

PROPIEDADES DEL GRAFENO Y APORTACIONES EN LA CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE DEL FUTURO EN MÉXICO.

TESIS TEÓRICA QUE PARA OBTENER
EL TÍTULO DE ARQUITECTO PRESENTA:
Andrés Saldívar Padilla.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
LABORATORIO DE ENTORNOS SOSTENIBLES (LES)
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CIUDAD UNIVERSITARIA,
CDMX, OCTUBRE DEL 2020.

Comité Tutorial
Tutor Principal: Dra. Adriana Lira Oliver
Asesores: M. en Ing. Sean Rodolfo S. Vilchis Martínez
M. en C. Naoki Enrique Solano García





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

1	Introducción.....	7
2	Marco teórico.....	10
2 1	Impacto ambiental.....	10
2 1.1	Energía embebida.....	10
2 1.2	Huella de carbono.....	11
2 1.3	Huella Hídrica.....	12
2 2	Propiedades físicas de los materiales.....	12
2 2.1	Resistencia a la compresión.....	13
2 2.2	Conductividad térmica.....	13
2 2.3	Densidad.....	13
2 2.4	Calor específico.....	14
3	Antecedentes.....	15
3 1	El concreto como material de construcción.....	16
3 2	La madera como material convencional dentro de la arquitectura.....	18
3 3	El uso del acero en la industria de la construcción.....	20
3 4	Materiales convencionales, paneles.....	22
3 5	Materiales cerámicos y clasificación.....	23
3 6	Materiales innovadores.....	24
3 7	Grafeno	30
4	Análisis del estado de arte.....	33
4 1	Composición y estructura.....	33
4 2	Métodos de obtención.....	34
4 3	Aplicaciones relacionadas con la arquitectura.....	34
5	Planteamiento del problema.....	38
5 1	Conclusión del estado de arte.....	38
5 2	Pregunta de investigación.....	38
5 3	Hipótesis.....	38
5 4	Objetivo general y específico.....	39
6	Metodología.....	40
6 1	Revisión de la literatura.....	40
6 2	Análisis con CES Selector.....	40
6 3	Modelado con Design Builder.....	41
6 4	Análisis con Energy Plus.....	41

7	Resultados.....	43
7 1	Propiedades obtenidas de las composiciones analizadas.....	43
7 2	Análisis térmico.....	45
7 3	Comparación general de propiedades de las composiciones.....	45
8	Discusión.....	48
8 1	Resistencia a la compresión contra costo, energía embebida y huella de carbono.....	48
8 2	Capacidad de acondicionamiento térmico pasivo de las composiciones concreto/grafeno.....	51
9	Conclusiones.....	53
	Apéndices.....	56
	Apéndice A. Horas de confort térmico mensuales para cada uno de los casos de estudio de composiciones grafeno / concreto analizadas.....	56
	Apéndice B. Comparación de propiedades termofísicas de las composiciones de grafeno/concreto analizadas contra huella de carbono y precio.....	59
	Referencias.....	63
	Créditos de imágenes.....	65

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo y comprensión incondicional de mis padres y hermano, que me han motivado a seguir desarrollándome como estudiante y pensar en mi futuro como profesionista.

Siendo la parte más importante de este proceso y logrando desarrollar un interés, admiración y motivación por la investigación de temas relacionados con el futuro de la Arquitectura Sostenible y el medio ambiente, agradezco a mi tutora la Dra. Adriana Lira Oliver, por aceptar y apoyar la investigación de este tema de principio a fin y por la oportunidad de sumarme al equipo de estudiantes en el Laboratorio de Entornos Sostenibles (LES) de la Facultad de Arquitectura, así como al Mtro. Sean Rodolfo Sebastián Vilchis Martínez, por su enseñanza, paciencia y dedicación a lo largo del proceso, fundamental para el desarrollo de esta investigación.

Al Mtro. Naoki Enrique Solano García, por sumar en el proceso e investigación aportando su experiencia, consejos y conocimientos.

Este trabajo fue posible realizarlo gracias al proyecto CONACyT-SENER 260155.

Y agradezco a cada una de las personas que formaron parte de este proceso en mi estancia dentro de la Facultad de Arquitectura en Ciudad Universitaria, amigos dentro y fuera de ella, que estuvieron presentes en esta etapa de investigación para el aprendizaje de nuevos conocimientos.

Resumen.

En esta tesis se presenta una investigación sobre el grafeno, considerando sus aplicaciones, así como los antecedentes relacionado a la arquitectura e industria de la construcción sostenible. Particularmente, se realizó un estudio comparativo sobre el uso de mezclas de concreto con grafeno, donde se compararon mezclas sin grafeno y mezclas con diferentes porcentajes de grafeno realizado en el programa de CES Selector. Los resultados que se obtuvieron indican que un porcentaje de 0.010% de grafeno en una mezcla de concreto de cemento Portland aumenta hasta un 71.5% la capacidad de resistencia a compresión, 542% en resistencia a la flexión, un 46% la resistencia a la tensión y disminuye un 30% la densidad de la mezcla con tan solo un aumento en la huella de carbono de aproximadamente el 20%. En relación con el aspecto térmico, la variación de las propiedades termofísicas del concreto a partir del nano-aditivo de grafeno no aportan una variación significativa de horas de confort (el concreto sin aditivo proporcionaba 2,382 horas de confort, en tanto que las mezclas de concreto con grafeno proporcionaban entre 2,268 y 2,379 horas, según la proporción de grafeno en la mezcla).

Abstract.

In this thesis a research on graphene is presented, considering the background and the applications related to the architecture and industry of sustainable construction. In particular, a comparative study was carried out on the use of concrete mixtures with graphene, where mixtures without graphene and mixtures with different percentages of graphene loaded in the CES Selector program were analyzed. The results obtained indicate that a percentage of 0.010% graphene in a Portland cement concrete mixture increases compressive strength capacity up to 71.5%, flexural strength 542%, resistance to tension 46%, decreases the density of the mixture by 30% with an increase in the carbon footprint of approximately 20%. Regarding thermal issues, the variation of the thermophysical properties of the concrete as function of amount of the graphene nano-additive does not provide a significant variation of comfort hours (the concrete without additive provided 2382 hours of comfort, while the concrete mixtures with graphene they provided between 2268 and 2379 hours, depending on the proportion of graphene in the mixture).

Para comenzar el análisis planteado en este estudio conviene hacerse la siguiente pregunta: “¿Por qué se sigue construyendo con los sistemas y procedimientos convencionales cuando existen nuevos materiales y sistemas constructivos?”

Esta pregunta es necesario planteársela como estudiante de Arquitectura, ya que es trabajo del Arquitecto concebir y construir espacios que respondan a las necesidades de habitabilidad derivadas del crecimiento poblacional, dinámicas ambientales, urbanas y sociales de los centros de población. Es obligatorio considerar este enfoque, no solo para resolver los problemas del tiempo presente, sino también para los del tiempo futuro.

Considerando la situación de crisis ambiental que se vive en estos años y sabiendo que hay soluciones y hay formas de poder aportar algo más al planeta para poder mitigar, en el mejor de los casos un daño irremediable como lo es el calentamiento global y todo lo que esto provocaría en nuestro medio ambiente.

Es obligación de estudiantes, académicos y profesionistas actualizarse y hacerse de las herramientas para poder proponer soluciones constructivas y espaciales que no solamente tengan el menor impacto ambiental posible, sino que también puedan contribuir, en algún momento, a mitigar el daño ambiental existente actualmente.

La respuesta a esta situación es la contribución no solamente disciplinaria, sino multidisciplinaria, o incluso transdisciplinaria, es el desarrollo de sistemas constructivos, fachadas, recubrimientos, cubiertas, etcétera que aprovechen las energías renovables, algo que seguramente la mayoría de estudiantes, académicos y profesionales dentro de la carrera de Arquitectura o Ingenierías podría tener en mente fácilmente.

Un ejemplo de estos sistemas son las celdas solares, los muros prefabricados de alto desempeño térmico que pueden incluso hacer que se llegue a prescindir de un equipo de aire acondicionado, sistemas de aprovechamiento y reutilización de agua y demás aportaciones que no solamente van dirigidas a incrementar la eficiencia energética de una edificación, sino que también sean resistentes a los embates derivados de la dinámica del planeta Tierra y que además no afecten, o afecten lo menos posible, a la existencia de la diversidad de formas de vida y recursos naturales del planeta.

Pero ¿si se pensara más allá de lo visto como algo “convencional” dentro de la arquitectura sostenible? Tal vez en nuevos materiales, en nuevos compuestos que puedan atender las necesidades de construir un hogar, un edificio, un entorno habitable y sostenible.

Además de los sistemas antes mencionados, las opciones siguen siendo variadas para dar solución a un problema no menor, por lo que se pueden proponer e investigar el comportamiento y propiedades de materiales compuestos nuevos que se puedan utilizar dentro de la construcción.

Pudiera pensarse en materiales de origen orgánico que puedan tener un impacto mínimo sobre el medio ambiente mientras su vida útil transcurre. Sin embargo, debe considerarse que las propiedades sí tienen que responder a las prestaciones que se buscan en el mundo de la construcción, tanto mecánica como térmica, pero ¿qué hay detrás de eso? La energía que se utiliza en todo el proceso para la producción de cualquier material de construcción se refleja en emisiones de dióxido de carbono, energía embebida, contando desde la extracción del material hasta su venta, entonces ¿cómo puede ser un material con una huella de carbono considerable y dañina para el medio ambiente considerado para la construcción si ya hay opciones para reemplazarlos?

Existen opciones que en este momento podrían responder a una demanda de vivienda emergente siendo fáciles de construir y recortando el tiempo de construcción total de una vivienda como es el caso del plástico reciclado que se tritura y se funde para convertirse en bloques que pueden ser resistentes a compresión y también flexibles para soportar movimientos sísmicos en zonas donde se requieran, además de tener un comportamiento térmico adecuado para zonas calurosas. Tal es el caso de Eco Plástico Ambiental que ha construido una casa que no requiere de aire acondicionado; “alrededor de seis grados centígrados menos dentro de la casa hecha con plástico, en comparación con afuera. En temporada invernal la promesa es de hasta 10 °C más respecto al exterior” [1].

Espinosa, de la Universidad de Guadalajara [2], diseñó una casa hecha con láminas de plástico reciclado que proporcionan condiciones confort térmico al interior de la casa y que por la flexibilidad que conserva el material resiste sismos, además de ser un 30% más barata que una construcción convencional. Se encontró que para un prototipo de 50 m² queda construido en tan solo cuatro semanas, demostrando que el uso de un material distinto puede modificar la producción de vivienda para bien reduciendo costos, tiempos de entrega, obteniendo una vivienda con un tiempo de vida de hasta 100 años [3].

Considerando lo anterior, en esta investigación se busca generar una pauta en la consideración de materiales para la construcción mediante la comparación de opciones convencionales, como el concreto armado elaborado con cemento Portland, contra opciones de materiales nuevos que se estén desarrollando para poder tener en mente estas nuevas opciones a la hora de proyectar y construir.

La búsqueda de materiales nuevos que pudieran marcar este antes y después dentro de la construcción, tal y como la conocemos, tiene que llegar y tiene que empezar a aprovecharse. Se debe estar consciente de que las mejores opciones a encontrar deben

proporcionar el mejor resultado para el beneficio del medio ambiente, de la seguridad y comodidad del usuario.

Si se comparan dos materiales que respondan favorablemente a la necesidad y a satisfacer en cuanto a propiedades mecánicas y térmicas, temas que competen dentro de la arquitectura y uno de ellos tiene un impacto ambiental menor al otro y el costo podría ser solo una diferencia mínima, el compromiso profesional de un arquitecto deberá ser el de recomendar el material con menor huella de carbono y más amable con el medio ambiente.

Los materiales compuestos son una alternativa potencialmente sostenible para la producción de arquitectura. En ciencia de materiales, reciben el nombre de materiales compuestos aquellos materiales que se forman por la unión de dos o más materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. En ciertos aspectos, los compuestos son los materiales más interesantes de la ingeniería debido a que su estructura es más compleja que la de los demás tipos [4].

Estos materiales compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad térmica [5].

El uso de materiales compuestos que mejoren el desempeño y que además se pueda reducir la cantidad empleada de los mismos es un punto importante en la reducción de la huella de carbono que genera la construcción. El interés tecnológico y comercial de los materiales compuestos proviene del hecho de que sus propiedades no sólo son distintas de las de sus componentes, sino que con frecuencia son mucho mejores [6].

El enfoque que se dará en este trabajo será relacionado al grafeno, un material “nuevo” que ha tenido muchas expectativas dentro de las aplicaciones que se pueden llegar a pensar para este material. Dentro de la arquitectura este material podría aportar mucho como aditivo a otros materiales, potencializando sus propiedades y reduciendo el impacto ambiental desde su producción.

Se presenta el estudio de la implementación de este material con morteros de concreto, analizando las propiedades obtenidas aplicando diferentes porcentajes de grafeno en concreto para poder deducir la mejor opción en cuanto a desempeño térmico, resistencia estructural y viabilidad económica.

Tomando en cuenta que el concreto es uno de los materiales más utilizados dentro de la construcción, la huella de carbono que genera la producción del cemento y agregados, se deben evaluar para poder contestar a una interrogante importante

en el marco de la situación ambiental de los últimos tiempos, ¿cómo puede generarse un sistema constructivo que sea resistente estructuralmente, pueda tener un desempeño térmico adecuado y tenga una huella de carbono menor que el concreto convencional?

En el caso del grafeno, los estudios publicados lo señalan como un material que puede aportar mucho como agregado, su uso está limitado por la producción, la cual sigue siendo dentro de laboratorios. Los procesos en el cual se pueda obtener grafeno de calidad en grandes cantidades sigue sin poder industrializarse.

Lo anterior indica que el grafeno, como material de construcción, todavía no es viable de aplicarse directamente, pero si para conformar un material compuesto de matriz cerámica o polimérica. Se necesita poco grafeno para lograr resultados en el material compuesto que pueda bajar la producción de un material con mayor impacto en el medio ambiente.

La pregunta sería válida para pensar en una producción y utilización de materiales compuestos, como ya se hace en la industria de la construcción, pero ahora a una escala diferente, con resultados capaces de justificar la investigación de materiales que se estudian en el campo de la nanotecnología.

2 |

Para dar contexto de la investigación sobre los conceptos utilizados para realizarla debemos entender que todo lo expuesto aquí está relacionado con la industria de la construcción, siendo estos conceptos utilizados para aclarar el amplio término de impacto ambiental.

Teniendo en cuenta lo anterior será más fácil entender el objetivo de la investigación y poder dimensionar todo lo que conlleva una intervención arquitectónica en cuanto al impacto ambiental se refiere y lo que en verdad integra una arquitectura sostenible. Para esto es importante saber que cada material representa un gasto energético, y tiene un impacto al medio ambiente al ser utilizado en una construcción, el grafeno como material prometedor en el ámbito de la construcción debe mostrar cualidades de sostenibilidad desde el método de obtención, producción y utilización en la industria.

MARCO TEÓRICO

2 | 1 IMPACTO AMBIENTAL

2 | 1.1 ENERGÍA EMBEBIDA

La energía embebida es la cantidad de energía que implica la producción de un material, es decir; energía embebida de producción primaria. La energía embebida de un proyecto arquitectónico, cuando se cuantifica globalmente, se refiere a la energía empleada en la fabricación de los materiales, el transporte de estos y la utilizada por la maquinaria durante la ejecución de la obra [7]. Un ejemplo es el caso del ladrillo rojo recocido (figura 1).

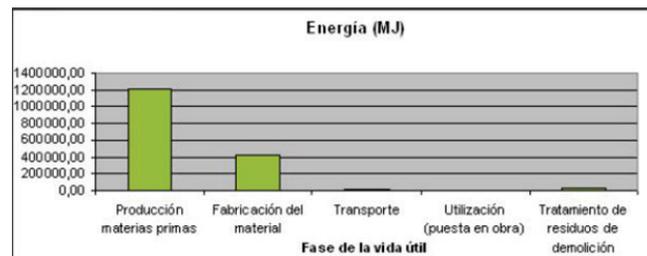


Fig. 1. Energía embebida de una fachada de ladrillo rojo recocido de 417.46 m²[1-1]

También se conoce como energía gris y es el parámetro más utilizado para calcular las emisiones de CO₂ generadas en el desarrollo completo de la obra [8].

La energía es medida en Joules y se calcula sumando la energía embebida de todos los materiales utilizados más la consumida durante el proceso de construcción [9].

Cuando se habla de disminución de consumo energético de un edificio no es suficiente para definirlo como un edificio sostenible, pues estaríamos considerando únicamente su etapa de uso y no su ciclo de vida completo. De nada sirve construir un edificio que no consume energía, su vida útil será corta y fue construido con materiales de alta energía embebida, finalmente el impacto ambiental no disminuiría [10].

Esta premisa debe tenerse en cuenta desde la fase de diseño, garantizando además disminución en el consumo de agua, el uso de combustibles fósiles y la generación de residuos. Seguir estos tres criterios ayudará a controlar la energía embebida total de un proyecto, los cuales tienen en principio criterios donde certificaciones sostenibles se basan para la obtención de los mismos [11]:

1. Usar materiales locales: minimiza las necesidades de transporte y garantiza una mejor adecuación al entorno natural.
2. Reducir los procesos de transporte: seleccionar medios que usen combustibles no fósiles y optimizar los procesos de transporte de material.
3. Seleccionar materiales de baja energía embebida: usar materiales que hagan un uso mínimo de energía para su extracción, producción, transformación y desecho, esto disminuye la generación de emisiones a la atmósfera.

En Europa, Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda, se han realizado mediciones del consumo de energía de los materiales de construcción y han concluido que los metales como el cobre y el aluminio son los materiales que más consumo energético representan en su fabricación y procesamiento.[12]

Otros, como el concreto y los ladrillos, se encuentran en el grupo de menor consumo. Sin embargo, es importante

revisar la relación del índice de energía embebida del material versus la cantidad usada de éste en la obra [13]. Lo anterior significa que, inclusive usando materiales de poco consumo energético, si se requieren grandes cantidades de éstos, terminarán por impactar negativamente el índice de energía embebida total [14].

Entre los materiales con mayor energía embebida destacan [15]:

Material	(MJ/m ³)
• Pisos de vinilo	105.990
• Pinturas con base en agua	115.000
• Aluminio	612.900
• Caucho sintético	118.800
• Acero estructural	274.570
• Zinc	371.280
• Cobre	631.164

Fuente: Victoria University of Wellington, New Zealand.

Entre los materiales con menor energía embebida se encuentran [16]:

Material	(MJ/m ³)
• Paja	30,5
• Arena	232
• Adobe	710
• Ladrillo cerámico	5.170
• Concreto 40 MPa	3.890
• Poliestireno expandido	2.340
• Asfalto	7.140

Fuente: Victoria University of Wellington, New Zealand.

2 | 1.2

HUELLA DE CARBONO

La huella de carbono se define como un indicador ambiental que pretende reflejar «la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto»[17]. Tal impacto ambiental es medido llevando a cabo un inventario de emisiones de GEI o un análisis de ciclo de vida según la tipología de huella, siguiendo normativas internacionales reconocidas, tales como ISO 14064, ISO 14069, ISO 14067, PAS 2050 o GHG Protocol entre otras [18].

La huella de carbono se mide en masa de dióxido de carbono (CO₂) equivalente emitida por unidad de masa de material. Una vez conocido el tamaño y la huella, es posible implementar una estrategia de reducción y/o compensación de emisiones, a través de diferentes programas, públicos o privados [19].

La huella de carbono involucra la producción primaria del material, su transporte, uso, etc. (véase, por ejemplo, la huella carbónica del ladrillo rojo recocido en la figura 2).

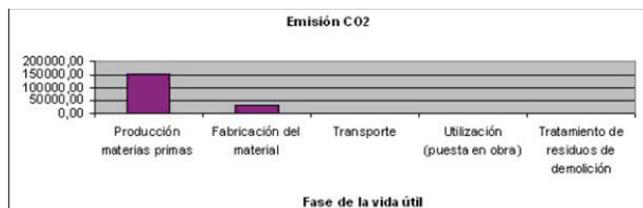


Fig. 2. Huella de carbono de una fachada de ladrillo rojo recocido de 417.46 m²[1-2]

2 | 1.3 HUELLA HÍDRICA

Se refiere al indicador del uso de agua, tanto al uso directo de un consumidor o productor, como a su uso indirecto. Este indicador también se puede establecer cómo el gasto de agua durante el proceso de un material en sus 3 diferentes categorías; huella de agua azul, huella de agua verde y huella de agua gris [20].

- Huella de agua azul: es el agua que se ha utilizado retirada de lagos, ríos, mantos acuíferos y fuentes similares
- Huella de agua verde: agua de lluvia o humedad en el suelo.
- Huella de agua gris: agua utilizada para disminuir emisiones por norma de impacto ambiental [21].

El grafeno, objeto de estudio de esta tesis, fabricado con el método de ultrasonido, tiene una huella hídrica de agua azul equivalente a la mitad que el grafeno obtenido mediante el método de reducción química, mientras que en ninguno de los dos procesos se generó huella hídrica de agua verde o agua gris [22] (figura 3).

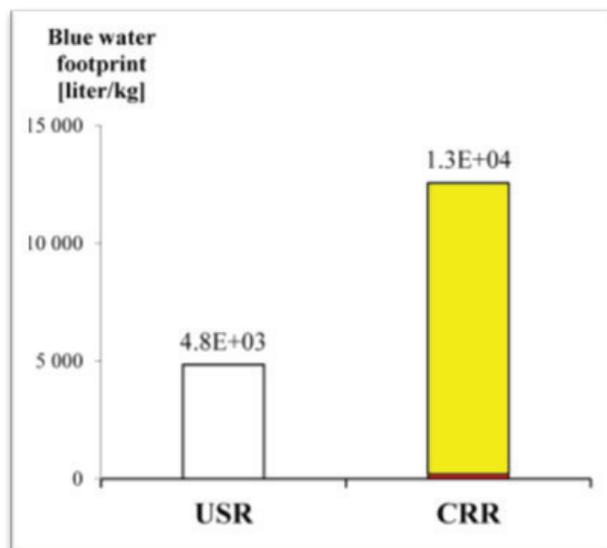


Fig. 3. Comparación de Huella de agua azul (Litros/ Kg), entre proceso de Ultrasonido (USR) y Reducción química (CRR) [1-3].

2 | 2 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

Las propiedades físicas de los materiales son las cualidades que indican el comportamiento de los mismos ante estímulos de origen mecánico, térmico, eléctrico o químico, entre otros. Particularizando sobre el grafeno, objeto de estudio de este trabajo, éste puede aportar una mejora de las propiedades a diferentes sistemas de materiales compuestos con base en diferentes matrices. Son importantes, ya que ahí se podrá demostrar si este nuevo material puede funcionar como compuesto sostenible en la industria de la construcción reduciendo los índices de huella de carbono.

El grafeno afecta las propiedades en materiales cerámicos, polímeros, etc. Esto permite que sus propiedades se puedan aprovechar en muchos ámbitos científicos con aplicaciones que se extienden hasta la biomedicina.

Se tiene conocimiento de que el grafeno es ligero y resistente, 200 veces más que el acero actual, con una densidad parecida a la de la fibra de carbono lo que se puede aprovechar por su maleabilidad mientras se trabaja con él [23].

La virtud del grafeno, como fase dispersa en un material compuesto, en la industria se podría llegar a ver como un material que por sus propiedades puede hacer que otro aumente su resistencia a la compresión logrando que las estructuras puedan construirse con una menor cantidad de material, así como una sección menor para poder conseguir la resistencia óptima. También ayudando a que sea más flexible, más ligero y además, si la aplicación llega a ser electrónica, puede ser un gran conductor de electricidad por su conductividad térmica, mucho mayor a la del cobre lo que amplía la posibilidad de usarse como material de instalaciones eléctricas que pueda ser más eficiente y consuma menor energía para funcionar [24].

2 | 2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión se puede definir como el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los materiales que no se rompen en la compresión se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el material. La resistencia a la compresión es una característica de las propiedades de los materiales que ayuda a diferenciarlos y clasificarlos por su comportamiento mecánico, forma en que un material se comporta frente a una fuerza externa, el cual es sumamente importante dentro de la arquitectura y la industria de la construcción [25, 26].



Fig. 4. Prueba de resistencia a Compresión en cilindro concreto [I-4]

2 | 2.2 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Capacidad de los materiales de conducir o transmitir el calor, o de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a otras moléculas adyacentes, o a otras sustancias con las que está en contacto. La conductividad térmica es elevada en metales y cuerpos continuos en general, y es especialmente baja en los materiales aislantes térmicos como lana de roca, fibra de vidrio, poliuretano, etc. [27].

Se mide en unidades de energía por unidad de tiempo por unidad tiempo por unidad de cambio de temperatura; en el Sistema Internacional de unidades, las unidades son Watts sobre metro por Kelvin ($W/m \cdot K$).

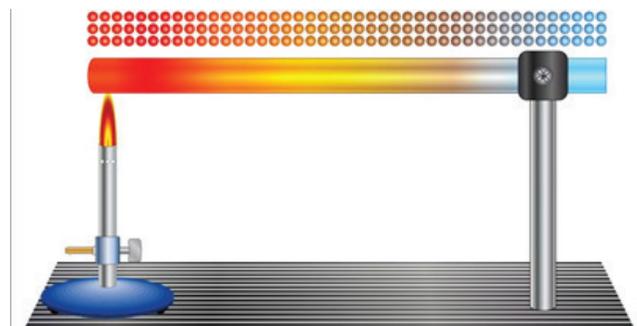


Fig. 5. Conductividad Térmica [I-5]. El calor es conducido por transmisión de movimiento molecular

2 | 2.3 DENSIDAD

Se define como la cantidad de masa contenida en un volumen definido de sustancia. En el Sistema Internacional de unidades de medida se mide en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) [28].

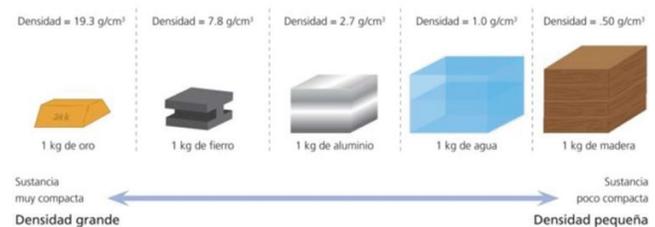


Fig. 6. Ejemplo de materiales de diferentes densidades [I-6]

2 | 2.4

CALOR ESPECÍFICO

Es la cantidad de energía que hay que suministrar o retirar a una masa definida de material para que su temperatura suba o baje, respectivamente. Esta magnitud se mide en Joules sobre kilogramo por Kelvin ($J/kg\cdot K$) [29].

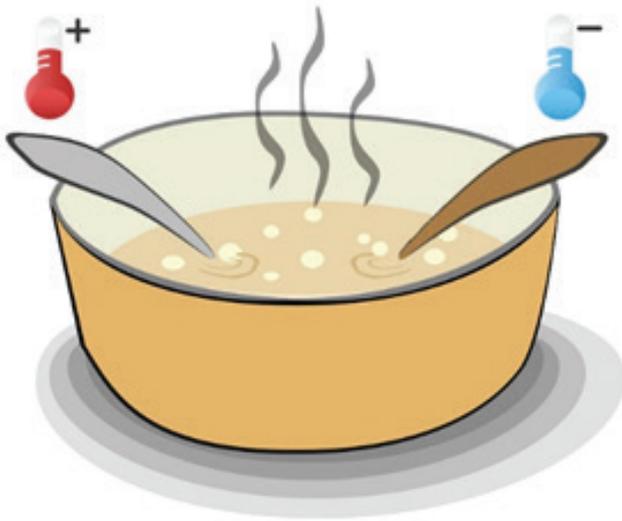


Fig. 7. Calor específico, ejemplo: el calor específico de la cuchara de madera es más alto que el de la cuchara de metal, por lo que con la misma temperatura y tiempo el metal se calienta más rápido que la madera [1-7].

3 |

ANTECEDENTES

La arquitectura ha tenido varias corrientes y estilos a través de los años, que han sido expresadas de diferentes maneras, el uso de colores, formas, vanos, instalaciones aparentes, juego de volúmenes, combinación de materiales, geometría, estructuras aparentes, acabados, etcétera, representan a cada una de ellas, marcando los cambios dentro de la arquitectura a través del tiempo, en los que una corriente arquitectónica “caducaba” para dar paso a otra nueva. Pero hay algo que se mantiene casi sin cambio alguno, el uso de materiales y sistemas constructivos, concreto, acero, piedra, madera, tabique, etc.

El problema con los materiales convencionales en la construcción es que, la producción desde la extracción de la materia prima tiene un impacto importante en el medio ambiente lo cual encarece el material hablando de sostenibilidad, sin conseguir aportar al ahorro de energía en su vida útil o tal vez desarrollar eficiencia térmica con su aplicación o alguna propiedad que pueda generar este material para justificar su producción.

3 | 1 EL CONCRETO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más utilizados alrededor del mundo, sus características lo permiten. Es una mezcla de cemento, formado a partir de piedra caliza y arcillas, que son calcinadas para después ser molidas, se endurece al contacto con el agua. Además del cemento están los agregados (fino y/o grueso) agua y adicional puede haber un aditivo el cual ayuda al fraguado de la mezcla [30].

El concreto tiene las siguientes características [31]:

- Fresco: moldeable, puede adoptar la forma de cualquier encofrado en el que vacíe.
- Fraguado: proceso por el cual alcanza su resistencia máxima y su forma final, se logra el 80% de su resistencia entre el primer y tercer día.
- Endurecido: dureza y resistencia

En relación con la resistencia del concreto, se lo puede clasificar en cuatro clases [32]:

- Baja: 150 kg/cm²
- Moderada: 150-250 kg/cm²
- Normal: 250-420 kg/cm²
- Alta: 400-800 kg/cm²

En general, el concreto tiene la capacidad de trabajar junto a otros materiales, existe el concreto armado / reforzado, estructural, ciclópeo, autocompactable, con color y traslucido, entre otros. Es resistente a compresión, moldeable, dúctil, durable, resistente al fuego y requiere poco mantenimiento [33].

Las desventajas del concreto serían su peso, el refuerzo que requiere, costo, diseño de mezcla para cumplir objetivos específicos. Su uso se da principalmente en ingeniería (figura 11), arquitectura (figura 9), mobiliario urbano (figura 10) y en prefabricados (figura 8) [34].



Fig. 8. Gio Ponti, Pier Luigi Nervi, Pirelli Tower (aplicación del concreto en prefabricados), Milán, 1958 [I-8]



Fig. 9. Universidad de Piura, Perú (aplicación arquitectónica del concreto) [I-9]



Fig. 10. Bancos Escofet (aplicación del concreto en mobiliario urbano) [I-10]



Fig. 11. Puentes de concreto (aplicación del concreto en ingeniería) [I-11]

Además del impacto ambiental que el concreto produce en el medio ambiente, fabricar 1 tonelada de cemento Portland produce una emisión de 1 tonelada de CO₂ [35].

Es importante entender que la finalidad de este estudio es demostrar como un material compuesto puede aportar mejoras importantes en cuanto a propiedades físicas así como a una reducción del impacto ambiental requiriendo menos cantidad para conseguir un comportamiento del material adecuado para la construcción, el concreto como mezcla muestra un comportamiento interesante mezclado con óxido de grafeno del cual se hablará más adelante, la necesidad de menos concreto en la mezcla para cualquier obra es igual a menor impacto ambiental.

La construcción es uno de los sectores que más influye en el cambio climático entre otras razones, porque la fabricación de cemento Portland implica una emisión considerable de CO₂, que supone el 5% del balance total de emisiones mundiales, tal como se indica en la tabla 1 [36].

Productos	Emisiones mundiales de CO ₂
Plásticos	1,3%
Cemento	5%
Ropa	9%
Alimentación	13%
Ocio	18%

Fuente: Denkstatt, consultora independiente especializada en desarrollo sustentable

Tabla 1. Emisiones mundiales de CO₂, Obtenida de [37]

3 | 2 LA MADERA COMO MATERIAL CONVENCIONAL DENTRO DE LA ARQUITECTURA

Dentro de los materiales convencionales encontramos la madera, es un material conocido ya en el mundo de la construcción siendo un material hasta cierto punto, tradicional, pero su uso ha sido importante dentro de la arquitectura y sus diferentes estilos, requerido desde cimbra, estructura, carpintería obviamente, acabados, moldes y andamios hechos en obra, rampas, etc.

En la arquitectura, las fachadas juegan un papel muy importante dentro de la expresión de la misma, la madera presenta propiedades diversas en el diseño y construcción por lo que sus usos siguen siendo amplios.

El uso puede variar desde las tonalidades que se busquen, hasta la resistencia que se necesite dentro del proyecto. El acabado aparente que proporciona la madera la convierte en un material de gran consideración en un proyecto, el avance dentro de los materiales compuestos y soluciones tecnológicas convierten materiales convencionales tales como este en algo más duradero y económico contra las condiciones climáticas [38].

Hoy en día podemos encontrar opciones de aglomerados o maderas que están preparadas para soportar por más tiempo que una madera normal las condiciones a las que son expuestas, sin embargo, lo que se busca en la arquitectura es la apariencia y el acabado por lo que este material debe ser lo más cercano a la madera natural [39], como lo mostrado en la figura 12.



Fig. 12. Acabado en Fachada. [I-12].



Fig. 13. Mobiliario [I-13]



Fig. 14. Cimbra [I-14]



Fig. 15. Estructura de Madera [I-15]

El uso de este material en interiores tiene mucho que ver con el diseño, la maniobrabilidad que otorga la madera además de su resistencia y peso a comparación de otros materiales la hacen perfecta para interiores, siendo un material con un impacto térmico en el espacio en el que se emplee. La madera en interiores es considerada como un material cálido por lo que su utilización en mobiliario o recubrimientos debe ser estudiado para conseguir la atmósfera correcta (figura 13).

La resistencia es importante en materiales utilizados en la construcción, los diferentes tipos de madera que se pueden conseguir para los trabajos de cimbra son ya conocidos en cualquier obra de construcción. La cimbra tiene dos principales funciones, una es servir de molde para alguna estructura, muro, losa, etc [40] (figura 14).

La otra función es dar un acabado por lo que la madera que se emplea para esta última debe ser de mayor calidad para conseguir que el vetado de la madera quede estampado en el concreto y conseguir un acabado limpio y decorativo [41].

Hablando de resistencia y flexibilidad que la madera tiene, también podemos hablar de la capacidad de trabajar a tensión y a compresión, lo que le da un lugar dentro de materiales convencionales que pueden usarse como estructura (figura 15). Permitiendo estructuras aparentes con acabado y color además del diseño que se puede dar gracias a la maniobrabilidad muestra este material en obra [42].

A diferencia del concreto la madera es un material orgánico, compuesto reforzado con fibras formado de largas celdas poliméricas tubulares, donde los tubos poliméricos están compuestos de haces de fibras de celulosa, alineadas en diversos ángulos respecto a los ejes de dichos tubos [43].

Su clasificación es la siguiente [44]:

- Muy blandas
- Blandas
- Semiduras
- Dura
- Muy dura

Las ventajas de la madera es su fácil obtención, bajo costo vs concreto y acero, buena resistencia a la compresión, flexión, resistencia a cortante y no conduce calor ni electricidad [45].

Las desventajas de este material: inflamable, poca homogeneidad y se puede descomponer y ser agredida por microorganismos [46].

Pero, es importante tener en cuenta que las opciones para poder aprovechar al máximo este recurso es investigar sobre los materiales compuestos, como en el caso del concreto donde el óxido de grafeno ayuda a conseguir una mezcla más homogénea, llegando a necesitar menos materia prima para la mezcla requerida y aún así conseguir que las propiedades del concreto aumenten y se aprovechen en el ámbito de la construcción. Es importante saber que no es un recurso ilimitado y el impacto ambiental por la tala de árboles es importante, pero si sabemos aprovechar la madera como materia prima y como material de construcción supliendo otros materiales que generan una mayor emisión de energía embebida (una comparativa se muestra en la tabla 2) el impacto ambiental sería menor.

Material	Energía embebida
1 Ton. de madera (referencia)	580 kWh
1 Ton. de aluminio	126 veces respecto de la madera
1 Ton. de acero	26 veces respecto de la madera
1 Ton. de vidrio	14 veces respecto de la madera
1 Ton. de cemento	5 veces respecto de la madera
1 Ton. de ladrillo	4 veces respecto de la madera

Tabla 2. Impacto ambiental medido en energía embebida de la madera en la construcción [47].

Entonces ¿cómo evolucionar este material dentro la industria de la construcción?

La combinación de materiales puede llegar a cerrar la brecha entre un producto terminado con materiales sustentables y un diseño, proceso y producto sustentable, cuidando los detalles en que cada material pueda ser aprovechado y explorando las alternativas para bajar el impacto ambiental de la construcción desde el proceso mismo.

Continuando con los mencionados materiales convencionales debemos tener presente uno de los más comunes en esta evolución de la arquitectura moderna, siendo de los más revolucionarios en cuanto a su gran área de utilización duración y apariencia, el acero.

Un material que puede estar presente dentro de la construcción aún sin que podamos percibirlo, pues el concreto armado está compuesto, por ejemplo, de concreto y varillas de acero. Este es solo un ejemplo de los diferentes usos que se le ha dado al acero dentro de la construcción de la arquitectura e ingeniería.

El acero tiene la ventaja de ser un material práctico, se puede considerar desde el primer momento del proyecto, ya sea en estructura, acabado, mobiliario, etc.

La constructibilidad se refiere a la integración del acero en las distintas etapas de la construcción, se ha comenzado a plantear en las últimas décadas debido a la estandarización [48]. Esto se refiere a que las secciones se pueden encontrar ya en una medida estándar para su mejor aprovechamiento. En estructuras grandes esto repercute directamente en los costos de la obra, el desperdicio del material también es importante ya que la producción de 1 tonelada de acero representa 26 veces la energía utilizada para producir 1 tonelada de madera (Tabla 2) [49].

La ventaja del acero, como estructura, es el bajo peso propio de una estructura de acero frente a otros materiales le permite tener mejores propiedades mecánicas frente a las solicitaciones sísmicas. Las normas de cada ciudad influyen en el diseño de las mismas y deben considerarse para las especificaciones especiales y así lograr minimizar ese riesgo [50].

El principal enemigo del acero dentro de la construcción es la corrosión. Bajo determinadas condiciones atmosféricas el acero sufre fenómenos de corrosión. Las formas de evitarla son mediante:

1. Protección de las estructuras mediante Galvanización a fuego (por inmersión) [51].

2. Uso de aceros resistentes a la corrosión, denominados patinables, del tipo Corten o similares, con un contenido de cobre que forma una pátina (capa de óxido externa que inhibe la corrosión ulterior) [52].

3. Mediante el uso de productos ya revestidos en zinc o zinc-aluminio: perfiles conformados en frío a partir de chapas galvanizadas. Corresponden a materiales de menor espesor relativo usado en construcciones livianas [53].

4. Aplicación de pinturas anti-óxido
Además del problema de la corrosión, se tiene que una estructura metálica pierde su resistencia a una temperatura de a los 550 °C [54]. Para incrementar su resistencia al fuego se han implementado materiales que limitan la transferencia de calor del fuego hacia la estructura metálica [55].

Entre los materiales que limitan la transferencia de calor en las estructuras metálicas se encuentran las pinturas intumescentes, mantos de lana de vidrio una especie de tela que se usa como aislante entre paneles y otros materiales aislantes. Asimismo, complementan la protección contra el fuego los denominados elementos de protección activa, tales como rociadores [56].



Fig. 16 Refuerzo de acero [I-16]



Fig. 17 Estructura metálica [I-17]



Fig. 18 Acero Cor-Ten en Fachada [I-18]



Fig. 19 Mobiliario en acero inoxidable [I-19]

En el refuerzo de acero (figura 16) es un elemento clave para las construcciones de concreto reforzado, como su nombre lo indica este material ayuda a mantener el elemento de concreto mecánicamente estable y trabaja junto con éste para brindar propiedades como flexibilidad, mayor resistencia a la compresión y rigidez al elemento arquitectónico [57].

Las posibilidades que el acero proporciona a una obra son muchas, pero en cuanto a planeación y tiempo una estructura de acero puede ahorrar mucho ya que los elementos previamente seccionados de acuerdo con los requerimientos llegan al sitio de la obra donde los espera su respectiva cimentación calculada de acuerdo al peso de la estructura y sección.

La estructura de acero (figura 17) aligera la construcción y permite que el edificio se mueva, ayudando en caso de ser una zona sísmica donde se encuentre absorba parte de la energía del movimiento telúrico [58].

En el ámbito arquitectónico, el diseño de fachadas es de vital importancia en un proyecto, el uso de colores, materiales y volumetría define el carácter de la obra. El acero se puede llegar a usar como elemento de fachada (figura 18), pero también funcionando como estructura, ya que los acabados del acero se pueden aprovechar, como el color. Sus propiedades lo hacen ideal como material exterior sin apenas requerir mantenimiento [59].

El uso del acero en interiores y mobiliario (figura 19) no es novedad, el acero inoxidable es ideal para superficies donde se necesite una fácil limpieza después de su uso y donde el acabado del material permita tener un ambiente ordenado y limpio a la vista.

El uso del acero inoxidable en hospitales por ejemplo, refleja las propiedades que puede mostrar este material siendo un elemento definitivo en el mobiliario por su durabilidad y fácil limpieza [60].

3 | 4 MATERIALES CONVENCIONALES, PANELES

El desempeño de algunos materiales utilizados en la construcción tiene mucho que ver con la forma en que se instalan, con la ingeniería detrás de ellos que hacen que su maniobrabilidad sea apta para la construcción moderna en tiempo y forma, acortando los tiempos de mano de obra. Un ejemplo de estos materiales que se han convertido en convencionales puede ser el panel de yeso o mejor conocido como tablaroca.

En 1903 United States Gypsum Company desarrolló su primer producto para la construcción, Pyrobar, una teja a prueba de fuego hecha de yeso. El siguiente paso hacia el panel de yeso que hoy conocemos fue la invención del tablero Sackett, un panel compuesto de varias capas de yeso y papel [61], como el mostrado en la figura 20.

Este panel siguió evolucionando siendo uno de los referentes en la construcción para muros interiores principalmente. Su ligereza, rapidez de montar y precio lo convirtieron en una opción viable para la construcción. La innovación e investigación continua para el mejoramiento de este material y las asociaciones con empresas en otros países abrió el mercado internacional, el material se prestaba para la utilización de otros materiales con prestaciones térmicas [62].

La evolución de los paneles consiguió mezclarse con materiales convencionales ya conocidos como el cemento, pero un muro de concreto tiene al menos un grosor de 15 cm con acabado, mientras que un muro con sistema de panel de cemento puede tener 12 cm aproximadamente. Lo que en la escala de la arquitectura algunos centímetros hacen la diferencia [63].

El panel de cemento (figura 21) ofrece nuevas soluciones constructivas resistentes al agua, por lo tanto, su uso puede ser en exteriores. Además, nos encontramos con que derivados de estos paneles, surgieron los cielos o falsos plafones con la misma característica de los paneles de yeso o cemento, fácil instalación y un acabado limpio al instante [64]. Se podría decir que los paneles de yeso y cemento fueron en su momento materiales compuestos que

revolucionaron la manera en que se construía y dejando un antecedente de innovación en la industria, aprovechando los materiales y sus propiedades con los que estaban compuestos.



Fig. 20. Panel de yeso (Tablaroca) [I-20]



Fig. 21. Panel de cemento (Durock) [I-21]

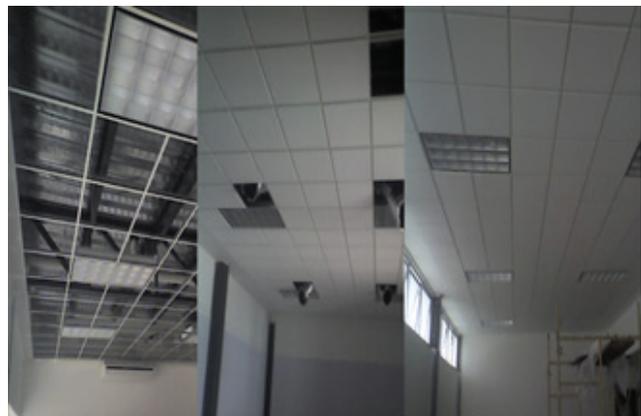


Fig. 22. Plafones de yeso [I-22]

3 | 5 MATERIALES CERÁMICOS, CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN

Los materiales cerámicos también son parte importante de la industria de la construcción y su historia, pues se han fabricado a partir de materiales obtenidos de la superficie de la Tierra como arcillas y rocas. Sus aplicaciones van desde productos de alfarería, pasando por recubrimientos de hornos, hasta elementos constructivos como ladrillos, azulejos y vidrios [65].

Son elementos duros pero frágiles, tienen baja conductividad eléctrica y térmica pero elevada resistencia a la compresión [66].

Su clasificación está dada en la figura 23.



Fig. 23. Clasificación de materiales cerámicos [67].

Los procesos que pasan las diferentes arenas y piedras dan como resultado el tipo de material, características y propiedades. Por ejemplo, la vitrificación se produce cuando la arena y el cuarzo se funden y se solidifican entonces, el material cerámico se vuelve impermeable, algo muy útil en los exteriores donde no se pretenda utilizar otro acabado más que el material mismo y el mantenimiento del muro sería en realidad nulo [68]. Los derivados de cerámicos más utilizados son: los ladrillos, blocks de cemento, tabique rojo, block huevo, etc.



Fig. 24. Uso de Ladrillo en Casa [1-24]

Dentro de la arquitectura el ladrillo se usa como material aparente, gracias a su color y composición se puede utilizar en muro sólido o celosía teniendo interesantes juegos de luz (figura 24). Algo que hay señalar es que el uso de este tipo de materiales aparentes reduce el uso de otros, reduciendo el desperdicio de materiales en obra, por lo tanto, el impacto ambiental [69].



Fig. 25. Block de cemento [1-25]

Dentro de los materiales utilizados para la construcción el block de cemento (figura 25) ocupa un lugar importante en la vivienda llamada de interés social por su reducido costo y prestaciones. Obteniendo un volumen mayor al del tabique, por ejemplo, el block de cemento ocupa más superficie por lo que se necesita menos material para construir un muro [70].

Los materiales convencionales dentro de la industria de la construcción han sido comúnmente empleados por sus propiedades, su manejabilidad, apariencia, costo, etc. Estos materiales tienen una gran trayectoria dentro de la construcción debido a esto, pero, ¿han cambiado en estos años? La época en la que vivimos exige cambios, parece una tarea difícil cambiar materiales que han funcionado por tantos años sin cambios aparentes, pero las formas de producción también tienen que ver en esto, la exigencia de materiales para dar abasto a la industria de la construcción crece, pero atendiendo esta demanda, las investigaciones sobre alternativas para estos materiales convencionales a materiales modernos han continuado sacando a la luz materiales compuestos con prestaciones superiores a los convencionales marcando la pauta al futuro de la construcción.

Los materiales innovadores son una evolución al tipo de soluciones para resolver espacios arquitectónicos, urbanos y sobre todo aprovechar los nuevos métodos de producción disponibles, así como explotar al máximo las propiedades de los materiales y mitigar las emisiones de CO₂ en el proceso, esto como parte de una concientización dentro de la industria e investigación. Muchos materiales compuestos no cambian su matriz, es decir el material base sobre el cual se trabaja el compuesto, pero las adiciones en estos materiales pueden representar un impacto importante incluso desde la extracción de los materiales que componen el resultado final, teniendo un material más amigable con el medio ambiente.

Siempre se está en la búsqueda de materiales más duraderos, eficientes y sostenibles que nos permitan contar con estructuras más resistentes, económicas, versátiles y mejor integradas al medioambiente.

Si bien es cierto que el cemento, el concreto y los instrumentos asociados a la construcción tradicional seguirán teniendo preponderancia, existen nuevas tendencias en este sentido. Cada vez son más las soluciones asociadas con la implementación de tecnología y fabricación con fines arquitectónicos más modernos [71].

Podemos decir entonces que los materiales innovadores surgen a cada momento para tratar de resolver problemas puntuales que han sido heredados de los métodos industriales más comunes. Lo que se pretende es introducir nuevas técnicas de manufactura, el reciclaje de componentes contaminantes, el abaratamiento de los costos de construcción, reducir la huella de carbono, favorecer el ahorro energético, entre otros [72].

3 | 6 MATERIALES INNOVADORES

En este sentido, encontramos materiales que son biodegradables y que se usan para hacer edificaciones, muebles, artículos de uso diario, empaques y mucho más. Además de tener propiedades mecánicas que los hacen sólidos, livianos y duraderos, pueden encontrarse en abundancia. Ejemplos de materiales son las balas de paja, bloques de plástico, ladrillos de colillas y otros ejemplos notables, aquí se muestran una serie de materiales que se consideran importantes en la industria de la construcción sostenible:

Replast.



Fig. 26. Casa de ladrillos de plástico reciclado [1-26]

Son bloques de plástico reciclado y su fabricación emite 95% menos CO₂ que la forma convencional (figura 26). Usando una plataforma modular, no hace falta clasificar o lavar el plástico, puede tener distintas dimensiones y densidades, y posee un gran aislamiento térmico y acústico [73].

Breathe brick.

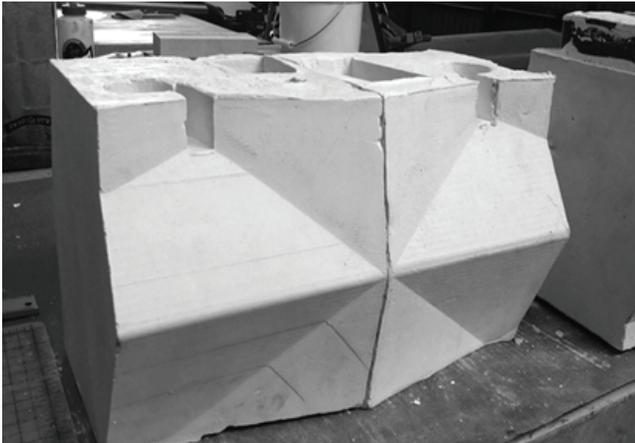


Fig. 27. Breathe Bricks [1-27]

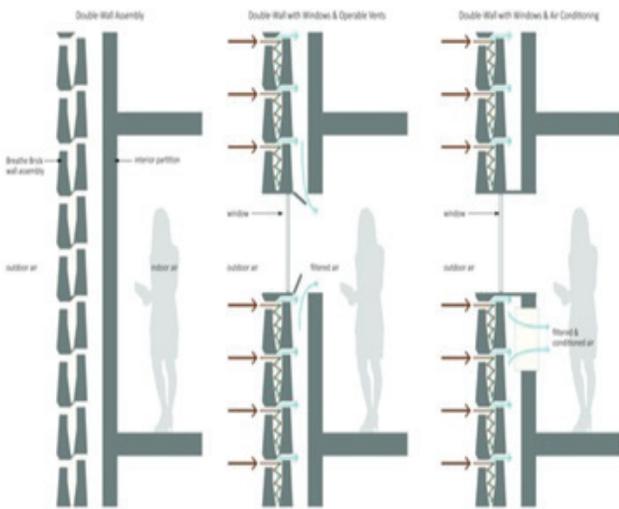


Fig. 28. Breathe Bricks [1-28]

Diseñados para ser parte de la ventilación, estos ladrillos funcionan como una aspiradora con filtración ciclón (figura 27). Van situados al exterior para capturar las partículas contaminantes, filtrarlas y descargarlas en una tolva desmontable incorporada [74].

Permite concebir un sistema de fachada que, además de cumplir con el resto de las funciones habituales de la envolvente del edificio, aporta un aire de calidad a las estancias interiores, gracias a un sistema de filtración tipo ciclón, basado en el funcionamiento de las aspiradoras del hogar, el cual, consigue separar las partículas pesadas contenidas en el aire, depositándolas en un recipiente desmontable para su posterior retirada [75].

Los Breathe Bricks componen la capa exterior de la fachada ventilada, que dispone de una segunda capa de fabricación tradicional con aislamiento estándar al interior, con una cámara de aire intermedia, a la que accede el aire una vez filtrado. El bloque tipo tiene una cara vista cuya geometría, con una superficie de acabado facetada, colabora en la conducción del aire hacia el interior de la pieza. Dispone de dos huecos que atraviesan verticalmente su sección, uno para permitir el paso de la estructura metálica de refuerzo, y el otro para crear la chimenea continua por donde caerán las partículas filtradas, que se recogerán en un depósito situado en la parte baja de la envolvente [76], tal como se aprecia en la figura 28.

Cemento luminoso



Fig. 29. Cemento Luminoso [1-29]

Creado por Rubio [77], este material es capaz de absorber la luz que irradia el sol durante el día e irradiar energía luminosa. Se presume que aunque el día esté nublado el cemento luminoso se carga con poca energía y la intensidad de la luz se puede regular (figura 29).

Sin duda, avances tecnológicos de este tipo ayudan al medio ambiente en el tema del ahorro energético lo cual representa un gran paso para la arquitectura sostenible ya que materiales de este tipo pueden ser aprovechados en gran parte de los diseños urbanos para mejoramientos de espacios arquitectónicos y además se puede pensar en una

mayor seguridad vial por el tipo de aplicaciones que tiene el cemento lumínico, lo cual se traduce en un impacto positivo en la sociedad.

Otro material innovador que puede cambiar la forma en que la pintura se use es la pintura que ilumina sin electricidad (figura 30). Recientemente estudiantes mexicanos del Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) desarrollaron una pintura que absorbe la luz natural y la artificial que después es reflejada y puede iluminar su entorno sin la utilización de energía eléctrica [78].

Una ventaja de esta pintura biofotoluminiscente –de la empresa Armonett Pinturas–, es que puede tener una duración de hasta 15 años, además de que, al no utilizar organismos vivos bioluminiscentes, se reducen los costos de producción [79].

Los materiales compuestos se caracterizan por tomar lo mejor de un material convencional y modificar su estructura para obtener mejores propiedades, aprovechando los procesos tecnológicos estos materiales se pueden dar, tal es el caso de la madera transparente. Gracias a la tecnología, se ha llegado a un nivel superior y ahora por ejemplo, existe como opción la madera traslúcida, útil para el desarrollo de ventanas y paneles solares [80]. Por otro lado, la “súper madera”, es más fuerte que el acero pero seis veces más ligera [81]. Al presionarse en una cierta dirección es 30 veces más fuerte que los materiales aislantes térmicos típicos y mucho más aislante [82].

“Puede tener aplicaciones que reemplacen potencialmente al vidrio y algunos materiales ópticos”, comenta Liangbing Hu en la revista *Advanced Material* [83]. Con el impulso generado por el potencial de la madera, los investigadores de Maryland confían encontrar soluciones en la energía fotovoltaica al emplear este nuevo material. Apuntando a generar paneles solares [84].

La idea sería mantener rebotando la luz en la superficie mediante las “células trampa” que se generan en surcos de la madera, logrando una mayor eficiencia. Respecto a la arquitectura, Liangbing Hu comenta que, a diferencia de otros materiales, la luz que entra mediante la madera se focaliza, generando un sentimiento de mayor iluminación en el interior [85].

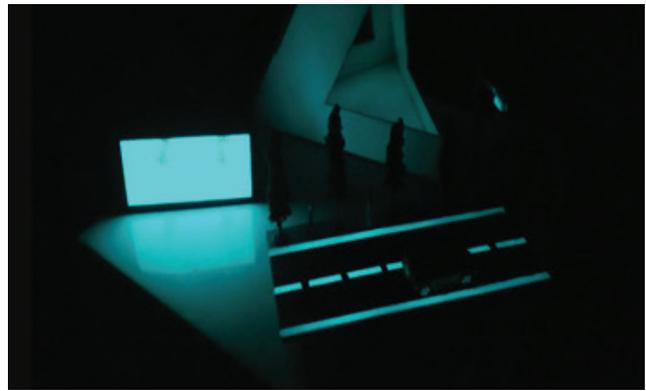


Fig. 30. Pintura que ilumina sin electricidad [I-30]



Fig. 31. Madera transparente [I-31]



Fig. 32. Madera transparente [I-32]

A lo anterior se suma el hecho de que la madera es un material frecuentemente utilizado en las construcciones gracias a la flexibilidad, durabilidad y bajo costo, por lo que los científicos prevén de igual forma un incremento en el uso para viviendas y construcciones comerciales [86].

Por otro lado, los investigadores del Royal Melbourne Institute of Technology (comúnmente conocida como RMIT University) han desarrollado una técnica para la fabricación de ladrillos con colillas de cigarrillos (figuras 33 y 34).

Además de los beneficios ambientales, el equipo de Mohajerani encontró que la adición de las colillas disminuía la energía utilizada en el proceso de cocción hasta un 58%. Los ladrillos terminados mantienen las propiedades estructurales de los ladrillos normales, pero son más ligeros y tienen una mejor capacidad de aislamiento térmico [87]. Además, el proceso de cocción también atrapa los contaminantes tóxicos de los cigarrillos dentro de los ladrillos, de manera que no se liberan al medio ambiente. “Estos también son más baratos de producir en términos del uso energético, y a medida que se incorporen más colillas, el coste energético disminuye aún más” [88]

Lo anterior es un indicativo de que producir materiales nuevos, no se trata solamente de producir materiales nuevos que provoquen un desperdicio en la industria o que su matriz sea un material alto en emisiones de CO_2 durante su extracción o producción, sino más bien, explorar las posibilidades en las que los materiales convencionales puedan presentar mejoras en cuanto a sus propiedades y comportamiento ambiental.

Cuidar los procesos de producción de los materiales es importante, ya que la energía embebida que se utiliza en estos es de considerarse, además la vida útil del material se debe tener en cuenta, para que un material sostenible pueda jactarse de ese título, su proceso completo debería poder representar un ahorro energético y además dar solución al impacto ambiental que pueda generar, por último considerar que los materiales de los que esté conformado puedan ser reciclados para completar el círculo de un material sostenible.



Fig. 33. Ladrillos con colillas de cigarrillos [I-33]



Fig. 34. Ladrillos con colillas de cigarrillos [I-34].

La nanotecnología ha sido fundamental para los procesos y descubrimientos de los materiales compuestos, mostrando la oportunidad que hay de poder modificar la estructura de un material para aprovechar al máximo sus propiedades.

Los investigadores de la Universidad de Princeton desarrollaron un nuevo tipo de ventana inteligente que controla la cantidad de luz y calor que entra en el edificio que además de estas cualidades, es autoalimentada por células solares transparentes de la propia ventana [89] (figura 35).

Una tecnología que ayudaría mucho en los edificios de oficinas pues ajustar las cantidades de luz solar que entra al inmueble y ahorrar en aire acondicionado o calefacción ciertamente trae muchas ventanas económicas y ecológicas [90]. Todo esto sucede en un vidrio de película delgada, y ya se trabaja en versiones flexibles con las que se dejará atrás las ventanas de aluminio y PVC, una tecnología que en muchos sitios aún ni ha llegado [91].

La variedad de materiales sustentables sigue en aumento, por ejemplo estudiantes de Cataluña crearon un nuevo tipo de ladrillo mediante la combinación de arcilla e hidrogel (figura 36), lo cual permite temperaturas agradables en épocas donde la temperatura exterior es alta, permitiendo prescindir de los sistemas de aire acondicionado contribuyendo al ahorro energético. El hidrogel con el que están hechos estos ladrillos absorbe agua hasta 500 veces su peso y esta agua absorbida se libera para reducir la temperatura hasta 6 °C en los interiores [92].

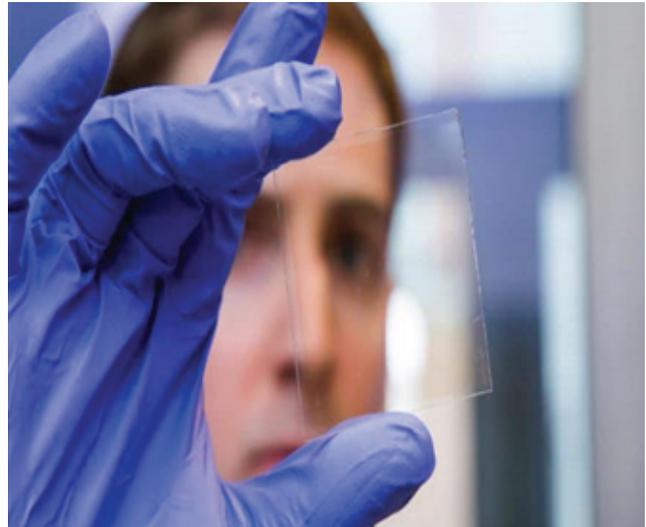


Fig. 35. Ventanas Inteligentes [I-35]



Fig. 36. Ladrillos de hidrogel [I-36]

Las soluciones a los problemas por emisiones de CO₂ son importantes y dentro de la industria de la construcción atenderlo es una obligación, pero también está el otro lado de la solución a problemas que ya se han tenido antes y estos pueden ser los desastres naturales, atender el problema de los sismos por ejemplo es una parte sensible dentro de la construcción ya que las vidas que se encuentran dentro de una edificación son la prioridad en un desastre de este tipo, entonces ¿cómo pueden responder los elementos arquitectónicos ante una variante así?, pues el desarrollo de nuevos materiales permite que se traten de mitigar estas dos variantes, el cuidado al medio ambiente mediante su fabricación y vida útil así como mitigar el impacto de los sismos en zonas donde esto representa un peligro latente.

Las varillas CABKOMA (figuras 37 y 38), material liviano y resistente, realizado a partir de fibras sintéticas e inorgánicas revestidas con una resina termoplástica como terminación. Los filamentos de esta nueva fibra de carbono la convierten en el refuerzo sísmico más liviano del mundo, según el fabricante [93]. Las ventajas que promete este nuevo material para las construcciones son: una disminución en los costos y una fácil manipulación del producto, además de ofrecer la posibilidad de funcionar como transmisor y regulador lumínico en los edificios [94].

Un rollo de 160 metros de largo de Cabkoma pesa apenas 12 kilos y puede ser fácilmente transportable. En comparación, un equivalente en metal con la misma resistencia pesa aproximadamente cinco veces más [95].

El funcionamiento de las varillas en un edificio se puede explicar de la siguiente manera:

Un edificio se recubre con las cuerdas (que miden casi 160 metros) desde el techo hasta la base, lo que permite que en el momento del terremoto la construcción se mueva toda junta [96].

La fibra de carbono es una de las mejores formas de absorber ondas de choque sin añadir volumen. Tiene una resistencia a la tracción muy elevada; de hecho, es tan fuerte como el acero, pero 90% más ligero. CABKOMA Strand Rod pesa menos que una manguera de jardín y se puede llevar en la mano [97].



Fig. 37. Edificio sede CABKOMA [I-37]



Fig. 38. Edificio sede CABKOMA [I-38]

El alcance de la tecnología hoy en día ha permitido avances en cuanto al descubrimiento no de materiales, sino de compuestos que presentan mejores propiedades que el material base, teniendo en cuenta que se busca un menor desperdicio y por supuesto utilizar menor materia prima para conseguir los resultados esperados en la industria. El grafeno, derivado del carbono, materia prima abundante en el planeta, muestra capacidades que son foco de investigaciones científicas para aprovechar su ligereza, resistencia mecánica, conductividad eléctrica y compatibilidad con otras matrices de materiales.

El grafeno es un alótropo del carbono, de dos dimensiones porque está compuesto de finísimas capas de un átomo de espesor (monocapa) significa que es extremadamente fino (0.0000000001 metros, o bien, 0.0000001 milímetros). De ahí que se le considere un material bidimensional. El único material bidimensional que es capaz de mantenerse estable hasta espesores equivalentes al de un átomo, con lo que prácticamente solo se aprecian dos de sus dimensiones [98].

Durante muchos años se consideró que era imposible obtenerlo de forma aislada, pues se creía que como película monoatómica sería termodinámicamente inestable. Geim y Novoselov de la Universidad de Manchester consiguieron mediante la exfoliación de grafito demostrar que era posible aislar monocapas de grafeno mediante exfoliación de un átomo de espesor en 2004 [99, 100].

Para obtener el grafeno partieron de un trozo de grafito al que fueron quitándole capas por exfoliación con una cinta adhesiva, al trozo que quedaba adherido a la cinta lo sometían a un procedimiento idéntico de forma que cada vez “adelgazaba” más. Finalmente, transfirieron los restos adheridos a un soporte de microscopía y comprobaron que efectivamente tenían zonas en las que había una película de espesor monoatómico. Este hecho demostró que era posible obtener capas aisladas de grafeno [101].

En 2010 estos científicos obtuvieron el Premio Nobel de Física por sus investigaciones sobre las propiedades del grafeno [102].

El término grafeno, por definición, es aplicable a la lámina monoatómica carente de defectos; sin embargo, coexisten con él otra serie de materiales denominados grafénicos, que se aproximan en mayor o menor medida a esta definición, por estar constituidos por un número pequeño de capas o por presentar defectos en su estructura o su composición [103].

Los métodos de obtención tienen que ver con el resultado de la lámina de grafeno que se pueda obtener y la calidad de la misma. Encontrar el proceso con el que se puedan obtener grandes cantidades de grafeno con mayor calidad a menor costo es el reto al que se enfrenta la industria en esta revolución tecnológica de nanomateriales.

El grafeno se constituye de partículas de carbono que se agrupan en forma hexagonal en dos dimensiones 2D, es un material que se obtiene a partir del grafito [104]. Este material es traslucido, conductor de electricidad y maleable. Una lámina de grafeno tiene un átomo de espesor, es decir, 0.01 mm; es unas 200 veces más resistente que el acero actual más fuerte, siendo su densidad más o menos la misma que la de la fibra de carbono, y unas cinco veces más ligero que el aluminio [105, 106].

El alcance de las aplicaciones del grafeno en el mundo moderno se puede explorar en varios ámbitos de la ciencia y sus aplicaciones, por ejemplo, se puede indicar que una lámina de 1m² y un espesor equivalente a un átomo de grafeno pesa solo 0.77 mg, en comparación con el acero (con la misma superficie), supondría un peso 200 veces menor. Cuenta con una superficie específica (relación entre el área de la superficie total y la masa del sólido) de 2600 m²/g, lo que le confiere cierta capacidad de autoenfriamiento por lo que el grafeno se presume como el material perfecto para remplazar al silicio por sus propiedades de conducción eléctrica y capacidad de almacenamiento de energía. El grafeno exhibe una gran resistencia mecánica con una flexibilidad y ligereza remarcables [107, 108].

Los electrones en el grafeno se mueven a una velocidad 300 veces menor que la de la luz, pero mayor que la de los electrones de los metales. Al aumentar su velocidad y eficiencia, el grafeno se calienta menos y necesita menos energía (es decir, consume menos electricidad) que el silicio para realizar la misma tarea [109].

El grafeno es el precursor de muchas otras formas de carbono, es la unidad elemental básica en 2D para construir todos los materiales gráfiticos de las demás dimensiones. Por ejemplo, considerando lo expuesto en la figura 39, si las capas de átomos de carbono las envolvemos a modo de forro de un balón, arqueadas en estructuras de cero dimensiones (0D), obtenemos fullerenos; si las enrollamos cilíndricamente en estructuras 1D, darán lugar a los nanotubos; finalmente, si superponemos más de 10 capas tridimensionalmente (3D), obtendremos el grafito [110].

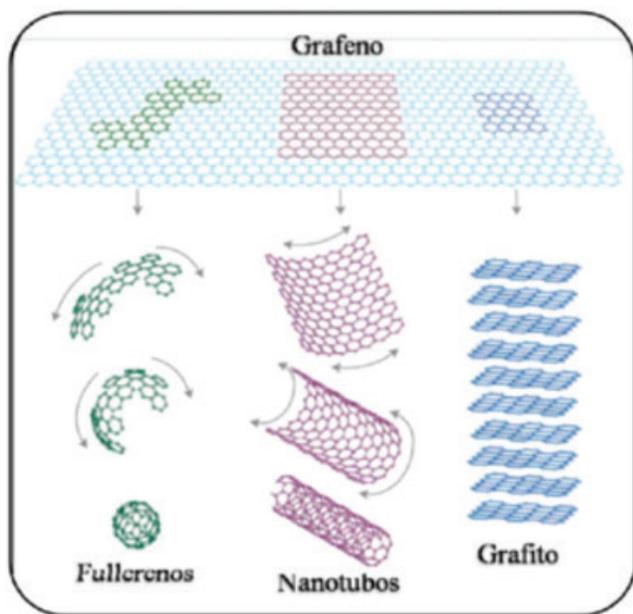


Fig. 39. Representación de la lámina de grafeno y los materiales carbonáceos derivados de él [1-39].

En relación con sus propiedades mecánicas, los datos que se muestran acerca del grafeno muestran que tiene una resistencia mecánica de 42 N/m a tensión de rotura, mientras que una lámina del acero más resistente y del mismo espesor que el grafeno, tendría aproximadamente una resistencia de 0.40 N/m. El grafeno muestra además un módulo de Young aproximadamente de ~ 1.0 TPa [111].

Se puede llegar a estirar un 10 % de su tamaño real y regresar a su forma original además de puede doblarse hasta un 20% sin llegar a sufrir daño permanente, al mismo tiempo que puede enrollarse sobre sí misma para crear nanotubos o adoptar cualquier otra forma [112, 113].

Tiene, además, una conductividad térmica de 5000 W/mK a comparación del cobre que es de 400 W/mK, además de

una absorción de luz blanca incidente de $\sim 2,3\%$ [114].

La densidad del grafeno es alta por lo que es incluso resistente a la penetración de moléculas de gas helio, una de las moléculas más ligeras. Sin embargo, deja pasar el agua, la cual, encerrada en un recipiente de grafeno, muestra una velocidad de evaporación similar a la que muestra en un recipiente abierto. Geim y su grupo de científicos observaron que una lámina de óxido de grafeno es impermeable a todo tipo de líquidos, vapores y gases, salvo al agua [115].

Las capas de óxido de grafeno dejan huecos que permiten pasar a las moléculas de agua (el H_2O penetra a través de las membranas de óxido de grafeno diez mil millones de veces más rápido que el helio), pero si otras moléculas tratan de hacer lo mismo se ven frenadas por los capilares del grafeno, que se recubren con las moléculas de agua [116].

Es por ello que otras aplicaciones industriales del grafeno podrían estar relacionadas con la separación y filtración de sustancias, la destilación de ciertos líquidos, la producción de biocombustible, la eliminación de toxinas en el agua o la purificación de ciertos productos químicos, entre otras [117].

Esto ha sido otro motivo de investigación en relación con la desalinización de agua, ya que el grafeno tiene la propiedad de ser un material antibacteriano, capaz de inhibir el crecimiento de microorganismos como bacterias, virus y hongos, pero que, sin embargo, no afecta al ADN humano y, por ser carbono, se ha demostrado que permite el crecimiento de células, lo que lo convierte en un sustrato con un potencial muy interesante para la medicina regenerativa o para la industria alimentaria [118].

Además, sus propiedades eléctricas lo colocan como el material del futuro ideal para el uso en celdas solares de mayor capacidad y eficiencia, instalaciones eléctricas y se ha investigado al grafeno como material biomédico donde, las prótesis avanzadas puedan ofrecer una conexión entre las terminales nerviosas por su gran conductividad eléctrica y además la escala en la que se puede manejar el grafeno permite que sean implantes nanotecnológicos avanzados reduciendo el tamaño de los mismos.

Gracias a la sensibilidad a cualquier molécula que se deposite en su superficie el grafeno puede reaccionar con otras sustancias para formar materiales compuestos mezclados heterogéneamente formados por moléculas de elementos variados, con diferentes propiedades, lo que dota a este material de gran potencial de desarrollo [119, 120].

Los procesos de obtención de grafeno se limitan a la cantidad y calidad que puedan obtener, en la industria, una de las alternativas de mayor interés para la producción de grafeno es la exfoliación de grafito en medio líquido, generalmente con un paso intermedio de oxidación [121].

En este método se introduce el grafito en un medio líquido y se oxida químicamente. En el grafito oxidado la presencia de grupos funcionales hace aumentar la distancia entre las láminas que lo constituyen, de forma que es más sencillo separarlas, lo que se lleva a cabo mediante tratamientos con ultrasonidos. De esta forma se obtienen láminas de óxido de grafeno, material grafénico con potenciales aplicaciones por sí mismo [122].

4 | 1 COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA

El grafeno es un material de carbono puro, con una estructura hexagonal bidimensional formada por una única capa de átomos, tal como se aprecia en la Figura 40.

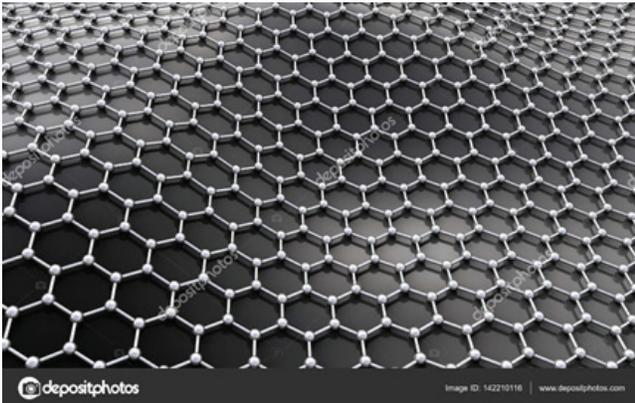


Fig. 40. Estructura molecular del grafeno (Depositphotos) [1-40] 2017)

No se encuentra como tal en la naturaleza, pero constituye cada una de las capas que forman el grafito. Durante muchos años se consideró que era imposible obtenerlo de forma aislada, pues se creía que como película monoatómica sería termodinámicamente inestable. Geim y Novoselov de la Universidad de Manchester consiguieron mediante

la exfoliación de grafito demostrar que era posible aislar monocapas de grafeno de un átomo de espesor en 2004, en 2010 estos científicos obtuvieron el Premio Nobel de Física por sus investigaciones sobre las propiedades del grafeno [123].

El grafeno se constituye de partículas de carbono que se agrupan en forma hexagonal en dos dimensiones 2D, es un material que se obtiene a partir del grafito [124]. Este material es traslucido, conductor de electricidad y maleable. Una lámina de grafeno tiene un átomo de espesor, es decir, el grafeno tiene el espesor de un átomo (monocapa) significa que es extremadamente fino (0.0000000001 metros, o bien, 0.0000001 milímetros), de modo que parece que solo posee las otras dos dimensiones: la longitud y la anchura, puesto que la tercera, la altura, es tan sumamente pequeña que parece no existir, de ahí que se le considere un material bidimensional [125].

El único material bidimensional que es capaz de mantenerse estable hasta con el grosor de un átomo; es unas 200 veces más resistente que el acero actual más fuerte, siendo su densidad más o menos la misma que la de la fibra de carbono, y unas cinco veces más ligero que el aluminio [126, 127, 128].

Las propiedades del grafeno lo convierten en uno de los materiales con más interés en estos días pues, si se habla de sus propiedades mecánicas, se puede indicar que una lámina de 1m^2 y un espesor equivalente a un átomo de grafeno pesa solo 0.77 mg , cuenta con una superficie específica (relación entre el área superficial total y la masa del sólido) de $2600\text{ m}^2/\text{g}$, lo que le confiere cierta capacidad de autoenfriamiento es decir, que por sí solo el material no guarda y disipa el calor de manera más eficiente que el silicio por ejemplo y que, a pesar de su resistencia, lo hace extremadamente ligero y flexible [129].

En relación con sus propiedades mecánicas, existen datos acerca de que el grafeno tiene una resistencia mecánica de 42 N/m a tensión de rotura, un módulo de Young de aproximadamente $\sim 1.0\text{ TPa}$. Se puede llegar a estirar un 10% de su tamaño real y regresar a su forma original además de puede doblarse hasta un 20% sin llegar a sufrir daño permanente [130]. Tiene, además, una conductividad térmica de 5000 W/mK a comparación del cobre que es de 400 W/mK , además de una absorción de luz blanca incidente aproximadamente de $\sim 2,3\%$, cuenta con la propiedad de convertir con facilidad corriente eléctrica en calor [131].

4 | 2 MÉTODOS DE OBTENCIÓN

En la mayoría de los laboratorios donde se fabrica grafeno se trata de obtener una muestra de gran calidad, lo que conlleva que el proceso sea más complicado y el resultado sean pequeñas muestras de grafeno de gran calidad pero que solo tienen la función de ser objeto de investigación en una escala menor, restringiendo así su producción únicamente a nivel de laboratorio [132]. Los medios de síntesis para obtener grafeno más utilizados son los mostrados, resumidamente, en el esquema de la figura 41.

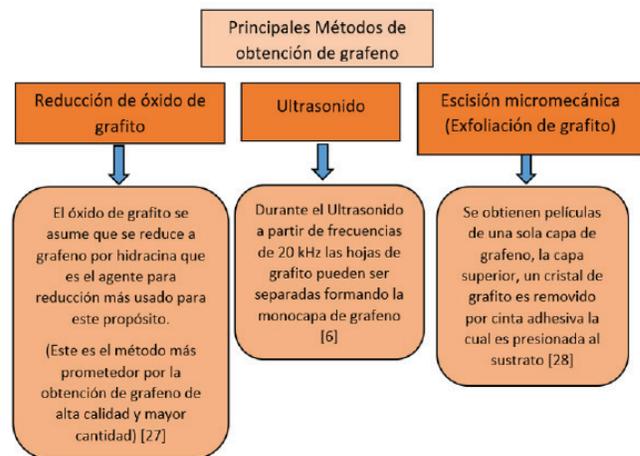


Fig. 41. Principales procesos de manufactura con los que se prepara el grafeno [133, 134, 135].

4 | 3 APLICACIONES RELACIONADAS CON LA ARQUITECTURA

Además de tener mayor resistencia que los materiales convencionales de hoy en día, hay productos como pinturas las cuales contienen óxido de grafeno que tienen la capacidad de absorber 120 gramos de CO_2 por metro cuadrado aportando también eficiencia energética siendo una capa que mejora a la regulación térmica del edificio una vez aplicada en muros, siendo una alternativa de métodos de acondicionamiento pasivos [136].

Particularmente, en relación con sus propiedades mecánicas y térmicas descritas en párrafos anteriores, el grafeno se vuelve un material interesante de estudio en aplicaciones arquitectónicas debido a las prestaciones que puede tener además de las aportaciones en el desarrollo de la arquitectura sostenible. Siendo un material de fácil compatibilidad puede propiciar el uso de materiales compuestos a nivel de nanoestructura aprovechando cada una de sus propiedades en materiales ya conocidos ayudando a mejorar su desempeño dentro de la arquitectura e industria de la construcción. Hasta ahora ejemplos de las aplicaciones hoy en día como antecedente del grafeno como material compuesto que potencializa las propiedades de materiales son limitadas pero todo apunta a que, conforme los métodos de obtención bajen costos el grafeno pueda ser más fácil de adquirir y por lo tanto experimentar en dimensiones mayores pero aquí se muestran los ejemplos

consolidados dentro de la industria relacionada con la arquitectura y construcción.

La empresa española Graphenano Smart Materials lanzó al mercado aditivos para concreto a base de grafeno que superan la dureza y la resistencia del acero. Su línea Smart Additives es la primera en utilizar grafeno en aditivos de concreto. La idea, según Graphenano, es producir un concreto que sea más resistente y posibilite construir estructuras que duren hasta 50 años más que las convencionales, dados los mismos niveles de mantenimiento [137].

Además, el fabricante propone concretos que resistirán más altos niveles de compresión, ductilidad y flexibilidad de las estructuras, retrasando el apareamiento de grietas y fisuras, incluso en lugares donde hay fuerzas sísmicas sobre las construcciones [138].

Una de las aplicaciones actuales del grafeno es en pinturas. Esta aplicación al mundo de la arquitectura es una intervención de una empresa en Londres que asegura, su producto puede absorber 120 gramos de CO₂ por metro cuadrado a lo largo de su vida útil. Esta pintura a base de grafeno y cal mejora la eficiencia energética de los edificios, además de permitir que las paredes respiren, de reducir la humedad y de evitar la proliferación de bacterias [139].

Otro de los usos en los que se plantea usar grafeno es en un edificio que almacene energía eléctrica a través de su misma estructura a base de grafeno, que por su conductividad y resistencia eléctrica pueda soportar las descargas de tormentas eléctricas y usar esa energía para abastecer las viviendas de la zona, abriendo la posibilidad de tener objetos arquitectónicos a base de grafeno que puedan generar energía por medio de su misma estructura [140].

La empresa mexicana Graphenemex es pionera en la producción de materiales grafénicos en Latinoamérica, presumiendo procesos que reducen los costos de producción aproximadamente a 30 dólares el gramo, hacia una escala industrial (ultrasonido, centrifugaciones, cizallamiento de alta intensidad) que promete impulsar al grafeno como material revolucionario [141].

Estos procesos se caracterizan por el resultado en la calidad de la lámina de grafeno que se puede obtener, así como sus derivados [142].

Su principal área de desarrollo en estos momentos son los aditivos para concretos y pinturas con óxido de grafeno, que prometen un cambio revolucionario en la industria de la construcción sostenible.

La producción de este material grafénico pretende impulsar a México dentro de la industria lo antes posible, el óxido de grafeno, que incorpora átomos de oxígeno en las moléculas de carbono es más fácil de producir por lo que probar sus prestaciones se vuelve más sencillo en el área de campo de la industria de la construcción, por ejemplo [143].

Las propiedades que muestra el grafeno como aditivo en matrices de materiales cerámicos, por ejemplo, se han estudiado en varios artículos dando a conocer los resultados como el aumento en la resistencia mecánica a compresión, flexibilidad y homogenización en la mezcla que se lleva a cabo mediante la formación de hidrosilicatos de calcio básicos convirtiendo más densa la mezcla, aumentando también la impermeabilidad hacia los elementos y prestaciones térmicas en temperaturas extremas [144].

La compatibilidad del grafeno con distintas matrices como morteros de cemento, concreto, materiales cerámicos y polímeros ha demostrado aumentar la resistencia de sus estructuras.

En el estudio de las propiedades aplicadas del grafeno en diferentes campos de la ciencia se encuentra la adición de este material en los nanocompuestos; que permite la mejora de las propiedades compuestas para ser utilizadas en electrónica, óptica, conversión de energía electroquímica y almacenamiento.

Dentro de la arquitectura el grafeno apunta a revolucionar muchas de las aplicaciones de materiales convencionales que, combinados con el grafeno puedan aumentar sus prestaciones y crear una nueva brecha en el diseño y desarrollo de arquitectura sostenible.

En la utilización de grafeno en dispositivos eléctricos se podría llegar a una mayor eficiencia energética con el uso de sistemas domóticos, detectores, iluminación, paneles solares, etc. El alto potencial eléctrico del grafeno y la que la conductividad del mismo podría permitirlo en un futuro cercano.

Otro uso posible en el desarrollo de la construcción sostenible sería la aplicación de grafeno con polímeros que permite en el caso del poliuretano, producir un apantallamiento físico ante los factores, evitando ampollas, grietas, amarillamiento del color y evita el deterioro del material al absorber la luz incidente, además de proporcionar hidrofobicidad a la superficie.

El grafeno como material compuesto en combinación con el óxido de titanio genera una respuesta más activa como catalizador frente a algunos tipos de bacteria y contaminantes. Lo que genera la idea de trabajar en el desarrollo de sistemas constructivos o recubrimientos que puedan funcionar como antibacterianos en determinadas superficies, ayudando a la creación de espacios arquitectónicos funcionales y sostenibles [145].

Estudiando las diferentes propiedades agregadas del grafeno a otro material se destaca el uso de láminas de óxido de grafeno sintetizadas por exfoliación química, donde se muestra que los cambios en la conductividad del dispositivo se miden para variar la humedad relativa. El dispositivo sensor tiene una alta sensibilidad y tiempo de respuesta más rápido, lo que demuestra su posible uso en el campo de monitoreo industrial, ambiental y estructural (midiendo la corrosión de alguna estructura) [146].

Pensando en recubrimientos, el campo del grafeno es prometedor en el uso dentro de la arquitectura, pero también se puede estudiar y probar sus propiedades como un material compuesto dentro de la estructura de algún edificio donde se requiera un refuerzo mayor sin el uso de solamente acero estructural, por lo que el grafeno podrá ofrecer un refuerzo como material compuesto tanto a la resistencia mecánica por compresión y flexibilidad como a la corrosión. Esto pensando en que se ha demostrado que una película de entre tres y cuatro capas de grafeno por deposición química de vapor (CVD) ofrece resistencia a largo plazo a la corrosión del níquel (figura 42).

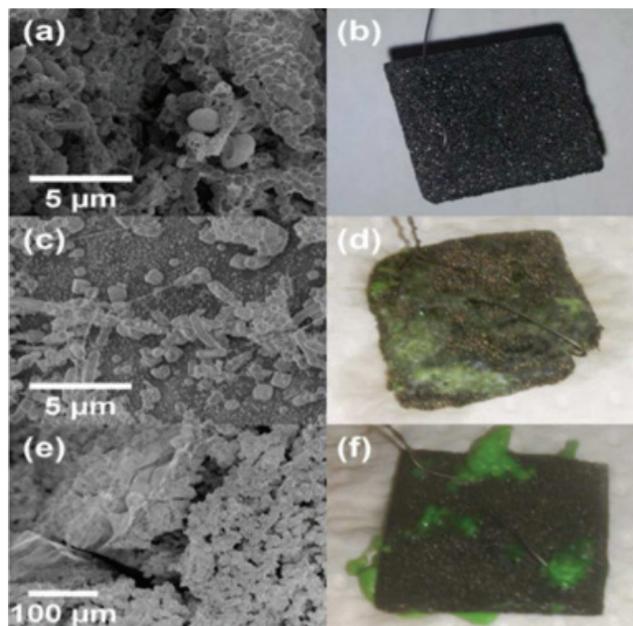


Fig. 42. (a) Imagen SEM de la capa de grafeno sobre Níquel, (b) Resistencia MIC del Gr/Ni después de 30 días, (c) Imagen SEM de la capa PA sobre Ni, (d) Corrosión del PA/ Ni después de 30 días, (e) Imagen SEM de la capa PU sobre Ni, (f) Corrosión del PU/Ni después de 30 días [1-42].

Otra aplicación del grafeno es en relación con el tratamiento de agua. El uso de membranas de óxido de grafeno para la filtración y descontaminación de agua genera un gran interés para el uso de esta tecnología aplicada a la industria sostenible. En el estudio realizado por (Yongchen Liu. College of Energy, Xiamen University, Xiamen, Fujian Province, China. 2017) artículo: Application of graphene oxide in water treatment. [147], se revisaron los métodos de preparación de la membrana de óxido de grafeno, incluyendo la filtración por succión al vacío, el recubrimiento por pulverización, el recubrimiento por centrifugación, el recubrimiento por inmersión y el método de capa por capa.

El resultado de este estudio arroja que la aplicación de la membrana de óxido de grafeno, la membrana de óxido de grafeno modificado y las membranas híbridas de grafeno que con el tamaño de poro adecuado en las tabletas de óxido de grafeno deja pasar las moléculas de agua, mientras que retiene Na (sodio) y Cl (cloro) [148].

Debido a su alta hidrofobicidad, la lámina de óxido de grafeno se usa para destilación, y el flujo de agua puede aumentar severamente comparado con membranas de osmosis invertida convencional [149].

La membrana de óxido de grafeno, óxido de grafeno modificado y membrana híbrida de óxido de grafeno, tienen la ventaja de una simple preparación en su proceso y buena separación en los poros que se generan, gran potencial en el campo de tratamiento de agua [150].

Las investigaciones relacionadas con el grafeno y sus prestaciones mecánicas así como térmicas son las que más nos interesan, en el ámbito de la arquitectura y construcción todo apunta a que este material vendrá a revolucionar el modo en que se producen obras arquitectónicas, pero el grafeno hasta ahora se ha estudiado en laboratorios, a escalas que no alcanzan a satisfacer la necesidad de ver a este material desempeñándose de manera “real”.

En el MIT (Massachusetts Institute of Technology) se está estudiando la manera en que el grafeno tenga una aplicación estructural más importante, en la experimentación de un módulo 3D compuesto por grafeno, se pretende generar un patrón geométrico con este material que pueda desarrollar todas las propiedades estudiadas en laboratorio (figura 43) [151].

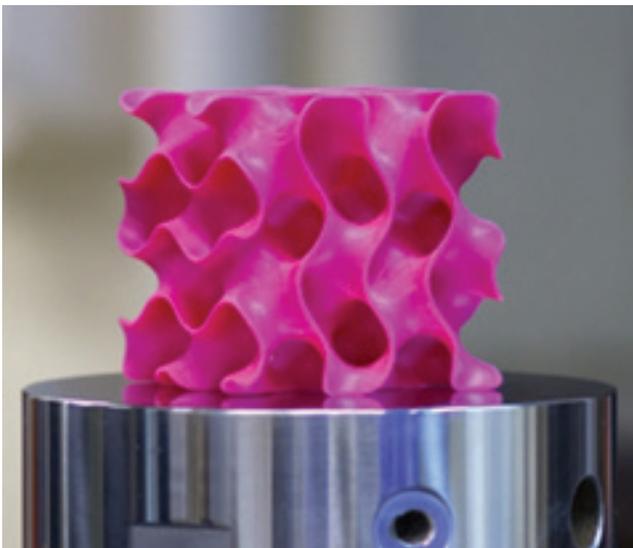


Fig. 43. Modelo de giroide impreso 3D (Estructura prototipo) [1-43].

Llevando así al campo de aplicación del grafeno a la manufactura de módulos prefabricados que respondan a las necesidades de la industria, consiguiendo una menor sección, un menor peso en la estructura y agregando las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y flexibilidad.

Lo que también se ha encontrado sobre este material es que, hasta que la producción en masa no esté solucionada no se podrá aplicar grafeno en una escala de consumo, según expertos podrá tardar media década y otros apuntan que pasará el 2025 para poder empezar a presenciar esta revolución reflejada en el consumo general [152].

5 | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

5 | 1 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS DEL ESTADO DE ARTE

Las aplicaciones del uso del grafeno como material potencial dentro de la industria de la construcción en estos días son limitadas debido a la falta de procesos de obtención en grandes cantidades de este material. Los casos de estudio se resumen al uso del grafeno como compuesto en aditivos de concreto para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla, presentado también pinturas que puedan absorber CO₂, esto sin duda contribuye al medio ambiente.

Su aplicación en electrónica es también prometedora por lo que el ahorro energético es uno de sus principales beneficios, los artículos científicos comparten las mismas propiedades del grafeno, pero en cuanto a las aplicaciones en muchos casos faltan pruebas físicas que puedan mostrar las propiedades del grafeno como compuesto, la escala de estos experimentos está relacionada con los métodos de obtención que apuntan a un futuro en el que se pueda conseguir grafeno a un costo accesible para la industria y entonces poder ver las aplicaciones desarrolladas a una escala mayor.

5 | 2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Con base en las conclusiones anteriormente expuestas, se formula la pregunta de investigación que rige a este estudio. ¿El uso de grafeno en estructuras de concreto, como aditivo para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas, puede reducir el uso de materiales convencionales con mayores emisiones de CO₂ en la industria de la construcción dando pauta a una construcción más sostenible en México?

5 | 3 HIPÓTESIS

La posible respuesta de que el grafeno puede ser, como material revolucionario dentro de la industria de la construcción es clara, el grafeno aumenta las propiedades mecánicas del concreto y habiendo estudiado su comportamiento en las mezclas de concreto como caso de estudio disminuir el uso de concreto y agregados en la construcción de estructuras, muros, acabados, etc. Significaría un impacto positivo dentro de las emisiones que muestra la producción de arquitectura en México y en el mundo.

5 | 4 OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICO

Como objetivo general de este proyecto se realizó una investigación sobre la influencia del grafeno en el comportamiento mecánico y térmico de sistemas constructivos con base en concreto, a fin de determinar si la utilización del grafeno es adecuada como medio para incrementar la resistencia a la compresión, determinar si es capaz de acondicionar térmicamente de manera pasiva un espacio, permitiendo así reducir la huella de carbono generada por el uso de materiales convencionales dentro de la industria de la construcción en México. Todo esto considerando su potencial variación en la huella de carbono del sistema constructivo.

Como objetivos específicos de esta investigación se propuso:

- Realizar una investigación documental acerca del grafeno y sus propiedades como material en la construcción tomando en cuenta los casos de estudio abordados en relación con la Arquitectura.
 - Realizar una comparación entre grafeno y materiales convencionales respecto a sus propiedades mecánicas y térmicas, así como sus ventajas y desventajas.
 - Analizar las emisiones de CO₂ como parte fundamental del uso de materiales dentro de la construcción para determinar si se contribuye a aminorar el impacto ambiental del sistema constructivo completo.
 - Estudiar el impacto del grafeno como material compuesto en materiales convencionales.
 - Proponer porcentajes de grafeno en mezclas de concreto según la literatura consultada.
 - Utilizar el programa CES Selector para poder tener un parámetro que mida la diferencia entre las propiedades e impactos del grafeno en comparación con el concreto convencional, así como el concreto con diferentes porcentajes de grafeno como aditivo.
- Obtener tablas de comparación de propiedades del grafeno en diferentes mezclas de concreto para obtener resultados de sus aportaciones mecánicas y térmicas
 - Simular celdas de prueba con base en los diferentes porcentajes de grafeno propuestos en las mezclas de concreto para obtener las temperaturas dentro de los espacios de las celdas y determinar si los espacios interiores de las celdas se encuentran dentro del intervalo de temperaturas de confort.
 - Comparar el desempeño del grafeno con sus respectivos porcentajes en concreto en relación a las emisiones de CO₂, precio, resistencia a la compresión y densidad de cada mezcla sugerida para obtener la mejor opción.

6 |

METODOLOGÍA

6 | 1 REVISIÓN DE LA LITERATURA

En primera instancia se llevó a cabo investigación documental sobre el estado de arte del estudio y aplicaciones del grafeno así como antecedentes de su aplicación relacionada a la arquitectura, también se investigaron los procesos de obtención del material además de buscar en qué campos de la ciencia se ha ocupado este material y donde puede haber aplicaciones en un futuro dentro de la arquitectura.

Dentro de la literatura estudiada se encontraron aplicaciones como pinturas con óxido de grafeno capaces de absorber CO₂ durante su vida útil además de necesitar menos litros de pintura para lograr un acabado uniforme, también se encontró información sobre el grafeno como material de protección contra la oxidación corrosiva adecuado para construcciones donde la humedad sea una condicionante.

Además de que se encontró información sobre el uso del grafeno en concretos a diferentes porcentajes por lo que la relación con las propiedades mecánicas del grafeno como aditivo era directa, basándose en la investigación física del grafeno como aditivo de concreto se propuso realizar una simulación de concretos con grafeno en diferentes porcentajes.

6 | 2 ANÁLISIS CON CES SELECTOR

Para la obtención de resultados se investigaron propiedades mecánicas y térmicas del grafeno como aditivo y se compararon con las propiedades de mezclas de concreto sin grafeno, ya que son las relacionadas con la resistencia en un material de construcción y aprovechamiento energético dentro de los espacios habitables y así poder obtener un concreto con porcentaje adecuado para las necesidades arquitectónicas de la industria de la construcción sostenible, esto para poder responder la pregunta de investigación propuesta dentro del planteamiento del problema.

Para el estudio comparativo del impacto del grafeno en las mezclas de concreto se usó CES Selector. CES Selector es un programa de selección de materiales relacionado con el cálculo de huella de carbono desde la etapa inicial de desarrollo del material seleccionado, así como sus propiedades mecánicas y precio del material, CES Selector considera el rendimiento técnico junto a factores tales como el costo, el riesgo de sustancias restringidas y el impacto medioambiental por lo que resultó una herramienta importante dentro de la comparación de las mezclas de concreto convencional y concreto con porcentajes de grafeno.

Con base en la información sobre pruebas mecánicas de mezclas de concreto con varios porcentajes de grafeno reportadas en la literatura, se propuso analizar los diferentes impactos, medidos en huella de carbono, de las diversas concentraciones del grafeno añadidas como aditivo al concreto, tomando en cuenta este parámetro de la literatura se propusieron los siguientes porcentajes; mezcla de concreto con 0% de grafeno (concreto convencional), concreto con 0.005% de grafeno, concreto con 0.010% de grafeno, 0.015% de grafeno, 0.020% de grafeno y 0.025% de grafeno como máximo en la mezcla de concreto.

Las propiedades investigadas sobre el grafeno que hasta ahora se tienen, relacionadas con su comportamiento como material de construcción se limitaron a las siguientes; dentro de las propiedades térmicas: densidad, conductividad térmica y calor específico a presión constante. Dentro de las propiedades mecánicas se consideró la resistencia a la compresión.

Estas propiedades fueron obtenidas de la literatura, donde se puede apreciar que todavía falta experimentar más sobre el uso de este material, debido al costo que representa producir grafeno. Las pruebas y resultados que se pudieron encontrar en los artículos científicos se reducen a pruebas de laboratorio con porcentajes microscópicos de grafeno en pruebas de materiales compuestos.

Tras investigar las propiedades relevantes para poder tener un parámetro de su comportamiento como material de construcción, propiedades mecánicas y térmicas y de huella de carbono, se vaciaron en el programa CES Selector donde se crearon las cinco diferentes proporciones de grafeno/cemento.

6 | 3 MODELADO CON DESIGNBUILDER

Posterior a ello, con el programa DesignBuilder, se modelaron las volumetrías de celdas de prueba cúbicas para estudiar el comportamiento térmico del concreto con diferentes concentraciones de grafeno a fin de determinar si es factible la utilización de estos materiales compuestos para brindar condiciones de comodidad térmica, de manera pasiva sin equipos mecánicos como aires acondicionados o calefactores, en los espacios construidos con estos materiales. DesignBuilder es un programa computacional

empleado para el modelado energético de los edificios con y sin sistemas de aire acondicionado o calefacción cuya capacidad principal es la modelación geométrica de las volumetrías de los espacios a analizar.

La celda de prueba diseñada para el estudio térmico se presenta en la Figura 44.

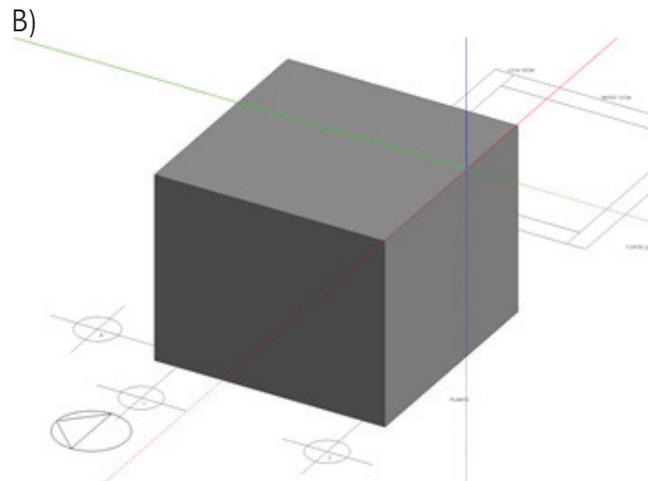
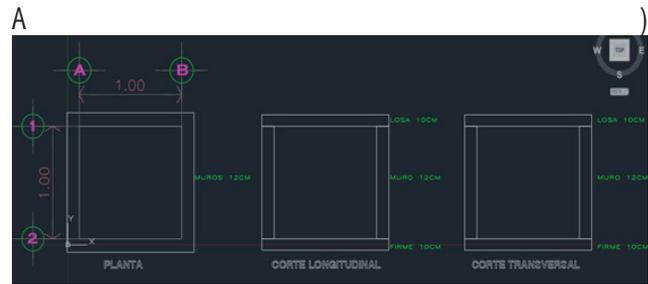


Figura 44. A) Diseño de volumetrías de celdas de prueba cúbicas para estudiar el comportamiento térmico del concreto con diferentes concentraciones de grafeno en el programa AutoCAD. B) Volumetría modelada en DesignBuilder.

6 | 4 ANÁLISIS CON ENERGY PLUS

La simulación computacional para determinar si el espacio es térmicamente cómodo, se utilizó el programa EnergyPlus, que permite determinar, las temperaturas que alcanzan los espacios por efectos de transferencia de calor de los materiales con los que se construyen las envolventes de los espacios empleando cálculo mediante simulación térmica dinámica (DTS, por sus siglas en inglés). Las propiedades termofísicas de los concretos con las diversas concentraciones que se estudiaron en CES Selector.

Las concentraciones analizadas de grafeno fueron, caso 0: 0% (concreto convencional), caso 1: 0.005%, caso 2: 0.010%, caso 3: 0.015%, caso 4: 0.020%, caso 5: 0.025% de grafeno en la mezcla de concreto respectivamente.

Para determinar si el espacio es térmicamente cómodo, se determinó el intervalo de comodidad térmica. Para ello, se calculó primero la temperatura de neutralidad térmica (T_n) con el modelo adaptativo de la norma ASHRAE 55 dado en la ecuación 01, con base en la temperatura ambiental promedio mensual (T_{amb}) D[153].

$$T_n = 0.31 T_{amb} + 17.8 \quad (01)$$

El intervalo de temperaturas de comodidad térmica consta de temperaturas mínimas ($T_{c\ min}$) y máximas ($T_{c\ máx}$) permisibles para ser considerado a un espacio térmicamente cómodo. Este intervalo se calcula para cada mes del año sustrayendo y añadiendo 2.5 °C a la temperatura de neutralidad térmica (ecuaciones 02a y 02b), con lo que se obtiene un intervalo de temperaturas de comodidad térmica permisible de 5 °C para cada mes del año [154].

$$T_{c\ min} = T_n - 2.5 \text{ °C} \quad (02a)$$

$$T_{c\ máx} = T_n + 2.5 \text{ °C} \quad (02b)$$

El resultado de la simulación térmica será la capacidad de proveer condiciones de comodidad térmica a lo largo de un año típico de la Ciudad de México. Para este fin, se procedió a contabilizar las horas de comodidad térmica al año de la celda de prueba. El total de horas de comodidad térmica se calculó con la ecuación 03 [155].

$$t_{ct} = t_p - (t_{ic} + t_{if}) \quad (03)$$

Donde t_{ct} es el número de horas de comodidad térmica, t_p es el número de horas del período analizado (8760 para el período anual y entre 620 y 744 dependiendo del mes del año), t_{ic} es el número de horas en que los espacios se encontraron por arriba de la temperatura máxima de comodidad térmica y t_{if} es el número de horas en que los espacios se encontraron por debajo de la temperatura mínima de comodidad térmica [156].

7 | 1 PROPIEDADES OBTENIDAS DE LAS COMPOSICIONES ANALIZADAS

Los resultados de relevancia para esta investigación consistieron, entre otros, en las propiedades térmicas, mecánicas e impactos ambientales, medidos en forma de huella de carbono y energía embebida, de las diferentes composiciones obtenidas de concreto / grafeno. Un resumen de las propiedades obtenidas se puede ver en la tabla 3.

	Concrete (normal, Portland cement)	Concrete / Grafeno al 0.005% (Unidirectional Composite) - 0.005%vf	Concrete / Grafeno al 0.025% (Unidirectional Composite) - 0.025%vf	Concrete / Grafeno al 0.010% (Unidirectional Composite) - 0.01%vf	Concrete / Grafeno al 0.015% (Unidirectional Composite) - 0.015%vf	Concrete / Grafeno al 0.020% (Unidirectional Composite) - 0.02%vf	Grafeno
Price							
Price (MXN/kg)	0.919	42.3 ↑	207 ↑	83.6 ↑	125 ↑	166 ↑	574000 ↑
Price per unit volume (MXN/m ³)	2200						1.38e9 ↑
Physical properties							
Density (kg/m ³)	2390	1670 ↓	1670 ↓	1670 ↓	1670 ↓	1670 ↓	2410 ↑
Relative density							2.41
Porosity (closed) (%)	0						
Porosity (open) (%)	0.122						
Mechanical properties							
Young's modulus (Pa)	1.94e10	5e13 ↑	2.5e14 ↑	1e14 ↑	1.5e14 ↑	2e14 ↑	1e18 ↑
Yield strength (elastic limit) (Pa)	1.1e6						
Tensile strength (Pa)	1.2e6	1.76e6 ↑	1.77e6 ↑	1.76e6 ↑	1.76e6 ↑	1.76e6 ↑	4.2e7 ↑
Elongation (strain)	0.00005						0.001 ↑
Compressive strength (Pa)	2e7	3.05e7 ↑	3.1e7 ↑	3.43e7 ↑	3.09e7 ↑	3.2e7 ↑	4.5e7 ↑
Flexural modulus (Pa)	1.94e10	5e13 ↑	2.5e14 ↑	1e14 ↑	1.5e14 ↑	2e14 ↑	
Flexural strength (modulus of rupture) (Pa)	2.02e6	2.46e7 ↑	2.46e7 ↑	2.46e7 ↑	2.46e7 ↑	2.46e7 ↑	
Shear modulus (Pa)	8.42e9						
Bulk modulus (Pa)	9.19e9						
Poisson's ratio	0.141						
Shape factor	3						
Hardness - Vickers (HV)	5.99						
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles (Pa)	673000						
Mechanical loss coefficient (tan delta)	0.0173						
Thermal properties							
Melting point (°C)	1060						4240 ↑
Maximum service temperature (°C)	495						
Minimum service temperature (°C)	-155						
Thermal conductivity (W/m.°C)	1.35	0.923 ↓	1.99 ↑	1.2 ↓	1.47 ↑	1.73 ↑	5000 ↑
Specific heat capacity (J/kg.°C)	936	973 ↑	973 ↑	973 ↑	973 ↑	973 ↑	700 ↓
Primary production energy, CO2 and water							
Embodied energy, primary production (J/kg)	818000	898000 ↑	1.22e6 ↑	978000 ↑	1.06e6 ↑	1.14e6 ↑	1.1e9 ↑
CO2 footprint, primary production (kg/kg)	0.122	0.123 ↑	0.128 ↑	0.124 ↑	0.125 ↑	0.127 ↑	16.6 ↑
NOx creation (kg/kg)	0.000419						
SOx creation (kg/kg)	0.000899						
Water usage (m ³ /kg)	0.0034						13 ↑

Tabla 3. Resumen de Propiedades mecánicas, termofísicas y de huella de CO₂ de las mezclas de concreto con grafeno analizadas calculadas en el programa CES Selector.

De la simulación energética realizada con EnergyPlus en la celda de prueba propuesta en este estudio, se obtuvieron las horas de confort térmico que fueron capaces de proporcionar las diferentes composiciones grafeno/concreto, considerando una temperatura de confort mínima permisible de 20 °C y una temperatura de confort máxima permisible de 25 °C a lo largo del año, en condiciones climáticas de la Ciudad de México.

Casos	Frías	Calientes	Confort
Caso 0	6175	203	2382
Caso 1	6014	309	2437
Caso 2	5996	385	2379
Caso 3	5992	424	2344
Caso 4	5992	459	2309
Caso 5	5988	504	2268

Tabla 4. Horas totales anuales frías (debajo de los 20 °C), calientes (arriba de 25 °C) y dentro del intervalo de confort térmico (entre 20 y 25°C) en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

7 | 3 COMPARACIÓN GENERAL DE LAS PROPIEDADES DE LAS COMPOSICIONES

Se estudió comparativamente las diferentes resistencias a la compresión contra su huella de carbono y su precio, tal como se muestra en las figuras 45 a 47. En las figuras 45 a 47 se muestra la ubicación del grafeno, el concreto y los concretos con diferentes proporciones de grafeno respecto del universo de materiales de CES Selector

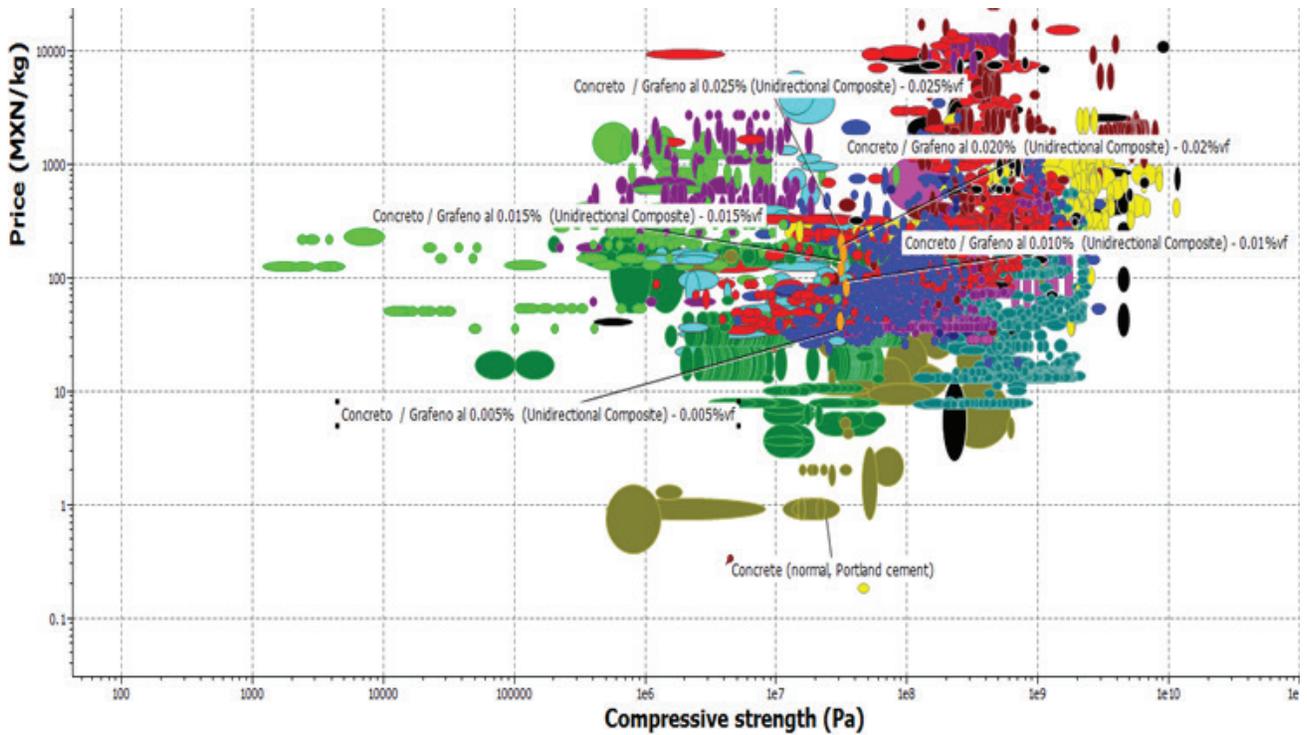


Figura 45. Gráfica donde se muestra la comparación entre el precio del concreto convencional y las mezclas de concreto con grafeno respecto al aumento en la resistencia a la compresión.

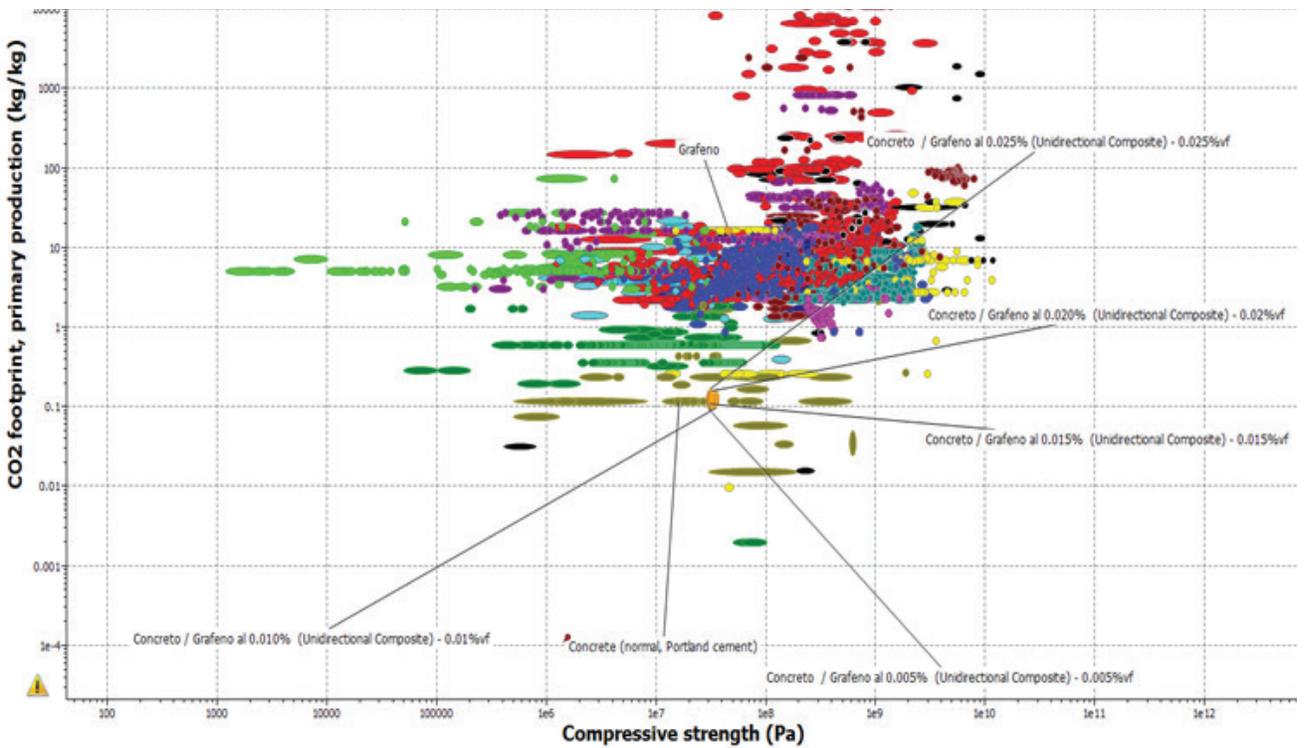


Figura 46. Gráfica donde se muestra la comparación entre la huella de carbono por la producción del concreto convencional y las mezclas de concreto con grafeno respecto al aumento en la resistencia a la compresión.

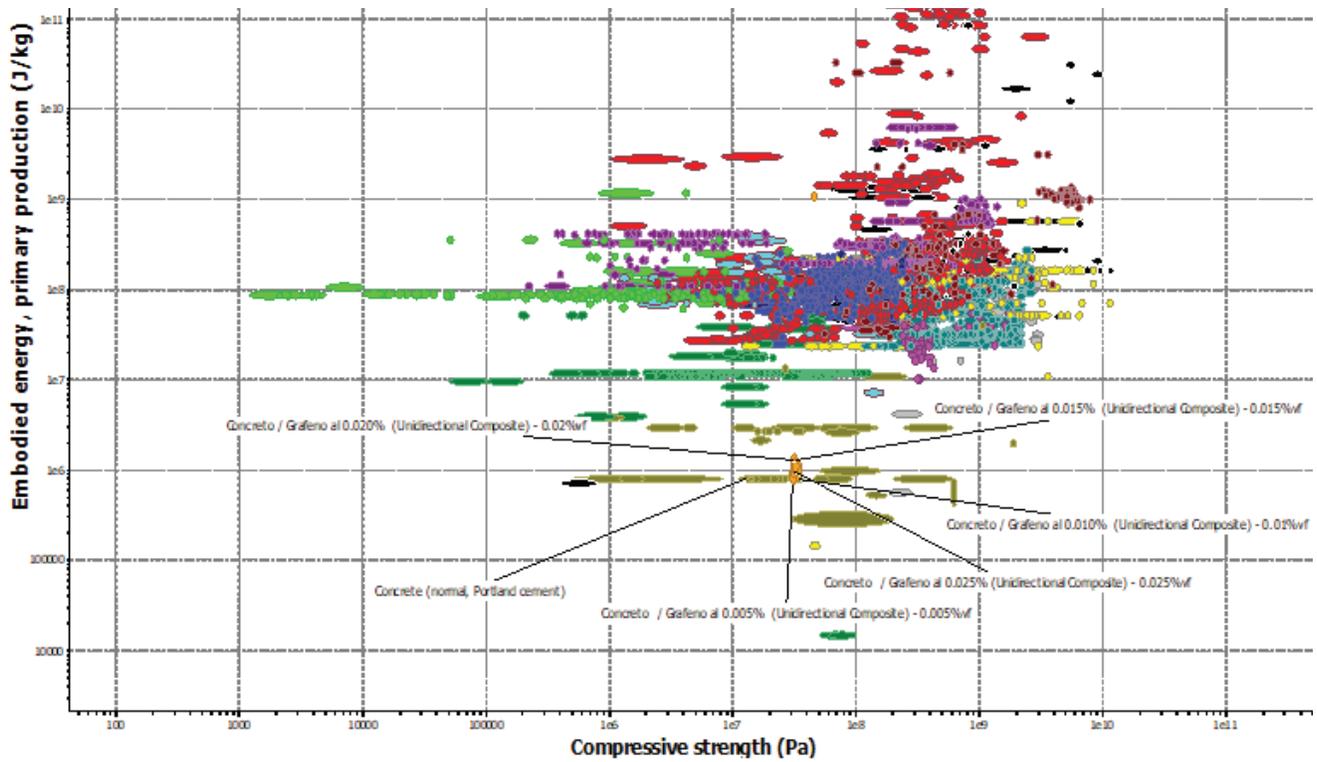


Figura 47. Gráfica donde se muestra la comparación entre la energía embebida por la producción del concreto convencional y las mezclas de concreto con grafeno respecto a resistencia a la compresión.

8 | 1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN CONTRA COSTO, ENERGÍA EMBEBIDA Y HUELLA DE CARBONO

A fin de tener una base sobre la cual plantear el problema de estudio abordado en este trabajo, se propuso un diseño experimental simple consistente en la adición de grafeno al concreto convencional según lo reportado en el artículo de investigación “Structuring in Cement Systems with Introduction of Graphene Nano- Additives” en cuyo documento se consideraron concretos con grafeno en diferentes porcentajes 0.005%, 0.010%, 0.015%, 0.020%, 0.025%, los cuales habían sido sometidos a ensayos de resistencia mecánica a la compresión cuyos resultados demostraban una mejora un incremento en cuanto a su resistencia mecánica, lo que sugirió que ésta investigación siguiera un rumbo similar tomando esa referencia y aplicándola en condiciones de la Ciudad de México además de estudiar la viabilidad económica de las diferentes mezclas teniendo como parámetro el precio del concreto convencional y el impacto ambiental en la producción que este compuesto de concreto/grafeno pudiera representar como huella de carbono y sus propiedades térmicas como posible método de acondicionamiento pasivo en una vivienda.

Con base en la información de la tabla 3, se puede observar que los concretos con aditivo de grafeno variaron sus propiedades mecánicas y termofísicas, así como los impactos ambientales y costos, respecto de concreto convencional de cemento Portland.

Se puede inferir, a nivel de propiedades mecánicas, que, particularmente y de interés en esta investigación, la variación de la resistencia a la compresión se incrementó con la adición del grafeno al concreto y que, con base en el porcentaje de grafeno, se fue incrementando la resistencia a la compresión. Esta variación fue semejante en relación con la resistencia a la flexión de igual manera.

Sin embargo, la variación de la resistencia a la compresión y a la flexión de las distintas composiciones analizadas tiende a permanecer en un nivel muy parecido respecto al aumento de porcentaje de grafeno en las composiciones experimentadas.

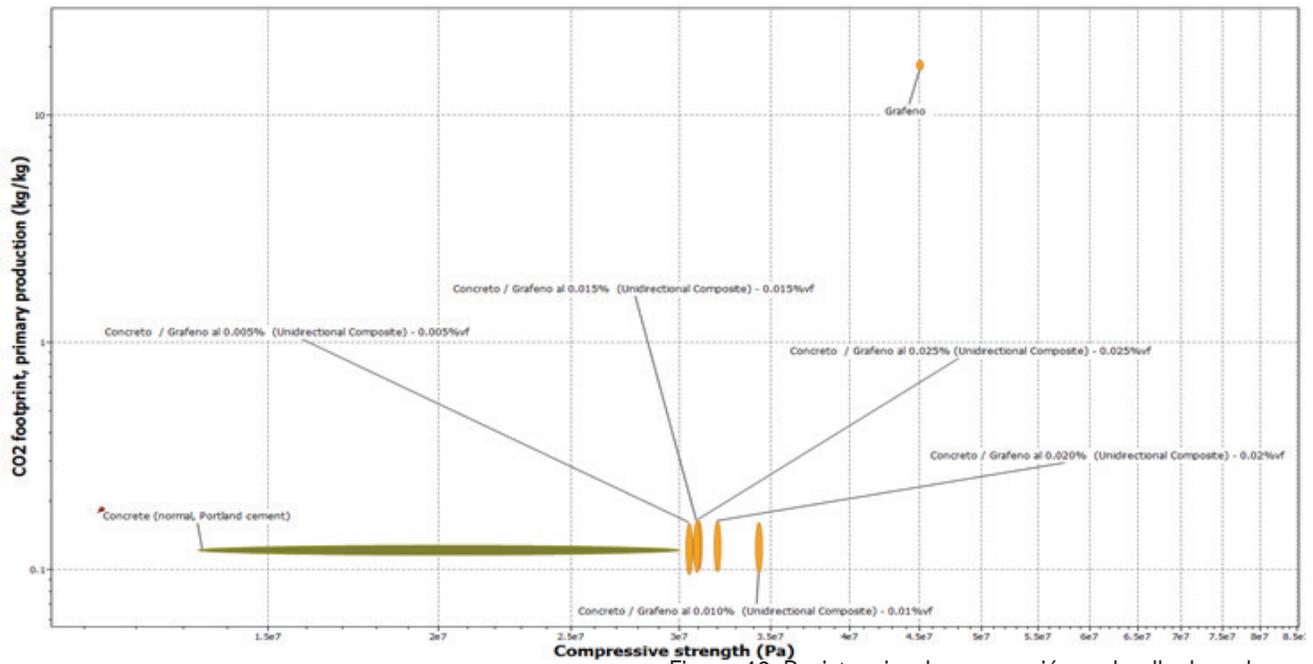


Figura 48. Resistencia a la compresión vs. huella de carbono.

Observando las cartas de comparación en la Figura 48. La huella de carbono en relación al impacto ambiental de estas composiciones no muestra un incremento apreciable respecto al concreto convencional de cemento Portland.

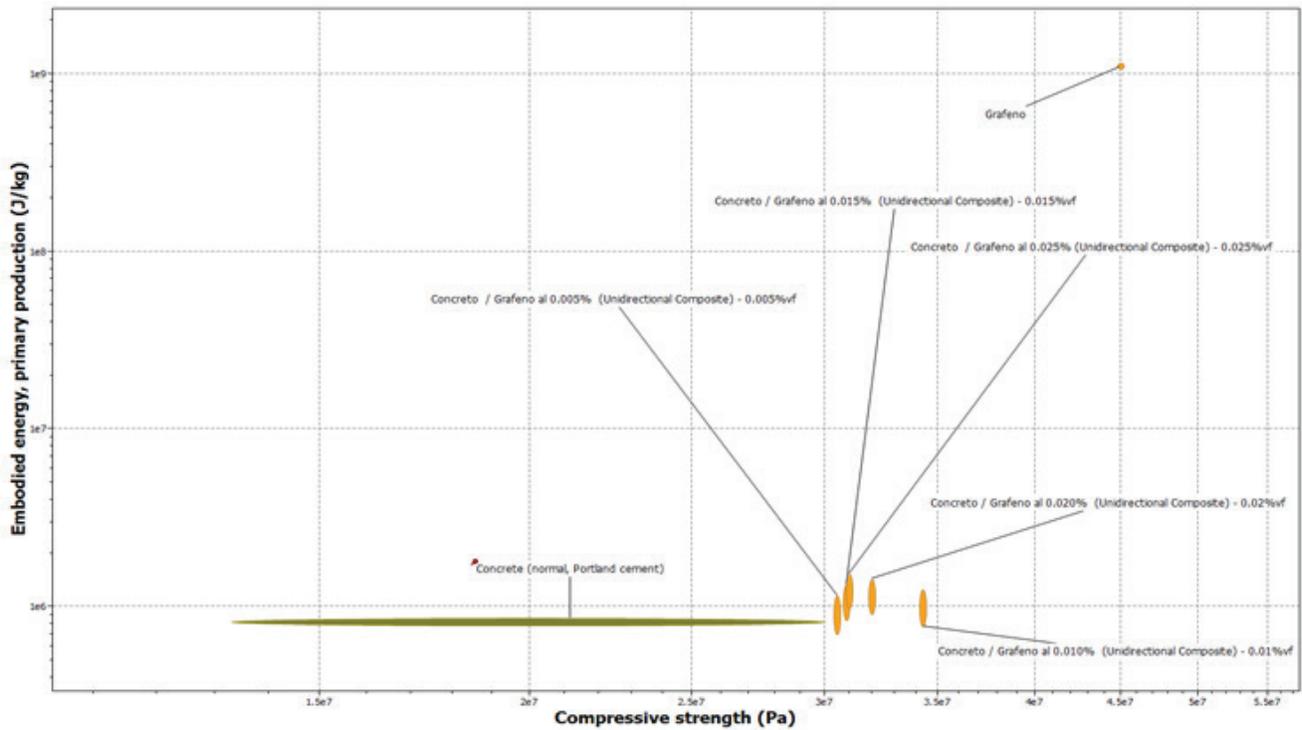


Figura 49. Resistencia a la compresión vs. energía embebida.

La energía embebida de las composiciones tampoco tuvo un aumento importante respecto a la energía embebida utilizada en un concreto convencional de cemento Portland Figura 49. Sin embargo podemos observar como la mezcla con el porcentaje de 0.010% se separa en el aumento de resistencia a la compresión. Este incremento de la energía embebida resulta en el incremento de emisiones de CO₂ expuesto en el punto anterior.

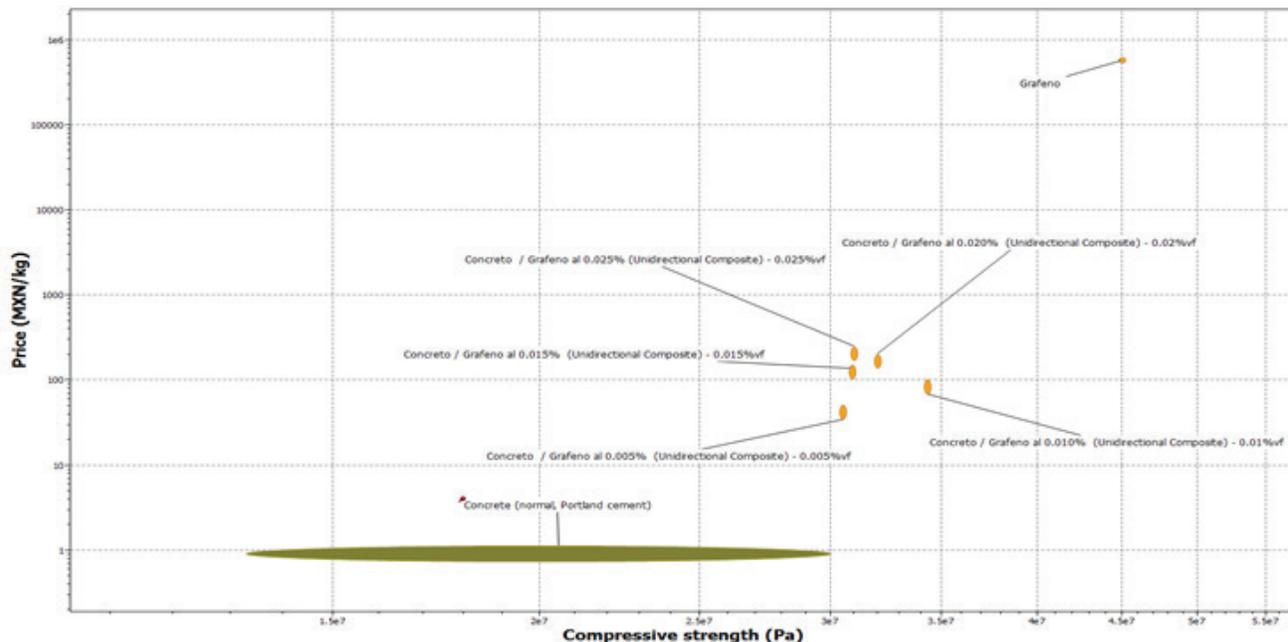


Figura 50. Precio vs resistencia a la compresión.

La variable presentada en las cartas de comparación de atributos de las composiciones grafeno / concreto cuyo cambio fue más evidente en relación con su incremento de resistencia mecánica fue el costo, el cual exhibe un incremento importante, considerando el concreto como referencia, la composición con 0.005% de grafeno incrementa su costo un 40% respecto del concreto, mientras que la composición con 0.010% de grafeno le sigue con un 53.33% de incremento de costo, estando en el rango más alto las composiciones con 0.015%, 0.020% y 0.025% de grafeno que van de incrementos del 80% hasta del 93.33% respectivamente como se muestra en la Figura 50.

Siendo el incremento en cuanto a resistencia mecánica apreciable a partir del porcentaje de 0.010% sin obtener gran diferencia con el aumento a 0.15%, 0.020% y 0.025%. Con base en la información de la tabla 3, se puede observar que las propiedades de los cinco casos de estudio de porcentajes de concreto / grafeno así como el concreto y el grafeno por separado.

Obteniendo los resultados siguientes:

- Aumento en el módulo de Young en todas las mezclas
- Aumento a la fuerza de tensión en todas las mezclas 46.6% a 47.5% ésta última representada por la mezcla de 0.025% de concentración de grafeno
- Aumento en la resistencia a la compresión en todas las mezclas de 52.5%, 71.5%, 54.5%, 60%, 55% respectivamente, siendo la mezcla 0.010% la de mayor ganancia
- Aumento en la resistencia a la flexión de 542% en todas las mezclas

Ya que, en la literatura, de manera general, no se especifica el método de obtención del grafeno, costo y calidad del mismo, se tomó como referencia Graphenemex, para poder calcular las propiedades mecánicas, huella de carbono y térmicas. El costo se fijó basándose en esta referencia que presume un costo de 30 dólares el gramo de grafeno, haciendo la equivalencia en Pesos Mexicanos (MXN) el

24 de mayo del 2019, día de la simulación de las gráficas de comparación entre precio vs resistencia mecánica a la compresión y huella de carbono [32].

En relación con sus propiedades mecánicas, los datos que se muestran sobre la resistencia mecánica son de 42 N/m a tensión de rotura y un módulo de Young aproximadamente de ~ 1.0 TPa [7]. Datos que el documento en el que se basó la investigación tampoco especificaba, los datos se investigaron en otras literaturas referenciadas, en las cuales las propiedades encontradas estaban definidas.

Con la información de las gráficas mostradas queda demostrado que la huella de carbono generada por la producción de mezclas de concreto con nano-aditivos en este caso grafeno con los porcentajes utilizados no repercute de manera importante en el impacto ambiental comparándolo con el concreto convencional. Sin embargo, existe casi un incremento del 30% en la resistencia a la compresión lo que podría justificar la elevación en costo ya que con menos material se puede conseguir una mayor resistencia además que, como se indica en la Figura B3 del apéndice B, la densidad del concreto con grafeno disminuye, por lo que en conjunto con su ganancia en resistencia a la compresión se vuelve un material más ligero y más resistente.

Se consigue una mezcla con menos material, más ligero, menor impacto ambiental, mayor resistencia a la compresión y flexión. Siendo el concreto uno de los materiales más utilizados dentro de la industria de la construcción tendría un mayor impacto global si se estudiaran los casos bajo las especificaciones y normas de países donde el concreto tenga una huella de carbono importante y se pueda aplicar para contribuir con el medio ambiente.

Las propiedades del grafeno mejoran notablemente, con base en la información de la figura 46, el comportamiento mecánico de las composiciones de concreto/grafeno en sus diferentes porcentajes. El mejor comportamiento según los cálculos efectuados en CES Selector fue la mezcla con un porcentaje de 0.010%. Al agregar grafeno se puede observar que los resultados como el aumento en la resistencia mecánica a compresión, flexibilidad y homogenización en la mezcla que se lleva a cabo mediante la formación de hidrosilicatos de calcio básicos convirtiendo más densa la mezcla, además, con base en el trabajo previamente realizado, potencialmente reduciría la permeabilidad del material

hacia los elementos de la intemperie e incrementarían sus prestaciones térmicas en temperaturas extremas [33]. Este último punto no constituye un alcance de esta investigación, lo que constituiría un trabajo a realizarse posteriormente.

8 | 2 CAPACIDAD DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO PASIVO DE LAS COMPOSICIONES CONCRETO/GRAFENO

Las celdas de prueba cúbicas que se emplearon como casos de estudio en este documento se sometieron a una simulación térmica dinámica con los porcentajes de grafeno dentro de la mezcla como ya antes se mencionaron para, poder medir su capacidad de funcionar como un sistema constructivo capaz de proveer de acondicionamiento térmico pasivo. La información de las horas de confort térmico provistas por la celda se indica en la tabla 4.

De la simulación energética realizada con EnergyPlus en la celda de prueba propuesta en este estudio, se obtuvieron las horas de confort térmico que fueron capaces de proporcionar las diferentes composiciones grafeno/concreto, considerando una temperatura de confort mínima permisible de 20 °C y una temperatura de confort máxima permisible de 25 °C a lo largo del año.

En la gráfica que se muestra puede observar que las horas de confort no tienen un cambio considerable a lo largo de todo el año, siendo el caso 0 el concreto convencional. Sin embargo, las propiedades termofísicas del grafeno propician que por su alta conductividad, las horas en la que el espacio interior de la celda se encuentre en temperaturas arriba de la temperatura de confort máxima permisible en época de calor aumenten, por lo que el material no muestra ventaja en el uso como material útil para acondicionamiento térmico pasivo de espacios.

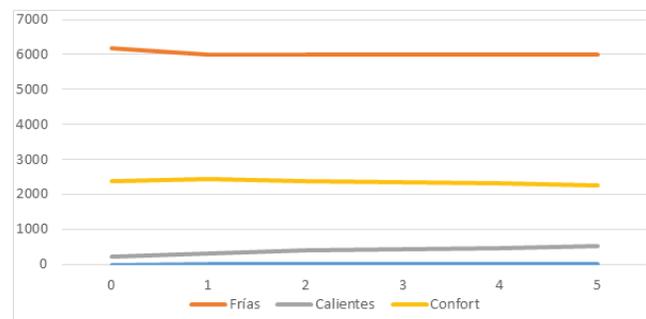


Figura 51. Total de horas de confort térmico anuales en las celdas de prueba analizadas.

Las horas más cálidas y las horas más frías se encuentran en el mes de Mayo y Diciembre respectivamente, con base en la información concentrada en la tabla A5 y en la tabla A12 (apéndice A) que muestra el comportamiento térmico, en horas de confort térmico, de las mezclas en estas condiciones de la Ciudad de México.

Se puede observar que el cambio dentro del promedio de horas de confort térmico disminuye en comparación a las horas logradas con el concreto convencional. También llegan a aumentar las horas de confort, aunque no significativamente, debido a que el grafeno aumenta la conductividad térmica de la mezcla de concreto proporcionando una entrega calorífica en menor tiempo a la del concreto convencional, pero teniendo una pérdida de la capacidad calorífica del material, lo que no permite que el calor se almacene en los muros de la celda de prueba y el proceso de transferencia de calor sea llevado a cabo con mayor rapidez.

Las propiedades termofísicas del grafeno como nano-aditivo en las mezclas de concreto demostraron una disminución de densidad de un 30% en todos los casos. La huella de carbono generada por las mezclas aumenta desde un 0.81%, 1.63%, 2.45%, 4.09% hasta 4.91% respectivamente [Tabla 3]. Mientras que el aumento en el precio en todas las mezclas representa un aumento que va desde 4.502% hasta 22.424%. Respecto a la energía embebida generada para realizar las mezclas va desde 9.77%, 19.55%,

En relación con el calor específico, los cálculos realizados arrojaron que esta propiedad, en cada composición, se incrementa un 3.95% en todos los casos mientras que la conductividad térmica varía, en los casos 0.005% y 0.010%, de -31.62% a -11.11% respectivamente y en los demás casos de estudio de 8.88%, 28.14% y 47.40% respectivamente. Lo anterior puede justificar la pérdida de horas en que el espacio de la celda se encuentre a temperaturas dentro del intervalo de confort a lo largo del año demostrando poco valor de estas composiciones materiales dentro del acondicionamiento térmico pasivo de objetos arquitectónicos.

En esta tesis se presentó un trabajo de investigación cuyo objetivo fue indagar sobre la influencia del grafeno en el comportamiento mecánico y térmico de sistemas constructivos con base en concreto, a fin de determinar si la utilización del grafeno es adecuada como medio para incrementar la resistencia a la compresión, determinar si es capaz de acondicionar térmicamente de manera pasiva un espacio, todo esto considerando su potencial variación en la huella de carbono del sistema constructivo. Para la realización de este trabajo se ejecutaron las actividades de investigación documental sobre el estado de arte del estudio y aplicaciones del grafeno así como antecedentes de su aplicación relacionada a la arquitectura como aditivo en concreto, procesos de obtención del material así como impactos ambientales sobre huella de carbono, huella hídrica y energía embebida. Para después realizar un estudio comparativo sobre las mezclas estudiadas y el impacto del grafeno como nano-aditivo dentro del concreto. Los resultados obtenidos fueron, aumento dentro de la resistencia a la compresión de hasta un 71% en el mejor de los casos, mezcla con el 0.010% de grafeno. Aumento en la resistencia a la flexión en un 542%, incremento también en la resistencia a la tensión de un 46% mejorando en general las propiedades mecánicas de las mezclas por un aumento perceptible de 1.66% sobre de la huella de carbono y un 19% en la energía embebida para la mezcla de 0.010% que

CONCLUSIONES

representa el mejor de los casos dentro de los porcentajes de concreto con nano-aditivo de grafeno.

La pregunta central a responder en esta investigación es ¿El uso de grafeno en estructuras de concreto, como aditivo para mejorar las propiedades mecánicas y térmicas, puede reducir el uso de materiales convencionales con mayores emisiones de CO₂ en la industria de la construcción dando pauta a una construcción más sostenible en México?

El uso del grafeno como nano-aditivo en concretos con el porcentaje indicado según la investigación realizada sí aumenta de manera importante las propiedades mecánicas del concreto tales como la resistencia a la compresión (aproximadamente un 71%, según la proporción de 0.010% de grafeno) y a la flexión (aproximadamente un 542% según todas las proporciones) además de ayudar entre otras cosas con la permeabilidad del concreto ante los elementos así como evitar el agrietamiento del mismo alargando su vida útil dentro de la industria de la construcción.

¿Qué representa esto? Que al usar nano-aditivos de grafeno el concreto potencialmente resista sismos de mayores intensidades, se conserve su integridad en mejor condición ante desastres naturales y debido a que el grafeno disminuye la densidad de la mezcla considerablemente esto se traduce

en una reducción potencial del peso de las estructuras que se construyan con estos materiales hasta un 50%, lo que representa una disminución de huella de carbono de hasta 446 kg/Tn de emisiones de CO₂ dentro de la industria cementera, afectando positivamente a la industria de la construcción. Conviene recordar que el impacto ambiental varía según las condiciones específicas de cada región; se podría analizar de manera global, sabiendo que el uso del concreto es el más frecuente a nivel mundial para la construcción.

Sin embargo, como se indica en este documento, si algo mantiene al grafeno al margen de la industria sabiendo sus posibles aplicaciones, es el modo de producción, los cuales siguen siendo desarrollados para poder satisfacer en un futuro próximo a las industrias que lo requieran, pues hasta ahora el modo de obtener grafeno de gran calidad con las propiedades y prestaciones antes mencionadas se encuentran dentro de laboratorios con una producción mínima aún casi exclusiva para estudios y experimentos.

El proceso seleccionado para la obtención de grafeno fue por ultrasonido, un proceso que demuestra producción de grafeno de alta calidad por menor energía embebida utilizada en el proceso, así como menor huella hídrica sin embargo muestra una alza dentro de la toxicidad sobre humanos y apenas un incremento en eco toxicidad a comparación del proceso de obtención de reducción química, como se muestra en la imagen.

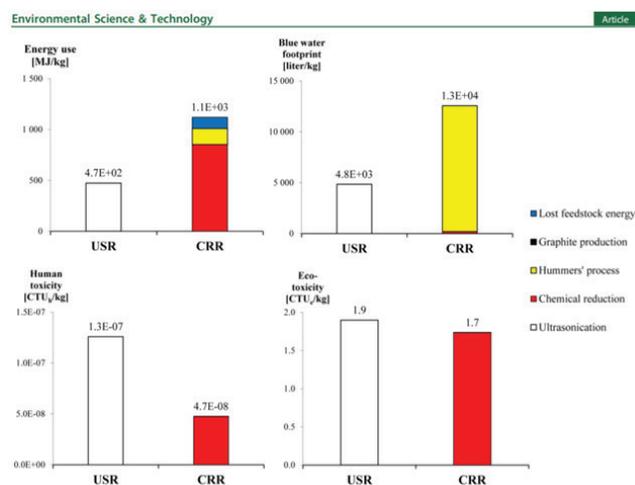


Figura 52. Uso de energía del caso de referencia, huella hídrica azul, toxicidad humana y ecotoxicidad para el grafeno producido a través de la ruta de ultrasonidos (USR) y la ruta de reducción química (CRR) [1-45].

El avance dentro de los métodos de producción de grafeno podría permitir bajar los índices de toxicidad y la intervención humana dentro del mismo, facilitando su obtención a nivel industrial y permitiendo ampliar el panorama para sus posibles futuras aplicaciones.

Las aplicaciones del grafeno desde el punto de vista arquitectónico tienen el potencial de ser un material que pueda convertir el mismo objeto arquitectónico en algo funcional, más allá de su función principal de proporcionar un espacio habitable. Esto va dirigido a proponer que las soluciones de sostenibilidad dentro de la arquitectura no solo sean sistemas adaptados a las viviendas o edificios, sino que estos vayan de la mano del diseño y tecnologías que permitan aprovechar al máximo las propiedades físicas de materiales modernos, sistemas que se puedan aplicar desde una residencia hasta una vivienda de interés social o emergente la cual responda a las realidades y necesidades de la sociedad en que vivimos.

En el pensamiento de la arquitectura se debe estar obligado a utilizar el conocimiento, las herramientas, el criterio y la ética en favor de quien lo necesite y requiera, desarrollando soluciones estudiadas para mejorar la calidad de vida de los seres humanos. Por lo que esta investigación podría dar pie a que las aplicaciones relacionadas con la arquitectura obliguen a pensar en soluciones del futuro, en objetos arquitectónicos que interactúen con el entorno y que sean capaces de no solo existir sino de producir un bienestar o mitigar las afectaciones existentes en el entorno.

Las diferentes áreas de aplicación de grafeno, como se han investigado, van desde el tratamiento de aguas, donde se estudia el uso de una membrana de óxido de grafeno para la separación de partículas filtrando y purificando agua salada, además de que también se ha estudiado al grafeno como un material antibacteriano capaz de utilizarse en hospitales, así como el desarrollo de superficies auto-limpiables, que retrasan la corrosión en superficies metálicas disminuyendo el mantenimiento de estructuras y alargando la vida de las mismas, lo cual, de nuevo representa una baja en emisiones de CO₂ convirtiendo así un edificio en un objeto arquitectónico sostenible demostrando que la arquitectura puede no solo a bajar las emisiones de la construcción y operación de los edificios, sino a tratar los residuos a través de los objetos y sistemas arquitectónicos que no generen desechos y que a lo largo de su vida útil sean activos dentro de un entorno.

Esta investigación tiene como propósito generar un interés sobre los materiales nuevos aplicados a la arquitectura, construcción y producción de sistemas sostenibles innovadores que puedan responder a los problemas ambientales.

Las herramientas que se tienen para la investigación de estos temas deben ser aprovechadas al máximo, dentro del campo del grafeno existen hasta ahora pocas empresas capaces de dar información completa sobre su producto, por lo que la innovación e investigación debe ir de la mano de pruebas reales, que puedan demostrar las propiedades que en artículos científicos se pueden encontrar.

Importante pensar en que las condicionantes de cada región permiten que el material se comporte de manera diferente por lo que, experimentar en diferentes zonas con climas extremos permitiría revelar las variantes sobre el grafeno no solo como nano-aditivo, sino como un material compuesto dentro de la industria de la construcción que posibilite la reducción de huella de carbono y energía embebida y aumente las propiedades de materiales que puedan demostrar mejoras importantes para justificar su evolución dentro de la industria, proporcionando mejores soluciones arquitectónicas.

APÉNDICES

Apéndice | A.

Horas de confort térmico mensuales para cada uno de los casos de estudio de composiciones grafeno / concreto analizadas.

Se considera al espacio de la celda de prueba estudiada en condiciones de confort térmico cuando su temperatura se encuentra entre 20 °C y 25 °C.

Enero	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	587	0	157
Caso 1	565	0	179
Caso 2	561	2	181
Caso 3	553	2	189
Caso 4	549	4	191
Caso 5	547	6	191

Tabla A1. Cálculo Térmico en el mes de Enero obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Febrero	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	499	7	166
Caso 1	483	17	172
Caso 2	479	23	170
Caso 3	478	27	167
Caso 4	478	27	167
Caso 5	474	28	170

Tabla A2. Cálculo Térmico en el mes de Febrero obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Marzo	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	458	32	254
Caso 1	453	46	245
Caso 2	448	56	240
Caso 3	450	57	237
Caso 4	449	61	234
Caso 5	452	63	229

Tabla A3. Cálculo Térmico en el mes de Marzo obteniendo

las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Abril	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	453	32	235
Caso 1	443	48	229
Caso 2	448	57	215
Caso 3	446	63	211
Caso 4	446	67	207
Caso 5	449	97	174

Tabla A4. Cálculo Térmico en el mes de Abril obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Mayo	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	413	52	279
Caso 1	412	68	264
Caso 2	415	75	254
Caso 3	420	79	245
Caso 4	427	85	232
Caso 5	424	86	234

Tabla A5. Cálculo Térmico en el mes de Mayo obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Junio	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	431	44	245
Caso 1	422	52	246
Caso 2	422	61	237
Caso 3	429	68	223
Caso 4	432	71	217
Caso 5	432	72	216

Tabla A6. Cálculo Térmico en el mes de Junio obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Julio	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	513	2	229
Caso 1	496	13	235
Caso 2	501	25	218
Caso 3	506	28	210
Caso 4	506	32	206
Caso 5	507	34	203

Tabla A7. Cálculo Térmico en el mes de Julio obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Agosto	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	526	5	213
Caso 1	509	7	228
Caso 2	513	14	217
Caso 3	515	18	211
Caso 4	514	21	209
Caso 5	516	24	204

Tabla A8. Cálculo Térmico en el mes de Agosto obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Septiembre	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	471	16	233
Caso 1	466	34	220
Caso 2	462	44	214
Caso 3	460	51	209
Caso 4	467	57	196
Caso 5	469	59	192

Tabla A9. Cálculo Térmico en el mes de Septiembre obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Octubre	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	550	13	181
Caso 1	529	24	191
Caso 2	532	28	184
Caso 3	533	31	180
Caso 4	528	32	184
Caso 5	528	33	183

Tabla A10. Cálculo Térmico en el mes de Octubre obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Noviembre	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	585	0	135
Caso 1	571	0	149
Caso 2	562	0	158
Caso 3	556	0	164
Caso 4	555	2	163
Caso 5	552	2	166

Tabla A11. Cálculo Térmico en el mes de Noviembre obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Diciembre	Frío	Caliente	Confort
Caso 0	689	0	55
Caso 1	665	0	79
Caso 2	653	0	91
Caso 3	646	0	98
Caso 4	641	0	103
Caso 5	638	0	106

Tabla A12. Cálculo Térmico en el mes de Diciembre obteniendo las horas más frías, más calientes y el intervalo de confort en cada caso de estudio de las mezclas de concreto con grafeno.

Apéndice | B.

Comparación de propiedades termofísicas de las composiciones de grafeno / concreto analizadas contra huella de carbono y precio.

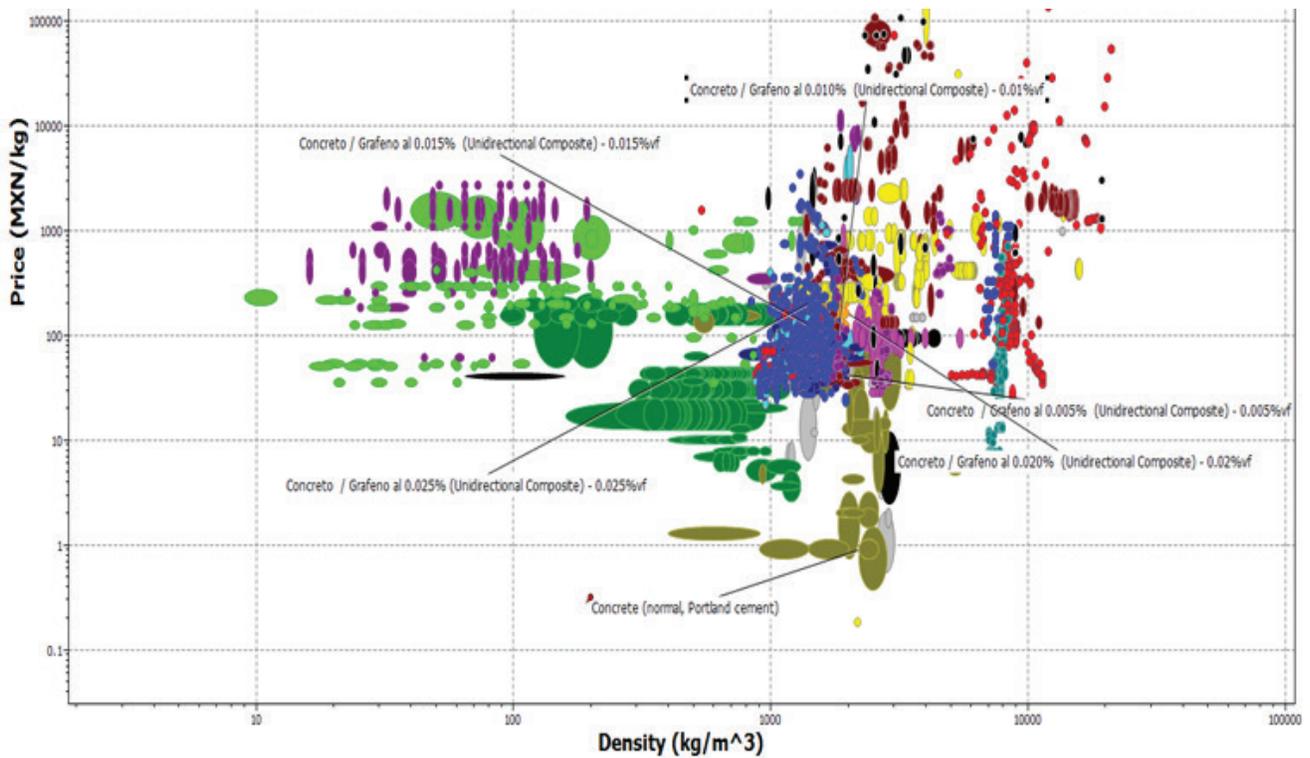


Figura B1. Gráfica donde se muestra la comparación entre el precio del concreto convencional y las mezclas de concreto con grafeno respecto a la densidad adquirida con los diferentes porcentajes de grafeno.

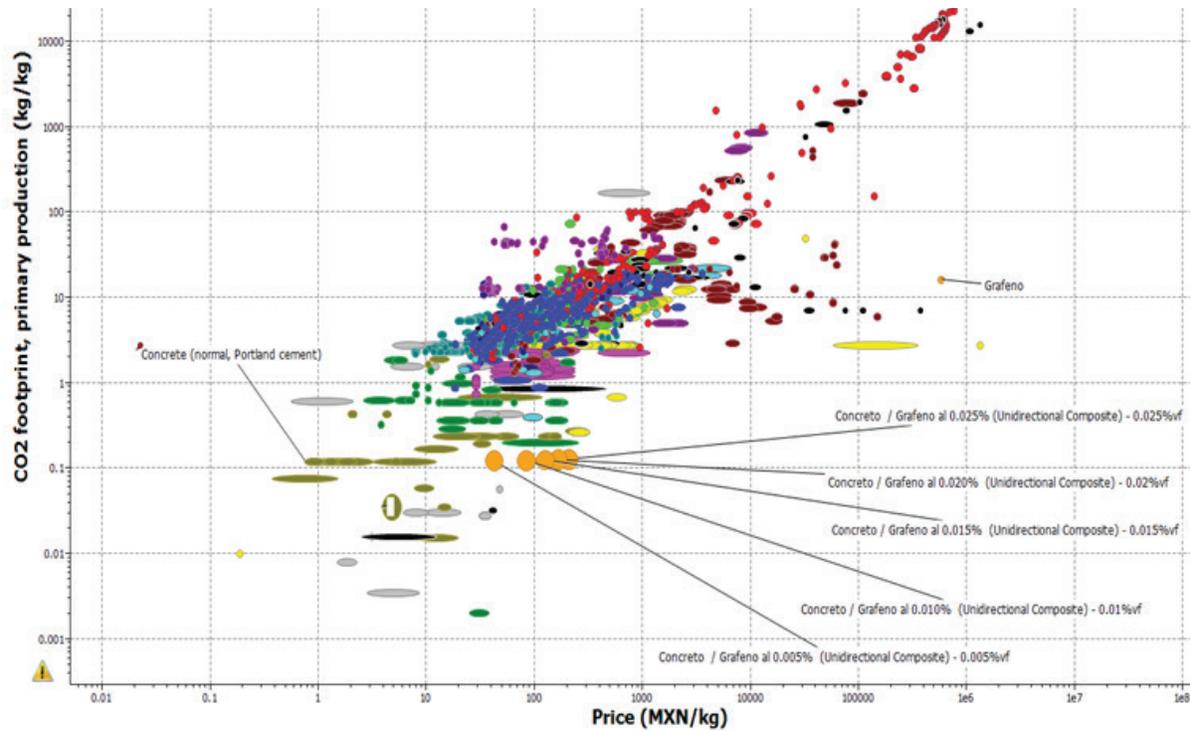


Figura B2. Gráfica donde se muestra la comparación entre la huella de carbono por la producción del concreto convencional y las mezclas de concreto con grafeno respecto al precio.

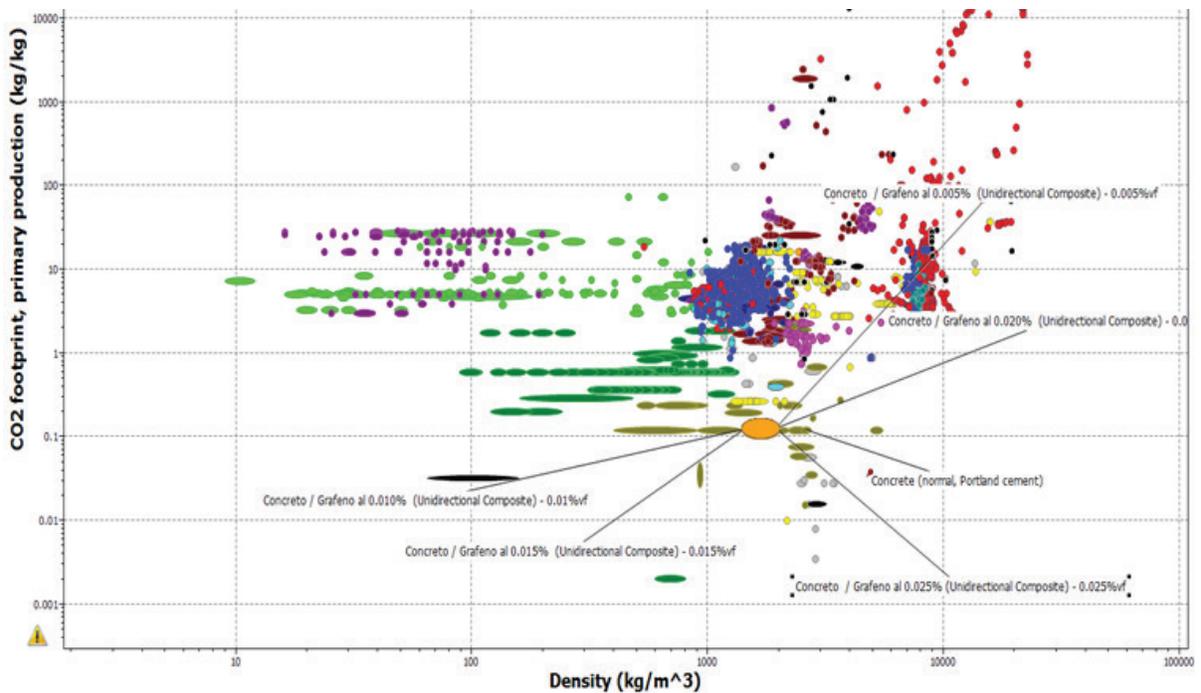


Figura B3. Gráfica donde se muestra la comparación entre la huella de carbono por la producción del concreto convencional y las mezclas de concreto con grafeno respecto a la densidad adquirida con los diferentes porcentajes de grafeno.

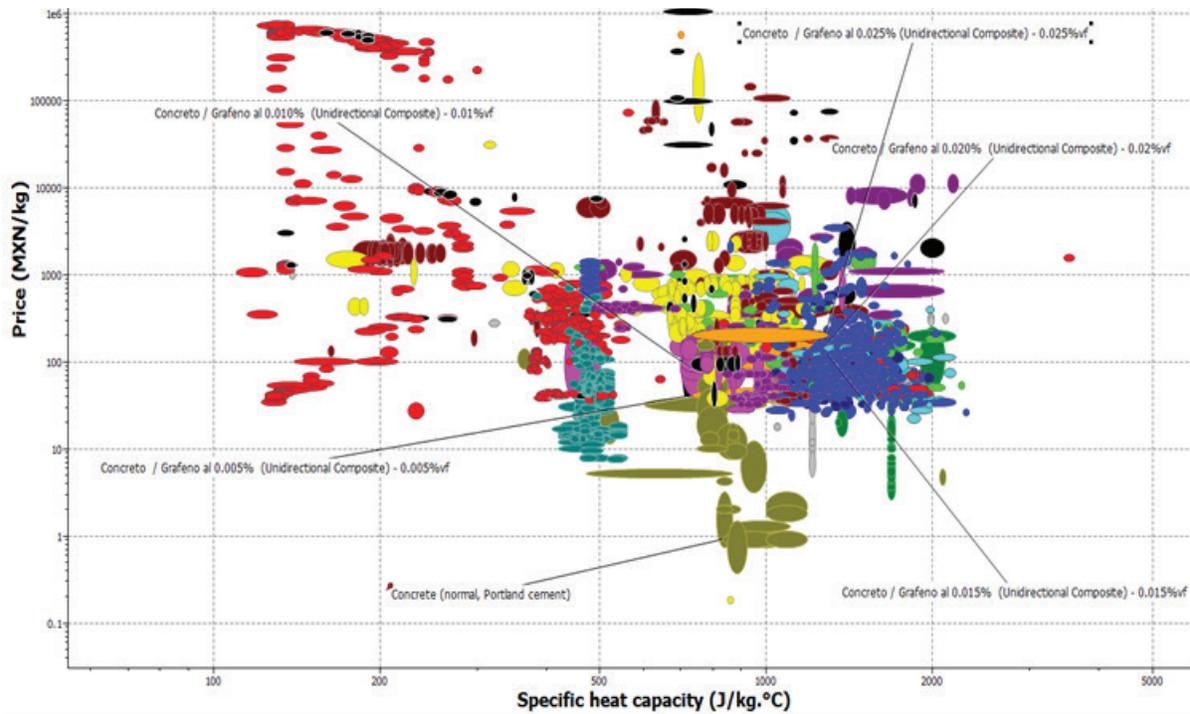


Figura B4. Gráfica donde se muestra la comparación entre el precio del concreto convencional y las mezclas de concreto con grafeno respecto al cambio en el calor específico adquirido con los diferentes porcentajes de grafeno.

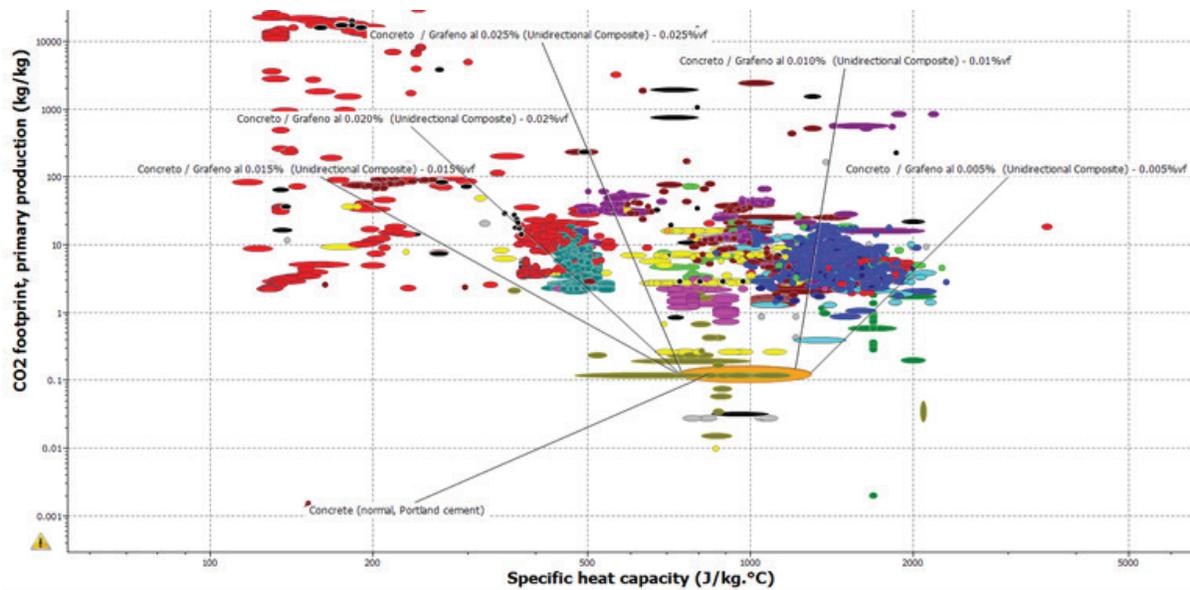


Figura B5. Gráfica donde se muestra la comparación entre la huella de carbono por la producción del concreto convencional y las mezclas de concreto con grafeno respecto al cambio en el calor específico adquirido con los diferentes porcentajes de grafeno.

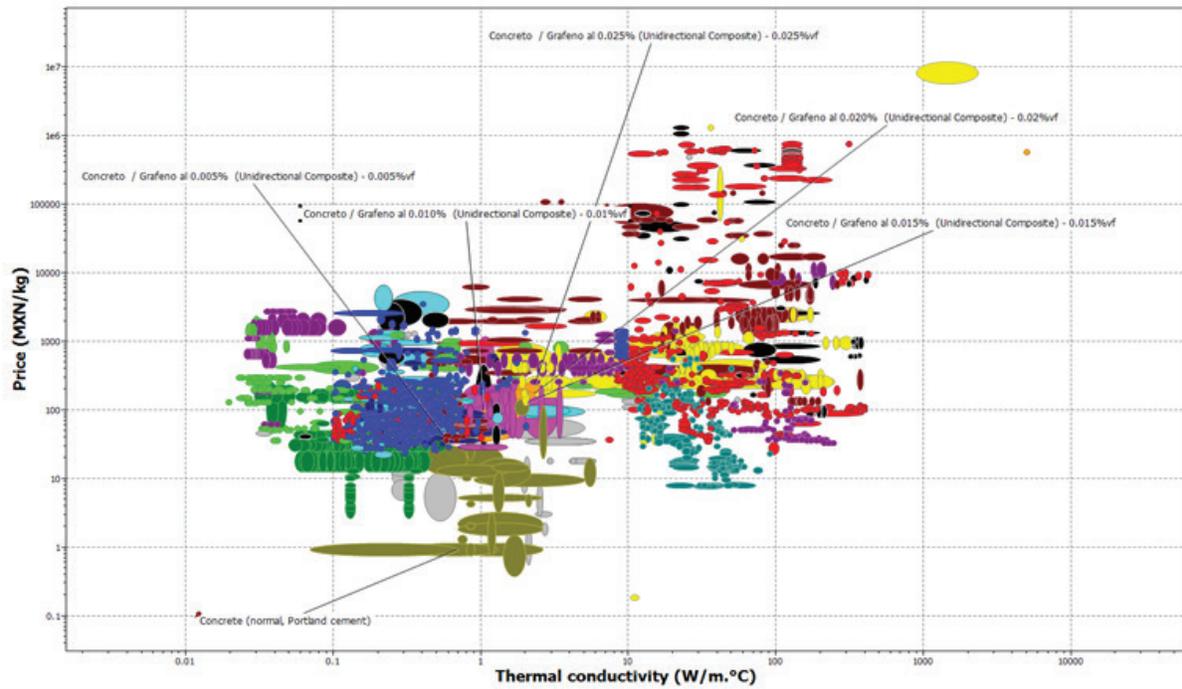


Figura B6. Gráfica donde se muestra la comparación entre el precio del concreto convencional y las mezclas de concreto con grafeno respecto al cambio en la conductividad térmica adquirida con los diferentes porcentajes de grafeno.

REFERENCIAS

1. Óscar Steve. (16 Mayo 2019). Casas hechas de plástico, resisten sismos, y son idea de un ingeniero en Guadalajara, México. Recuperado de: <https://www.xataka.com/ecologia-y-naturaleza/casas-hechas-plastico-resisten-sismos-idea-profesor-mexico>
2. Ibídem
3. Ibídem
4. Groover, M. (1997), Fundamentos de Manufactura Moderna, 1/a. Ed., Prentice Hall, México.
5. Wikipedia. (16 julio, 2019). Material Compuesto. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Material_compuesto
6. Groover, M. (1997), Fundamentos de Manufactura Moderna, 1/a. Ed., Prentice Hall, México.
7. Argos. (Junio, 2018). La energía embebida y su importancia en la construcción sostenible. Recuperado de: <https://colombia.argos.co/Acerca-de-Argos/Innovacion/La-energia-embebida-y-su-importancia>
8. Ibídem
9. Ibídem
10. Ibídem
11. Ibídem
12. Ibídem
13. Ibídem
14. Ibídem
15. Ibídem
16. Ibídem
17. Wikipedia. (14 Agosto, 2019). Huella de Carbono. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Huella_de_carbono
18. Ibídem
19. Ibídem

20. Arvidsson, Rickard, Kushnir Duncan, Sanden Björn A. Molander Sverker. Prospective Life Cycle Assessment of Graphene Production by Ultrasonication and Chemical Reduction. *Environmental Science & Technology*. (2014). *Environ. Sci. Technol.* 2014, 48, 4529-4536
21. Ibídem
22. Ibídem
23. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
24. Ibídem
25. M en Arq. Sofía B. Vargas López, LMSE (Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales). (Octubre 2018). *Materiales de construcción*.9. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones.
26. Instron. (11 Septiembre, 2019). Resistencia a la compresión. Recuperado de: <https://www.instron.com.ar/our-company/library/glossary/c/compressive-strength>
27. La enciclopedia de materiales. A. Rodríguez. (11 Septiembre, 2019). Propiedades térmicas de los materiales. Recuperado de: <http://www.materialesde.com/propiedades-termicas-de-los-materiales/>
28. Ibídem
29. Ibídem
30. M en Arq. Sofía B. Vargas López, LMSE (Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales). (Octubre 2018). *Materiales de construcción*.9. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones.
31. Ibídem
32. Ibídem
33. Ibídem
34. Ibídem
35. Domoterra. (16 Julio 2016). La huella de carbono y los proyectos de construcción. Recuperado de: <http://www.domoterra.es/blog/2016/07/16/la-huella-de-carbono/>
36. Ibídem
37. Ibídem
38. María Elena Arcia. (8 Octubre 2012). Impacto Ambiental de la madera en la construcción. Recuperado de: <http://icasasecologicas.com/impacto-ambiental-del-uso-de-la-madera-en-la-construccion/>
39. Ibídem
40. Ibídem
41. Ibídem
42. Ibídem
43. M en Arq. Sofía B. Vargas López, LMSE (Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales). (Octubre 2018). *Materiales de construcción*.9. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones.
44. Ibídem
45. Ibídem
46. Ibídem
47. María Elena Arcia. (8 Octubre 2012). Impacto Ambiental de la madera en la construcción. Recuperado de: <http://icasasecologicas.com/impacto-ambiental-del-uso-de-la-madera-en-la-construccion/>
48. Wikipedia. (15 Diciembre, 2017). Superficie Específica. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Superficie_espec%C3%ADfica
49. María Elena Arcia. (8 Octubre 2012). Impacto Ambiental de la madera en la construcción. Recuperado de: <http://icasasecologicas.com/impacto-ambiental-del-uso-de-la-madera-en-la-construccion/>
50. Wikipedia. (19 Julio, 2018). Construcción en

- acero. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Construcci%C3%B3n_en_acero
51. Ibídem
52. Ibídem
53. Ibídem
54. Ibídem
55. Ibídem
56. Ibídem
57. Ibídem
58. Ibídem
59. Ibídem
60. Ibídem
61. USG.com. (7 Agosto 2019). Historia de USG. Recuperado de: <https://www.usg.com/content/usgcom/spanish/about-usg/company-overview/history-of-usg.html>
62. Ibídem
63. Ibídem
64. Ibídem
65. M en Arq. Sofía B. Vargas López, LMSE (Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales). (Octubre 2018). Materiales de construcción.9. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones.
66. Ibídem
67. Ibídem
68. Ibídem
69. Ibídem
70. Ibídem
71. UMACON. (28 Febrero 2017). Materiales innovadores en la construcción. Recuperado de: <http://www.umacon.com/noticia.php/es/materiales-innovadores-para-construccion/431>
72. Ibídem
73. Ibídem
74. Mercedes Galiana. (23 Abril 2018). Arquitectura y Empresa. Breathe Bricks, bloques de hormigón visto que purifican el aire exterior. Recuperado de: <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/breathe-bricks-bloques-de-hormigon-visto-que-purifican-el-aire-exterior>
75. Ibídem
76. Ibídem
77. Ibídem
78. Casetas de México. (29 Septiembre 2018). 9 Nuevos materiales de construcción que te sorprenderán. Recuperado de: <https://casetasdemexico.com.mx/9-nuevos-materiales-de-construccion-que-te-sorprenderan/>
79. Ibídem
80. Ibídem
81. Ibídem
82. Ibídem
83. Arena Pública. (30 Mayo 2016). Madera transparente ¿el futuro de la arquitectura ecológica? Recuperado de: <https://www.arenapublica.com/articulo/2016/05/30/4795>
84. Ibídem
85. Ibídem
86. Ibídem
87. Patrick Lynch. (15 Julio 2016). ArchDaily. Investigadores de RMIT desarrollan un ladrillo más eficaz y liviano utilizando colillas de cigarrillos. Recuperado de: <https://www.archdaily.com>

- mx/mx/791421/investigadores-de-rmit-desarrollan-un-ladrillo-mas-eficaz-y-liviano-utilizando-colillas-de-cigarrillos
88. Ibídem
89. Casetas de México. (29 Septiembre 2018). 9 Nuevos materiales de construcción que te sorprenderán. Recuperado de: <https://casetasdemexico.com.mx/9-nuevos-materiales-de-construccion-que-te-sorprenderan/>
90. Ibídem
91. Ibídem
92. Ibídem
93. Revista Construye. (22 Agosto 2019). Las varillas Cabkoma Para sismos. Recuperado de: <http://revistaconstruye.com.mx/innovaci%C3%B3n/2317-las-varillas-cabkoma-para-sismos.html>
94. Ibídem
95. Ibídem
96. Ibídem
97. Ibídem
98. Imperio de la Ciencia. (19 Noviembre 2012). Las Dimensiones de un Átomo. Recuperado de: <https://imperiodelaciencia.wordpress.com/2012/11/19/las-dimensiones-de-un-atomo/>
99. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
100. Ciencia y Presencia. (25 Febrero 2015). Grafeno, una breve historia. Recuperado de: <http://cienciaypresencia.blogspot.com/2015/02/grafeno-una-breve-historia.html>
101. Ibídem
102. Ibídem
103. Ibídem
104. Info Grafeno. (26 julio, 2018). Recuperado de: <https://www.infografeno.com>
105. Imperio de la Ciencia. (19 Noviembre 2012). Las Dimensiones de un Átomo. Recuperado de: <https://imperiodelaciencia.wordpress.com/2012/11/19/las-dimensiones-de-un-atomo/>
106. Wikipedia. (19 julio, 2018). Grafeno. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Grafeno>
107. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
108. Wikipedia. (15 Diciembre, 2017). Superficie Específica. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Superficie_espec%C3%ADfica
109. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
110. Ibídem
111. Ibídem
112. Ibídem
113. Ciencia y Presencia. (25 Febrero 2015). Grafeno, una breve historia. Recuperado de: <http://cienciaypresencia.blogspot.com/2015/02/grafeno-una-breve-historia.html>
114. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
115. Ibídem
116. Ibídem
117. Ibídem
118. Ibídem

119. Ibídem grafeno.pdf
120. Wikipedia. (27 Agosto, 2019). Composite. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Composite>
121. Ciencia y Presencia. (25 Febrero 2015). Grafeno, una breve historia. Recuperado de: <http://cienciaypresencia.blogspot.com/2015/02/grafeno-una-breve-historia.html>
122. Ibídem
123. Ibídem
124. Wikipedia. (14 Agosto, 2019). Huella de Carbono. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Huella_de_carbono
125. Imperio de la Ciencia. (19 Noviembre 2012). Las Dimensiones de un Átomo. Recuperado de: <https://imperiodelaciencia.wordpress.com/2012/11/19/las-dimensiones-de-un-atomo/>
126. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
127. Imperio de la Ciencia. (19 Noviembre 2012). Las Dimensiones de un Átomo. Recuperado de: <https://imperiodelaciencia.wordpress.com/2012/11/19/las-dimensiones-de-un-atomo/>
128. Wikipedia. (19 julio, 2018). Grafeno. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Grafeno>
129. Wikipedia. (15 Diciembre, 2017). Superficie Específica. Recuperado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Superficie_espec%C3%ADfica
130. Argos. (Junio, 2018). La energía embebida y su importancia en la construcción sostenible. Recuperado de: <https://colombia.argos.co/Acerca-de-Argos/Innovacion/La-energia-embebida-y-su-importancia>
131. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
132. Ibídem
133. Ibídem
134. Info Grafeno. (26 julio, 2018). Recuperado de: <https://www.infografeno.com>
135. Wikipedia. (19 julio, 2018). Grafeno. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Grafeno>
136. EcolInventos. (13 de mayo, 2018). Graphenstone, pintura con grafeno que mejora eficiencia energética y absorbe 120 gramos de CO2 por metro cuadrado. Recuperado de: <https://ecoinventos.com/graphenstone-pintura/>
137. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>
138. Fausto Oliveira. (4 abril 2018). Lanzan aditivo de concreto en base a grafeno. Recuperado de: <https://www.construccionlatinoamericana.com/noticias/lanzan-aditivo-para-concreto-en-base-a-grafeno/132417.article>
139. EcolInventos. (13 de mayo, 2018). Graphenstone, pintura con grafeno que mejora eficiencia energética y absorbe 120 gramos de CO2 por metro cuadrado. Recuperado de: <https://ecoinventos.com/graphenstone-pintura/>
140. OVACEN. (2017). El grafeno y sus aplicaciones en la construcción o arquitectura. Recuperado de: <https://ovacen.com/el-grafeno-y-sus-aplicaciones-construccion/>
141. Zacarías Ramírez Tamayo. Forbes. (1 Febrero 2019). Un mexicano en la pugna por el grafeno, el material milagro. Recuperado de: <https://www.forbes.com.mx/un-mexicano-en-la-pugna-por-el-material-milagro/>
142. Ibídem
143. Ibídem

144. Yanturina, R A, Trofimov, B, Ahmedjanov, R M, Structuring in Cement Systems with Introduction of Graphene Nano- Additives. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.262 012017 and Buildings 145 (2017) 251–258
145. Pedro-Rafael DeLaPeña-Benítez, Alfonso García-Santos, Marta Castellote-Armero y Eva Jiménez-Relinque, Universidad Politécnica de Madrid. (España) CSIC. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (España) (1 Marzo 2018). La nanotecnología en la arquitectura: el grafeno. García Santos, Alfonso, Paz Ortega, Irene, Universidad Politécnica de Madrid. (España). (1 Enero 2018). El grafeno: posibilidades del grafeno en la arquitectura. Recuperado de: http://oa.upm.es/49708/1/TFG_Paz_Ortega_Irene.pdf
<http://eds.b.ebscohost.com/pbidi.unam.mx:8080/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=2&sid=ef862100-e5ae-4b98-82e0-46fd7df15a0e%40sessionmgr4007>
146. Gautam Naik, Sridhar Krishnaswamy, Center for Quality Engineering, Northwestern University, Evanston, USA. (3 Diciembre 2015). Room Temperature Humidity Sensing Using Graphene Oxide Thin Films. Recuperado de: https://file.scirp.org/Html/1-2690067_61683.htm
147. Yongchen Liu. College of Energy, Xiamen University, Xiamen, Fujian Province, China. (2017). Application of graphene oxide in water treatment. Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/94/1/012060/pdf>
148. Ibídem
149. Ibídem
150. Ibídem
151. Lisandro Pardo. (2017). El grafeno 3D del MIT es diez veces más fuerte que el acero. Recuperado de: <https://www.neoteo.com/grafeno-3d-del-mit-diez-veces-mas-fuerte-acero/>
<http://news.mit.edu/2017/3-d-graphene-strongest-lightest-materials-0106>
152. Ibídem
153. Oropeza-Pérez, I., Petzold-Rodríguez, A. H., Bonilla-López, C., Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling, Energy and Buildings 145 (2017) 251–258
154. Ibídem
155. Ibídem
156. Ibídem

CRÉDITOS DE IMÁGENES

- I-1. Anibal Carlos, 2014. Energía embebida de ladrillo rojo recocido. TALLER 31: MATERIALES PARA ARQUITECTURA SOSTENIBLE. Recuperado de: <https://slideplayer.es/slide/1111579/> Fuente: Victoria University of Wellington, New Zealand.
www.victoria.ac.nz/cbpr/documents/pdfs/ee-coefficients.pdf
- I-2. Anibal Carlos, 2014. Emisiones de CO₂ de ladrillo rojo recocido. TALLER 31: MATERIALES PARA ARQUITECTURA SOSTENIBLE. Recuperado de: <https://slideplayer.es/slide/1111579/>
- I-3. Arvidsson, Rickard, Kushnir Duncan, Sanden Björn A. Molander Sverker. Prospective Life Cycle Assessment of Graphene Production by Ultrasonication and Chemical Reduction. Environmental Science & Technology. (2014). Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 4529–4536
- I-4. Jesús Márquez, 13 Abril, 2010. Prueba de resistencia a Compresión en cilindro concreto. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=829Ki6IIN34>
- I-5. María Estela Raffino, 30 Abril, 2018. Conductividad Térmica. Recuperado de: <https://concepto.de/conductividad-termica/>
- I-6. Densidades, Creado por Tendenzias Media sl 2019. Recuperado de: <https://espaciociencia.com/densidad/>
- I-7. Calor Específico. Motor Giga, 2019. Recuperado de: <https://diccionario.motorgiga.com/calor-especifico>
- I-8. Gio Ponti, Pier Luigi Nervi, Pirelli Tower (aplicación del concreto en prefabricados), Milán, 1958. Enrique Chao.

- 31 Agosto 2015 Recuperado de: <https://www.facebook.com/Domus/photos/gio-ponti-pier-luigi-nervi-pirelli-tower-milan-1958/10153896690781120/>
- I-9. Universidad de Piura, Perú (aplicación arquitectónica del concreto) 20 Septiembre. Recuperado de: <https://www.flickr.com/photos/udep/29338119414/lightbox/>
- I-10. Bancos Escofet (aplicación del concreto en mobiliario urbano) Recuperado de: <https://docplayer.es/49282883-Nuevo-centro-cultural-de-pozuelo-de-alarcon-ncc.html>
- I-11. Puentes de concreto (aplicación del concreto en ingeniería) Recuperado de: <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/punto-de-fuga/514-puentes-de-concreto-en-el-desarrollo-del-mexico-del-siglo-xx>
- I-12. Acabado en Fachada. 10 Octubre 2018. Autor: Caro Recuperado de: <https://fachadascasas.com/fachadas/acabados-en-fachadas-de-casas-modernas/>
- I-13. Mobiliario 10 Enero 2017 Recuperado de: <https://casaydiseno.com/vestidor-disenos-en-50-ideas.html>
- I-14. Cimbra. Recuperado de: <http://www.treoproyectos.com/construccion-de-segunda-planta-en-edificacion/>
- I-15. Estructura de Madera. Sinergia Energy Savings. 26 Julio 2019. Recuperado de: <https://www.sinergia.tech/grandes-estructuras/>
- I-16. Refuerzo de acero para trabe de concreto Identificador de la imagen: 26863929 Tipo de medios: Foto de archivo Derecho de autor: Thalerngsak Mongkolsin. Recuperado de: https://es.123rf.com/photo_26863929_refuerzo-de-barras-de-acero-para-la-construccion-de-la-armadura.html
- I-17. Estructura metálica. 26 Julio 2019. Identificador de la imagen: 44738616 Tipo de medios: Foto de archivo Derecho de autor: Wang Aizhong. Recuperado de: <https://es.123rf.com/imagenes-de-archivo/aceroti=mc4j860vqtgzwyko2|&mediapopup=44738616>
- I-18. Fachada Acero Cor-Ten. Top Building. 21 Marzo 2017. Recuperado de: <http://www.topbuilding.org/acero-cor-ten/>
- I-19. Mobiliario acero inoxidable. Induaho Industrias Auxiliares del Hogar. Agosto 2013. Recuperado de: <http://www.induaho.com/productos/muebles-en-acero-inoxidable/>
- I-20. La firma de tablaroca más grande del mundo surge tras la fusión de Knauf-USG. 15 mayo 2019. Recuperado de: <https://obrasweb.mx/construccion/2019/05/15/la-firma-de-tablaroca-mas-grande-del-mundo-surge-tras-la-fusion-de-knauf-usg>
- I-21. Panel de cemento (Durock). 7 Agosto 2019. Recuperado de: <https://plafones.com/producto/durock-next-gen-12-x-1-22-x-2-44-mt/>
- I-22. Plafones de yeso. 7 Agosto 2019. Recuperado de: <http://piesa.com.mx/>
- I-23. Clasificación de materiales cerámicos [8].
- I-24. Uso de ladrillo en casa. Hans Kabsch Vela: Las más recientes noticias y obras de arquitectura Casas mexicanas que muestran diversas formas de usar el ladrillo. 6 Mayo 2018
- Fotografía: Carlos Berdejo Mandujano, Onnis Luque y Patrick Lopez. Recuperado de: <https://www.archdaily.mx/mx/tag/hans-kabsch-vela>
- I-25. Block de cemento. (4 Mayo 2010). Recuperado de: <https://pyma.wordpress.com/2010/05/04/block-de-cemento/>
- I-26. Esta vivienda se construyó en 5 días con ladrillos de plástico reciclado. Nicolas Valencia. (25 Julio 2016). Recuperado de: <https://www.archdaily.co/co/792028/en-5-dias-se-construyo-esta-vivienda-con-ladrillos-de-plastico-reciclado>
- I-27. Mercedes Galiana. (23 Abril 2018). Arquitectura y Empresa. Breathe Bricks, bloques de hormigón visto que purifican el aire exterior. Recuperado de: <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/breathe-bricks-bloques-de-hormigon-visto-que-purifican-el-aire-exterior>
- I-28. Mercedes Galiana. (23 Abril 2018). Arquitectura y Empresa. Breathe Bricks, bloques de hormigón visto que purifican el aire exterior. Recuperado de: <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/breathe-bricks-bloques->

de-hormigon-visto-que-purifican-el-aire-exterior

I-29. Arqzon. (22 Mayo 2018) Cemento luminoso. Recuperado de: <https://arqzon.com/2018/05/22/cemento-luminoso/>

I-30. Casetas de México. (29 Septiembre 2018). 9 Nuevos materiales de construcción que te sorprenderán. Recuperado de: <https://casetasdemexico.com.mx/9-nuevos-materiales-de-construccion-que-te-sorprenderan/>

I-31. Arena Pública. (30 Mayo 2016). Madera transparente ¿el futuro de la arquitectura ecológica? Recuperado de: <https://www.arenapublica.com/articulo/2016/05/30/4795>

I-32. Arena Pública. (30 Mayo 2016). Madera transparente ¿el futuro de la arquitectura ecológica? Recuperado de: <https://www.arenapublica.com/articulo/2016/05/30/4795>

I-33. Patrick Lynch. (15 Julio 2016). ArchDaily. Investigadores de RMIT desarrollan un ladrillo más eficaz y liviano utilizando colillas de cigarillos. Recuperado de: <https://www.archdaily.mx/mx/791421/investigadores-de-rmit-desarrollan-un-ladrillo-mas-eficaz-y-liviano-utilizando-colillas-de-cigarillos>

I-34. Patrick Lynch. (15 Julio 2016). ArchDaily. Investigadores de RMIT desarrollan un ladrillo más eficaz y liviano utilizando colillas de cigarillos. Recuperado de: <https://www.archdaily.mx/mx/791421/investigadores-de-rmit-desarrollan-un-ladrillo-mas-eficaz-y-liviano-utilizando-colillas-de-cigarillos>

I-35. Casetas de México. (29 Septiembre 2018). 9 Nuevos materiales de construcción que te sorprenderán. Recuperado de: <https://casetasdemexico.com.mx/9-nuevos-materiales-de-construccion-que-te-sorprenderan/>

I-36. Casetas de México. (29 Septiembre 2018). 9 Nuevos materiales de construcción que te sorprenderán. Recuperado de: <https://casetasdemexico.com.mx/9-nuevos-materiales-de-construccion-que-te-sorprenderan/>

I-37. Revista Construye. (22 Agosto 2019). Las varillas Cabkoma Para sismos. Recuperado de: <http://revistaconstruye.com.mx/innovaci%C3%B3n/2317-las-varillas-cabkoma-para-sismos.html>

I-38. Revista Construye. (22 Agosto 2019). Las

varillas Cabkoma Para sismos. Recuperado de: <http://revistaconstruye.com.mx/innovaci%C3%B3n/2317-las-varillas-cabkoma-para-sismos.html>

I-39. Graphenano Nanotechnologies (Julio, 2017). El grafeno: propiedades y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.graphenano.com/uploads/2017/11/Que-es-el-grafeno.pdf>

I-40. Estructura del Grafeno. Depositphotos ID imagen: 142210116 Copyright: iLexx. Fecha de carga: Feb 15, 2017 Recuperado de: <https://sp.depositphotos.com/142210116/stock-photo-graphene-molecular-structure.html>

I-41. Principales procesos de manufactura con los que se prepara el grafeno [7] [23] [24]

I-42. Grafeno retrasa oxidación en níquel (Fuente: Ajay Krishnamurthy Venkataramana Godhamshetty, Rahul Mukherjee, Bharath Natarajan, Osman Eksik, S. Ali Shojaee. Don A. Lucca, Wencai Ren, Hui-Ming Cheng & Nikhil Koratkar. 2015. Superiority of Graphene over Polymer coatings for prevention of microbially induced corrosion. Nature scientific reports, Noviembre)

I-43. Grafeno 3D (Fuente: David L. Chandler | MIT News Office. Enero 6, 2017. Foto: Melanie Gonick / MIT) Recuperado de: https://www.lasexta.com/tecnologia-tecnologia-ciencia/divulgacion/consiguen-grafeno-diez-veces-mas-fuerte-que-acero_201701245889b0060cf26c6d591a47a4.html

Las figuras 44 a 51 fueron elaboradas por el autor.

I-52. Arvidsson, Rickard, Kushnir Duncan, Sanden Björn A. Molander Sverker. Prospective Life Cycle Assessment of Graphene Production by Ultrasonication and Chemical Reduction. Environmental Science & Technology. (2014). Environ. Sci. Technol. 2014, 48, 4529-4536