aceros al carbono.

Fuente: Elaboración propia, basado en Ashby y Johnson.

### **Fabricación**

Para fabricarlo, se extrae hierro mineral desde la tierra y se calienta a altas temperaturas con coque (combustible sólido formado por la destilación de carbón a temperaturas de 500 a 1 100°C) para producir la materia prima llamada arrabio (*pig iron*), el cual tiene un alto contenido de carbono. El arrabio se funde con otros elementos para formar una aleación, donde se puede combinar con una propor-

ción de residuos metálicos, y posteriormente ser tratado con oxígeno para reducir el contenido de carbono. Una vez que se separan las impurezas, el acero resultante es fundido en lingotes, o bien es extruido o rolado para posteriormente ser distribuido a manufactureras para la fabricación de materiales derivados y otros componentes. El acero se clasifica mediante estándares. Uno de ellos es el sistema AISI-SAE (*American Iron and Steel Institute-Society of Automotive Engineers*). En este sistema los aceros se clasifican con cuatro dígitos. El primero especifica la aleación principal, el segundo indica el porcentaje aproximado del elemento principal y con los dos últimos dígitos se conoce la cantidad de carbono presente en la aleación. Otra clasificación es la de ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

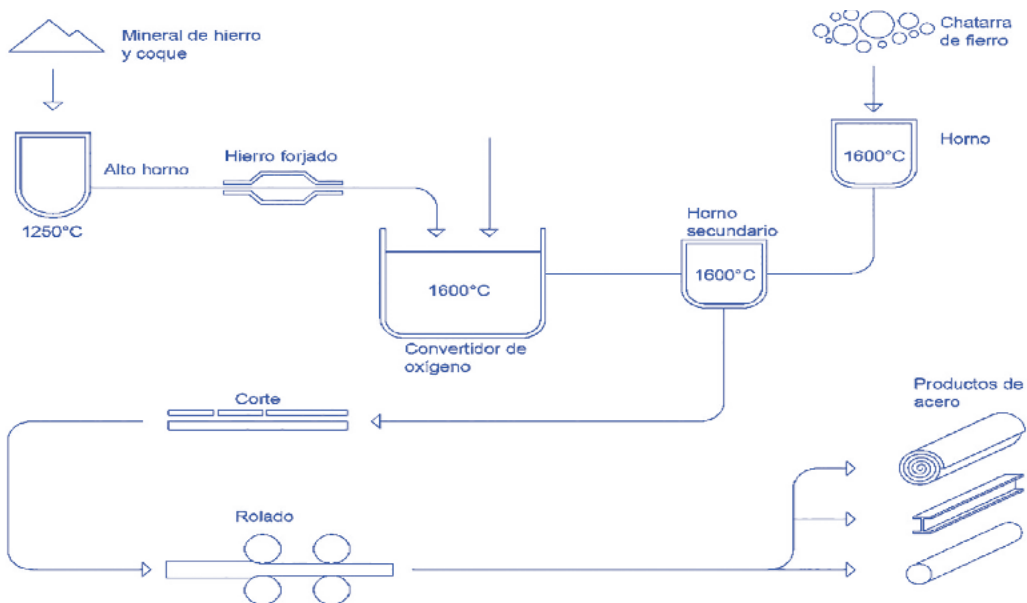


Figura 10. Descripción de la elaboración del acero. Elaboración: Luis Rivera, basado en Mandal.

### Consideraciones ambientales

Cada tonelada de acero producida en 2018 emitió, en promedio, 1.85 toneladas de dióxido de carbono, lo que en total equivalió a cerca del 8% de las emisiones globales de dióxido de carbono a la atmósfera.<sup>5</sup> Esto se debe a que se queman enormes cantidades de combustible fósil para lograr la temperatura necesaria para fundirlo.

5. Christian Hoffman, Michel Van Hoey y Benedikt Zeumer, "Decarbonization challenge for steel" (Nueva York: McKinsey & Company, 2020), <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel#>

Para disminuir la demanda en la producción de acero estructural podemos reducir en lo posible los claros entre ejes estructurales para ocupar secciones y perfiles más pequeños, siempre y cuando los requerimientos del proyecto lo permitan. También, es posible limitar su uso a elementos estructurales para aprovechar sus propiedades mecánicas al máximo, así como evitar usos no estructurales o estrictamente estéticos. Si es posible, se pueden diseñar estructuras desmontables que puedan servir para otro uso sostenible en el futuro. También, podemos utilizar perfiles reciclados o de reuso previa consulta con un especialista. Finalmente, podemos explorar materiales y sistemas alternativos como madera, concreto armado o bóvedas de otro material como tabique, si el proyecto, la necesidad y la economía lo permiten.

Los aceros inoxidable se caracterizan por una alta resistencia a la corrosión debido al cromo que contienen, lo cual permite que se forme una capa delgada y protectora de óxido de cromo cuando el acero se expone al oxígeno.<sup>6</sup>

El acero inoxidable y el acero corten pueden tener una muy alta huella de carbono, sin embargo, su resistencia a la corrosión implica ahorros en revestimientos de alta huella de carbono (como la pintura) a lo largo de su vida útil, dando pie a una larga vida y potencial de reuso mediante el reciclaje.

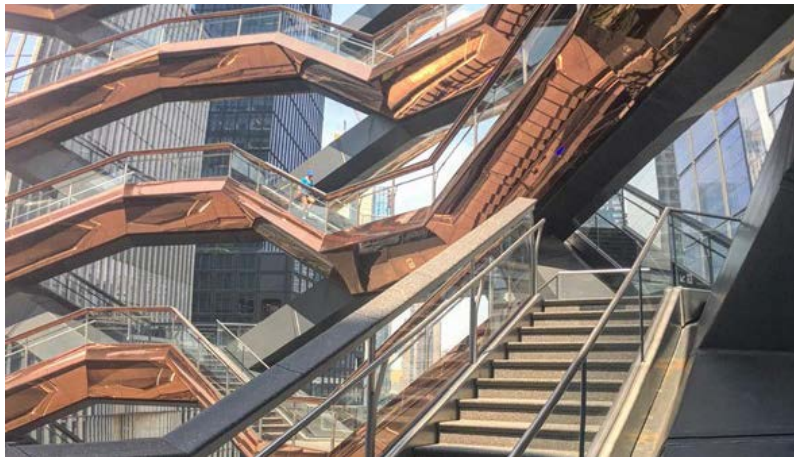


Imagen 27. The Vessel, obra de Thomas Heatherwick. La parte inferior de las escaleras está revestida con un acero inoxidable PVD en tono cobre. Nueva York, EUA. Fuente: Imagen del autor.

6. Donald Askeland y Wendelin Wright, *Ciencia e ingeniería de materiales* (Ciudad de México: Cengage Learning, 2017).

## Aleaciones de aluminio

### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                                                    | Unidad                | Valor                      |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Conductividad térmica                                                        | W/mK                  | 76-235                     |
| Módulo de Young                                                              | GN/m <sup>3</sup>     | 69-79                      |
| Fluencia                                                                     | MN/m <sup>2</sup>     | 100-267                    |
| Resistencia a la tracción                                                    | MN/m <sup>2</sup>     | 300-700                    |
| Temperatura de servicio                                                      | °C                    | -270-180                   |
| Energía embebida (producción primaria)                                       | MJ/kg                 | 198 a 219                  |
| Energía embebida (reciclado)                                                 | MJ/kg                 | 33.4 a 37                  |
| Carbono embebido (producción primaria)                                       | kgCO <sub>2</sub> /kg | 12.2 a 13.5                |
| Carbono embebido (reciclado)                                                 | kgCO <sub>2</sub> /kg | 0.958 a 1.21               |
| Huella de agua                                                               | l/kg                  | 1 130 a 1 250              |
| Reciclable                                                                   | Si                    |                            |
| Fracción reciclable                                                          |                       | 40.5 a 44.7%               |
| Contribución de emisiones globales de CO <sub>2</sub> asociadas a producción |                       | 1%                         |
| Pronóstico de demanda                                                        |                       | Cuadruplicada para el 2050 |

Recuadro 3. Resumen de propiedades e impactos ambientales del aluminio. Consultar Anexo 2.

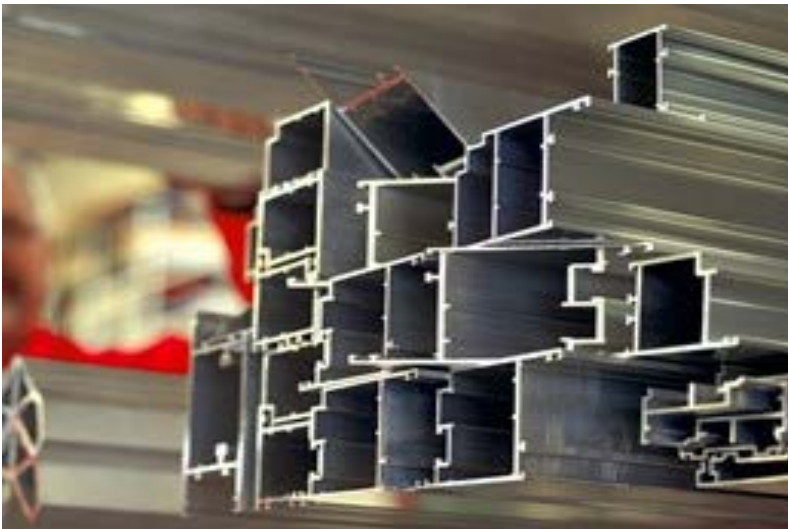


Imagen 28. Perfiles de aluminio extruido. Imagen Creative Commons.



El aluminio extruido se usa principalmente en arquitectura para ventanas, puertas, estructuras, muros cortina, entre otras cosas. También tiene aplicaciones en las industrias automotriz, mobiliario, fuselajes, entre otras.

### ***Fabricación***

Para fabricarlo, se extrae bauxita de la tierra y se purifica hasta obtener alúmina, el cual es llevado a una planta de procesamiento donde se disuelve en un baño de criolita fundida. Posteriormente, se extrae el aluminio mediante un proceso energéticamente intensivo de electrólisis donde se liberan grandes cantidades de CO<sub>2</sub>. En este punto, se pueden incorporar residuos de aluminio de reciclamiento. El aluminio resultante se funde en lingotes, o bien es extruido o rolado para posteriormente ser distribuido a manufactureras para la fabricación de materiales derivados y otros componentes.

A nivel global, se recicla aproximadamente un 63% del aluminio. En países en vías de desarrollo, las emisiones en su manufactura pueden llegar a ser hasta tres veces más altas que la producción en países industrializados con normativas más sostenibles en la fabricación.<sup>7</sup> La huella de carbono del aluminio también depende del grado de carbonización en la producción eléctrica del país de origen.

### ***Consideraciones ambientales***

Al ser un material anticorrosivo, se evitan gastos en revestimientos de alta huella de carbono como la pintura a lo largo de su vida útil. Los metales en general tienen una larga vida, son duraderos y se pueden reciclar con facilidad.

Para reducir su demanda podemos considerar alternativas como madera, incluso para ser aplicado en marcos de ventanas y puertas exteriores con el debido procesamiento para intemperie. También se pueden considerar productos híbridos como marcos de ventana de madera recubiertas de aluminio donde se aprovechan los beneficios térmicos y de baja huella de carbono de la madera, así como el bajo mantenimiento del metal. Por desgracia, esta última alternativa aún no está disponible en el mercado mexicano, pero podría estarlo en el futuro cercano.

7. Carbon Counts, Energy & Climate Change Consulting, <https://www.carbon-counts.com/>

## Vidrios

### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                              | Unidad                | Valor         |
|----------------------------------------|-----------------------|---------------|
| Densidad                               | kg/m <sup>3</sup>     | 2440-2500     |
| Conductividad térmica                  | W/mK                  | 0.7-1.3       |
| Coefficiente de emisividad             | ε                     | 0.85-0.95     |
| Calor específico                       | J/kg °C               | 850-950       |
| Temperatura de servicio                | °C                    | -270-250      |
| Energía embebida (producción primaria) | MJ/kg                 | 10.1 a 11.1   |
| Energía embebida (reciclado)           | MJ/kg                 | 7.81 a 8.64   |
| Carbono embebido (producción primaria) | kgCO <sub>2</sub> /kg | 0.72 a 0.796  |
| Carbono embebido (reciclado)           | kgCO <sub>2</sub> /kg | 0.614 a 0.679 |
| Huella de agua                         | l/kg                  | 13.6 a 15.1   |
| Hermético                              | Sí                    |               |
| Reciclable                             | Sí                    |               |
| Fracción reciclable                    | 22 a 26%              |               |

Recuadro 4. Resumen de propiedades e impactos ambientales del vidrio. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 29. Vidrio. Imagen Creative Commons.

El vidrio es un material ampliamente utilizado en la construcción en ventanas, puertas, muros, techos, acabados y hasta en pisos. No muestra deformación permanente hasta que se rompe. Sin embargo, es un material frágil y fallará apenas sea sometido a tensiones muy grandes. Aunque su resistencia a la compresión es muy alta, su resistencia a la tracción es significativamente más baja.

Un uso importante del vidrio en edificios son las dobles fachadas y los muros cortina. Con la creciente necesidad de aislamiento térmico y de reducción de energía empleada para climatizar espacios interiores, el uso de una sola capa de vidrio se vuelve cada vez menos común, a excepción de los climas templados, donde no hay necesidad de calentar o enfriar los espacios mecánicamente durante el año. El uso de doble acristalamiento permite que las caras internas al espacio de aire entre los dos vidrios tengan un tratamiento para reducir su transmitancia térmica.<sup>8</sup>

### ***Fabricación***

Para producir vidrio, se extraen arena de sílice, piedra caliza, carbonato de calcio y dolomita del suelo. Se pueden incluir en la mezcla desechos de vidrio. La mezcla es transportada a un horno donde se funde a 1 500°C. Para los paneles de vidrio, la mezcla se va en un flujo continuo a un horno para después darle un baño de estaño, donde pasa flotando, y va saliendo conforme se va solidificando. Después, pasa por un proceso de recocido, donde se enfría lentamente. Por último, se corta dependiendo de las medidas que se requieran. También puede ser soplado para darle forma antes de ser cortado para su tamaño final. Para la fibra de vidrio, la mezcla fundida pasa por un proceso llamado *bushing*, en el que la mezcla pasa por una placa que le dará forma a las fibras. Las fibras que van saliendo son enfriadas para llevarlas al bobinado. Por último, las fibras se tejen según el uso o la aplicación de la fibra de vidrio.

Tanto el vidrio arquitectónico, la lana de vidrio (aislante térmico), fibra de vidrio, fibras ópticas y piezas de iluminación soplados contribuyen en conjunto al consumo total del vidrio.

8. Andrew Watts, *Modern Construction Handbook* (Basel: Birkhäuser, 2013).

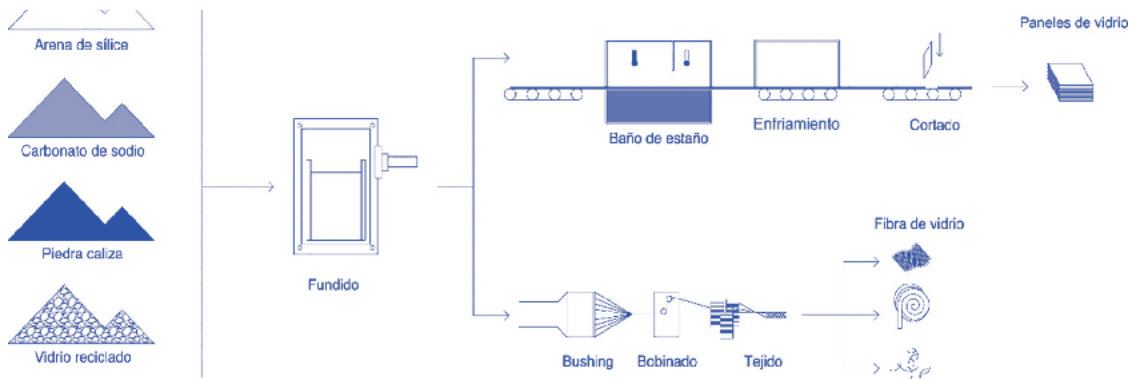


Figura 11. Esquema general de la producción de productos de vidrio. Elaboración: Ana Cedillo, basado en Watts.

### Consideraciones ambientales

Debemos reconsiderar el uso de vidrio en fachadas completas o en ventanas de piso a techo. A menos que esto se haga para introducir grandes cantidades de luz (no de calor) al interior, o bien, resaltar alguna vista interesante del paisaje, no se recomienda hacer esto en una mala orientación ya que el vidrio comienza a funcionar de manera muy ineficiente en detrimento de las condiciones óptimas de bienestar térmico y lumínico interior. A su vez, esto puede derivar en la implementación de sistemas de climatización artificial incrementando la energía operacional del edificio.

Actualmente, existen tecnologías inteligentes de vidrio de alta eficiencia energética que permiten un mayor control de la entrada de luz y calor solar, o bien impiden la pérdida de calor, según se necesite. Los vidrios de alta tecnología tienden a tener una mayor huella de carbono embebido, pero sus posibles ventajas en cuanto a los ahorros generados en el carbono operacional hacen que su implementación valga la pena. Es importante discutir en la etapa de diseño si los ahorros y beneficios operacionales exceden los inconvenientes de alto carbono embebido en la producción, así como la imposibilidad de reciclamiento de este tipo de vidrio al final de su vida útil. Algunos revestimientos y acabados en el vidrio de los muros-cortina en fachadas completas provocan que el reciclaje no sea posible.

Para disminuir los impactos ambientales del vidrio es recomendable utilizar material suministrado localmente para reducir las emisiones del transporte. En cuanto al aislamiento térmico por medio de fibras de lana de vidrio, podemos elegir explorar otras alternativas de materiales aislantes como fibras de celulosa, pacas de paja o hasta lana de ovejas, siempre y cuando hubiera su-

ministro local. En el caso de los aislantes naturales (paja y lana de oveja) sería muy importante que primero se investiguen las condiciones y preparaciones a considerar para evitar el crecimiento de moho, condensación indeseada, o la proliferación de plagas dentro del material al momento de su aplicación.

### Tabique rojo recocido

#### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                             | Unidad                | Valor                      |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Densidad                                              | kg/m <sup>3</sup>     | 600 a 2 100                |
| Conductividad térmica                                 | W/mK                  | 0.6 a 1.2 al 5% de humedad |
| Energía embebida (producción primaria)                | MJ/kg                 | 2.2 a 5                    |
| Carbono embebido (producción primaria)                | kgCO <sub>2</sub> /kg | 0.206 a 0.227              |
| Huella de agua                                        | l/kg                  | 5.27 a 5.83                |
| Hermético                                             | No                    |                            |
| Reciclable                                            | Muy limitado          |                            |
| Fracción reciclable                                   | 15 al 20%             |                            |
| Contribución de emisiones globales de CO <sub>2</sub> | < 1%                  |                            |
| Pronóstico de demanda                                 | Duplicada para 2060   |                            |

Recuadro 5. Resumen de propiedades e impactos ambientales del tabique. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 30. Tabiques rojos recocidos en un muro. Imagen del autor.



Imagen 31. Tabiques de cemento-arena en un muro. Imagen del autor.

El tabique es uno de los materiales de construcción más antiguos en la historia de la humanidad. Son piezas de barro fabricadas artificialmente y cortadas convenientemente para ser acomodados en un muro con la mano. Por lo general, su forma es prismática con dimensiones variables según la época y el lugar. Por la sencillez de su proceso de elaboración, su bajo costo y lo común de los elementos necesarios para fabricarlos, se pueden encontrar diferentes variaciones.<sup>9</sup>

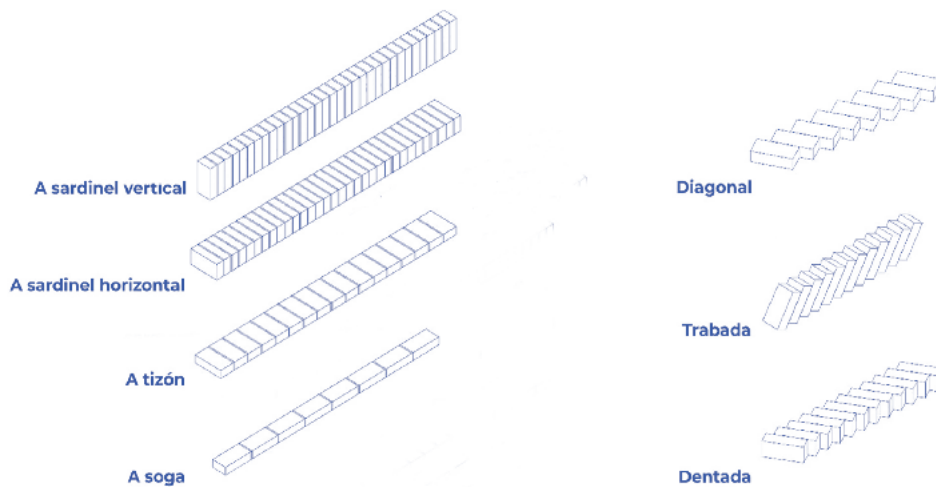


Figura 12. Algunas formas de aplicación del tabique. Elaboración: Ana Cedillo, basado en Desplazes.

9. Alejandro Fernández del Castillo, *op. cit.*

### Fabricación

Los tabiques están hechos de arcilla y arena extraídos del suelo, los cuales son triturados, mezclados con agua y estrujados para darles forma. Se dejan secar al aire libre y luego son vitrificados en un horno a 1 000°C. La mayoría de la producción de tabiques en países no industrializados se lleva a cabo de manera artesanal utilizando hornos que utilizan combustible de carbón, biomasa o incluso quemando llantas. Este tipo de producción no automatizada puede causar deforestación y altos niveles de contaminación del aire.

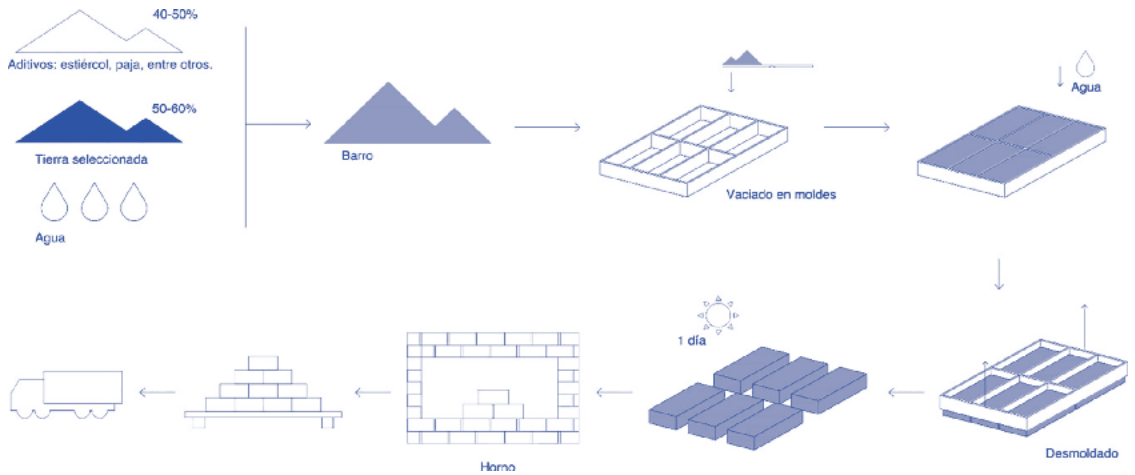


Figura 13. Esquema general de producción del tabique cocido. Elaboración: Ana Cedillo, basado en Desplazes.



Imagen 32. Horno para fabricar tabiques, tejas y ladrillos. Honduras. Imagen Creative Commons.

### **Consideraciones ambientales**

Podemos reducir la demanda de tabiques considerando alternativas energéticamente menos intensivas como adobe, muros de tierra (tapia), bahareque, tabique celular autoclaveado, tabiques ecológicos o, incluso, tabiques de cemento-arena. Aunque algunas alternativas no tienen una capacidad de carga tan grande como un tabique de barro recocido normal, estos se pueden utilizar en muros divisorios que no sean de carga; además muchos proveen un buen aislamiento térmico y acústico. En cuanto a los tabiques ecológicos, estos pueden estar formados de cenizas de carbón o a partir de cáñamo o paja, también con buenas cualidades aislantes. Se recomienda que las alternativas sean producidas y aplicadas de manera local.

Cuando no sea posible contemplar alternativas, debemos asegurarnos de aprovechar al máximo las cualidades mecánicas y/o el impacto visual de los tabiques en nuestro proyecto. Al igual que las alternativas, es muy importante que los tabiques se surtan de manera local. Con ello, se reducen las emisiones del transporte y, además, se minimizan los daños en el material, lo cual se traduce en menos piezas rotas aprovechando así todos los tabiques que sean entregados en la obra. Los tabiques pueden quedar de manera aparente en los muros generando ahorros en mantenimiento (pintura), además de darle una apariencia estética agradable.

En ocasiones, el tabique puede ser rescatado en las demoliciones. Este tabique puede ser reutilizado en detalles estéticos con aparejos interesantes, como cimbra muerta en las cimentaciones o como pedacería para la construcción de algunos elementos en obra.

Utilizado de forma adecuada mediante un diseño y especificaciones óptimos, el tabique puede tener una vida útil de cientos de años. Desafortunadamente, su uso es tan generalizado en la construcción de todo tipo de edificios que pocas veces se considera el máximo aprovechamiento de sus cualidades. En muchos casos, se utiliza en edificios con periodos de vida útil muy cortos, de 50 años o menos. Esto pasa muchas veces debido a un diseño arquitectónico inadecuado que no permite adaptaciones, ampliaciones, reconfiguraciones internas de acuerdo con el uso actual. Si la fabricación del material ya tuvo grandes impactos al ambiente, ¿por qué no aprovecharlo mejor y por mucho más tiempo?

### **Tabique de cemento-arena**

Los tabiques hechos de cemento-arena son similares a los tabiques de barro recocido en forma y función. Al tener huecos de aire de forma interna, presentan un buen desempeño térmico. Normalmente son más económicos que el



tabique rojo recocido, y en México, es muy ampliamente utilizado para la construcción de vivienda.

### **Fabricación**

De manera general, su fabricación incluye cuatro procesos. Primero se incorporan las cantidades adecuadas de arena, grava y cemento en seco, para luego mezclarse y agregar agua. Luego, en una máquina especializada, la mezcla se vierte en moldes que definen su forma y tamaño. Este proceso viene acompañado de un vibrado mecánico. Finalmente, se endurecen, se curan y los bloques resultantes son almacenados y transportados.

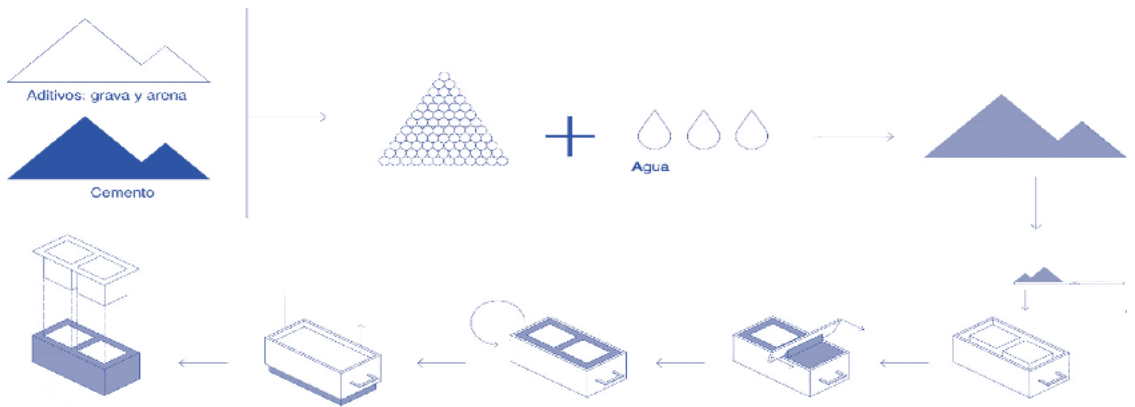


Figura 14. Proceso de fabricación de tabiques de cemento-arena. Elaboración: Ana Cedillo, basado en Desplazes.



Imagen 33. Fabricación de tabiques de cemento-arena. Imagen Creative Commons.

## Adobe

### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                              | Unidad            | Valor       |
|----------------------------------------|-------------------|-------------|
| Densidad                               | kg/m <sup>3</sup> | 850-1800    |
| Conductividad térmica                  | W/mK              | 0.20 a 0.79 |
| Coefficiente de emisividad             | $\epsilon$        | 0.88-0.92   |
| Calor específico                       | J/kg °C           | 1030-1529   |
| Energía embebida (producción primaria) | Muy baja          |             |
| Energía embebida (reciclado)           | Muy baja          |             |
| Carbono embebido (producción primaria) | Muy bajo          |             |
| Carbono embebido (reciclado)           | Muy bajo          |             |
| Reciclable                             | Sí                |             |

Recuadro 6. Resumen de propiedades e impactos ambientales del adobe. Fuente: Consultar Anexo 2.



Imagen 34. Adobes. Imagen Creative Commons.

Los adobes son piezas de arcilla producidas a mano relleno de arcilla en moldes, llamados gradillas o gabereras, y secados al aire libre.<sup>10</sup> Por lo general, su forma es prismática con dimensiones variables según la época y el lugar. Su huella

<sup>10</sup> Gernot Minke, *Manual construcción en tierra: La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual* (Uruguay: Editorial Fin de Siglo, 2005).

de carbono es muy cercana a cero, ya que el material no necesita someterse a procesos energéticamente intensivos de tipo alguno.

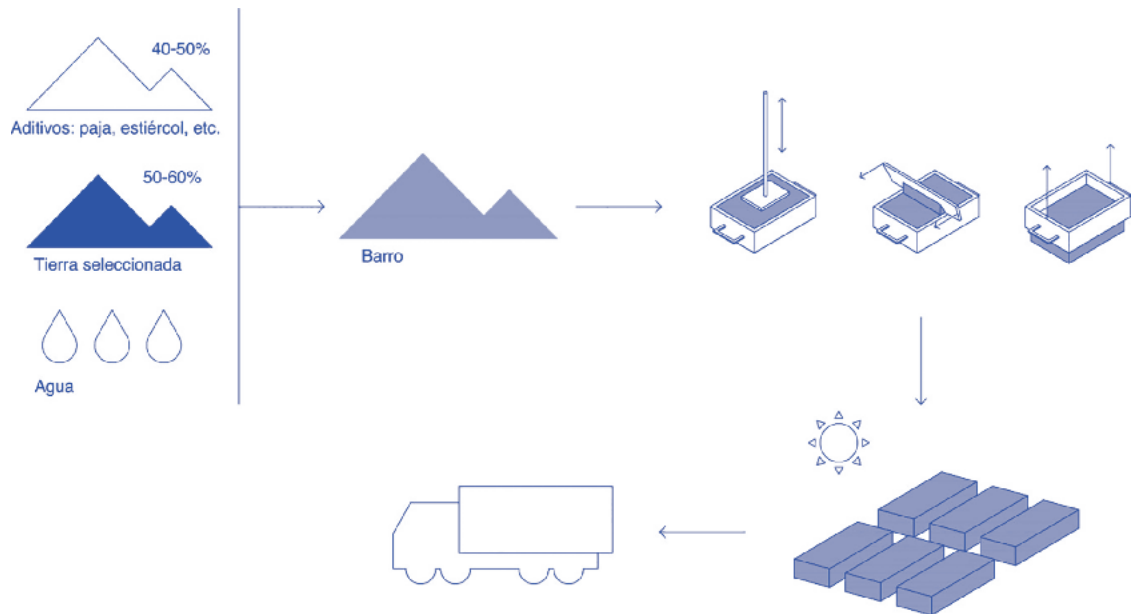


Figura 15. Esquema del proceso de fabricación del adobe. Elaboración: Ana Cedillo, basado en Minke.

El adobe no está cocido, por lo tanto, su resistencia mecánica es inferior a la de un tabique rojo recocado o un tabicón de cemento-arena. Como consecuencia, las condiciones de protección a la humedad tendrán que ser cuidadosas, además de que el diseño de la junta de la unidad o bloque de adobe debe estar bien consolidado para evitar fallas por contracción y agrietamientos.

Se recomienda que las juntas lleven fibras que pueden ser naturales (paja, coco) y/o rocas pequeñas porosas tipo pómez o tezontle para evitar grietas a contracción.<sup>11</sup> En cuanto a lo estructural, se debe procurar combinar con materiales afines al adobe, como lo es la madera, evitando siempre su combinación con materiales muy rígidos como el acero o el concreto. Su conductividad térmica es muy variable en virtud del contenido mineral de la arcilla con el que está hecho.

11. Silverio Moreno, *Degradación y durabilidad de materiales y componentes constructivos* (México: UNAM, Facultad de Arquitectura, 2019).



Imagen 35. Muro de adobe con pedacería de tejas en las juntas. Tepecoacuilco, Guerrero. Imagen del autor.

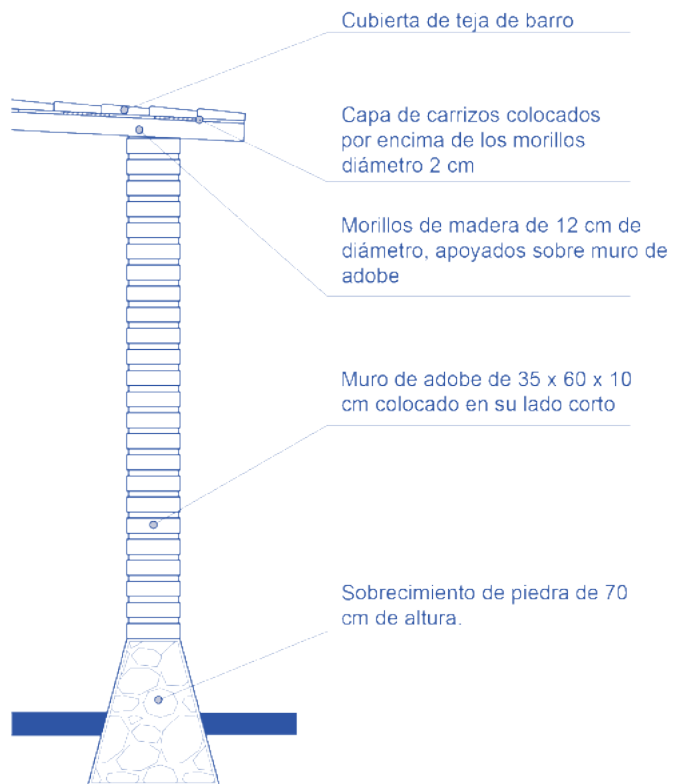


Figura 16. Esquema general de un muro de adobe. Elaboración: Ana Cedillo, basado en Moreno.

### Consideraciones ambientales

El adobe es un material con el cual se pueden construir edificios de muy bajas emisiones de carbono incorporado. Esto se debe a que, en ocasiones, la materia prima puede ser extraída del mismo terreno de la obra, por lo que no hay necesariamente emisiones producto del transporte. Además, no se somete a ningún tipo de procesamiento o transformación energéticamente intensivo. En condiciones óptimas, una edificación de adobe puede durar cientos de años. Es muy importante protegerlo contra la humedad, por lo cual se recomiendan aleros grandes para evitar los escurrimientos, también se puede recubrir de aplanados de tierra o de cal. Para reparar un muro de adobe, este debe humedecerse y repararse por partes pequeñas, nunca en porciones muy grandes. En climas calurosos, su aplicación resulta ideal para alcanzar bienestar térmico. No se recomienda la instalación de sistemas artificiales de climatización en viviendas de adobe.

### Madera

#### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                                | Unidad                | Valor               |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Densidad                                                 | kg/m <sup>3</sup>     | Variable            |
| Conductividad térmica                                    | W/mK                  | 0.12-0.19 (general) |
| Coefficiente de emisividad                               | ε                     | 0.88-0.95           |
| Energía embebida (producción primaria)                   | MJ/kg                 | 8.77 a 9.7          |
| Energía embebida (energía recuperada por combustión)     | MJ/kg                 | 20.7 a 22.1         |
| Carbono embebido (producción primaria)                   | kgCO <sub>2</sub> /kg | 0.358 a 0.396       |
| Carbono embebido (CO <sub>2</sub> emitido de combustión) | kgCO <sub>2</sub> /kg | 1.76 a 1.85         |
| Huella de agua                                           | l/kg                  | 665 a 735           |
| Reciclable                                               | Sí                    |                     |

Recuadro 7. Resumen de propiedades e impactos ambientales de la madera. Fuentes: Consultar Anexo 2.

La madera es un material excepcional para ser aprovechada en la industria de la construcción y ha sido utilizada desde tiempos prehistóricos para la edificación del entorno construido.



Imagen 36. Troncos de madera. Imagen Creative Commons.

La madera es un material orgánico e higroscópico que tiene muchos beneficios. Existen dos grupos principales para clasificar a los árboles, y su madera tiene algunas diferencias: las *coníferas* (gimnospermas) y las *latifoliadas* (angiospermas). Las coníferas pueden identificarse por tener una copa de árbol en forma de cono, semilla descubierta, no produce frutos, tiene acículas (generalmente en forma de agujas) y hay ausencia de flores. Los pinos, oyameles y cipreses son algunos ejemplos.

Las latifoliadas se identifican por tener una copa “redonda”, la semilla está cubierta o dentro del fruto, tienen hojas de diferentes formas (generalmente anchas) y les crecen flores de diferentes formas y tamaños. El cedro, la caoba, encinos y nogales son algunos ejemplos.

Son las características microscópicas las que diferencian la madera de latifoliadas de la de coníferas.<sup>12</sup>

La madera se mide de dos formas:<sup>13</sup>

12. *Manual de construcción de estructuras ligeras de madera* (México: COFAN, 1990), pp. 10-19.

13. Manuel Elorza, “Unidades de medida de la madera”, notas del curso: Construcción con madera (Ciudad de México, junio de 2018).

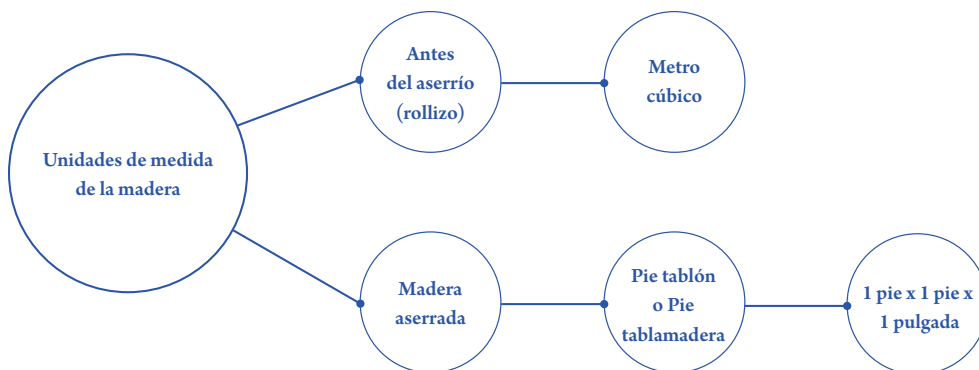


Figura 17. Unidades de medida de la madera. Fuente: Notas del curso Construcción con madera. Fuente: Elorza.

El árbol que más se utiliza para la construcción en México es el pino, representa el 75% de la producción forestal nacional. En segundo lugar, está el encino con un 11%, el resto son diferentes especies coníferas y latifoliadas.<sup>14</sup>

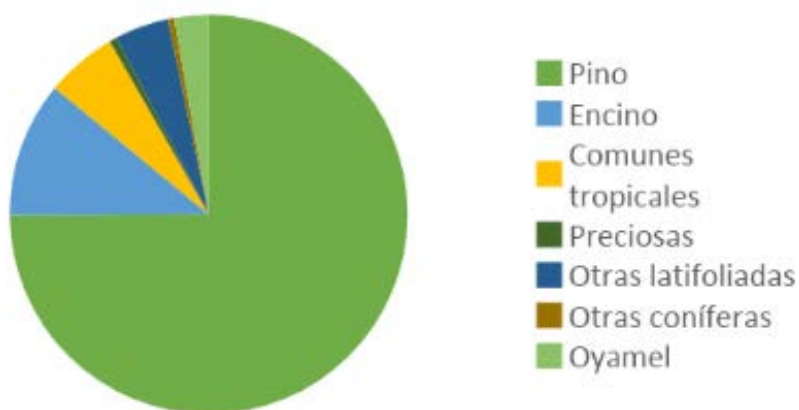


Figura 18. Especies más explotadas en México. Fuente: Semarnat.

14. "Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2016" (Ciudad de México: SEMARNAT, 2019), <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/282951/2016.pdf>

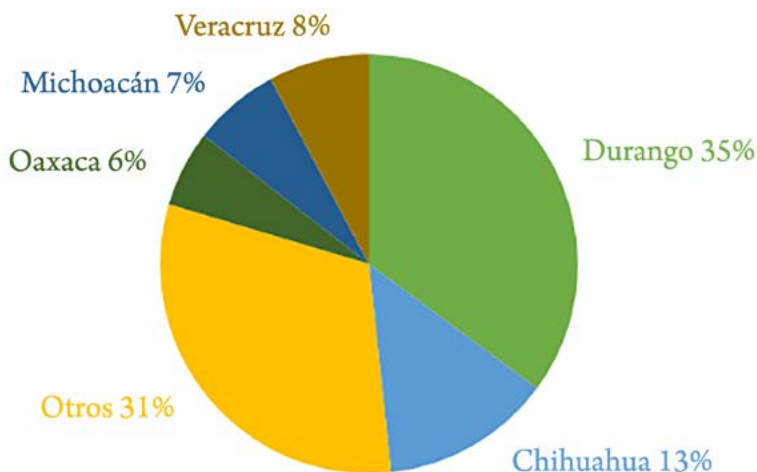


Figura 19. Principales estados productores de madera. Fuente: Semarnat.

La madera para aplicaciones estructurales se utiliza con diversos niveles de industrialización. La forma más rudimentaria es la *madera en rollo* o *madera rolliza*, es decir, los troncos descortezados de árboles sin mayor tratamiento posterior. También tenemos *madera aserrada*, que es la que ha recibido una geometría determinada a través de un proceso de aserrado ya sea manual o mecánico. De la madera aserrada se derivan diversos productos como los tableros o paneles dentro de los que destacan la madera *contrachapada*, los de *fibra* y los de *partículas*. En el mercado nacional, la medida más frecuente es de 122 x 244 cm, aunque también se fabrican en anchos de 76 y 91 cm.

A la madera se le pueden incorporar diversas sustancias, o bien, tratar por métodos térmicos o mecánicos, con el fin de lograr un producto con características de resistencia al fuego, resistencia a ataques por xilófagos (insectos y hongos), o de acciones mecánicas requeridas por aplicaciones estructurales. Los elementos estructurales de *madera laminada* son generalmente de grandes dimensiones, formados al unir piezas de madera delgadas por medio de adhesivos en un solo sentido. Esta técnica permite fabricar elementos estructurales de longitudes mucho mayores a las posibles con madera maciza o rolliza.<sup>15</sup> La tecnología más nueva en madera laminada es la *madera contralaminada*, la cual une piezas delgadas de madera en ambas direcciones y no sólo en una dirección como es el caso de la madera laminada simple.

15. Elorza et al., *Manual de construcción de estructuras ligeras de madera* (Ciudad de México: COMACO, 1994) 10-19.



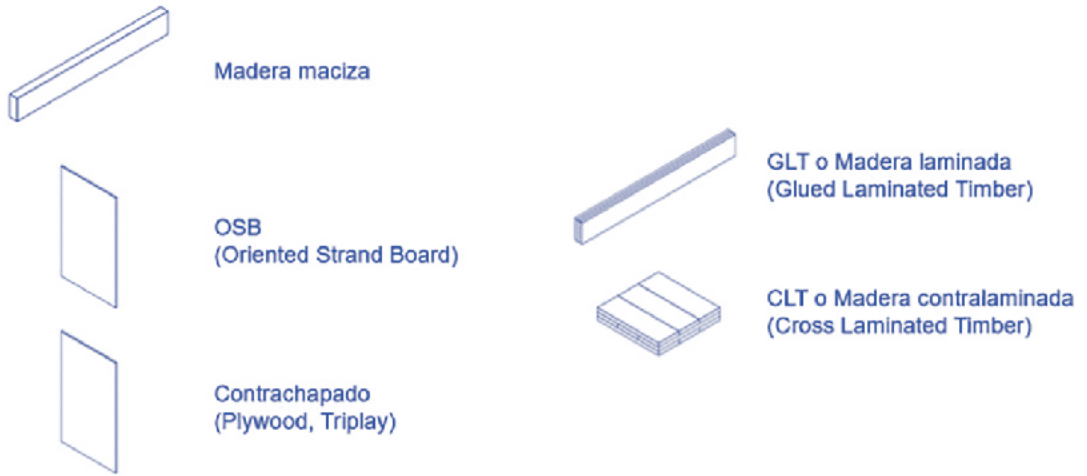


Figura 20. Algunos productos derivados de la madera aserrada. Elaboración: Luis Rivera.

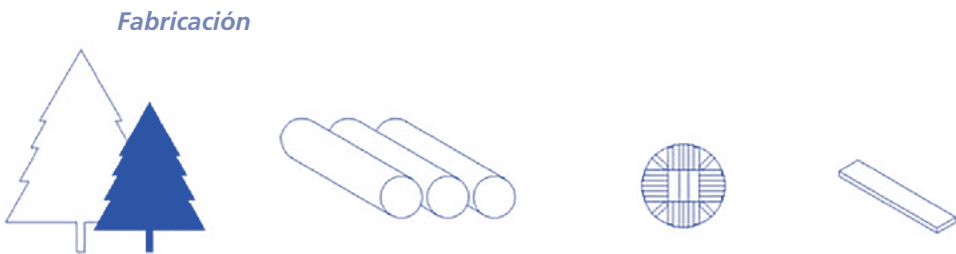


Figura 21. Proceso de aserrío de la madera, desde el corte del fuste hasta la generación de tablas, tablones. Elaboración: Luis Rivera.

Para producir toda la gama de productos derivados de la madera, se sigue un proceso que comienza con la tala del árbol. Después, se transporta a un aserradero donde los fustes se cortan dándoles las dimensiones deseadas. Este proceso se puede dar de manera manual o mediante maquinaria. Posteriormente la madera se somete a un proceso de secado (al aire libre) o estufado (mediante hornos) para que la madera pierda humedad. Luego, se clasifica y puede someterse a otros procesos y tratamientos para aumentar su durabilidad y combatir plagas, pero sin modificar esencialmente sus propiedades. Finalmente, dependiendo del tamaño de la sección, el producto se destina para sus diferentes aplicaciones por diversos procesos para producir duela, tablones, polines, vigas, durmientes, paneles, fibras, madera laminada.

### Consideraciones ambientales

Al ser un material orgánico natural, la madera captura carbono de la atmósfera ya que lo almacena en su estructura celular mientras el árbol crece. Ya en forma de madera y aplicado a un edificio u objeto, el carbono queda efectivamente “guardado” dentro de la estructura del edificio u objeto durante toda su vida útil. Utilizar la madera y otros materiales orgánicos como paja o bambú, significa que podemos comenzar a ver a los edificios como potenciales *reservorios de carbono*.

Desde luego, esto no es tan simple. Los beneficios ambientales de utilizar madera como material de construcción dependen en gran medida si su explotación se hace de forma sostenible y controlada. De no hacerse esta explotación con las especies de árbol adecuadas no se puede garantizar un equilibrio entre la tasa de explotación y de regeneración, además de provocar un problema de deforestación. Por ejemplo, una demanda de madera muy grande en una zona tropical probablemente tenga un efecto contraproducente al disminuir la superficie de selva virgen.

La utilización de madera certificada por la autoridad resulta primordial para un uso y explotación sostenibles.

Agradecimiento a la maestra Karina Flores por su colaboración en esta sección.

### Bambú

#### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                                 | Unidad                | Valor                         |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Densidad                                                  | kg/m <sup>3</sup>     | 500 a 850<br>(al 12% humedad) |
| Energía embebida (producción primaria)                    | MJ/kg                 | 0.0143 a 0.0158               |
| Energía embebida (energía recuperada por combustión)      | MJ/kg                 | 19.8 a 21.3                   |
| Carbono embebido (producción primaria)                    | kgCO <sub>2</sub> /kg | 0.00194 a 0.00214             |
| Carbono embebido (CO <sub>2</sub> emitido por combustión) | kgCO <sub>2</sub> /kg | 1.69 a 1.78                   |
| Huella de agua                                            | l/kg                  | 665 a 735                     |
| Reciclable                                                | Sí                    |                               |

Recuadro 8. Resumen de propiedades e impactos ambientales del bambú. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 37. Estructura de bambú. Jardín Botánico de Bogotá, Colombia. Imagen del autor.

El bambú es un material con la capacidad de compresión del concreto y la resistencia a la tracción del acero.<sup>16</sup> Es un material ligero, flexible y tiene aplicaciones en techos, muros, estructuras. En regiones donde crece el bambú, el clima generalmente es cálido y húmedo, lo que conlleva al uso de materiales de baja capacidad de almacenamiento térmico y de diseños que permiten la ventilación cruzada. Las construcciones de bambú satisfacen plenamente estos requerimientos.<sup>17</sup> Se requiere de mano de obra especializada para trabajar el bambú, pero en zonas donde éste crece, es común encontrar maestros y artesanos que lo trabajen de manera tradicional. Las mayores desventajas se deben a su relativa baja durabilidad (debido a ataques biológicos), y la baja

16. Carbon Counts, Energy & Climate Change Consulting, <https://www.carbon-counts.com/>

17. Abel Castillo, "El bambú en construcción: un material inmejorable", EcoHabitar.org, <https://ecohabitar.org/el-bambu-en-construccion-un-material-inmejorable/#:~:>

resistencia a huracanes y fuego, por lo que las medidas de protección son esenciales.

Típicamente, alcanza su altura máxima en una temporada, por lo que su crecimiento es relativamente rápido. Al final de este tiempo puede ser cosechado para procesar la pulpa, o bien, se deja crecer y madurar de 4 a 6 años más. Después de cortarse, el bambú rebrota y crece de nuevo.

### ***Producción***

Para producir bambú, se cultivan los culmos del rebrote de los rizomas subterráneos. Posteriormente son transportados a un procesamiento especial. Dependiendo de su uso final, pueden permanecer en su forma natural, como culmo entero; puede ser dividido y procesado en hojas; prensado y pegado en secciones de ingeniería; o bien, químicamente reducido a sus fibras constituyentes para su uso en tejidos resistentes. El culmo de bambú requiere de tratamientos avanzados para prolongar su vida útil como material de construcción, además de protegerlo contra pudrición, infestaciones y degradación por rayos ultravioleta.

### ***Consideraciones ambientales***

Los impactos en su huella de carbono embebido se incrementan debido a las emisiones producto de su transporte, sobre todo cuando es utilizado en zonas donde no hay bambú.

La captura o secuestro de carbono del bambú es cercano a las 15.4 toneladas de carbono por hectárea por año. La esperanza de vida productiva de una plantación de bambú es de aproximadamente 75 a 100 años. Se estima que actualmente a nivel global se destinan 31.3 millones de hectáreas de suelo para producir bambú. El área adicional total determinada como apta para el bambú es de 122 millones de hectáreas, compuesta por bosques degradados y pastizales en climas húmedos, lo que equivale a cuatro veces el área de producción actual.<sup>18</sup>

18. Carbon Counts, Energy & Climate Change Consulting, <https://www.carbon-counts.com/>

## Cobre

### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                              | Unidad                | Valor       |
|----------------------------------------|-----------------------|-------------|
| Densidad                               | kg/m <sup>3</sup>     | 8930-8940   |
| Conductividad térmica                  | W/mK                  | 147-370     |
| Coefficiente de emisividad             | $\epsilon$            | 0.023-0.78  |
| Calor específico                       | J/kg °C               | 372-388     |
| Módulo de Young                        | GN/m <sup>3</sup>     | 124         |
| Fluencia                               | MN/m <sup>2</sup>     | 60          |
| Resistencia a la tracción              | MN/m <sup>2</sup>     | 400         |
| Energía embebida (producción primaria) | MJ/kg                 | 56.8 a 62.8 |
| Energía embebida (reciclado)           | MJ/kg                 | 12.9 a 14.3 |
| Carbono embebido (producción primaria) | kgCO <sub>2</sub> /kg | 3.52 a 3.9  |
| Carbono embebido (reciclado)           | kgCO <sub>2</sub> /kg | 1.23 a 1.69 |
| Huella de agua                         | l/kg                  | 293 a 324   |
| Reciclable                             | Sí                    |             |
| Fracción reciclable                    | 40 a 60%              |             |

Recuadro 9. Resumen de propiedades e impactos ambientales del cobre. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 38. Codos de cobre. Imagen Creative Commons.

El cobre tiene una variedad de aplicaciones en la industria de la construcción siendo utilizado mayoritariamente en la vivienda como cableado, tuberías de agua y gas, sistemas térmicos, techumbres, impermeabilizante. La construcción de una casa moderna promedio requiere al menos de 200 kg de cobre.<sup>19</sup> El cobre puede ser utilizado como un material de revestimiento con alto contenido de reciclado en un edificio. El cobre se utilizaba como impermeabilizante metálico; actualmente, esta técnica se encuentra en desuso. Al final de su vida útil, el cobre puede ser reciclado de nuevo sin problema alguno. La gran mayoría del cobre virgen proviene de Sudamérica y China, siendo Chile el país con las mayores reservas mundiales. El transporte de cobre virgen constituye la mayor huella de su carbono incorporado.



Imagen 39. El cobre se utilizaba como impermeabilizante metálico, esta técnica se encuentra en desuso. Las cúpulas del Monumento a la Revolución o el Palacio de Bellas Artes cuentan con este sistema en sus cubiertas. Fuente: Imagen del autor.

19. Carbon Counts, Energy & Climate Change Consulting, <https://www.carbon-counts.com/>

### **Fabricación**

El mineral de cobre se extrae del suelo con un contenido de cobre de entre 0.5 y 2.0%. Este mineral se procesa a altas temperaturas para eliminar imperfecciones y subproductos como hierro, plata, plomo y oro. Finalmente, se llega al cobre blister, una forma de cobre puro del 97 al 99%, que luego se electroliza para producir cobre puro de calidad comercial.

### **Consideraciones ambientales**

El 80% del cobre que ya ha sido extraído se encuentra aún en uso hoy, y puede ser reciclado indefinidamente sin la degradación de sus propiedades útiles. El cobre reciclado requiere únicamente una sexta parte de la energía para producirlo, en comparación al cobre virgen.

## **PVC**

### **Resumen de propiedades e impactos ambientales**

| <b>Propiedad</b>                       | <b>Unidad</b>                  | <b>Valor</b>  |
|----------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Densidad                               | kg/m <sup>3</sup>              | 1 250 a 1 500 |
| Conductividad térmica                  | W/mK                           | 0.16          |
| Coefficiente de emisividad             | ε                              | 0.91-0.93     |
| Energía embebida (producción primaria) | MJ/kg                          | 55.4 a 61.2   |
| Energía embebida (reciclado)           | MJ/kg                          | 34.2 a 37.8   |
| Carbono embebido (producción primaria) | kgCO <sub>2</sub> /kg          | 2.37 a 2.62   |
| Carbono embebido (reciclado)           | kgCO <sub>2</sub> /kg          | 2.69 a 2.97   |
| Huella de agua                         | l/kg                           | 197 a 218     |
| Reciclable                             | Es posible pero no es práctico |               |
| Fracción reciclable                    | 0.5 a 1%                       |               |

Recuadro 10. Resumen de propiedades e impactos ambientales del PVC. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 40. Tubería de PVC en una tienda de materiales. Fuente: Imagen del autor.

El cloruro de polivinilo (PVC), en su forma pura, es rígido y frágil, pero sus propiedades se pueden modificar con facilidad. Se utiliza en la industria de la construcción como tubos de agua y drenaje, principalmente. De este material se deriva la fabricación del cloruro de polivinilo clorado (CPVC), que es igual al PVC pero con mayor resistencia a la temperatura es ligero, flexible y fácil de instalar, es ideal para instalaciones de agua potable.<sup>20</sup>

### ***Fabricación***

Se elabora a partir del petróleo crudo y la sal extraída del suelo. Después de un proceso de destilación, molido y electrolización, los reactivos se combinan para producir un monómero que luego se calienta para formar una suspensión, posteriormente se polimeriza. El PVC resultante se convierte en polvo y luego se transporta a fábricas donde se funde, se extruye o moldea en diferentes productos.

20. "Difference Between UPVC and CPVC", differencebetween.net, <http://www.differencebetween.net/object/difference-between-upvc-and-cpvc/#:~:tex->



### **Consideraciones ambientales**

En países industrializados, su uso es muy amplio para puertas y ventanas, mientras que en nuestro país se utiliza principalmente para tuberías. Al ser un material ligero, tiene un menor impacto ambiental en cuanto a transporte en comparación con otros materiales sustitutos. No se puede reciclar fácilmente. La gran mayoría del PVC es tratado como desecho al final de su vida útil.

### **MATERIALES AISLANTES TÉRMICOS**

Los materiales aislantes tienen un valor de conductividad térmica menor a  $0.10 \text{ W/mK}$ .<sup>21</sup> Gracias a su efecto de aislamiento, logran generar ahorros de energía utilizada para calentar o enfriar los espacios y, por lo tanto, contribuyen a la reducción de emisiones de carbono. Cabe mencionar que la aplicación de materiales aislantes en las edificaciones no siempre es recomendable, sobre todo en climas templados donde su aplicación realmente no es necesaria, además de incrementar las emisiones embebidas. Sin embargo, una estrategia de aislamiento sí sería recomendada en lugares con muy altas o muy bajas temperaturas constantes para mantener de manera eficiente las condiciones de bienestar térmico.

La mayoría de los materiales aislantes en la industria de la construcción son inorgánicos sintéticos, por lo que tienden a contar con una elevada huella de carbono embebido debido a sus procesamientos energéticamente intensivos de su manufactura. Sin embargo, su correcta aplicación puede generar ahorros considerables de energía operacional en un edificio al paso de los años, lo cual justifica su aplicación en la envolvente. Existen alternativas naturales y energéticamente menos intensivas, sin embargo, su aplicación requiere cuidado ya que, al ser materiales orgánicos, pueden estar sujetos a la pudrición, moho o plagas.<sup>22</sup>

Antes de pensar en aislar toda una vivienda con estos materiales, conviene pensar en otras opciones primero. Tal vez una estrategia de almacenamiento térmico sería más sensata en lugares con climas extremos (muy caliente durante el día y muy frío por la noche). El diseño térmico de la envolvente deberá ser cuidadosamente estudiado en la etapa de planeación de acuerdo con cada contexto. A continuación, se describen algunos materiales utilizados como aislantes térmicos.

21. Margit Pfundstein *et al.*, *op. cit.*

22. Janet Cotterel y Adam Dadeby, *op. cit.*, pp. 46-60.

|              |                                                                                                                    | Materiales sintéticos orgánicos |                       |                              | Materiales sintéticos inorgánicos |              |                | Materiales naturales orgánicos |                                       |                   |               |   |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---------------|---|
|              |                                                                                                                    | Poliestireno expandido          | Poliestireno extruido | Espuma rígida de poliuretano | Fibra de vidrio                   | Lana de roca | Vidrio celular | Fibra de madera                | Lana de madera aglomerada con cemento | Fibra de celulosa | Lana de oveja |   |
| Piso y techo | Aislamiento exterior de techo o plafón, debajo de cubierta                                                         |                                 | ●                     | ●                            | ●                                 | ●            | ●              | ●                              |                                       | ●                 |               |   |
|              | Aislamiento exterior de techo o plafón, debajo de impermeabilizante                                                |                                 | ●                     | ●                            | ●                                 | ●            | ●              |                                |                                       |                   |               |   |
|              | Aislamiento exterior de techo o plafón, expuesto al medio ambiente                                                 |                                 |                       | ●                            |                                   |              |                |                                |                                       |                   |               |   |
|              | Aislamiento entre vigas y techos dobles por encima de plafón                                                       |                                 | ●                     |                              | ●                                 | ●            | ●              |                                | ●                                     | ●                 | ●             | ● |
|              | Aislamiento interior debajo de plafón o de estructura                                                              |                                 | ●                     | ●                            | ●                                 | ●            | ●              | ●                              | ●                                     | ●                 | ●             | ● |
|              | Aislamiento debajo de firme, sin requerimientos de aislamiento acústico                                            |                                 | ●                     | ●                            | ●                                 | ●            | ●              | ●                              | ●                                     | ●                 |               |   |
|              | Aislamiento debajo de firme, con requerimientos de aislamiento acústico                                            |                                 | ●                     |                              |                                   | ●            | ●              |                                | ●                                     |                   |               | ● |
| Muros        | Aislamiento exterior detrás de acabado                                                                             |                                 | ●                     | ●                            | ●                                 | ●            | ●              | ●                              | ●                                     | ●                 |               | ● |
|              | Aislamiento exterior de muro detrás de impermeabilizante                                                           |                                 | ●                     | ●                            | ●                                 |              |                | ●                              |                                       |                   |               |   |
|              | Aislamiento en marcos y paneles de madera                                                                          |                                 |                       |                              | ●                                 | ●            | ●              |                                | ●                                     | ●                 | ●             | ● |
|              | Aislamiento interior en muro                                                                                       |                                 | ●                     |                              | ●                                 | ●            | ●              | ●                              | ●                                     | ●                 | ●             | ● |
|              | Aislamiento entre muros con requerimientos de aislamiento de sonido                                                |                                 |                       |                              |                                   | ●            | ●              |                                |                                       |                   |               |   |
|              | Aislamiento en muros divisorios                                                                                    |                                 |                       |                              |                                   | ●            | ●              | ●                              | ●                                     |                   | ●             | ● |
| Cimentación  | Aislamiento térmico externo en muros en contacto con el terreno (al exterior de impermeabilizante)                 |                                 |                       | ●                            | ●                                 |              |                |                                |                                       |                   |               |   |
|              | Aislamiento térmico externo debajo de losa de cimentación en contacto con el terreno (debajo de impermeabilizante) |                                 |                       | ●                            |                                   |              |                |                                |                                       |                   |               |   |

Figura 22. Diferentes aplicaciones de los materiales aislantes. Elaboración: Ana Cedillo, basada en Pfundstein.

## Poliestireno expandido (EPS)

### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                                | Unidad                 | Valor       |
|----------------------------------------------------------|------------------------|-------------|
| Densidad                                                 | kg/m <sup>3</sup>      | 15 a 30     |
| Conductividad térmica                                    | W/mK                   | 0.03-0.038  |
| Calor específico                                         | J/kgK                  | 1 500       |
| Resistencia a la difusión de vapor                       | μ                      | 20-100      |
| Módulo de Young                                          | GN/m <sup>3</sup>      | 3-3.4       |
| Fluencia                                                 | MN/m <sup>2</sup>      | 34-70       |
| Resistencia a la tracción                                | MN/m <sup>2</sup>      | 40-70       |
| Temperatura de servicio                                  | °C                     | Hasta 80    |
| Energía embebida (producción primaria)                   | MJ/kg                  | 85 a 93.8   |
| Energía embebida (energía recuperada por combustión)     | MJ/kg                  | 39.9 a 42   |
| Carbono embebido (producción primaria)                   | kgCO <sub>2</sub> /kg  | 3.14 a 3.47 |
| Carbono embebido (CO <sub>2</sub> emitido de combustión) | kgCO <sub>2</sub> /kg  | 3.3 a 3.47  |
| Huella de agua                                           | l/kg                   | 433 a 479   |
| Reciclable                                               | Sí                     |             |
| Reacción al fuego                                        | No fácilmente flamable |             |

Recuadro 11. Resumen de propiedades e impactos ambientales del poliestireno expandido. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 41. Bloque de poliestireno expandido. Imagen Creative Commons.

El poliestireno expandido (EPS) es un material con excelentes propiedades aislantes; no es higroscópico ni se pudre. Su venta es amplia y es bastante económico. Una de sus aplicaciones más notables en la construcción de México es en forma de bovedilla en el sistema de vigueta y bovedilla, creando techos con relativas buenas propiedades aislantes. Es biológicamente neutro, por lo que se usa también para almacenar comida.

### ***Fabricación***

El EPS se produce a partir de poliestireno, un hidrocarburo (pentano) y estabilizadores. Su producción se lleva a cabo en varias etapas. En primer lugar, el granulado de poliestireno se obtiene mediante la polimerización del estireno y la adición de un agente de expansión. En la siguiente etapa, este granulado de perlas de vidrio con un diámetro de hasta 3 mm es ampliado de 20 a 50 veces su volumen original mediante tratamiento con vapor. Durante este proceso, el agente de expansión se vaporiza. Después de una fase de enfriamiento, las perlas se expanden por segunda vez con vapor y esto hace que se unan para formar un material homogéneo. Esto da como resultado bloques de gran formato que, tras un periodo de almacenamiento, se cortan para formar tablas y secciones.

### ***Consideraciones ambientales***

El proceso de fabricación es de bajo impacto ambiental siempre y cuando se utilice pentano y no clorofluorocarbonos como agente expansor. Su reciclamiento es posible, ya que se puede triturar y reciclar para formar empaque de materiales o agregados ligeros para concreto o más EPS. Sin embargo, para lograr esto el material tiene que venir limpio. Desafortunadamente, durante la demolición no se puede separar el material apropiadamente y termina como cascajo en un relleno sanitario.

### **Poliestireno extruido (XPS)**

El poliestireno extruido combina tres propiedades esenciales: baja conductividad térmica, alta resistencia a la compresión y resistencia a la humedad. Tampoco se pudre y es resistente a plagas. Es útil como aislante térmico en edificaciones donde haya un peso considerable de por medio, por ejemplo, en sótanos o en techos por la parte de afuera.<sup>23</sup>

23. Margit Pfundstein *et al.*, *op. cit.*, pp. 36-37.

### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                                | Unidad                 | Valor       |
|----------------------------------------------------------|------------------------|-------------|
| Densidad                                                 | kg/m <sup>3</sup>      | 25-45       |
| Conductividad térmica                                    | W/mK                   | 0.029-0.039 |
| Calor específico                                         | J/kgK                  | 1300-1700   |
| Resistencia a la difusión de vapor                       | μ                      | 80-200      |
| Temperatura de servicio                                  | °C                     | Hasta 75    |
| Energía embebida (producción primaria)                   | MJ/kg                  | 106 a 117   |
| Energía embebida (energía recuperada por combustión)     | MJ/kg                  | 39.9 a 42   |
| Carbono embebido (producción primaria)                   | kgCO <sub>2</sub> /kg  | 4.04 a 4.16 |
| Carbono embebido (CO <sub>2</sub> emitido de combustión) | kgCO <sub>2</sub> /kg  | 3.3 a 3.47  |
| Huella de agua                                           | l/kg                   | 433 a 479   |
| Reciclable                                               | No                     |             |
| Fracción reciclable (materia prima)                      | 0.95 a 1.05%           |             |
| Reacción al fuego                                        | No fácilmente flamable |             |

Recuadro 12. Resumen de propiedades e impactos ambientales del poliestireno extruido. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 42. Panel de poliestireno extruido. Imagen Creative Commons.

### Fabricación

XPS está fabricado con poliestireno, agentes espumantes, tintes y retardadores de fuego. Este proceso implica fundir un granulado de poliestireno opaco a aproximadamente 200° C en una extrusora, mezclándolo con aditivos y extruyéndolo continuamente a través de un troquel de ranura en una cinta transportadora. Con esto, el material fundido bajo presión se expande considerablemente y adquiere una estructura homogénea con células cerradas al 98% y la característica espuma suave en ambos lados. Después de enfriar, el material se puede cortar a la medida.

### Consideraciones ambientales

Desde un punto de vista ecológico, el poliestireno extruido puede ser o no un material amigable con el ambiente dependiendo del agente expansor que se utilice en su proceso de fabricación. Su reciclaje no es posible.

### Espuma rígida de poliuretano (PUR)

#### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                                | Unidad                | Valor       |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|
| Densidad                                                 | kg/m <sup>3</sup>     | 30-100      |
| Conductividad térmica                                    | W/mK                  | 0.024-0.03  |
| Calor específico                                         | J/kgK                 | 1400-1500   |
| Resistencia a la difusión de vapor                       | μ                     | 60-110      |
| Módulo de Young                                          | GN/m <sup>3</sup>     | 0.01-0.06   |
| Fluencia                                                 | MN/m <sup>2</sup>     | 1           |
| Resistencia a la tracción                                | MN/m <sup>2</sup>     | 1           |
| Temperatura de servicio                                  | °C                    | -30-120     |
| Energía embebida (producción primaria)                   | MJ/kg                 | 108 a 119   |
| Energía embebida (energía recuperada por combustión)     | MJ/kg                 | 21.3 a 22.4 |
| Carbono embebido (producción primaria)                   | kgCO <sub>2</sub> /kg | 4.57 a 5.05 |
| Carbono embebido (CO <sub>2</sub> emitido de combustión) | kgCO <sub>2</sub> /kg | 2 a 2.1     |
| Huella de agua                                           | l/kg                  | 280 a 310   |
| Reciclable                                               | No                    |             |
| Fracción reciclable (materia prima)                      | 0.95 a 1.05%          |             |
| Reacción al fuego                                        | Flamable              |             |

Recuadro 13. Resumen de propiedades e impactos ambientales de la espuma rígida de poliuretano. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 43. Espuma de poliuretano. Imagen Creative Commons.

Al igual que el XPS, las espumas rígidas de poliuretano tienen más del 90% de celdas cerradas y se caracterizan por conductividades térmicas muy bajas y altas resistencias a la compresión. Sin revestimientos están abiertos a la difusión de vapor y exhiben una reacción favorable al fuego. No son necesarias medidas especiales de seguridad al trabajar el material en el sitio de construcción. Las tablas son fáciles para cortar y aserrar con instrumentos convencionales. Se pueden colocar en una o más capas y también en conjunto con bitumen caliente como adhesivo.

### ***Fabricación***

El poliuretano se produce a partir de dos componentes: polialcohol y poliisocianato. Pueden obtenerse polialcoholes de petróleo crudo o, alternativamente, de azúcar de betabel, maíz o papas. Los agentes expansivos son generalmente mezclas de pentano y CO<sub>2</sub>. Siguiendo el proceso y almacenamiento, los bloques (hasta 5 m de largo) se cortan en tablas o se les da forma en partes.<sup>24</sup>

### ***Consideraciones ambientales***

Se pueden reutilizar las tablas del material, siempre y cuando no esté dañado. Se pueden incinerar para recuperar su energía térmica, pero esto causa mucha contaminación.

24. Margit Pfundstein *et al.*, *op. cit.*, pp. 19-21, 29.

## Lana mineral (lana de vidrio y lana de roca)

### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                              | Unidad                | Valor                                    |
|----------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|
| Densidad                               | kg/m <sup>3</sup>     | 15 a 200                                 |
| Conductividad térmica                  | W/mK                  | 0.031-0.044                              |
| Calor específico                       | J/kgK                 | 600 a 1 000                              |
| Resistencia a la difusión de vapor     | μ                     | 1-2                                      |
| Impedancia acústica                    | KPas/m <sup>2</sup>   | Lana de roca: 6-43<br>Lana de vidrio: ≥5 |
| Temperatura de servicio                | °C                    | Hasta 200                                |
| Energía embebida (producción primaria) | MJ/kg                 | 18 a 28                                  |
| Carbono embebido (producción primaria) | kgCO <sub>2</sub> /kg | 1.12 a 1.35                              |
| Reciclable                             | Limitado              |                                          |
| Reacción al fuego                      | Incombustible         |                                          |

Recuadro 14. Resumen de propiedades e impactos ambientales generales de la lana mineral. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 44. Lana de roca. Imagen Creative Commons.

Ambos materiales, la fibra de vidrio y la lana de roca, son considerados como lanas minerales. La lana de roca es producida a partir de varios tipos de rocas como diabasa, dolomita y caliza. La lana de vidrio consiste en arena de cuarzo, piedra caliza y aproximadamente 60% de vidrio reciclado (botellas y vidrios). Los aglutinantes y los agentes hidrófobos son los mismos que en la fibra de vidrio. La lana mineral es un material con buena capacidad de aislamiento y muy



abierto para la difusión de vapor. Es resistente al moho, pudrición y plagas por lo que su uso en muros, techos y pisos suspendidos es ideal.

### **Fabricación**

Las materias primas se funden en tanques a 1 500° C, enseguida se pasan a una máquina pulverizadora. Durante el proceso se agrega un aglutinante disuelto en agua. Posteriormente se vitrifica y las fibras se extienden sobre una cinta transportadora para pasar a un horno y calentarse a 200-250°C para permitir el curado del aglutinante que dará estabilidad al producto.<sup>25</sup>

### **Reciclamiento**

Es parcialmente reciclable, o puede ser simplemente reutilizado. Los desechos de producción pueden ser reintegrados al proceso de producción, o bien ser utilizados en la fabricación de losetas cerámicas o tabiques.

## **Fibra de celulosa (papel y cartón)**

### **Resumen de propiedades e impactos ambientales**

| <b>Propiedad</b>                       | <b>Unidad</b>         | <b>Valor</b>                     |
|----------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Densidad                               | kg/m <sup>3</sup>     | 30 a 80                          |
| Conductividad térmica                  | W/mK                  | 0.040 a 0.045                    |
| Calor específico                       | J/kgK                 | 1700 a 2150                      |
| Resistencia a la difusión de vapor     | μ                     | 1.5                              |
| Impedancia acústica                    | KPas/m <sup>2</sup>   | 3.6-76 (depende de presentación) |
| Temperatura de servicio                | °C                    | Hasta 60                         |
| Energía embebida (producción primaria) | MJ/kg                 | Ignición: 280                    |
| Energía embebida (reciclado)           | MJ/kg                 | 48 a 54                          |
| Carbono embebido (producción primaria) | kgCO <sub>2</sub> /kg | 10 a 23.2                        |
| Carbono embebido (reciclado)           | kgCO <sub>2</sub> /kg | 1.1 a 1.23                       |
| Huella de agua                         | l/kg                  | 1.13 a 1.25                      |
| Reciclable                             | Sí                    | 1620 a 1790                      |
| Fracción reciclable (materia prima)    | 70 al 74%             |                                  |
| Reacción al fuego                      | Flamable              |                                  |

Recuadro 15. Resumen de propiedades e impactos ambientales de la fibra de celulosa. Fuentes: Consultar Anexo 2.

25. Margit Pfundstein *et al.*, *op. cit.*, pp. 8-21.



Imagen 45. Aislamiento térmico con fibras de celulosa proyectada. Imagen Creative Commons.

Los materiales con base de fibras de celulosa tienen buenas propiedades de aislamiento térmico, son abiertas a la difusión de vapor y pueden manejar fluctuaciones menores de humedad. Sin embargo, son altamente hidrófilos y se hinchan, por lo que deben ser protegidos contra la humedad. El aislamiento de celulosa está disponible en forma de escamas (*flakes*) y tablas.

### ***Fabricación***

Es básicamente producido a partir de desechos de papel y cartón. Se le incorporan sales bóricas para incrementar su resistencia al fuego, así como resinas, sulfatos de aluminio o lignina como aglutinante más fibras o cordeles de yute como estabilizadores.<sup>26</sup> El material suelto, en forma de escamas, es obtenido directamente de la molienda del papel de desecho.

### ***Consideraciones ambientales***

Su uso no tiene riesgos para la salud. Su materia prima es material reciclado orgánico. Sin embargo, una vez agregadas las sales bóricas para protección contra el fuego, el material ya no se puede usar para composta o reciclar tan fácilmente. Tiene un alto contenido calorífico.

<sup>26</sup> Margit Pfundstein *et al.*, *op. cit.*, p. 54.

## Paja

### Resumen de propiedades e impactos ambientales

| Propiedad                                                 | Unidad                | Valor       |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|
| Conductividad térmica                                     | W/mK                  | 0.055-0.082 |
| Energía embebida (producción primaria)                    | MJ/kg                 | 0.1 a 0.3   |
| Energía embebida (recuperada por combustión)              | MJ/kg                 | 19.8 a 21.3 |
| Carbono embebido (producción primaria)                    | kgCO <sub>2</sub> /kg | -1.1 a -0.9 |
| Carbono embebido (CO <sub>2</sub> emitido por combustión) | kgCO <sub>2</sub> /kg | 1.19 a 1.28 |
| Reciclable                                                | No                    |             |
| Fracción reciclable (materia prima)                       | 0.1%                  |             |
| Reacción al fuego                                         | Flamable              |             |

Recuadro 16. Resumen de propiedades e impactos ambientales de las pacas de paja. Fuentes: Consultar Anexo 2.



Imagen 46. Pacas de paja. Huasca de Ocampo. Imagen Creative Commons.

La paja puede ser utilizada como aislamiento térmico en su forma de paca, o bien, como un aditivo a otros materiales como la tierra cruda. Hay dos problemas importantes relacionados con la construcción utilizando pacas de paja: la humedad y el moho. Durante la fase de construcción, los edificios deben protegerse de la lluvia, así como de fugas de agua en el cuerpo de las paredes. Al exponerse al agua, la paja comprimida puede expandirse debido a la absorción de humedad. En climas cálidos las paredes pueden humedecerse internamente, provocando la descomposición de la paja. Algunas plagas, como las ratas, pueden infiltrarse dentro del muro si no se toman las provisiones adecuadas.<sup>27</sup>

En algunos países ya hay empresas que han desarrollado muros prefabricados de paja y madera. Esta tecnología aún no llega a nuestro país.

### ***Fabricación***

La paja es un subproducto agrícola que consiste en tallos secos de las plantas de cereales como cebada, avena, arroz, centeno y trigo. Tiene una serie de usos diferentes, que incluyen combustible, forrajes para el ganado, techado de paja y fabricación de cestas. La paja generalmente se recolecta y almacena en una paca de paja, que es un manojo fuertemente atado con un cordel, alambre o cuerda. Las pacas de paja pueden ser cuadradas, rectangulares o redondas, y pueden ser muy grandes, según el tipo de empacadora utilizada.

### ***Consideraciones ambientales***

Al ser un material orgánico natural, tiene características sostenibles inherentes, y tiene un excelente desempeño térmico con una energía incorporada comparativamente baja. Las pacas de paja tienen el potencial de convertirse en un medio innovador para crear edificios con poca energía incorporada. Sin embargo, a pesar de este potencial obvio, la construcción con pacas de paja aún no ha sido adoptada por arquitectos y constructores ni ha dado el salto a un material de construcción convencional.

## **NUEVOS MATERIALES**

Existe una gama de materiales nuevos que se encuentra en desarrollo, cuya aplicación en el diseño de objetos o edificios resulta atractiva para lograr resul-

27. Frances Wright, "Bale Out Strategy! Could straw bale construction be developed as a low-tech, low embodied energy means of achieving Passivhaus construction standards in Scotland?" (University of Dundee, 2014).

tados que se pensaba que no serían posibles. Estos materiales nuevos pueden encontrarse de diferentes maneras, aquí algunos ejemplos:

- Materiales en investigación: polímeros electroactivos, nanomateriales, materiales autorreparables, cerámicos avanzados, materiales cambio de fase.
- Materiales de reciente comercialización: metales amorfos, espumas metálicas, aleaciones de memoria de forma, aleaciones avanzadas, paneles de madera contralaminada (CLT).
- Materiales combinados: elastómeros ferromagnéticos, placas de cemento y fibra de madera, paneles industrializados de paja y madera.
- Materiales ya existentes con nuevas aplicaciones: pacas de paja, papel y cartón en la construcción, cal.

Independientemente de si un material es tradicional o nuevo, debemos preguntarnos si su aplicación, en cuanto al contexto, aplicación, extracción, manufactura, entre otras consideraciones, sería pertinente y costeable. Puede tratarse de un material muy prometedor, pero tal vez su uso tenga mayores impactos que un material “tradicional”. En cualquier caso, es importante hacer una reflexión acerca de los impactos ambientales y el desempeño del material a lo largo de su periodo de uso. En ocasiones, es difícil obtener información de estos nuevos materiales. Su adopción en ciertas industrias resulta ser más rápida que en otras. Sin embargo, el papel del diseñador es primordial. Aquellos que se atrevan a hacer preguntas, explorar nuevas tecnologías, investigar acerca de cómo trasladar un conocimiento de una industria a otra, serán los que tengan algún éxito. No basta simplemente con proponerlos como materiales, sin saber bien sus capacidades, debilidades, compatibilidades con otros materiales, condiciones óptimas de uso, forma de presentación, entre otras cuestiones.

A continuación, se hace una breve mención, no exhaustiva, de algunos de ellos.

### **Espumas metálicas**

Imaginen una espuma de poliestireno expandido (EPS) que flota en el agua. Pero no es EPS, sino un metal como el aluminio, que es rígido y con propiedades atractivas de transferencia de calor; y, además, que es dúctil y soldable. Se trata de espumas metálicas con muy baja densidad, alta rigidez y fuerza. Las

principales aplicaciones de las espumas metálicas están en las industrias automotriz, aeroespacial, naval, ferroviaria y de la construcción.<sup>28</sup>



Imagen 47. Espuma metálica. Fuente: Academia Mexicana de Ciencias.

### Metales amorfos

Son materiales que no tienen una estructura reconocible, o amorfos. Los metales amorfos son excepcionalmente duros, extremadamente resistentes a la corrosión y tienen la combinación de propiedades que los hace mejores que cualquier otro metal. Se pueden utilizar para muelles, piezas a presión, filos de cuchillas, carcasas resistentes y ligeras, y otras aplicaciones en cuya alta resistencia en secciones delgadas es esencial. Tienen una desventaja ambiental ya que algunas aleaciones contienen berilio, lo que hace su disposición final un problema. Se espera que sigan en desarrollo para obtener un producto libre de material tóxico.<sup>29</sup>

### Aleaciones de memoria de forma

Son un grupo de metales que tienen la capacidad de “regresar” a su forma definida previa cuando se calientan. Algunas tienen memoria de forma sólo al calentarse (una memoria) y otros también al enfriarse (dos memorias). La deformación se invierte cuando la estructura vuelve a la fase original al calentar.<sup>30</sup> Estos metales de memoria de forma podrían tener aplicaciones en el control

28. J. A. Gutiérrez Vázquez y J. Oñoro, “Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones”, *Revista de metalurgia* 44, 5 (Madrid: CSIC-CENIM, 2008), pp. 457-476.

29. Mike Ashby y Kara Johnson, *Materials and Design. The Art and Science of Material Selection in Product Design* (Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013), p. 246.

30. Mike Ashby y Kara Johnson, *op. cit.*, p. 258.

sísmico de estructuras.<sup>31</sup>

### **Materiales cambio de fase (MCF)**

Un material cambio de fase es el que tiene un cambio de estado a una temperatura cercana a la del ambiente liberando gran cantidad de energía térmica, siendo el proceso sólido-líquido el de mayor aplicación en revestimientos en la industria de la construcción. No son propiamente materiales “nuevos”. Se han estado utilizando en la construcción como dispositivos de control térmico desde hace al menos seis décadas.<sup>32</sup> La investigación sobre MCF relaciona principalmente su uso en sistemas de construcción de envolventes de edificios para reducir el consumo de energía para acondicionamiento térmico mecánico interior. Sin embargo, la aplicación de estos materiales puede darse en forma de estrategias pasivas para acondicionamiento térmico interior en algunos climas.<sup>33</sup>

### **Nanomateriales**

Los nanomateriales están creciendo a un nivel inmensamente avanzado tanto en el conocimiento científico como en las aplicaciones comerciales. Los nanotubos de carbono, por ejemplo, han causado fascinación en el campo de los nanomateriales durante más de una década. Estos tubos tienen una muy alta resistencia a la tracción, propiedades electrónicas que van desde las metálicas a las semiconductoras, alta capacidad de transporte de corriente y alta naturaleza de conducción térmica. Sin embargo, existen muchos desafíos en el área de los nanotubos de carbono y su utilidad en diversas aplicaciones.<sup>34</sup>

31. Nohemí Salcido Fernández, “Análisis experimental de diferentes aleaciones con memoria de forma para su posible uso como disipadores de energía sísmica” (Instituto de Ingeniería, UNAM, 2007).
32. Jan Kosny, *PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change by Finite Element and Materials in Building Envelopes and Soft Computing Methods Internal Structures*, Brian Derby (ed.) (Springer, 2015).
33. Adriana Lira-Oliver y S. Vilchis-Martínez, “Thermal Inertia Performance Evaluation of Light-Weighted Construction Space Envelopes Using Phase Change Materials in Mexico City’s Climate”, *Technologies* 5, núm. 4 (2017): pp. 69.
34. T. C. Dinadayalane y Jerzy Leszczynski, “Toward nanomaterials: Structural, energetic and reactivity aspects of single-walled carbon nanotubes”, *Theoretical and Computational Chemistry* 18 (2007): pp. 167-199.

# **Elección de materiales en el diseño**



El entorno y la energía que actúan sobre los materiales de construcción influyen en su comportamiento y durabilidad. Esto incluye la exposición a altas o bajas temperaturas, humedad, esfuerzos, corrosión, pudrición, entre otros. Estos efectos deben de tomarse en cuenta en el diseño para asegurar que los materiales no fallen desempeñando su función en una determinada parte de la edificación. Además, debemos considerar si están disponibles a la venta para su uso en para la aplicación deseada. A continuación, se describen algunos aspectos a considerar en cuanto a la elección de materiales hacia un bienestar térmico interior.

### **FUENTES DE CALOR**

Los cambios de temperatura por las diversas fuentes de calor pueden influir en los materiales en una envolvente. Tenemos que preguntarnos el origen, magnitud y periodicidad de las fuentes de calor y energía, las cuales interactuarán con la envolvente y su ambiente interior. Por ejemplo, es importante indagar si los materiales que proponemos poseen propiedades de masa térmica. Si es así, debemos ser cuidadosos de su aplicación en superficies de contacto directo con fuentes de calor. Un ejemplo de ello son las losas planas de concreto armado cuando son construidas en un techo inclinado. Al estar inclinado, no es necesaria la implementación de un entortado exterior para gestionar el desalojo de aguas pluviales. Sin esta capa “protectora” frente al calor, el concreto armado queda solo en la envolvente de techo aumentando así su capacidad de transmisión de calor. Aunado a lo anterior, recordemos que el concreto tiene propiedades de masa térmica, con lo cual el material estaría almacenando calor a lo largo del día y liberándolo por la noche. En un clima cálido esto resulta ser contraproducente en cuanto al bienestar térmico interior ya que estaríamos diseñando, involuntariamente, un sistema pasivo de calefacción en la cubierta de una edificación ubicada en una región con un clima donde sería absolutamente innecesario. Asimismo, es importante considerar la temperatura de servicio óptimo de los materiales por si estuvieran en contacto con algún equipo o maquinaria que eleve mucho la temperatura.

### **FUENTES DE HUMEDAD**

La presencia de humedad en los materiales de construcción puede tener efectos adversos a los deseados en la envolvente. La humedad tiene influencia en la conductividad térmica de los materiales de construcción al aumentar este

valor. Según un estudio, el aumento de la conductividad térmica es proporcional a la cantidad de humedad presente en la estructura del material. Los materiales poseen estructuras internas porosas, granulares o fibrosas, cuyos vacíos internos están rellenos de aire en condiciones óptimas de uso. Si estos vacíos se llenan de agua o humedad, la conductividad térmica del material se incrementará, y la resistencia térmica disminuirá, perdiendo con ello parte de su capacidad de aislamiento.<sup>61</sup>

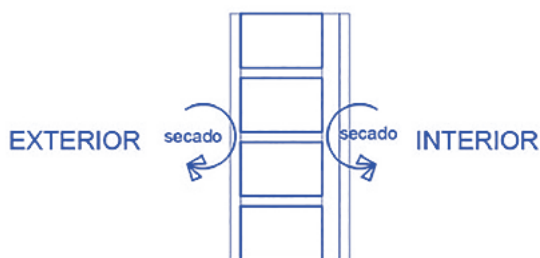


Imagen 48. La presencia de humedad en el tejido del muro afecta sus propiedades térmicas. Es importante crear estrategias de secado de los materiales. Fuente: Imagen del autor.

En principio, no es deseable ningún tipo de acumulación excesiva de humedad dentro de la microestructura de cualquier material de construcción por la razón que sea. Los errores en el diseño, una mala especificación o una ejecución de la obra deficiente pueden ser algunas causas comunes. Asimismo, se puede dar el caso de afectar a los materiales por una saturación indeseada de agua durante el almacenaje, transporte o instalación del material. Es recomendable que los materiales de construcción estén especificados de tal manera que puedan secarse de manera natural en caso de que lleguen a mojarse. En casos con envolventes arquitectónicas altamente aisladas, puede darse un efecto indeseado de condensación al interior del tejido del muro, por lo cual sería importante, en este caso, implementar la capa resistente contra el vapor. En la imagen 49 se puede apreciar un error de diseño en la especificación de un muro de carga de tabique rojo recocido. La falta de una capa impermeabilizante a una altura adecuada provocó que el tabique absorbiera la humedad presente en el suelo de esta vivienda, causando la aparición de humedad, manchas y salitre en el acabado final de yeso.

61. Gelu Coman, Krisztina Uzuneanu y Simona Paraschiv, "The influence of moisture on the thermal conductivity for building materials", *Cement, Wapno, Beton*, (Cracovia: Stowarzyszenie Producentow Cementu, 2011): pp. 44-48.



Imagen 49. Problemas de humedad en un muro de tabique rojo recocado. Nótese que las primeras hiladas de abajo hacia arriba se encuentran saturadas de agua. Fuente: Imagen del autor.

## DESGASTE DE LOS MATERIALES

Los materiales sufren desgastes a lo largo de su vida útil en la envolvente. Algunos se oxidan, otros se degradan con la humedad o el aire, el uso constante, o por la aparición de plagas o moho en el caso de los materiales orgánicos naturales.

Es importante preguntarnos algunas cuestiones al momento de elegir un material para prever o evitar en la medida de lo posible su desgaste:

- Expectativa de vida útil: ¿Por cuánto tiempo desempeñará su función de manera segura y óptima?
- Condiciones de uso: ¿A qué fuerzas estará sometido el material durante su periodo útil de uso? ¿El material es el correcto para recibir las cargas, fuerzas o hacer frente a las condiciones ambientales que actuarán sobre él? ¿Qué situaciones crónicas o súbitas pueden causar su falla?
- Mantenimiento preventivo: ¿Cada cuánto tiempo es necesario llevar a cabo un proceso de mantenimiento? ¿Cuáles son los costos ambientales y económicos de esos procesos? ¿Qué tan fácil o difícil es hacerlo con una determinada frecuencia?
- Mantenimiento correctivo: ¿Qué procesos y materiales serían necesarios para mantener la utilidad del material? ¿Valen la pena?

- Reemplazo: ¿Ha dejado de desempeñar su función de forma segura? ¿Qué alternativas de materiales para reemplazo existen al momento? ¿Cuáles son los costos ambientales y económicos?

En todos los casos, es importante reflexionar en primer lugar cómo sería el fin de vida del material desde antes de proponerlo en el diseño. Tal vez en esta etapa se dé uno cuenta que no es el mejor material, o que tiene muchas desventajas en lo ambiental, práctico o económico. También tenemos que pensar si su reemplazo sería aparatoso o sencillo. Es necesario reemplazar el material cuando represente un riesgo, o bien, cuando deje de desempeñar su función.

En la imagen 50 podemos apreciar dos edificios. El edificio en primer plano necesitará dar mantenimiento constante a su fachada y acabado final de pintura por muchos años, y de manera constante. El edificio en segundo plano cuenta con un recubrimiento pétreo en su fachada y no ha requerido de mantenimiento mayor en gran parte de su superficie en años, luciendo en relativo buen estado.



Imagen 50. La falta de mantenimiento preventivo de los materiales afecta también su aspecto estético. Fuente: Imagen del autor.

## GEOMETRÍA Y VOLUMEN

Las superficies de contacto con el ambiente exterior son los lugares en donde se da el intercambio de energía en forma de flujos de calor. Si esta superficie es reducida en un clima cálido, menor será la transmisión de calor hacia el interior. Además de la geometría, las propiedades térmicas y ópticas de los materiales de la envolvente trabajarán en forma conjunta para gestionar las pérdidas o ganancias de calor hacia un ambiente cómodo interior.

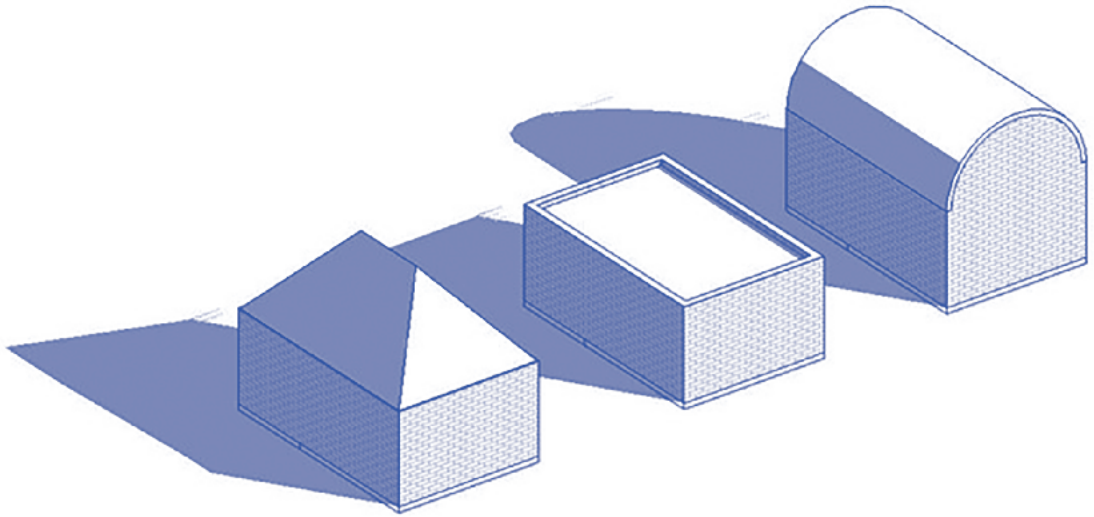


Imagen 51. Las formas arquitectónicas influyen en la incidencia de los rayos solares sobre la edificación. Fuente: Imagen del autor.

El volumen de aire interior también influye en el consumo energético del edificio. La presencia de grandes volúmenes de aire al interior implica que se consumirá más energía para calentar o enfriar todo el espacio de manera artificial. Sin embargo, si la envolvente no requiere de sistemas de acondicionamiento artificial en un clima cálido, resultaría benéfico para mantener las condiciones interiores de bienestar térmico al propiciar los flujos naturales de aire por ventilación cruzada y por efecto de convección.

## FORMA DE PRESENTACIÓN DEL MATERIAL

Es importante conocer la forma de presentación de los materiales de construcción antes de proponer su uso en un proyecto. A continuación, se enlistan algunos puntos a tomar en cuenta:

- Unidad de medida: litro, galón, kilogramo, tonelada, millar, lote, metro cúbico.
- Forma de presentación a la venta: en forma de panel, rollo, tablero, cubeta, por pieza, por caja.
- Estructuras complementarias: algunos materiales necesitan de un bastidor o estructura de soporte antes de ser instalados.
- Materiales complementarios: por lo general, los materiales necesitan otros materiales para ser instalados o fijados: adhesivos, tornillos, taquetes, clavos, grapas, pernos, soldadura, placas.

Es muy importante tomar en cuenta las medidas de la forma de presentación de los materiales, así como de su suficiencia por unidad de venta. Por ejemplo: ¿cuántas losetas vienen por caja y cuántos metros cuadrados cubre? Conocer los rendimientos en la aplicación de los materiales hará que se generen menos desperdicios y mermas. Modular la medida de los espacios interiores de acuerdo con las medidas de los materiales a utilizar también podría ser útil. Un mismo material puede tener un rendimiento diferente en condiciones distintas de aplicación. La pintura, por ejemplo, rendirá menos en superficies rugosas que en lisas; también influye la técnica de aplicación empleada en la mano de obra y hasta el tipo de brocha a utilizar.

Mucha de esta información viene especificada por parte de los proveedores en las fichas técnicas de los materiales. Aunque los valores anotados ahí son indicativos (y muchas veces calculados en condiciones ideales de laboratorio), es muy importante que se tome nota de los rendimientos reales en obra siempre que sea posible. Recordemos que cada obra es una oportunidad de obtener datos útiles con base en nuestros aciertos y errores para ser replicados, mejorados o corregidos en la siguiente obra. Las recomendaciones de este apartado no sólo aplican en la selección de materiales para alcanzar el bienestar térmico, también son aplicables al diseño en general.

# Reflexiones finales

La enseñanza de la arquitectura se relaciona con el desarrollo de la creatividad al crear consciencia sobre la complejidad y las escalas. Estas dan pie a nuevas formas de pensar, crear, dar forma y solucionar los problemas de habitabilidad en el contexto actual de permanente contingencia ambiental. Hoy más que nunca es necesario retomar las interfaces entre las ciencias y las artes, aunque parezca que últimamente estas se han apartado una de la otra. En el ejercicio profesional actual, debemos crear narrativas y procesos nuevos que permitan solucionar los problemas tradicionales, pero con el reto adicional de considerar las nuevas dimensiones relacionadas con el ambiente y el uso responsable de la energía.

Los arquitectos no sólo diseñamos espacios, también organizamos materiales y formas de trabajo en torno a la edificación. De ahí la importancia de percibir a nuestros diseños de forma integral, pensando desde el material hasta el humano.

Al momento de diseñar, es importante considerar la energía y temporalidad en la correcta selección de los materiales. La energía puede estar presente en forma de vigas de acero, tabiques, costales de cemento, vigas de madera o aislantes térmicos. No todas las tipologías arquitectónicas están destinadas a durar lo mismo. Esto lo debemos reconocer para diseñar en consecuencia con la temporalidad. Además, debemos conocer todo de nuestros materiales: de dónde vienen, qué se tuvo que hacer para extraer los minerales de la tierra, cómo se fabricaron, cómo llegaron a nuestras manos y a nuestros planos arquitectónicos. El tiempo también es importante. Debemos preguntarnos qué pasará con los materiales y el edificio después de construido, cuánto durará, cada cuánto se renovará mediante la remodelación de sus baños, cocinas, instalaciones, espacios, cómo se demolerá, cómo y dónde deseamos que terminen los materiales que estamos proponiendo en nuestro diseño. Desentenderse y decir que está bien que terminen en un tiradero municipal ya no es aceptable dado el escenario ambiental que vivimos.

Entender a los edificios como un ser vivo con un ciclo de vida permitirá dar un respiro a la extracción salvaje de materiales minerales y recursos energéticos. Las ciudades se convertirán en las principales fuentes de materiales al reciclar lo consumido por ellas mismas. De esta manera seguirán vivos, seguirán presentes en nuestro entorno construido por muchas generaciones. Los clientes normalmente están más interesados en adquirir materiales de construcción por su costo, facilidad de adquisición, practicidad de construcción que por cuestiones ambientales. Es parte de nuestro quehacer profesional encontrar las ventajas de una manera creativa e involucrar al cliente con estas elecciones responsables.

Al momento de elegir materiales es importante no dejarse llevar solamente por sus cualidades tangibles y estéticas. Es fundamental considerar la magnitud de la energía embebida, las fuentes de energía para su producción, su ciclo de vida y hasta las condiciones de trabajo de la mano de obra. Los materiales y los edificios construidos con ellos no son estáticos, por el contrario, son dinámicos y deberán ser sometidos a una transformación y renovación continua. Los arquitectos tenemos la tarea de diseñar esas transformaciones.

A medida que pensamos los edificios en términos de sostenibilidad y energía hay un cambio en la proporción de las escalas. Ahora, la temporalidad se vuelve más relevante y comenzamos a darnos cuenta de que nuestros edificios no serán eternos. Los materiales y la energía son sólo flujos temporales. Diseñar considerando la energía embebida tiene una dimensión temporal. Es momento de repensar lo nuevo y lo viejo, lo industrializado y lo artesanal, lo analógico y lo digital hacia una edificación sostenible.

Los materiales no son ni buenos ni malos por sí solos; hay que preguntarse primero para qué función sirven mejor y por qué, para que estos no sean mal aplicados o subutilizados. Hay que conocerlos desde la cuna para sacar su máximo provecho y que desempeñen su función correctamente de acuerdo con sus propiedades y capacidades.



# Lista de referencias

- “Carbon Counts” <https://carboncounts.fcbstudios.com/#materials>.
- “Radiografía de la industria del acero en México”, *Canacero*, 2020, 1. [https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/Radiografia\\_de\\_la\\_Industria\\_del\\_Acero\\_en\\_Mexico\\_2020.pdf](https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico/descargas/Radiografia_de_la_Industria_del_Acero_en_Mexico_2020.pdf).
- “The Engineering Tool Box”, 2003. <https://www.engineeringtoolbox.com>.
- Angelovska, Emilija, “Difference Between UPVC and CPVC”, 2018. <http://www.differencebetween.net/object/difference-between-upvc-and-cpvc/#:~:tex->
- Ashby, Mike y Johnson, Kara, *Materials and Design. The Art and Science of Material Selection in Product Design*, Oxford: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2010.
- Ashby, Mike, y Jones, David, *Engineering Materials 1: An introduction to their properties and applications*, Oxford: Butterworth Heinemann, 2002.
- Askeland, Donald y Wright, Wendelin, *Ciencia e ingeniería de materiales*, Ciudad de México: Cengage Learning, 2017.
- Askeland, Donald; Fulay, Pradeep y Wright, Wendelin, *Ciencia e ingeniería de materiales*, CENGAGE Learning Editores, México, 2012.
- Black, Brian C.; Gift, Nancy; Hassenzahl, David M.; Stephens, Jennie C. y Weisel, Gary, *Climate Change: An Encyclopedia of Science and History*. Westport, United States: ABC-CLIO, LLC, 2013. <http://ebook-central.proquest.com/lib/unam/detail.action?docID=1122577>.
- Cámara Nacional del Cemento, “Cemento y productos a base de cemento. Reporte de fabricación”, 2019. <https://canacem.org.mx/reporte-de-fabricacion/>.
- Castillo, Abel, “El bambú en construcción: un material inmejorable”, *Eco-Habitar*, 2019.
- Coman, Gelu; Uzuneanu, Krisztina y Paraschiv, Simona, “The influence of moisture on the thermal conductivity for building materials”, *Cement, Wapno, Beton*, número especial (2011), pp. 44-48.

- Cotterell, Janet, y Dadeby, Adam, *The Passivhaus Handbook*, Cambridge: Green Books, 2016.
- De Villanueva, Juan, *Arte de albañilería ó instrucciones para los jóvenes que se dediquen á él*, Porrúa, 2016.
- Desplazes, Andrea, *Construir la arquitectura: del material en bruto al edificio: un manual*, Barcelona: Gustavo Gili, 2010.
- Dinadayalane, T. C., y Leszczynski, Jerzy, "Toward nanomaterials: Structural, energetic and reactivity aspects of single-walled carbon nanotubes", *Theoretical and Computational Chemistry* 18 (2007), pp. 167-199. DOI: 10.1016/S13807323(06)80009-9.
- Dixit, Manish K., Fernández-Solís, Jose L.; Lavy, Sarel y Culp, Charles H., "Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 6 (2012), pp. 3730-3743. DOI: 10.1016/j.rser.2012.03.021.
- Elorza, Manuel, "Unidades de Medida de la Madera", *Notas del Curso Construcción con Madera*, DGAPA, DECAD, UNAM, 2018.
- Elorza, Manuel; Ricalde, Mario; Bárcenas, Guadalupe; Ordóñez, Víctor; Castillo, Irasema y Bocanegra, Salvador, *Manual de Construcción de Estructuras Ligeras de Madera*, Comisión Forestal de América del Norte, 1990.
- Fernández del Castillo, Alejandro, "Certificación de materiales de construcción con principios aplicados de biomimética", Ciudad de México, UNAM, 2012.
- Goldstein, Benjamin, y Rasmussen, Freja, "ICA of Buildings and the Built Environment", *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*, Hauschild, Michael; Rosenbaum, Ralph y Olsen, Stig (eds.), Springer, 2018. DOI: 10.2134/csa2019.64.0706.
- Granta, "Ces 2017 Edupack", 2017.
- Gutiérrez Vázquez, J. A., y Oñoro, J., "Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones". *Revista de metalurgia* 44, 5 (2008), pp. 457-476.
- Hernández Moreno, Silverio, *Degradación y durabilidad de materiales y componentes constructivos*, 2019.
- Hoffman, Christian; Van Hoey, Michel y Zeumer, Benedikt, "Decarbonization challenge for steel", 2020. <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel#>.

- INEGI, “Viviendas particulares habitadas por tipo de material en paredes, 2015”, *Encuesta Intercensal 2015*, 2015. [https://apps1.se-marnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2016/archivos/04\\_empleovivienda/D1\\_EMPVIV02\\_02.pdf](https://apps1.se-marnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2016/archivos/04_empleovivienda/D1_EMPVIV02_02.pdf).
- IPCC, *Calentamiento Global de 1,5 °C. Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2019.
- Kalamees, T.; Arumägi, E. y Alev, Ü., “Performance of interiorly insulated log wall: Experiences from Estonian cold climate conditions”, 2018, pp. 99-107. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1295314/FULLTEXT01.pdf>.
- Kirk-Davidoff, Daniel, *The Greenhouse Effect, Aerosols, and Climate Change. Green Chemistry: An Inclusive Approach*, Elsevier, 2018. DOI: 10.1016/B978-0-12-809270-5.00009-1.
- Kosny, Jan, *PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change by Finite Element and Materials in Building Envelopes and Soft Computing Methods Internal Structures*, Brian Derby, Springer, 2015.
- La Roche, Pablo, “The Greenhouse Effect”, *Carbon Neutral Architectural Design*, Boca Raton: CRC Press, 2017.
- Laboratorio de Entornos Sostenibles. “Datos de materiales LES”, 2021. [https://drive.google.com/file/d/1InEC1xYacBJhmkVwHLer-\\_o v D 0 Ty i R N E / v i e w .](https://drive.google.com/file/d/1InEC1xYacBJhmkVwHLer-_o v D 0 Ty i R N E / v i e w .)
- Lira-Oliver, Adriana, y Vilchis-Martínez, S., “Thermal Inertia Performance Evaluation of Light-Weighted Construction Space Envelopes Using Phase Change Materials in Mexico City’s Climate”, *Technologies* 5, 4 (2017), p. 69. DOI: 10.3390/technologies5040069.
- Lira, Adriana, “Transferencias de calor (cualidades térmicas de los materiales)”, *Unidades de Apoyo de Aprendizaje*. CUADED-UNAM, Facultad de Arquitectura, 2018. [https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/f0a34d71-c662-42f1-9917c189025e480/Transferencia\\_de\\_calor/index.html](https://uapa.cuaieed.unam.mx/sites/default/files/minisite/static/f0a34d71-c662-42f1-9917c189025e480/Transferencia_de_calor/index.html).
- Minke, Gernot. “Manual construcción en tierra: La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual”, 2005.
- ONU. “Desafíos globales. Cambio climático”. <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change#:~:text=Convención>

- Pfundstein, Margit; Gellert, Roland; Spitzner, Martin y Rudolphi, Alexander, *Insulating Materials: Principles, Materials, Applications*, Munich: Detail, 2008.
- Phylander, George (ed), *Encyclopedia of Global Warming and Climate Change*, Londres: Sage, 2008.
- Salcido Fernández, Nohemí. “Análisis experimental de diferentes aleaciones con memoria de forma para su posible uso como disipadores de energía sísmica”. Instituto de Ingeniería, UNAM, 2007.
- Sartori, I., y A. G. Hestnes. “Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article”. *Energy and Buildings* 39, 3 (2007), pp. 249-257. DOI: 10.1016/j.enbuild.2006.07.001.
- SEMARNAT, “Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2016”, 2016.
- Sener, Conuee y INEGI, “Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares. Presentación de Resultados”, Ciudad de México, Sener, 2018. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/encevi/2018/doc/encevi2018\\_presentacion\\_resultados.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/encevi/2018/doc/encevi2018_presentacion_resultados.pdf).
- Solano García, Naoki Enrique, “Improvement of Traditional Building Procedures in Dwellings towards an Energy-Efficient and Low-Carbon Architecture Practice in Mexico”, *Academia XXII* 10, 20 (2019).
- Watts, Andrew, *Modern Construction Handbook*. Birkhäuser, 2013.
- Wright, Frances, “Bale Out Strategy! Could straw bale construction be developed as a low-tech, low embodied energy means of achieving Passivhaus construction standards in Scotland?”, University of Dundee, 2014.

# Lista de imágenes

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Imagen 1 El efecto invernadero.<br>Elaboración propia basado en La Roche .....                                                                                                   | 13 |
| Imagen 2: Entorno construido de la Ciudad de México.<br>Imagen del autor .....                                                                                                   | 17 |
| Imagen 3. Casa que modera la entrada de energía solar<br>a través de una celosía y un techo entretejido de carrizos,<br>madera y barro. Guerrero, México. Imagen del autor ..... | 23 |
| Imagen 4. Detalle del techo interior entretejido de carrizos,<br>madera y tejas de barro. Guerrero, México. Imagen del autor .....                                               | 23 |
| Imagen 5. Edificio “Passivhaus” que aprovecha la energía<br>del ambiente. Escocia, Reino Unido. Imagen del autor .....                                                           | 24 |
| Imagen 6. Equipo de aire acondicionado para<br>una envolvente arquitectónica con un aislamiento térmico pobre.<br>Oaxaca, México. Imagen del autor .....                         | 26 |
| Imagen 7. Sistema de muros<br>de mampostería confinada. Imagen del autor .....                                                                                                   | 31 |
| Imagen 8. Proceso constructivo de muros<br>de mampostería confinada previo al cimbrado y colado<br>de los castillos. Ciudad de México. Imagen del autor.....                     | 31 |
| Imagen 9. Tabiques rojos recocidos de barro en una obra.<br>Ciudad de México. Imagen del autor.....                                                                              | 32 |
| Imagen 10. Tabiques de cemento-arena en una obra<br>de autoconstrucción. Ecatepec, Estado de México.<br>Imagen del autor .....                                                   | 32 |
| Imagen 11. Muro de tabique rojo recocido siendo aplanado<br>en su exterior con una capa de mortero de cemento-arena.<br>Ciudad de México. Imagen del autor.....                  | 33 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Imagen 12. Cimbra y armado de varillas de acero previo a colado de concreto de una losa maciza. Ciudad de México.</b>                                                                                                                                                                          |           |
| <b>Imagen del autor .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>35</b> |
| <b>Imagen 13. Modelado de flujo de calor de una envolvente con muro de mampostería confinada y losa plana de concreto armado con entortado, mediante un programa de flujo de calor (THERM). Fuente: Improvement of Traditional Building Procedures in Mexico.....</b>                             | <b>37</b> |
| <b>Imagen 14. Modelado de flujo de calor de una envolvente con muro de mampostería confinada y losa de vigueta y bovedilla de poliestireno expandido con entortado, mediante un programa de flujo de calor (THERM). Fuente: Improvement of Traditional Building Procedures in Mexico.....</b>     | <b>38</b> |
| <b>Imagen 15. Modelado de flujo de calor de un muro de mampostería confinada (vista en planta) en su intersección con un castillo de concreto armado mediante software THERM. Fuente: Improvement of Traditional Building Procedures in Mexico .....</b>                                          | <b>38</b> |
| <b>Imagen 16. Al ser color blanco, la nieve tiene un alto albedo. Escocia, Reino Unido. Fuente: imagen del autor .....</b>                                                                                                                                                                        | <b>52</b> |
| <b>Imagen 17. Las cámaras térmicas detectan la temperatura mediante la captura de diferentes niveles de luz infrarroja, la cual es irradiada por los objetos. Captura de una lectura de cámara térmica. Fuente: Laboratorio de Entornos Sostenibles, FA, UNAM.....</b>                            | <b>53</b> |
| <b>Imagen 18. Panteón de Agripa. Roma, Italia. Imagen del autor .....</b>                                                                                                                                                                                                                         | <b>56</b> |
| <b>Imagen 19. Los cascarones de concreto de Félix Candela comunican un concepto de alta eficiencia: máxima superficie construida utilizando el mínimo de apoyos y el mínimo de material, en este caso, el concreto armado. Planta de Bacardí, Estado de México. Fuente: Imagen del autor.....</b> | <b>59</b> |
| <b>Imagen 20. Cuando los materiales son aplicados cuidadosamente rescatando los valores de ritmo, proporción y jerarquía en la edificación, tenemos como resultado un entorno construido que no solo provee bienestar térmico, sino también bienestar</b>                                         |           |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| psicológico. Centro de Jojutla, MMX. Jojutla, Morelos.<br>Fuente: imagen del autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 60        |
| <b>Imagen 21. El futuro de la arquitectura tenderá a utilizar menos acero sustituyéndolo por materiales que siempre han existido, pero siendo procesados de manera diferente para incrementar sus capacidades mecánicas. Tal es el caso de la madera en forma de vigas laminadas y CLT. Fundación Louis Vuitton, Frank Gehry. Francia. Fuente: Imagen del autor.....</b> | <b>60</b> |
| <b>Imagen 22. La edificación del futuro tenderá a reutilizar técnicas en desuso el día de hoy, utilizando los mismos materiales. Edificio que utiliza un sistema impermeabilizante metálico en su cubierta combinando metal y vigas de madera laminadas en su interior. Maggie's Centre Dundee. Reino Unido.<br/>Fuente: Imagen del autor.....</b>                       | <b>61</b> |
| <b>Imagen 23. La durabilidad de los materiales al desgaste seguirá siendo uno de los ejes rectores en el diseño del entorno. Cuanto más dure un edificio, menor será su huella ecológica. Fachada principal del Sagrario Metropolitano, construida en piedra chiluca. Ciudad de México.<br/>Fuente: Imagen del autor.....</b>                                            | <b>61</b> |
| <b>Imagen 24. Concreto. Imagen Creative Commons.....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>63</b> |
| <b>Imagen 25 Viga de acero. Imagen Creative Commons.....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>66</b> |
| <b>Imagen 26. Varillas corrugadas de acero.<br/>Imagen Creative Commons.....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>66</b> |
| <b>Imagen 27. The Vessel, obra de Thomas Heatherwick. La parte inferior de las escaleras está revestida con un acero inoxidable PVD en tono cobre. Nueva York, EE.UU.<br/>Fuente: Imagen del autor.....</b>                                                                                                                                                              | <b>69</b> |
| <b>Imagen 28. Perfiles de aluminio extruido.<br/>Imagen Creative Commons.....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>68</b> |
| <b>Imagen 29. Vidrio. Imagen Creative Commons.....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>72</b> |
| <b>Imagen 30. Tabiques rojos recocidos en un muro.<br/>Imagen del autor .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>75</b> |
| <b>Imagen 31. Tabiques de cemento-arena en un muro.<br/>Imagen del autor .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>76</b> |

|                                                                                                                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Imagen 32. Horno para fabricar tabiques, tejas y ladrillos.</b>                                                                                                                          |            |
| Honduras. Imagen Creative Commons.....                                                                                                                                                      | 77         |
| <b>Imagen 33. Fabricación de tabiques de cemento-arena.</b>                                                                                                                                 |            |
| Imagen Creative Commons.....                                                                                                                                                                | 79         |
| <b>Imagen 34. Adobes. Imagen Creative Commons .....</b>                                                                                                                                     | <b>80</b>  |
| <b>Imagen 35. Muro de adobe con pedacería de tejas en las juntas.</b>                                                                                                                       |            |
| Tepecoacuilco, Guerrero. Imagen del autor .....                                                                                                                                             | 82         |
| <b>Imagen 36. Troncos de madera. Imagen Creative Commons .....</b>                                                                                                                          | <b>84</b>  |
| <b>Imagen 37. Estructura de bambú.</b>                                                                                                                                                      |            |
| Jardín Botánico de Bogotá, Colombia. Imagen del autor.....                                                                                                                                  | 89         |
| <b>Imagen 38. Codos de cobre. Imagen Creative Commons .....</b>                                                                                                                             | <b>91</b>  |
| <b>Imagen 39. El cobre se utilizaba como impermeabilizante metálico, esta técnica se encuentra en desuso.</b>                                                                               |            |
| <b>La cúpula del Monumento a la Revolución o el Palacio de Bellas Artes cuentan con este sistema en sus cubiertas.</b>                                                                      |            |
| Fuente: Imagen del autor.....                                                                                                                                                               | 92         |
| <b>Imagen 40. Tubería de PVC en una tienda de materiales.</b>                                                                                                                               |            |
| Fuente: Imagen del autor.....                                                                                                                                                               | 94         |
| <b>Imagen 41. Bloque de poliestireno expandido.</b>                                                                                                                                         |            |
| Imagen Creative Commons.....                                                                                                                                                                | 97         |
| <b>Imagen 42. Panel de poliestireno extruido.</b>                                                                                                                                           |            |
| Imagen Creative Commons.....                                                                                                                                                                | 99         |
| <b>Imagen 43. Espuma de poliuretano.</b>                                                                                                                                                    |            |
| Imagen Creative Commons.....                                                                                                                                                                | 101        |
| <b>Imagen 44. Lana de roca. Imagen Creative Commons.....</b>                                                                                                                                | <b>102</b> |
| <b>Imagen 45. Aislamiento térmico con fibras de celulosa proyectada. Imagen Creative Commons .....</b>                                                                                      | <b>104</b> |
| <b>Imagen 46. Pacas de paja. Huasca de Ocampo.</b>                                                                                                                                          |            |
| Imagen Creative Commons.....                                                                                                                                                                | 105        |
| <b>Imagen 47. Espuma metálica.</b>                                                                                                                                                          |            |
| Fuente: Academia Mexicana de Ciencias.....                                                                                                                                                  | 108        |
| <b>Imagen 48. La presencia de humedad en el tejido del muro afecta sus propiedades térmicas. Es importante crear estrategias de secado de los materiales. Fuente: Imagen del autor.....</b> | <b>112</b> |
| <b>Imagen 49. Problemas de humedad en un muro de tabique rojo recocado. Nótese que las primeras hiladas</b>                                                                                 |            |



|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| de abajo hacia arriba se encuentran saturadas de agua.<br>Fuente: imagen del autor .....                                                       | 113 |
| Imagen 50. La falta de mantenimiento preventivo<br>de los materiales afecta también su aspecto estético.<br>Fuente: Imagen del autor.....      | 114 |
| Imagen 51. Las formas arquitectónicas influyen<br>en la incidencia de los rayos solares sobre la edificación.<br>Fuente: Imagen del autor..... | 115 |

# Lista de figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Causas principales del calentamiento global.<br>Fuente: ONU, Cambio climático.....                                                                                                                                                       | 14 |
| Figura 2. Acciones frente al cambio climático.<br>Fuente: Climate Change:An Encyclopedia<br>of Science and History.....                                                                                                                            | 16 |
| Figura 3. Etapas del Ciclo de Vida de una edificación individual.<br>Las subcategorías de pre-uso se encuentran en azul,<br>las de uso en amarillo y las de post-uso en rojo.<br>Fuente: Elaboración propia basado en Life Cycle Assessment.....   | 20 |
| Figura 4. Tipos de emisiones de carbono. Fuente: Need for an<br>Embodied Energy Measurement Protocol for Buildings.....                                                                                                                            | 21 |
| Figura 5. Distribución porcentual de equipos de aire acondicionado<br>en uso en viviendas particulares por tiempo de uso al día,<br>según tipo de equipo. Fuente: Encuesta Nacional sobre Consumo<br>de Energéticos en Viviendas Particulares..... | 27 |
| Figura 6. Producción anual de cemento<br>en México de 2013 a 2018, en millones de toneladas.<br>Fuente: Reporte de fabricación CANACEM.....                                                                                                        | 30 |
| Figura 7. Proceso de manufactura general de los materiales.<br>Fuente: Carbon Counts.....                                                                                                                                                          | 57 |
| Figura 8. Proceso de uso durante vida útil del material.<br>Fuente: Carbon Counts.....                                                                                                                                                             | 58 |
| Figura 9. Proceso de producción del cemento.<br>Elaboración: Ana Cedillo basado en Desplazes.....                                                                                                                                                  | 64 |
| Figura 10. Descripción de la elaboración del acero.<br>Elaboración: Luis Rivera basado en Mandal.....                                                                                                                                              | 68 |
| Figura 11. Esquema general de la producción de productos de vidrio.<br>Elaboración: Ana Cedillo basado en Watts.....                                                                                                                               | 74 |

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 12. Algunas formas de aplicación del tabique.                                                                  |    |
| Elaboración: Ana Cedillo basado en Desplazes .....                                                                    | 76 |
| Figura 13. Esquema general de producción del tabique recocido.                                                        |    |
| Elaboración: Ana Cedillo basado en Desplazes .....                                                                    | 77 |
| Figura 14. Proceso de fabricación de tabiques de cemento-arena.                                                       |    |
| Elaboración: Ana Cedillo basado en Desplazes .....                                                                    | 81 |
| Figura 15. Esquema del proceso de fabricación del adobe.                                                              |    |
| Elaboración: Ana Cedillo basado en Minke .....                                                                        | 79 |
| Figura 16. Esquema general de un muro de adobe.                                                                       |    |
| Elaboración: Ana Cedillo basado en Moreno .....                                                                       | 82 |
| Figura 17. Unidades de medida de la madera.                                                                           |    |
| Fuente: Notas del curso Construcción con Madera.                                                                      |    |
| Fuente: Elorza.....                                                                                                   | 85 |
| Figura 18. Especies más explotadas en México.                                                                         |    |
| Fuente: SEMARNAT .....                                                                                                | 85 |
| Figura 19. Principales estados productores de madera.                                                                 |    |
| Fuente: SEMARNAT .....                                                                                                | 86 |
| Figura 20. Algunos productos derivados de la madera aserrada.                                                         |    |
| Elaboración: Luis Rivera .....                                                                                        | 87 |
| Figura 21. Proceso de aserrío de la madera,<br>desde el corte del fuste hasta la generación de tablas, tablones, etc. |    |
| Elaboración: Luis Rivera .....                                                                                        | 87 |
| Figura 22. Diferentes aplicaciones de los materiales aislantes.                                                       |    |
| Elaboración: Ana Cedillo basada en Pfundstein.....                                                                    | 96 |

# Lista de recuadros

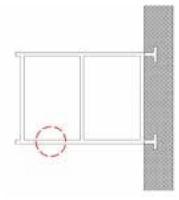
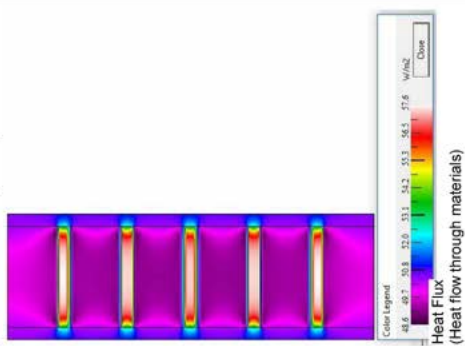
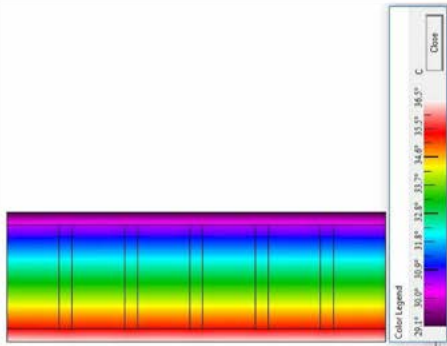
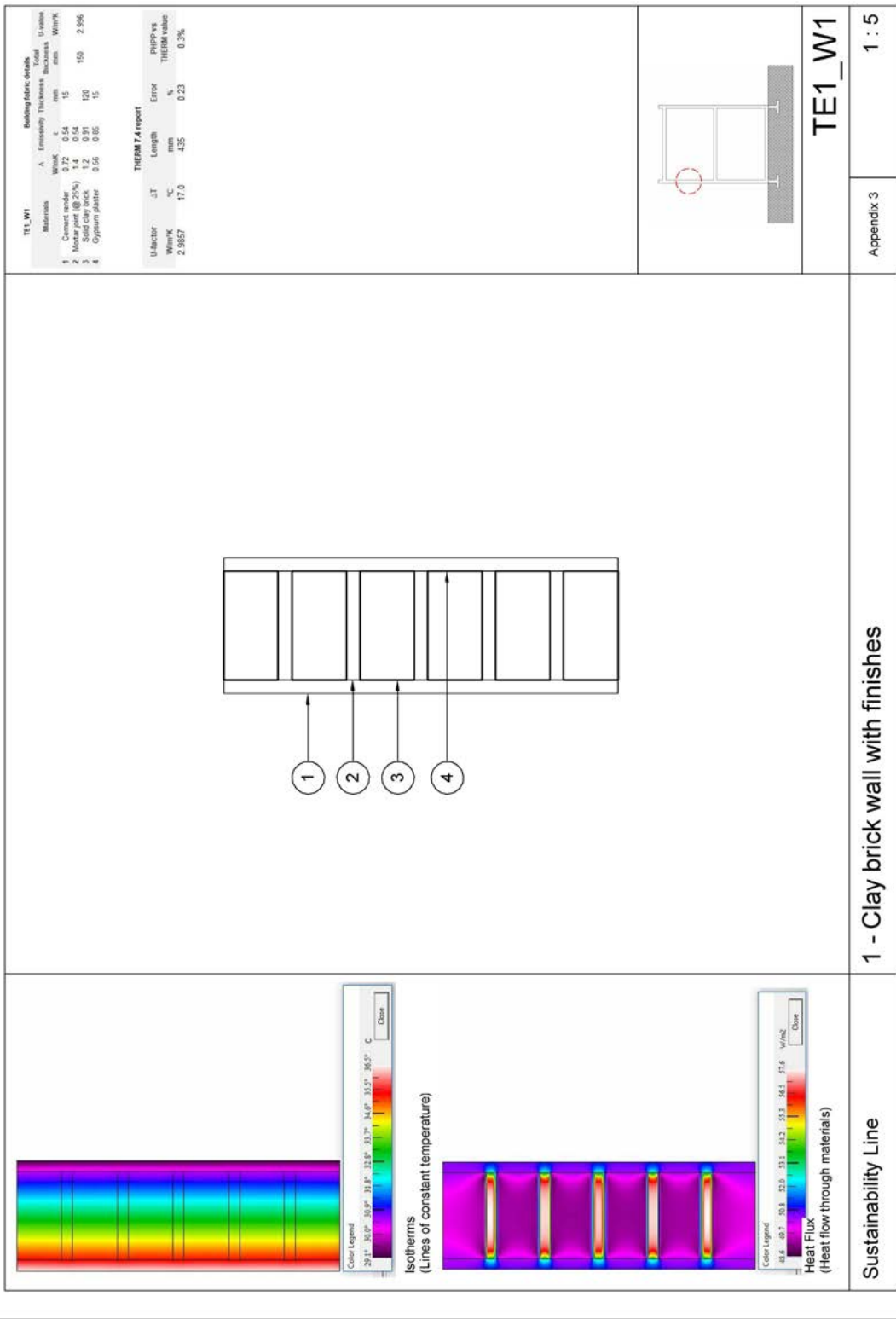
|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Recuadro 1. Resumen de propiedades e impactos ambientales del concreto. Consultar Anexo 2.....                                 | 63  |
| Recuadro 2. Resumen de propiedades e impactos ambientales del acero al carbono. Fuentes: Consultar Anexo 2.....                | 65  |
| Recuadro 3. Resumen de propiedades e impactos ambientales del aluminio. Consultar Anexo 2.....                                 | 70  |
| Recuadro 4. Resumen de propiedades e impactos ambientales del vidrio. Fuentes: Consultar Anexo 2.....                          | 72  |
| Recuadro 5. Resumen de propiedades e impactos ambientales del tabique. Fuentes: Consultar Anexo 2.....                         | 75  |
| Recuadro 6. Resumen de propiedades e impactos ambientales del adobe. Fuente: Consultar Anexo 2.....                            | 80  |
| Recuadro 7. Resumen de propiedades e impactos ambientales de la madera. Fuentes: Consultar Anexo 2.....                        | 83  |
| Recuadro 8. Resumen de propiedades e impactos ambientales del bambú. Fuentes: Consultar Anexo 2.....                           | 88  |
| Recuadro 9. Resumen de propiedades e impactos ambientales del cobre. Fuentes: Consultar Anexo 2.....                           | 91  |
| Recuadro 10. Resumen de propiedades e impactos ambientales del PVC. Fuentes: Consultar Anexo 2.....                            | 93  |
| Recuadro 11. Resumen de propiedades e impactos ambientales del poliestireno expandido. Fuentes: Consultar Anexo 2.....         | 97  |
| Recuadro 12. Resumen de propiedades e impactos ambientales del poliestireno extruido. Fuentes: Consultar Anexo 2.....          | 99  |
| Recuadro 13. Resumen de propiedades e impactos ambientales de la espuma rígida de poliuretano. Fuentes: Consultar Anexo 2..... | 100 |
| Recuadro 14. Resumen de propiedades e impactos ambientales generales de la lana mineral. Fuentes: Consultar Anexo 2.....       | 102 |

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Recuadro 15. Resumen de propiedades e impactos ambientales de la fibra de celulosa. Fuentes: Consultar Anexo 2 ..... | 103 |
| Recuadro 16. Resumen de propiedades e impactos ambientales de las pacas de paja. Fuentes: Consultar Anexo 2 .....    | 105 |

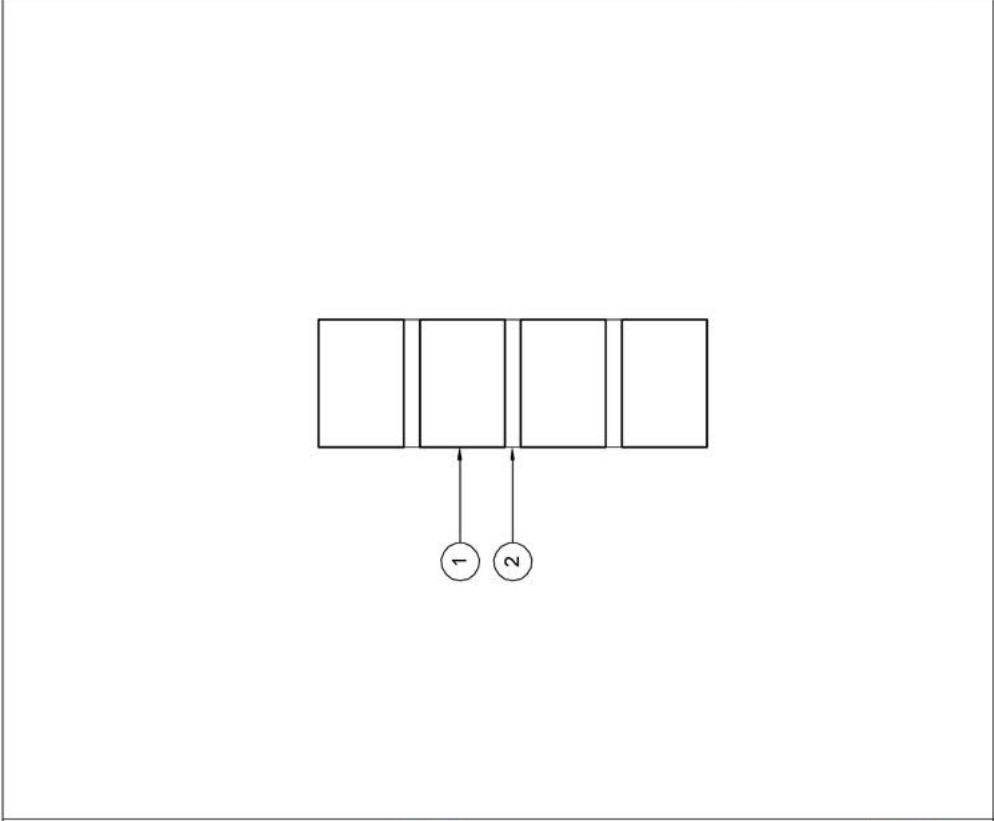
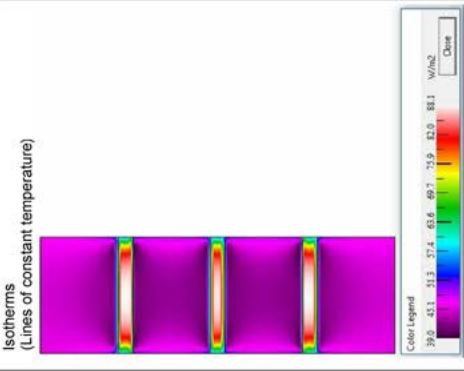
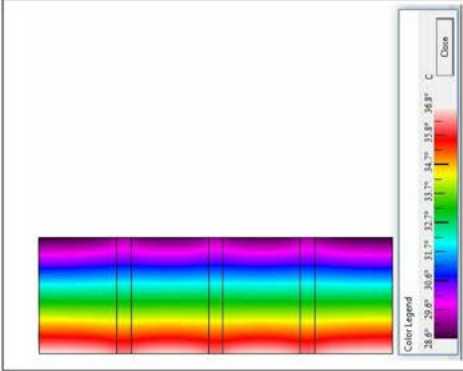
# Lista de tablas

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Yuxtaposición de consumos del entorno construido y los edificios dentro del tejido urbano.<br>Elaboración propia adaptado de Goldstein y Rasmussen .....                          | 18 |
| Tabla 2. Diferencias entre la aplicación del ACV para edificios y el entorno construido.<br>Elaboración propia basado en Goldstein y Rasmussen.....                                        | 19 |
| Tabla 3. Desempeño térmico de envolventes arquitectónicas normalmente utilizadas para la construcción en México.<br>Fuente: Improvement of Traditional Building Procedures in Mexico ..... | 36 |
| Tabla 4. Clasificación de los materiales por su composición orgánica o inorgánica (mineral).<br>Fuente: Pfundstein et al .....                                                             | 42 |
| Tabla 5. Densidades de algunos materiales utilizados en la industria de la construcción. Fuente: ICE .....                                                                                 | 45 |
| Tabla 6. Conductividades térmicas de diferentes materiales y su clasificación. Fuentes: ICE, CES Selector y LES .....                                                                      | 47 |
| Tabla 7. Capacidad de calor específico de algunos materiales de construcción. Fuente: ICE.....                                                                                             | 49 |
| Tabla 8. Tabla de medidas de la permeabilidad de vapor.<br>Fuente: Cotterell y Dadeby .....                                                                                                | 50 |
| Tabla 9. Resistencia a la difusión de vapor de algunos materiales.<br>Fuentes: Cotterell y Dadeby, Pfundstein, Kalamees .....                                                              | 51 |
| Tabla 10. Descripción de los diferentes aceros al carbono.<br>Fuente: Elaboración propia basado en Ashby y Johnson.....                                                                    | 67 |

**Anexo 1.**  
**Fichas**  
**de desempeño térmico**  
**de envolventes**  
**arquitectónicas**





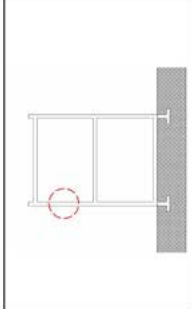


**TE2\_W2a**

| Building fabric details     |      |            |           |
|-----------------------------|------|------------|-----------|
| Material                    | A    | Emissivity | Thickness |
|                             | W/mK |            | mm        |
| Concrete block, lightweight | 0.56 | 0.54       | 120       |
| Mortar joint (@25%)         | 1.4  | 0.54       | 120       |

**THERM 7.4 report**

| U-factor | ΔT   | Length | Error | PHPP vs. THERM value |
|----------|------|--------|-------|----------------------|
| W/m²K    | °C   | mm     | %     |                      |
| 2.842    | 17.0 | 365    | 1.05  | 4.2%                 |



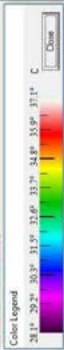
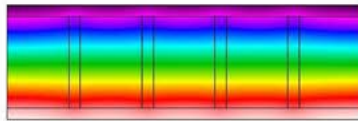
**TE2\_W2a**

Appendix 3

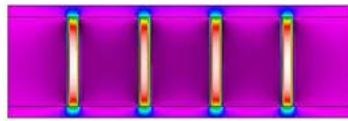
1 : 5

2 - Concrete block wall with no finishes

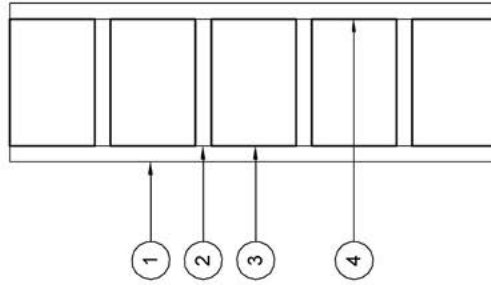
Sustainability Line



Isotherms  
(Lines of constant temperature)



Heat Flux  
(Heat flow through materials)

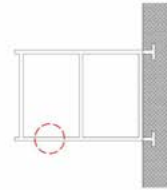


TE3\_W2b

| Materials         | Building Basic details |            |           | U value            |
|-------------------|------------------------|------------|-----------|--------------------|
|                   | A                      | Emissivity | Thickness |                    |
|                   | W/m <sup>2</sup> K     | ε          | mm        | W/m <sup>2</sup> K |
| 1 Concrete render | 1.2                    | 0.9        | 15        |                    |
| 2 Mortar (0.25%)  | 1.4                    | 0.94       | 10        |                    |
| 3 Concrete block  | 0.66                   | 0.94       | 120       | 1.597              |
| 4 Gypsum plaster  | 0.95                   | 0.95       | 15        |                    |

THEBM 7.4 report

| U factor           | ΔT   | Length | Error | PHPP vs THEBM value |
|--------------------|------|--------|-------|---------------------|
| W/m <sup>2</sup> K | °C   | mm     | %     |                     |
| 2.5809             | 17.0 | 490    | 1.11  | 0.6%                |



TE3\_W2b

Appendix 3

3-Concrete block wall with finishes

Sustainability Line

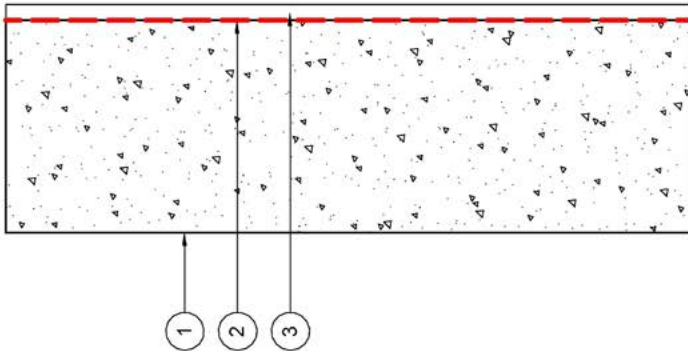
1 : 5



Isotherms  
(Lines of constant temperature)



Heat Flux  
(Heat flow through materials)

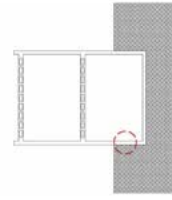


TE4\_W3 Building Mark Details

| Material              | A    | Embossing | Thickness | Total | U-value |
|-----------------------|------|-----------|-----------|-------|---------|
|                       |      |           | mm        | mm    | W/m²K   |
| 1 Reinforced concrete | 2.1  | 0.05      | 200       | 215   | 4.132   |
| 2 Waterproof membrane |      |           |           |       |         |
| 3 Gypsum plaster      | 0.56 | 0.05      | 15        |       |         |

THESEM 7.4 report

| U Factor | ΔT  | Length | Error | PHPP vs      |
|----------|-----|--------|-------|--------------|
| W/m²K    | °C  | mm     | %     | THESEM value |
| 4.1141   | 7.0 | 645    | 0     | 0.4%         |



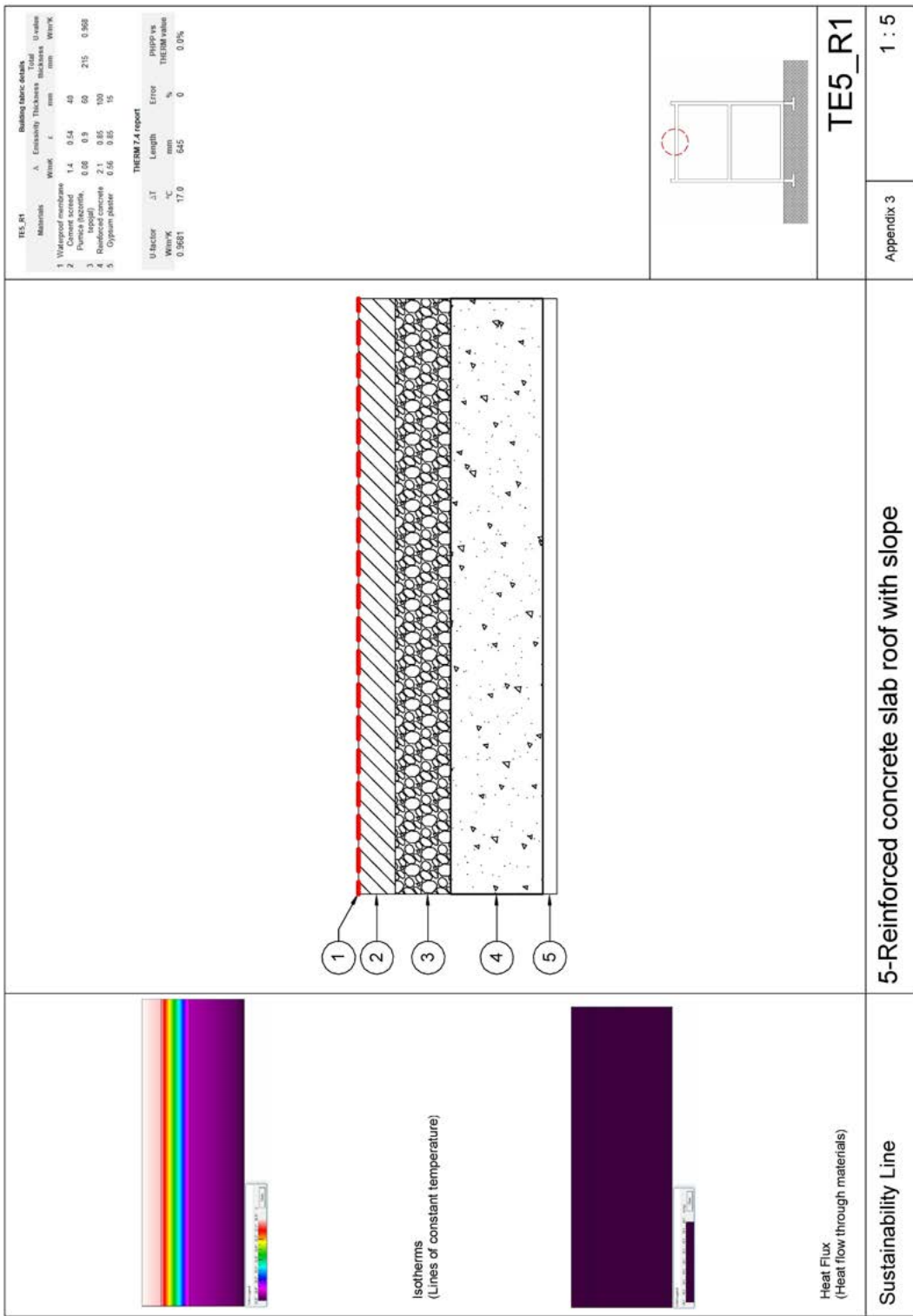
TE4\_W3

Appendix 3

1 : 5

4-Reinforced concrete wall with finishes

Sustainability Line



Isotherms  
(Lines of constant temperature)

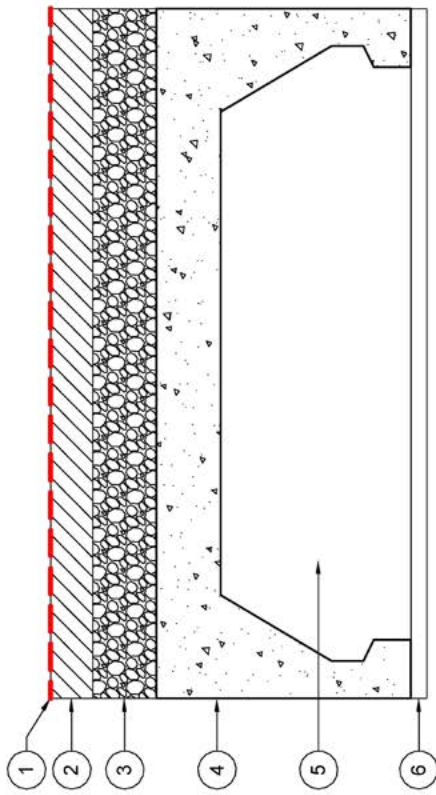


Heat Flux  
(Heat flow through materials)

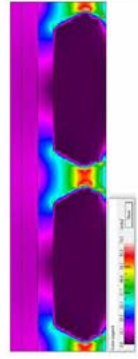
Sustainability Line

| TE6_R2                             |                    | Building fabric details |           | Total U-value      |
|------------------------------------|--------------------|-------------------------|-----------|--------------------|
| Material                           | A, U-value         | Thickness               | Thickness | W/m <sup>2</sup> K |
|                                    | W/m <sup>2</sup> K | L                       | mm        | mm                 |
| 1 Waterproof membrane              | 1.4                | 0.54                    | 40        |                    |
| 2 Cement screed                    | 0.08               | 0.9                     | 60        |                    |
| 3 Insulation                       | 0.03               | 0.9                     | 240       |                    |
| 4 Reinforced concrete              | 2.1                | 0.85                    | 240       | 355                |
| 5 Expanded polystyrene (EPS) (85%) | 0.038              | 0.9                     |           | 0.378              |
| 6 Gypsum plaster                   | 0.56               | 0.85                    | 15        |                    |

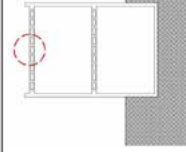
| THERM 7.1 report   |      |        |       |
|--------------------|------|--------|-------|
| U-factor           | ΔT   | Length | Error |
| W/m <sup>2</sup> K | °C   | mm     | %     |
| 0.5239             | 17.0 | 1300   | 6.28  |
|                    |      |        | 9.4%  |



Isotherms  
(Lines of constant temperature)



Heat Flux  
(Heat flow through materials)



TE6\_R2

1 : 5

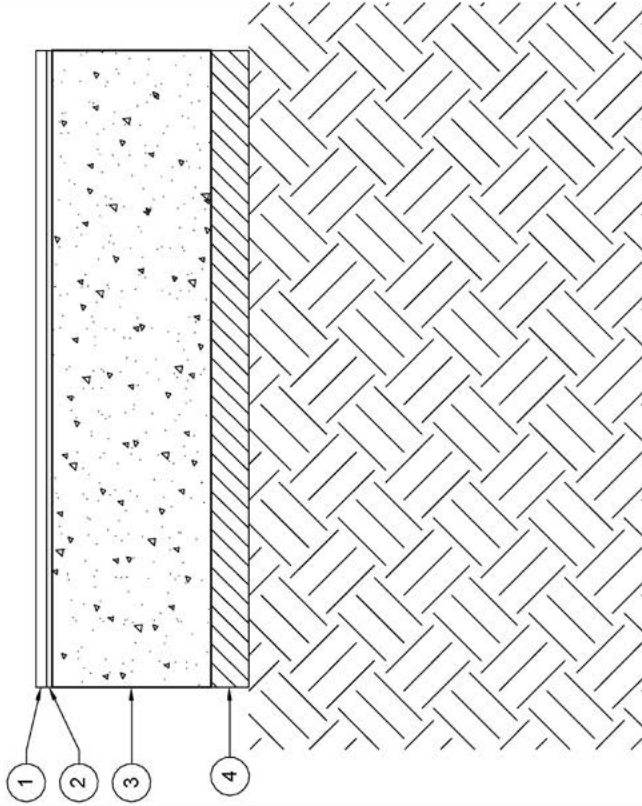
Appendix 3

6-Reinforced concrete beam and vault with slope

Sustainability Line



Isotherms  
(Lines of constant temperature)



Heat Flux  
(Heat flow through materials)

Sustainability Line

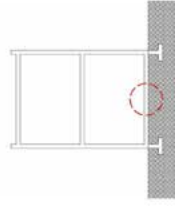
7-Reinforced concrete compensated foundation

TE7\_Cf

| Building fabric details    |                    |           |           |
|----------------------------|--------------------|-----------|-----------|
| Materials                  | A                  | Emisivity | Thickness |
|                            | W/m <sup>2</sup> K |           | mm        |
| 1 Concrete slab            | 1.7                | 0.92      | 10        |
| 2 Cement based adhesive    | 0.02               | 0.54      | 5         |
| 3 Reinforced concrete      | 2.1                | 0.85      | 150       |
| 4 Cement treated aggregate | 1.4                | 0.54      | 25        |

THEBM 7.4 report

| U-factor           | ΔT  | Length | Error | PHPP vs     |
|--------------------|-----|--------|-------|-------------|
| W/m <sup>2</sup> K | °C  | mm     | %     | THEBM value |
| 3.1822             | 7.0 | 600    | 0     | 0.4%        |



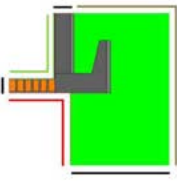
TE7\_B

Appendix 3

1 : 5

TJ1\_GFW

Boundary conditions



| Color  | Boundary condition    | Thermal resist. mPKW | Temp. % | U-factor |
|--------|-----------------------|----------------------|---------|----------|
| Red    | Internal wall (hor)   | 0.12                 | 23      | Edge     |
| Green  | Internal floor (down) | 0.15                 | 23      | Edge     |
| Blue   | External floor (down) | 0.17                 | 10      | None     |
| Yellow | External wall (hor)   | 1.41                 | 16      | None     |
| Black  | Adiabatic             |                      |         | None     |

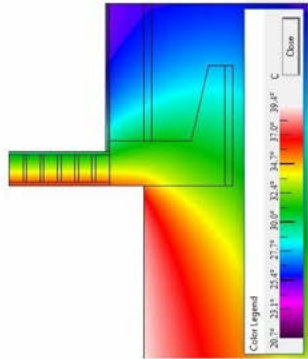
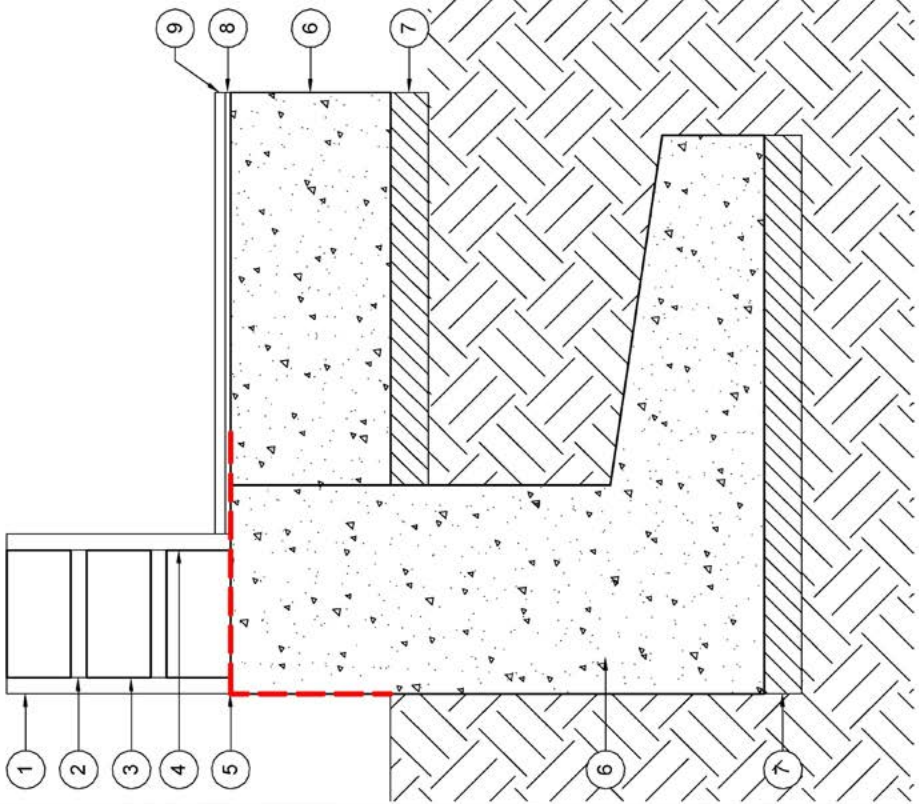
| Materials specification   | Thickness mm |
|---------------------------|--------------|
| 1 Cement render           | 15           |
| 2 Mortar (@ 25%)          | 15           |
| 3 Solid clay brick        | 100          |
| 4 Damp proof course       | 5            |
| 5 Reinforced concrete     | variable     |
| 6 Cement screed           | 35           |
| 7 Cement plaster adhesion | 5            |
| 8 Concrete tile           | 10           |

w value

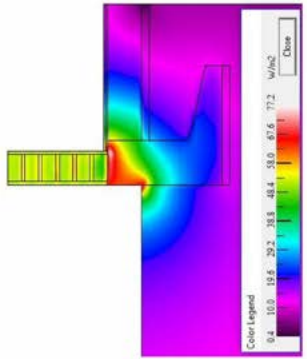
w value = U factor \* length of 2D Model - Sum of U factors \* Length of 1D Model

| U factor | length mm | U factor | length mm | U factor | length mm | U factor | length mm | U factor | length mm |
|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
| 1.0325   | 1066      | 0.692    | 24        | 0.0491   | 1732      | 3.66     | TJ1_GFW   |          |           |
| 2.8857   | 435       | 0.435    | 17        | 0.0763   | 974       | 0.22     | TJ1_GFW   |          |           |
| U value  | 0.00      | 0.6      | 7         | 0.2128   | 268571    | 0        | TJ1_GFW   |          |           |
| U value  | 0.3308    | W/mK     |           |          |           |          |           |          |           |

Boundary Length 8.43 m



Isotherms (Lines of constant temperature)



Heat Flux (Heat flow through materials)

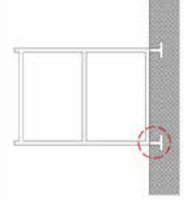
Sustainability Line

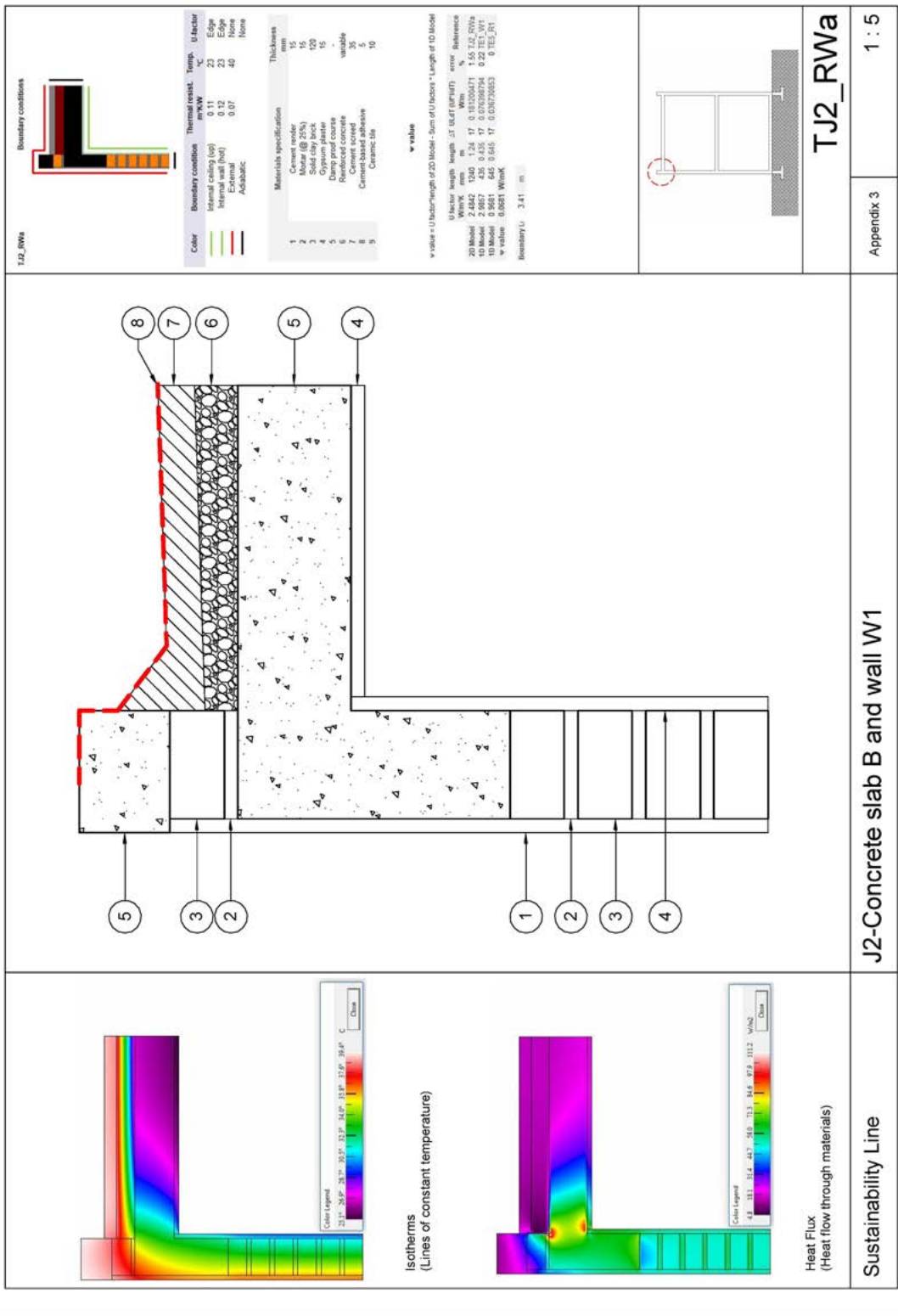
J1 - Ground floor slab and wall

Appendix 3

TJ1\_GFW

1 : 5





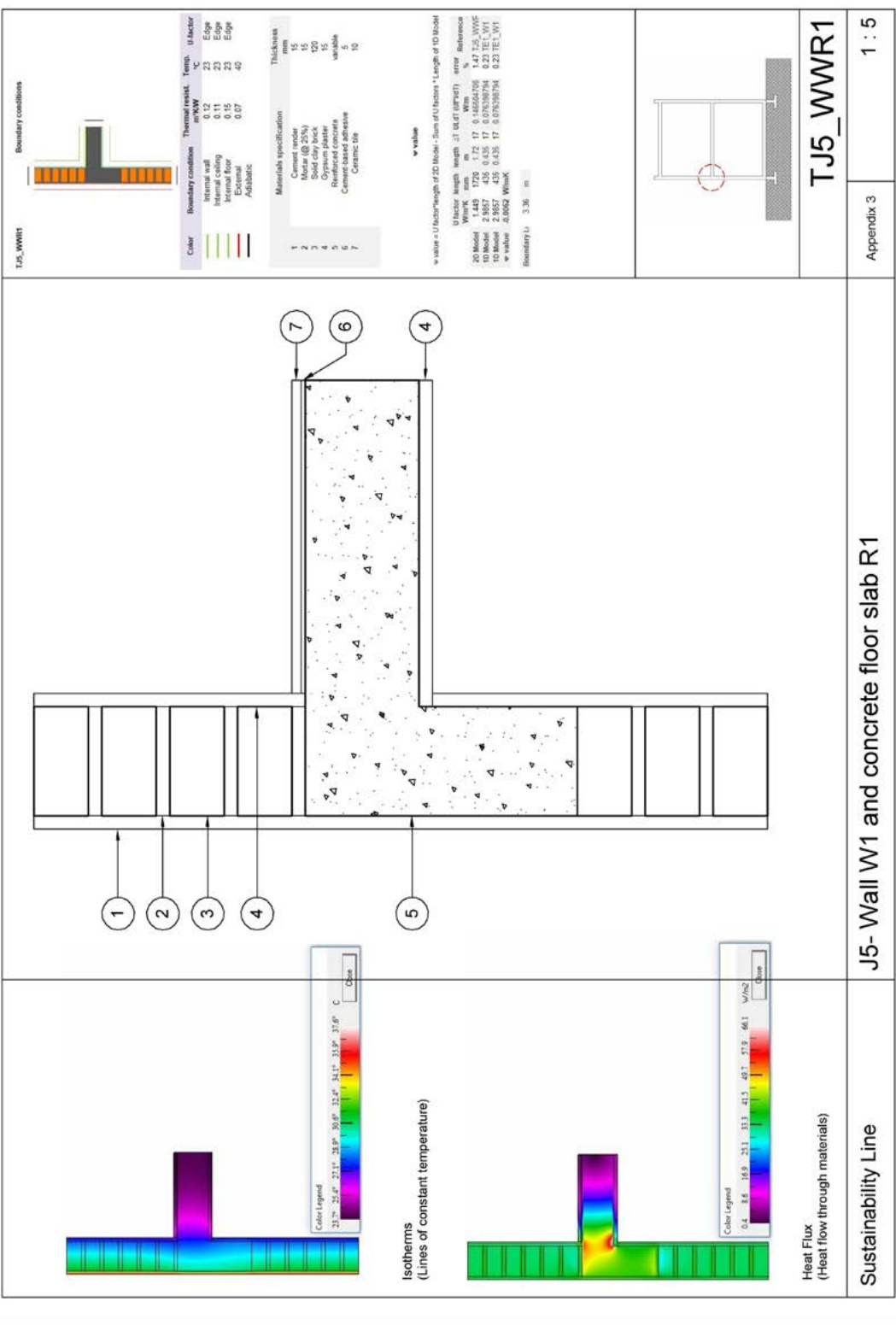
J2-Concrete slab B and wall W1

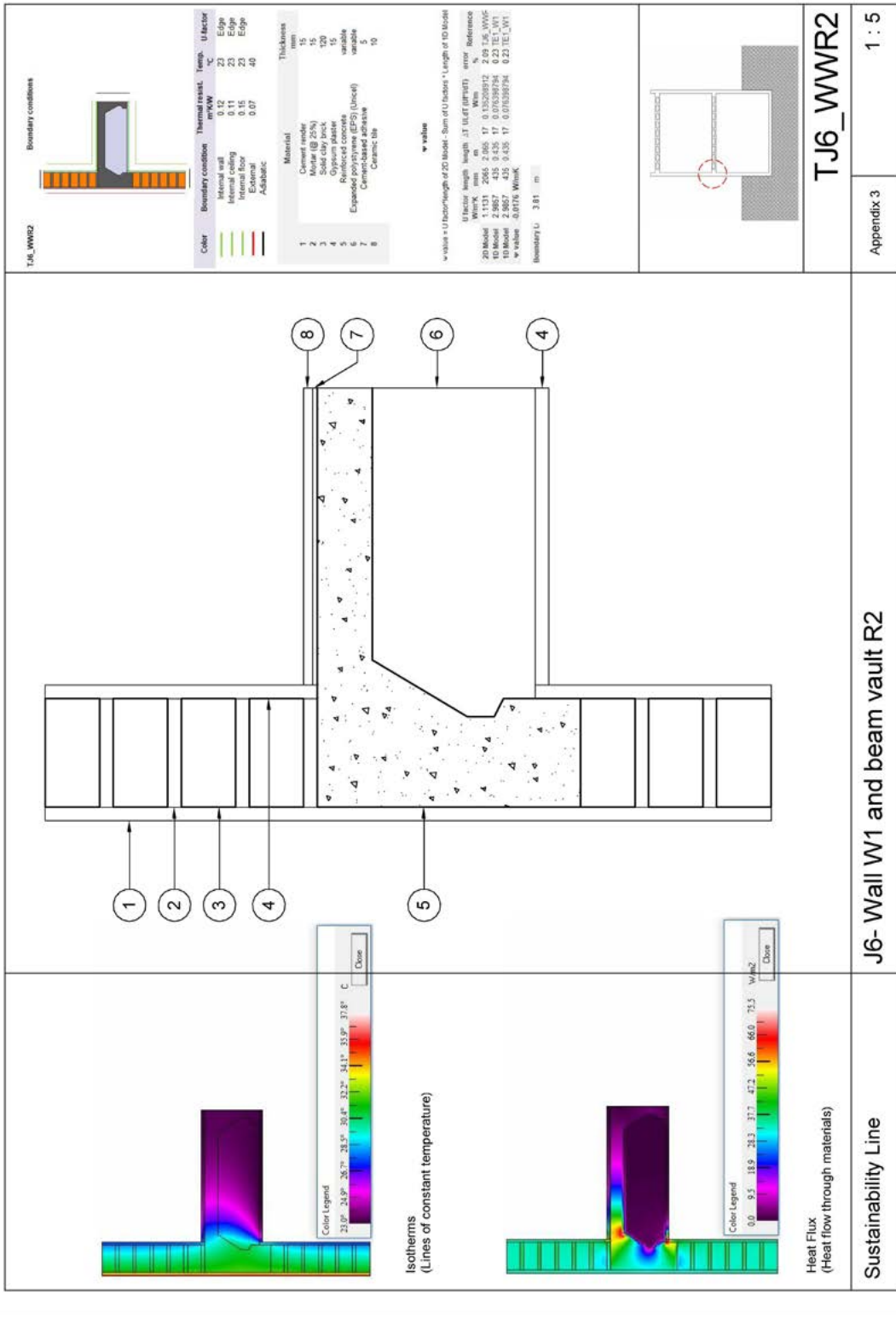
TJ2\_RWA

1 : 5

Appendix 3







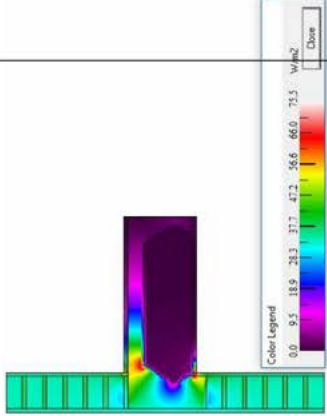
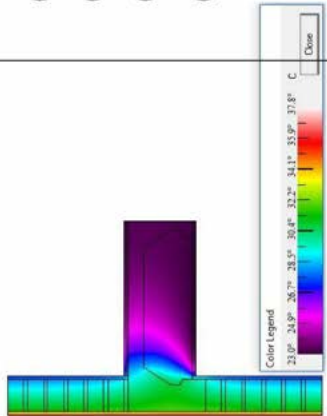
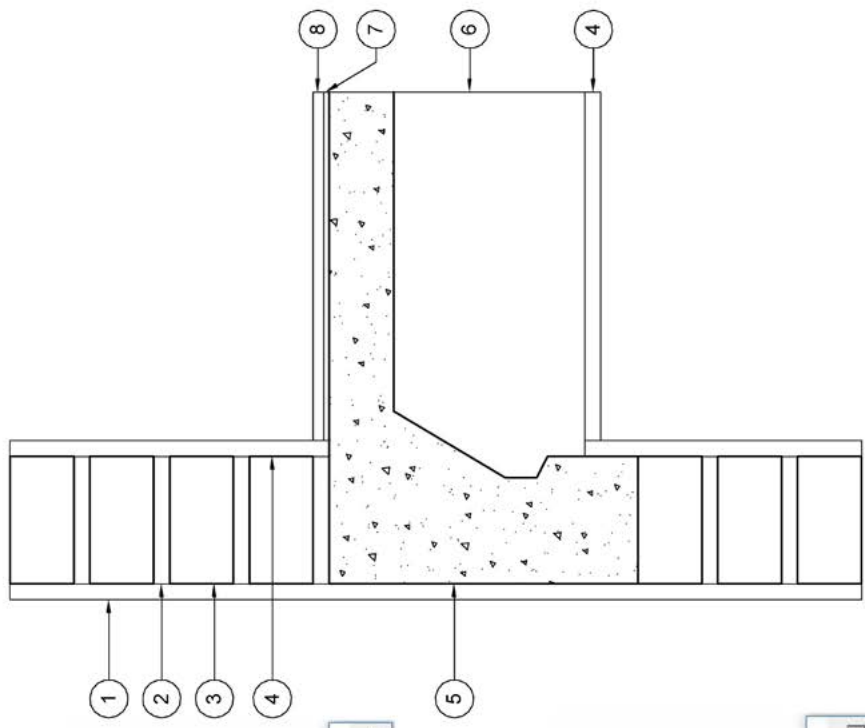
TJ6\_WWR2

1 : 5

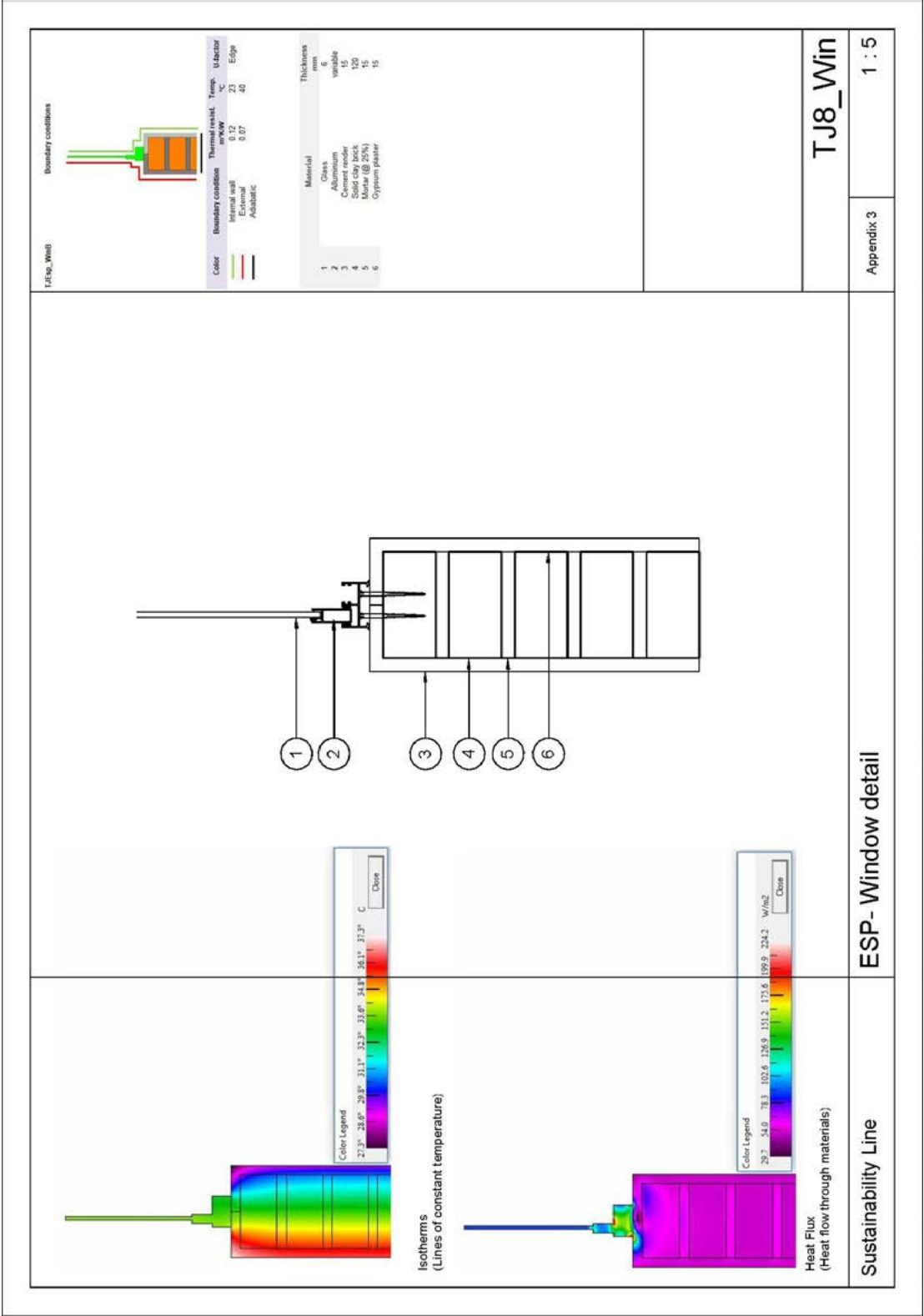
Appendix 3

J6- Wall W1 and beam vault R2

Sustainability Line







## **Anexo 2.**

# **Tabla sintética de valores**

| Material                                                                                                                                                                                   | Conductividad térmica $\lambda$ W/mK                                                                   | Coefficiente de expansión térmica $\alpha$                                                   | Densidad kg/m <sup>3</sup>                                                     | Energía embalsada (EE) MJ/kg                                            | Carbono embalsado (CE) kg/CO <sub>2</sub> -eq/kg                                  | Capacidad calorífica J/kg·K           | Resistencia a la difusión de vapor $\mu$ | Hermaticidad idac S/No | Impedancia acústica KPa·s/m <sup>2</sup> | Módulo de Young GN/m <sup>2</sup> | Punto de fluencia kN/m <sup>2</sup> | Resistencia a la tracción MN/m <sup>2</sup> | Temperatura de servicio °C | Formas de presentación con unas para la construcción                                                                                        | Fuente (por orden de aparición)                                                                                                 |                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Acero al carbono                                                                                                                                                                           | 45-55                                                                                                  | 0.2-0.85                                                                                     | 7800-7900                                                                      | 25-72                                                                   | 1.2-1.9                                                                           | 440-520                               |                                          |                        |                                          | 195-207                           | 260-1300                            | 500-1580                                    | -70-360                    | vigas, varillas, postes, placas, perfiles etc                                                                                               | 1,2,1,4,4,1,3,3,3,1                                                                                                             |                                                |
| Acero inoxidable                                                                                                                                                                           | 11-29                                                                                                  | 0.075-0.85                                                                                   | 7400-8100                                                                      | 83-115                                                                  | 6.150                                                                             | 400-530                               |                                          |                        |                                          | 190-200                           | 240-400                             | 500-800                                     | -270-850                   | placa, lámina, perfil                                                                                                                       | 2,2,1,1,6,1,3,3,3,1                                                                                                             |                                                |
| Adobe                                                                                                                                                                                      | 0.2-0.79                                                                                               | 0.88-0.92                                                                                    | 850-1800                                                                       |                                                                         |                                                                                   | 1000-1529                             |                                          |                        |                                          |                                   |                                     |                                             |                            | rellar                                                                                                                                      | 8,8,8,8                                                                                                                         |                                                |
| Agua (huevo)                                                                                                                                                                               |                                                                                                        | 0.95-0.963                                                                                   |                                                                                |                                                                         |                                                                                   |                                       |                                          |                        |                                          | 9.1                               | 85                                  |                                             |                            |                                                                                                                                             |                                                                                                                                 | 2,3,3                                          |
| Aleaciones de aluminio                                                                                                                                                                     | 76-235                                                                                                 | 0.04-0.77                                                                                    | 2500-2950                                                                      | 198-219                                                                 | 12.2-13.5                                                                         | 857-990                               |                                          |                        |                                          | 69-79                             | 100-267                             | 300-700                                     | -270-180                   | rolado, perfiles, tiramos                                                                                                                   | 1,2,1,4,4,2,3,3,3,1                                                                                                             |                                                |
| Aleaciones de memoria de forma                                                                                                                                                             | 17-18                                                                                                  |                                                                                              | 6420-6470                                                                      | 320-380                                                                 |                                                                                   |                                       |                                          |                        |                                          |                                   |                                     |                                             |                            | ND                                                                                                                                          | 1,1,1                                                                                                                           |                                                |
| Bamboo                                                                                                                                                                                     |                                                                                                        |                                                                                              | 500-850                                                                        | 0.014-0.015                                                             | 0.001-0.002                                                                       |                                       |                                          |                        |                                          |                                   |                                     |                                             |                            | pieza                                                                                                                                       | 2,2                                                                                                                             |                                                |
| Callosa                                                                                                                                                                                    | 0.04-0.045                                                                                             | 30-80                                                                                        |                                                                                | 48-54                                                                   | 1.1-1.23                                                                          | 1700-2150                             | 1.5                                      |                        | 3.6-76*                                  |                                   |                                     |                                             | hasta 60*                  | soplada, suelta, tablero                                                                                                                    | 2,7,4,4,7,5,7,7                                                                                                                 |                                                |
| Cable                                                                                                                                                                                      | 147-370                                                                                                | 0.023-0.78                                                                                   | 8800-8940                                                                      | 57-63                                                                   | 3.5-3.9                                                                           | 372-388                               |                                          | SI                     |                                          | 124                               | 80                                  | 400                                         |                            | tubera, lámina, pieza                                                                                                                       | 1,2,1,4,4,1,3,3,3                                                                                                               |                                                |
| Concreto armado                                                                                                                                                                            | 2.1                                                                                                    | 0.85-0.94                                                                                    | 2300                                                                           | 0.758-0.838                                                             | 0.093-0.099                                                                       |                                       |                                          | SI                     |                                          | 30-50                             | 20-30*                              |                                             |                            | colado, paneles, prefabricados, etc                                                                                                         | 5,2,6,4,4,5,3,3                                                                                                                 |                                                |
| Conglomerado de materia (CST):<br>Espuma de polietileno<br>Espuma de poliuretano (PIR)<br>Espuma de poliestireno (PSE)<br>Espumas metálicas                                                | 0.033<br>0.024-0.03<br>0.021-0.024<br>0.3-10                                                           | 0.13<br>0.033<br>0.024-0.03<br>0.021-0.024                                                   | 50-110<br>35-65<br>30<br>70-500                                                | 15.00<br>77-85<br>108-119<br>250-290                                    | 15.00<br>2.6-2.9<br>4.5-5<br>1.120                                                | 2100<br>800-1000<br>1400-1500<br>1400 | 7000<br>60-110<br>60                     | SI*                    |                                          | 0.2-0.7<br>0.01-0.06              | 6-20<br>1                           | 20<br>1                                     | -40-105<br>-30-120         | espuma<br>placa, espuma<br>ND<br>pieza, tableros                                                                                            | 7,7,4,4,7,3,3,3,7<br>7,7,4,4,7,3,3,3,7<br>5,6,6,5<br>1,1,1,1                                                                    |                                                |
| Lámina metálica de cobre<br>Lámina metálica de aluminio<br>Lámina metálica de níquel<br>Madera (banera)<br>Madera aserrada<br>Insuladora bienda<br>Mármol                                  | 0.0240-0.042<br>0.031-0.044<br>0.12 - 0.19<br>0.160<br>0.130                                           | 0.023-0.78<br>0.88-0.95<br>variable<br>variable<br>0.95*                                     | 8800-8940<br>variable<br>variable<br>6200-6400                                 | 57-63<br>variable<br>variable<br>350-400                                | 3.5-3.9<br>0.358-0.396<br>10-40<br>variable                                       | 372-388<br>2810<br>1380               | 60-110                                   |                        |                                          |                                   |                                     |                                             |                            |                                                                                                                                             |                                                                                                                                 | 6,4,3<br>25<br>9-16<br>5,6,6,6<br>5,6,6<br>2,3 |
| Materiales amorfos<br>Paja<br>Pieza pomera<br>Policloruro de vinilo (PVC)<br>Poliéster extruido (PSE)<br>Poliuretano extruido (PSE)<br>PVC<br>Tallique cido<br>Tablayeso<br>Vidrio<br>Yeso | 0.065-0.082<br>0.080<br>0.03-0.038<br>0.029-0.039<br>0.160<br>0.6-1.2<br>0.250<br>0.7-1.3<br>0.18-0.56 | 0.06-0.08<br>0.06-0.08<br>0.029-0.039<br>0.029-0.039<br>0.160<br>0.6-1.2<br>800<br>0.65-0.95 | 175-285<br>15-30<br>25-45<br>1250-1500<br>600-2100<br>800<br>2440-2500<br>1120 | 0.24<br>85-94<br>108-117<br>55-4-61.2<br>2.2-5<br>6.75<br>10-11<br>3.48 | 0.014<br>3.1-3.4<br>4-4.1<br>2.2-2.6<br>0.205-0.227<br>0.390<br>0.72-0.8<br>0.130 | 1000<br>1500<br>1300-1700<br>80-200   | 4<br>20-100<br>80-200                    |                        |                                          | 3.3-4<br>0.2-0.8                  | 34-70                               | 40-70                                       | hasta 80<br>hasta 75       | pacas, tableros<br>suelo<br>suelo, placa, pieza, boquilla, etc<br>placa o tablero<br>tuberia<br>pieza<br>tablero<br>lámina cortada<br>suelo | 5,6,6<br>7,7,7,7<br>2,7,4,4,7,3,3,3,7<br>5,7,4,4,7,7,7<br>6,2,6,4,4,3<br>2,4,4,5<br>5,6,6,6,5<br>1,2,1,4,4,1,5,1<br>5,6,6,6,5,5 |                                                |
| Observaciones                                                                                                                                                                              |                                                                                                        |                                                                                              |                                                                                |                                                                         |                                                                                   |                                       |                                          |                        |                                          |                                   |                                     |                                             |                            |                                                                                                                                             |                                                                                                                                 |                                                |

\*blanco \*resaca \*depende de presentación >18 mm \*temp de ingrnicón 280 \*sin armazo

Fuentes:

1. Ashby y Johnson, Materials and Design. The Art and Science of Material Selection in Product Design.
2. "The Engineering Toolbox"; 2003, <https://www.engineeringtoolbox.com>.
3. Michael Ashby y David Jones, Engineering Materials 1: An introduction to their properties and applications, Segunda ed (Oxford: Butterworth Heinemann, 2002)
4. Granta, "CES 2017 EduPack", 2017.
5. Cotterell y Dadeby, The Passivhaus Handbook.
6. Fuentes diversas (considerar con mayor reserva)
7. Pfundstein et al., Insulating Materials : Principles, Materials, Applications.
8. Laboratorio de Entornos Sostenibles, "Datos de materiales LES"; 2021, [https://drive.google.com/file/d/1nEciXyAcBhmkvWHLFr\\_ovDoTyIRNE/view](https://drive.google.com/file/d/1nEciXyAcBhmkvWHLFr_ovDoTyIRNE/view).

# Anexo 3.

## Tabla de unidades

| Propiedad                       | Unidad                | Descripción                                                                |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Energía embebida                | MJ/kg                 | Mega Joules por kilogramo                                                  |
| Huella de carbono               | kgCO <sub>2</sub> /kg | Kilogramos de dióxido de carbono por kilogramo (de material)               |
| Transmitancia térmica (valor-U) | W/m <sup>2</sup> K    | Watt por metro cuadrado Kelvin                                             |
| Resistencia térmica             | m <sup>2</sup> K/W    | Metro cuadrado Kelvin por Watt                                             |
| Conductividad térmica           | W/mK                  | Watt por metro Kelvin                                                      |
| Densidad                        | kg/m <sup>3</sup>     | Kilogramo por metro cúbico                                                 |
| Capacidad de calor específico   | J/kgK                 | Joule por kilogramo Kelvin                                                 |
| Capacidad de compresión         | Pa                    | Pascal                                                                     |
| Permeabilidad de vapor          | perm                  | 1 grano de vapor de agua por hora por pie cuadrado por pulgada de Mercurio |
| Resistividad de vapor (valor-r) | MNs/gm                | Mega Newton segundo por gramo metro                                        |
| Resistencia al vapor (valor-G)  | MNs/g                 | Mega Newton segundo por gramo                                              |
| Humedad relativa                | %                     | Porcentaje                                                                 |
| Impedancia acústica             | KPas/m <sup>2</sup>   | Kilo pascales por segundo sobre metro cúbico                               |
| Módulo de Young                 | GN/m <sup>3</sup>     | Giga Newtons sobre metro cúbico                                            |
| Punto de fluencia               | MN/m <sup>2</sup>     | Mega Newtons sobre metro cuadrado                                          |
| Resistencia a la tracción       | MN/m <sup>2</sup>     | Mega Newtons sobre metro cuadrado                                          |
| Temperatura de servicio         | °C                    | Grados centígrados                                                         |



## **Materiales en la edificación**

Editado por la  
Facultad de Arquitectura de la UNAM.  
Se utilizaron las tipografías  
Arno Pro, The Sans,  
Frutiger LT Std y Warnock Pro.





la  
**fa**

