



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA 2021-1
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN
CAMPO DE CONOCIMIENTO: TECNOLOGÍAS

Panel modular prefabricado para muros de vivienda de interés social con material nanocompuesto de matriz polimérica

Tesis

Que para obtener el grado de
Maestro en Arquitectura

Presenta:

Jorge Humberto Laguna Copca

Tutor: Mtro. Sergio Alfonso Martínez González (FES Aragón)

Comité Tutorial: Dr. Antonio Sánchez Solís (FES Aragón)

Mtro. Ernesto Ocampo Ruiz (FES Aragón)

Ciudad Nezahualcóyotl, enero del 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA 2021-1
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN
CAMPO DE CONOCIMIENTO: TECNOLOGÍA

**Panel modular prefabricado para muros de vivienda de interés social con
material nanocompuesto de matriz polimérica**

Tesis

Que para obtener el grado de
Maestro en Arquitectura

Presenta:

Jorge Humberto Laguna Copca

Tutor: Mtro. Sergio Alfonso Martínez González (FES Aragón)

Sinodales: Dr. Antonio Sánchez Solís
Mtro. Ernesto Ocampo Ruiz
Mtra. Sofía Chávez López
Mtro. Israel Garduño Bonilla

Ciudad Nezahualcóyotl, enero del 2023



TITULO

Panel modular prefabricado para muros de vivienda de interés social con material nanocompuesto de matriz polimérica

***“Vivienda, arquitectura, desarrollo urbano, financiamiento y mercado, son hoy variables de una ecuación que habrá de definir el futuro de nuestras ciudades”.** Sara Topelson Fridman.
Subsecretaria de Desarrollo Urbano y Ordenación del Territorio. Secretaría de Desarrollo Social.
Gobierno Federal.*





Apartado para oficios de autorización

Apartado para oficios de autorización



Agradecimientos

En el presente proyecto de investigación agradezco a DIOS, por permitirme dar un paso más en mi carrera profesional, por darme la oportunidad cumplir este objetivo y ser quien puso la sabiduría en mi corazón y dio espíritu a mi conocimiento, además de su infinita bondad y amor.

A mi esposa, por ser mi timón, por tú paciencia durante todo este tiempo, por tus consejos, regaños y por acompañarme en los momentos más difíciles y más importantes de mi vida. Te amo. A mis hijos, Dana y Ángel por ser mi motor, que cada día impulsan a superarme y por permitirme robarles mucho de su tiempo para dedicarlo a este proyecto, mis más grandes motivaciones para luchar día con día y conquistar mis metas.

A mis padres, Lore (†) y Humberto por su gran apoyo incondicional, cariño incansable, un ejemplo de fé y perseverancia; sé que ese gran ángel que me acompaña cada día está muy orgullosa y siempre al pendiente de cada paso que damos. A mi hermana, por ser esa gran compañera de viaje y por siempre estar a mi lado. A la familia Saldaña por estar al pendiente de mi familia y a Diana por su gran apoyo en este trabajo.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial mi alma máter la Facultad de Estudios Superiores Aragón de la cual orgullosamente formo parte y al programa de Posgrado en Arquitectura, así como, a cada uno de mis profesores por su guía y por su conocimiento compartido. Al CONACYT por su apoyo e impulso en el desarrollo de la investigación, por permitirme ser participe de este gran programa de estudio.

A mi tutor el Mtro. Sergio Martínez por su dedicación y guía en este proceso, a mis co tutores, por incentivarme al desarrollo de la investigación e innovación tecnológica, al CIDESI-CENTA en Querétaro, al Dr. Edgar Franco, Ceci y Rodrigo, por abrirme las puertas de sus instalaciones para realizar las pruebas de laboratorio. Al IIM, al Dr. Antonio por su apoyo y asesoría en la fabricación de nano materiales.

Al equipo de Quattro lyp, Pili, Vicky y Alex, por su gran apoyo y por darme la oportunidad de seguir aprendiendo de ustedes a diario, pero sobre todo por ser unas personas increíbles, un equipo maravilloso que siempre me han alentado a crecer y seguir adelante.

*Me agradezco por seguir adelante. Por ser valiente, esas veces que quise salir corriendo.
Por seguir intentando sin rendirme. Por soñar y amar a pesar de las circunstancias, me agradezco, me valoro y me felicito.*

Anónimo

Índice

Introducción.....	3
La vivienda y el plástico, problemáticas con una solución común	5
Marco metodológico de la investigación	8
Diagrama del proyecto de investigación	11
Capítulo I. Arquitectura eficiente, entre la bioclimática y la prefabricada en la vivienda en serie.....	12
1.1 La vivienda sustentable en México.....	20
1.1.1 La vivienda mínima como núcleo social	24
1.1.2 Producción de vivienda social en serie.....	27
1.1.3 Adquisición de Vivienda en serie en México	29
1.2 Características básicas de programas sustentables de vivienda en México	30
1.2.1 Evaluación de vivienda sustentable y ahorro energético	36
1.2.2 Aislamiento térmico-acústico en la vivienda	41
1.3 Arquitectura modular y prefabricados.....	46
1.3.1 Soluciones modulares de vivienda	48
1.3.2 Elementos de mampostería	52
1.3.3 Sistemas constructivos en seco.....	57
1.3.4 Sistema de unión de componentes: Ensamblés	62
1.3.5 Materiales constructivos alternativos.....	63
Capítulo II. El plástico reciclado y su refuerzo con nanoarcillas.....	67
2.1 Plástico reciclado, el desecho de un solo uso.....	72
2.2 Características del Polietileno de alta densidad reciclado.....	75
2.3 El reciclaje en México	80
2.4 Tipo y clasificación de reciclaje	83
2.4.1 Recolección, separación y clasificación	86
2.4.2 Proceso de triturado y lavado	87
2.4.3 Sistemas de reciclaje mecánico.....	88
2.5 Aplicaciones de plásticos reciclados en la construcción.....	90
2.6 La arcilla como integrador polimérico.....	92
2.7 Mezcla del material polímero-arcilla	95
2.8 Nanoarcilla, diseño e integración plástica	97
Capítulo III. Metodología de fabricación del panel prefabricado	102
3.1 Análisis de materia prima.....	105
3.1.1 Polímeros.....	105



3.1.2 Arcilla modificada	108
3.1.3 Agente de acoplamiento, Fusabond AU-514D (Anhidrido Maleico)	110
3.2 Equipos y herramientas experimentales	112
3.3 Fase preliminar o de referencia	114
3.3.1 Polietileno de alta densidad extruido	114
3.3.2 Compuesto HDPE y arcilla montmorillonita común.....	115
3.4 Fase 1. Procesamiento del nanocompuesto	115
3.4.1 Dosificación de materiales en la producción del material compuesto	119
3.4.2 Moldeo por inyección de probetas de tracción	121
3.4.3 Pruebas de tensión para el material compuesto	123
3.5 Fabricación de prototipo	127
Capítulo IV. Diseño de panel modular prefabricado	132
4.1 Parámetros de diseño.....	134
4.1.1 Modulación y dimensiones.....	136
4.1.2 Componentes y ensamblajes.....	139
4.2 Simulación digital de comportamiento.....	142
4.2.1 Comportamiento mecánico	142
4.2.2 Comportamiento térmico.....	146
4.3 Prototipo de vivienda, caso de estudio.....	151
4.3.1 Rendimiento y habilitado del material.....	154
4.4 Tiempo y costo de construcción	157
4.5 Características del panel modular	159
4.5.1 Aplicaciones en la vivienda	164
Capítulo V. Análisis de resultados.....	165
5.1 Gráficas de esfuerzo deformación para pruebas de tracción	166
5.2 Producción de segunda fase de nano compuesto	170
5.3 Comparativas de resultados	176
Conclusiones y recomendaciones	182
Ante lo tradicional.....	185
Ante lo económico.....	186
Ante lo social	187
Ante lo ambiental.....	188
Recomendaciones y futuras investigaciones	189
Referencias.....	191
Índice de Tablas y figuras.....	197
Anexos	201

Introducción

Dentro de los procesos de planeación y proyección hacia un desarrollo sostenible, se ha modificado el rumbo en torno a la construcción de espacios habitables, a inicios del siglo XXI se ha concientizado sobre el panorama que presenta la crisis ambiental y el uso respetuoso de los recursos, en este sentido la vivienda también atraviesa por un proceso de desarrollo, al transformar las necesidades del usuario y del entorno que lo rodea, hacia un panorama de vivienda sustentable.

Es indispensable pensar en el futuro de nuestro bien común al momento de hacer uso de los recursos que se encuentran a nuestro alcance, es por ello que se vuelve necesaria la búsqueda de estrategias para optimizar el aprovechamiento de los materiales que tenemos a la mano, evitar la generación de desperdicios y promover el reúso, la reducción y el reciclaje.

Conceptos como economía circular, ecodiseño y sustentabilidad, destacan dentro de las premisas de solución en diversas disciplinas, por tal motivo, se plantea en este trabajo una propuesta de diseño que pueda responder a las exigencias ambientales, económicas y sociales, en función de generar una aportación al sector del desarrollo de vivienda en serie, mismo que presenta retos importantes en aspectos de calidad, eficiencia, dimensiones, costos, entre otros, a pesar de dar solución a la necesidad creciente de vivienda.

La arquitectura responde a una realidad social, política y económica, dentro de un entorno físico, condiciones climáticas, por lo que, para el desarrollo de alternativas habitacionales en los sectores de bajos recursos, es fundamental contribuir para generar las condiciones óptimas de adquisición de vivienda social, por lo que conocer las problemáticas que afectan estos sectores de la sociedad aporta a una solución óptima los procesos de diseño, planeación y construcción.

La vivienda de interés social en serie responde a una necesidad a gran escala, aunque este concepto se relaciona con la percepción de que la vivienda carece de una adecuada solución de los espacios arquitectónicos, a un hábitat que no es confortable o construcciones que tiene deficiencias en los procesos constructivos y en el uso de materiales de baja calidad. Por tal motivo, la implementación de un sistema modular basado en materiales plásticos reciclados, esboza notas de una solución viable a las exigencias que se tienen por parte de este sector de la población, ya que, si lo vemos desde una perspectiva de desamarrarlo sustentable, aporta grandes beneficios derivado de conceptos como el de industrialización, reproducción de manera sistemática y masiva.

Un sistema modular sustentable contribuye a mejorar la eficiencia en la construcción de vivienda en serie, se disminuyen tiempos de construcción al

considerar de manera previa el diseño y fabricación de módulos, la disminución de merma en desperdicios por ajustes o cortes en los materiales, eliminar las demoliciones que debilitan la estructura de la vivienda con la finalidad de alojar instalaciones hidro-sanitarias, pluviales o eléctricas, garantiza disminuir fugas y fisuras, entre otros.

Por lo tanto, se busca el aumento del coeficiente térmico al incluir materiales plásticos, con lo que aporta una mejora en la regulación de la temperatura al interior a la vivienda (aislante térmico); en resumen, un sistema modular sustentable contribuye a la disminución de tiempos y costo en la ejecución de vivienda de interés social, se apega a un diseño de solución arquitectónica, estructural y de instalaciones, lo cual contribuye a generar vivienda de interés social de calidad, sustentable y a bajo costo.

En las últimas décadas (finales del S. XX- inicio del S.XXI) se ha hecho énfasis en la búsqueda de una Arquitectura bioclimática para contribuir a la reducción del daño al medio ambiente, generado entre otros factores, por el desarrollo acelerado de las ciudades y los desperdicios derivados del consumismo desmedido (residuos plásticos), ya que, al modificar y adaptar el entorno para satisfacer las necesidades del hombre indudablemente se hace una afectación abrupta al medio ambiente.

Una importante manifestación es la necesidad de una vivienda digna y confortable, la cual es considerada como una de las necesidades más básicas, aunque el crecimiento demográfico exponencial origina un rezago importante de soluciones habitacionales, y a pesar de ser un derecho para cualquier ser humano, las condiciones económicas y sociales dificultan el acceso a una vivienda digna.

Esta problemática se ve reflejada sobre todo en zonas de bajos recursos en países latinoamericanos, que a la par del crecimiento de las grandes ciudades origina problemas en los contornos de las mismas, un ejemplo de ello es la Ciudad de México y su área metropolitana las cuales ha crecido indiscriminadamente al punto de requerir ampliar proyectos como el Aeropuerto "Felipe Ángeles" en Santa Lucia, Estado de México, un proyecto de gran magnitud que representa desarrollo, pero a la vez implica necesidades complejas como la vivienda caracterizada por la zona bioclimática del centro del país. En México, la solución se torna a dos trayectorias principales: la vivienda en serie producida por empresas desarrolladoras y la autoconstrucción.

El arquitecto tiene el compromiso de crear soluciones a necesidades básicas de protección, confort y descanso, dentro de un entorno ambiental bondadoso, aunque en los últimos años este balance de adaptación y modificación respetuoso del entorno no se ha respetado, ya que para integrar la arquitectura al ambiente se deben respetar 3 premisas fundamentales: ser justa socialmente, sana con el medio ambiente y económicamente viable.

El problema de investigación se centra en proponer una solución de vivienda integrando un material plástico, producto de desechos de un solo uso, el polietileno de alta reciclado (LDPEr-HDPEr), que por medio de la aplicación de nanotecnología en un material con bondades en la construcción, como es la arcilla, se analiza la propuesta de paneles modulares prefabricados, orientados a contribuir positivamente en los costos, eficiencia de procesos constructivos y confort térmico al servir como aislante para la vivienda de interés social en serie. Genera una alternativa de vivienda económica y eficiente, a la par de contrarrestar el daño generado al medio ambiente.

La vivienda y el plástico, problemáticas con una solución común

El objetivo general de la investigación es diseñar un panel modular basado en un nano compuesto de matriz polimérica (polietileno de alta densidad reciclado) y una carga de refuerzo (nanoarcillas modificadas) para mejorar sus propiedades y ser capaz de utilizarse como elemento constructivo para muros de vivienda.

En cuanto a los objetivos particulares puedo destacar la relevancia que implica el integrar un residuo plástico, por lo que es fundamental identificar las características de la composición de la mezcla entre arcilla y polietileno de alta densidad reciclado (en adelante HDPEr) para mejorar las condiciones de este material, al compararlo con materiales tradicionales. Por consiguiente, es fundamental aplicar los procesos de obtención de nanocompuestos entre las arcillas y la matriz polimérica, que para este caso se opta por el HDPEr.

Posteriormente se compararán las condiciones mecánicas del material polímero-arcilla con relación con materiales tradicionales utilizados para la construcción de muros. Con lo cual, deriva en la posibilidad de evaluar las condiciones del material de plástico reciclado aplicado a sistemas constructivos de muros; para coadyuvar la eficiencia constructiva y energética para dar cumplimiento a los parámetros establecidos para programas sociales y crediticios de la vivienda en serie.

De igual forma se pretende comprobar la relación que existe entre el proceso de integración de materiales reciclados por medio de arcillas modificadas y, por otro lado, el proceso de expansión del reciclaje de residuos plásticos de un solo uso como proceso de fabricación del panel modular. Por último, se plantea diseñar los procesos de fabricación, suministro y colocación de elementos constructivos modulares sustentables, que funcionen como un sistema integrador para incrementar la eficiencia de los procesos constructivos en menor tiempo y a menor costo.

Por consiguiente, la hipótesis planteada es que: si integran arcillas modificadas como refuerzo de polietileno de alta densidad reciclado para el diseño del panel prefabricado, entonces mejoran las propiedades necesarias para cumplir con las características de un elemento estructural, lo que propicia una mejora en la eficiencia energética y constructiva para las viviendas.

En el marco de la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible efectuada en 2015, con más de 150 líderes mundiales, se emitió el documento titulado “Transformar Nuestro Mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”, fue adoptado por los 193 Estados Miembros, incluyendo a México. Como actor global, México participó de manera activa para la implementación de estrategias con la finalidad de implementar estrategias para dar cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Podemos destacar algunos objetivos que profundizan en la generación de desarrollo de vivienda; en primer lugar, destaca el **Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles**, en el cual se destaca que *“Más de la mitad de la población mundial vive hoy en zonas urbanas. En 2050, esa cifra habrá aumentado a 6.500 millones de personas, dos tercios de la humanidad. Mejorar la seguridad y la sostenibilidad de las ciudades implica garantizar el acceso a viviendas seguras y asequibles y el mejoramiento de los asentamientos marginales.”* (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2021). El objetivo es proporcionar a la población urbana que habita en viviendas precarias una alternativa de ciudad y asentamientos humanos inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

En el caso de México, alrededor de 9.2 millones de viviendas se encuentran en condición de rezago habitacional. Presentan rezagos en los materiales o en la construcción de sus viviendas, lo que significa que los materiales con los que se encuentran contruidos son considerados como precarios (Secretario de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, 2021). Y si a estas cifras le incluimos los problemas que presentan en las condiciones económicas de las familias enfocadas a la adquisición de una vivienda digna, ya que la compra de vivienda nueva sólo es accesible para quienes perciben más de cinco salarios mínimos, ya que a partir de ese nivel de ingreso se puede acceder a créditos hipotecarios públicos y privados, lo que se traduce en la exclusión aproximadamente de 73.6 millones de mexicanos quienes no pueden acceder al mercado formal de vivienda. (Herrera, 2021)

México es un país en el cual se ha reiterado el compromiso de respaldar el derecho a la vivienda adecuada que mantengan los principios de inclusión social, eficacia económica y protección ambiental, por lo que en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024, se reconoce la producción de vivienda como una tarea del estado debido a que esta es un derecho humano.

En cuanto al **Objetivo 12. Producción y consumo responsable**, es fundamental realizar acciones para garantizar modalidades de consumo y producción sostenible, ya que, el progreso económico y social conseguido durante el último siglo ha estado acompañado de una degradación medioambiental que está poniendo en peligro los mismos sistemas de los que depende nuestro desarrollo futuro.

Por tal motivo, la producción de vivienda sostenible enfocada al ahorro y consumo de energía durante su construcción y uso final para habitarlas, se debe encaminar a estrategias de diseño y uso racional de materiales, los cuales aporten de manera significativa para propiciar ahorros energéticos. Conforme a cifras emitidas por la Organización de las Naciones Unidas a ONU *“Los hogares consumen el 29% de la energía mundial y, en consecuencia, contribuyen al 21% de las emisiones de CO2 resultantes.”* (Organización de las Naciones Unidas, 2021).

A estos datos se le suma la contaminación generada durante el proceso de construcción, en el cual este sector es responsable de consumir el 50% de los recursos naturales, el 40% de la energía y del 50% del total de los residuos generados.

Aunque los programas e impulsos están encaminados a disminuir estas catastróficas cifras, la contaminación ya se encuentra depositada en nuestro planeta, en vertederos o tiraderos municipales que sirven como bote de basura de las grandes ciudades, contaminando fuentes de recursos como ríos y lagos, el propósito de este proyecto de investigación es aportar en lo posible una forma de integrar los residuos sólidos plásticos de un solo uso a un segundo ciclo productivo.

Un problema muy preocupante y que ha crecido de manera alarmante en las últimas décadas es el manejo de desechos de plástico de un solo uso, que se sitúa principalmente en los contornos urbanos de las grandes ciudades y su área metropolitana, la Ciudad de México y algunos municipios del Estado de México no son la excepción, por lo que representa un problema constante al considerar al plástico como una alternativa económica para el almacenaje de alimentos, productos u objetos de limpieza, juguetes, embalaje de mercancías, etc.

Con base en datos emitidos por la Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México, en esta ciudad habitan casi 9 millones de personas, que en conjunto tiran mil 350 millones de bolsas al año, además, esta cantidad no considera las bolsas que se utilizan y se desechan en la zona conurbada, en la que habitan más de 12 millones de personas (Nava, 2020). Ante este contexto la concepción de transformar los residuos en materia prima se vuelve el inicio de un ciclo dentro de los criterios de una economía circular que beneficie a cada uno de los eslabones de esta cadena y sobre todo al dar una alternativa más de uso de materiales reciclados en la construcción.

En torno al **Objetivo 13. Acción por el clima**, podemos destacar los compromisos de las naciones se tornan a realizar acciones con la finalidad de reducir las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para el año 2030. En este sentido México tiene planteamientos sobre todo en la producción de vivienda con Programas sustentables de entidades Crediticias para adquisición de vivienda, por ejemplo de INFONAVIT (Sisevive Ecocasa) con la calificación del Índice de

Desempeño Global (IDG), tomando como referente un prototipo base y realizando una mejora en los materiales o ecotecnologías que se ofertan, de este modo se puede ser acreedor de estímulos económicos como Subsidios Federales (SHF), lo cual beneficia a familias de bajos recursos para alcanzar los montos requeridos para adquisición de vivienda.

Tomado como base el block gris hueco y el tabique rojo recocido, los cuales se conciben como un elemento prefabricado modular recurrido para la construcción de vivienda, y que, a pesar de su funcionalidad en la construcción tradicional de muros, presenta diversas áreas de oportunidad para la mejora de los procesos constructivos.

Un ejemplo de ello es la dimensión, al poder ampliar las medidas del bloque se disminuyen los puntos de falla en la unión con mortero y se disminuyen los tiempos de ejecución. El uso de ensambles para disminuir procesos que utilicen agua (colados, morteros) reducen los tiempos de construcción y costos en transporte al ser un material más ligero. Para la solución de instalaciones hidro-sanitarias en baños y cocinas, se pueden integrar a los módulos prefabricados apegados a los criterios indicados previamente en proyectos de solución de instalaciones e incluso anexar apoyos para la colocación de cimbra de elemento de concreto como castillos y losas.

Dentro de la configuración y fabricación de paneles modulares se plantea integrar el pellet plástico reciclado de polietileno de alta y baja densidad (rLDPE-HDPEr), retomando este desecho como recurso y alternativa sustentable, para poder integrarlo de una forma adecuada se toma como base un material muy bondadoso y utilizado desde tiempos inmemorables en la construcción, como lo es “la arcilla”, contribuyendo en algunas deficiencias que presenta el plástico como material constructivo de vivienda y que a su vez, mejora la eficiencia energética de este material, sirviendo también como aislante térmico y acústico, para contribuir a las condiciones de una vivienda sustentable, económica y comfortable.

La aportación de un sistema constructivo modular-sustentable, va dirigido a promover la eficiencia constructiva y energética de viviendas de interés social logrando cumplir por una parte con las características de aislamiento térmico contribuyendo por una parte al confort de los ocupantes de la vivienda.

Marco metodológico de la investigación

Para el desarrollo de la investigación es fundamental conocer el marco metodológico que se pretende realizar, por lo que según Balestrini (2006) el marco metodológico “Es el conjunto de procedimientos lógicos, tecno operacionales implícitos en todo proceso de investigación, con el objeto de ponerlos de manifiesto y sistematizarlos; a propósito de permitir descubrir y analizar los supuestos del estudio y de reconstruir los datos, a partir de los conceptos teóricos convencionalmente operacionalizados”

(p.125). En otras palabras, es la estructura sistemática que permite la interpretación de los resultados producto de los procesos de recolección, ordenamiento y análisis de la información en función del tipo de investigación sobre el problema a investigar.

Por tal motivo, se realizará de inicio una investigación de tipo exploratoria para identificar los factores relevantes poco estudiados y con ello encaminar la investigación, por lo que sus resultados constituyen una visión aproximada de dicho objeto, es decir, un nivel superficial de conocimientos.

Dado que el estudio pretende analizar parámetros de eficiencia y mejora de condiciones de comportamiento del material, comparado con materiales y procesos tradicionales, se plantea el diseño de investigación de tipo experimental, que según Fidias G. Arias (2012), lo define como “un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)” (p.125). Por tal motivo, al ser resultados medibles y comparables con parámetros ya establecidos se tiene un enfoque cuantitativo.

En cuanto a la medición de variables se aplicará de tipo transversal, donde los datos se recolectan en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado (Sampieri, 2003), teniendo en cuenta que el proyecto de investigación tiene un sustento teórico, se procede a realizar una investigación por su nivel de tipo descriptivo, misma que se define como “los que buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que se someta a análisis. (Danhke, 1989, p. 80).

Dentro de las técnicas e instrumentos de recopilación de información primordialmente se realiza una investigación documental, retomando datos y aspectos de autores relacionados con el problema de investigación, posteriormente se realizara investigación de campo tomando como base los procesos de empresas recicladoras de plástico y fuentes de sistemas de manejo de residuos como tiraderos y sitios de recolección; de igual forma se toma como base el proceso de fabricación de elementos constructivos como bloqueras o tabiqueras, como referencia.

Se plantea producir un nano compuesto de matriz polimérica por medio de un proceso de intercalación en fundido, se utilizará el proceso de fusión del polímero y su mezcla con el silicato modificado, por medio de la técnica de extrusión de doble usillo.

Conforme a la información obtenida para enfatizar en el proceso de mezclado en fundido, se plantea iniciar el proceso de experimentación en una primera fase, con la fabricación de probetas al integrar el polietileno de alta densidad reciclado y la arcilla modificada variando las proporciones y condiciones de producción, con la finalidad de obtener el porcentaje de mezcla que favorezca a las propiedades del material, con los cuales se obtendrán datos preliminares de las características

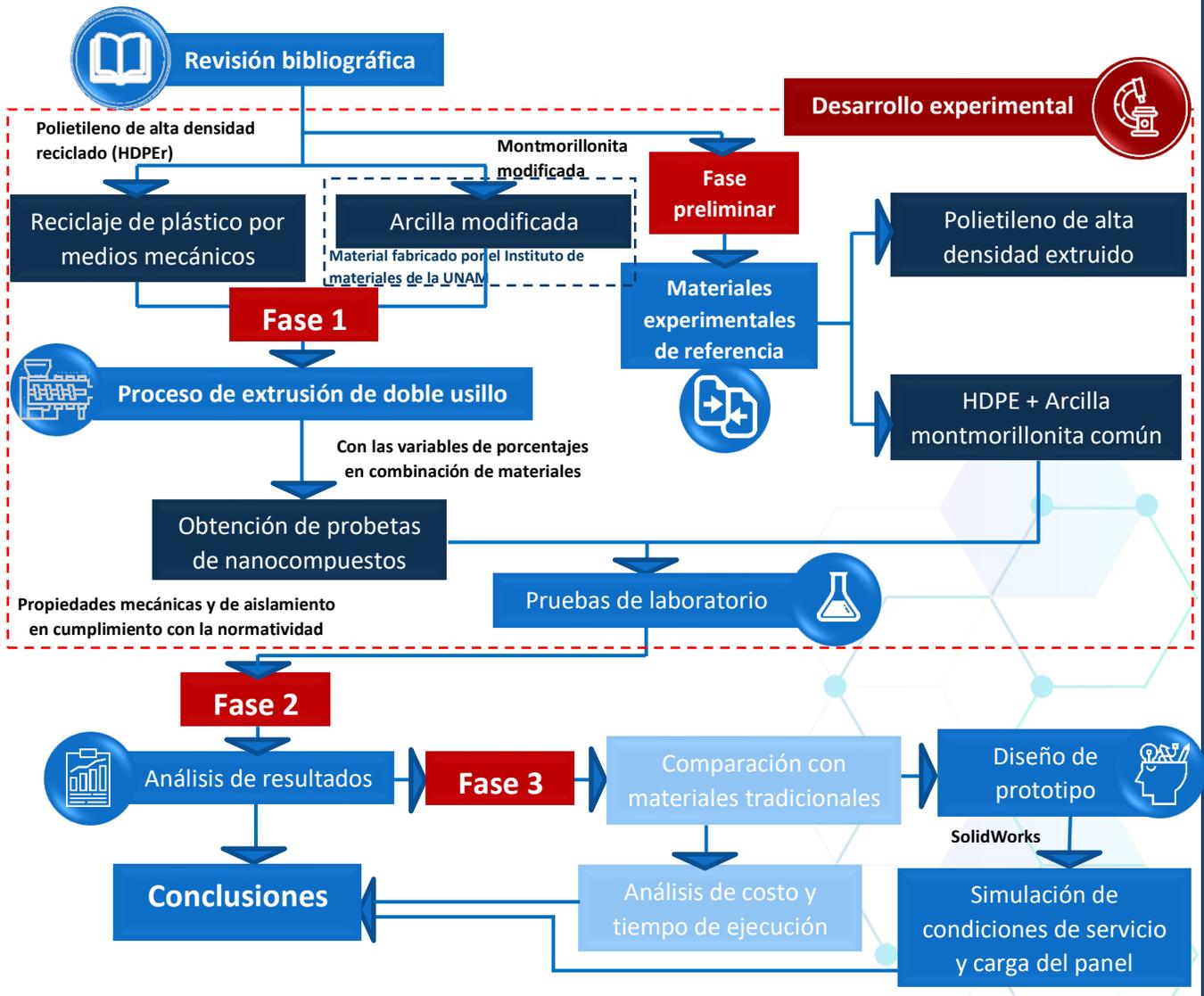
mecánicas y aislantes ante los cuales poder realizar una comparativa con materiales tradicionales, posteriormente se determina la mezcla óptima para la fabricación de los prototipos base para una segunda fase de pruebas.

Finalmente se pretenden tomar mediciones del material polímero – arcilla por medio de pruebas de laboratorio conforme las normatividades y criterios de construcción aplicables, así como de vivienda sustentable en programas de adquisición de vivienda en México, para de esta forma ser comparados con materiales constructivos tradicionales.



Diagrama del proyecto de investigación

Figura 1 Planteamiento general de proyecto de investigación



Nota: Se plantea de inicio la revisión bibliográfica y estudio del arte (Capítulo I y II), para posteriormente realizar el desarrollo experimental el cual comprenden 3 fases, iniciando con la fabricación de probetas interactuando con 4 posibles variantes de materia prima para obtener las mejores condiciones del compuesto, posteriormente se realizan pruebas de laboratorio para determinar las condiciones del material y por último se comparan los datos obtenidos con las condiciones actuales de materiales tradicionales, elaboración propia.

Arquitectura eficiente, entre la bioclimática y la prefabricada en la vivienda en serie

*“La extensión del arte de la vivienda es el arte de vivir, vivir en armonía con los impulsos más profundos del hombre y con su ambiente adoptado o prefabricado”
Charlotte Perriand (1903-1999)*

Capítulo I. Arquitectura eficiente: bioclimática y prefabricada para la vivienda en serie.

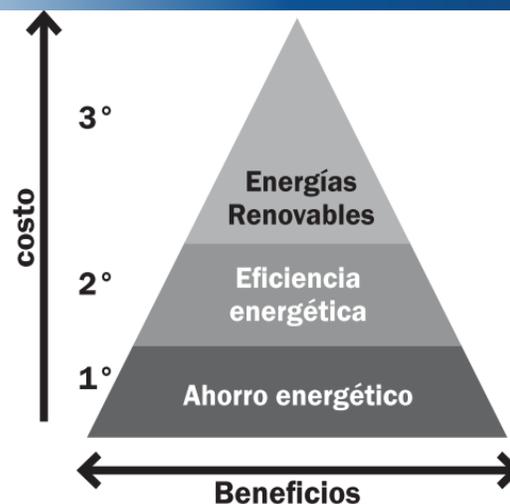
En el proceso de adaptación del hombre en su entorno físico, es posible remitirnos a los inicios de la sociedad moderna¹ (finales del siglo XVII y se consolida hacia el final del siglo XVIII), la cual ha desencadenado la evolución de diversas herramientas y materiales para la construcción de edificios o espacios en donde desarrollar actividades cotidianas, las técnicas y tradiciones han traspasado el tiempo al extremo de transformar su entorno y minimizar la importancia de la naturaleza misma.

En este sentido, es posible destacar a la Arquitectura bioclimática, como la encargada de integrar los espacios construidos interpretando las características del clima y el entorno que los rodea para realizar una actividad o grupo de acciones que se introducen a un espacio, ya sea, para referirnos a una casa habitación, edificio de oficinas, un teatro al aire libre, un estadio, un poblado, ciudad, entre otras, partiendo de lo rural hasta lo urbano.

En definición de Gálvez (2008):

La arquitectura bioclimática es aquella que tiene en cuenta el clima y las condiciones del entorno para ayudar a conseguir el confort, tanto en interiores como en exteriores, y que para ello utiliza exclusivamente el diseño y los elementos arquitectónicos, tratando de no utilizar sistemas mecánicos, que son considerados más bien como sistemas de apoyo. (p.7)

Fig. 1.1 Estrategias de evaluación energética en edificaciones.



Nota: El gráfico presenta la pirámide de los niveles de evaluación energética en las edificaciones, retomado de Menjívar M, Arquitectura Bioclimática como parte fundamental para el ahorro de energía en edificaciones, 2013, p. 124.

¹ La modernidad nace en un período caracterizado por un movimiento progresista de industrialización y el triunfo revolucionario-burgués de 1789”, según Humberto Daza en el artículo la Sociedad Moderna, Revista Venezolana de Economía y Ciencias sociales. 2 de mayo-agosto de 2010.

Aunque el proceso de diseño bioclimático no ha surgido de manera espontánea, es producto de muchos años de trabajos de investigación y de aplicaciones prácticas, por lo que puedo remitirme a procesos constructivos de arquitectura vernácula, en donde se revaloraron conocimientos empíricos y su refuerzo de una generación a otra, al adaptarse a las condiciones climáticas de cada región, derivando de esta forma de análisis e investigación científica se han desencadenado importantes aportes y avances dentro de las tecnologías constructivas.

Otra definición es la que realiza Rodríguez (2015), describe el concepto de Arquitectura Bioclimática de la siguiente manera:

... la arquitectura diseñada sabiamente para lograr un máximo confort dentro del edificio con el mínimo gasto energético. Para ello aprovecha las condiciones climáticas de su entorno, transformando los elementos climáticos externos en confort interno gracias a un diseño determinado... aboga por una actuación lógica, minimizando las necesidades energéticas con estrategias pasivas, diseño, orientación, uso de aislamientos... usando equipos que consuman menos, energías renovables. **Ahorro + Eficiencia + Energías renovables** (p.14).

Sin embargo, no quiere decir que una arquitectura bioclimática cumpla en su totalidad con esta finalidad, ya que existen soluciones que utilizan mayor energía aun considerándose viviendas bioclimáticas.

En este aspecto, las propuestas de nuevas tecnologías también han aportado numerosos avances para la evaluación y cuantificación de parámetros de interacción entre el edificio y su entorno, tanto mediciones para brindar confort térmico, como acústico y un mejor aprovechamiento lumínico, al utilizar a nuestro favor las condiciones en las que se desarrolla, se aportan innovadoras respuestas para el diseño y construcción de nuevos espacios, se deja en claro que el objetivo primordial es reducir el consumo energético y generar el mejor aprovechamiento de los espacios.

La solución de espacios que prioriza los conceptos bioclimáticos se debe concebir de forma integral. En primer lugar, se debe resaltar el uso de los sistemas pasivos de enfriamiento o calentamiento natural, adecuar técnicas constructivas más eficientes para la envolvente, con la finalidad de lograr una alta eficiencia energética en el edificio.

Un sistema pasivo es fundamental en el control de variables al interior de los espacios, por el uso racional de los materiales como mecanismos de transferencia de calor del edificio mismas, las cuales se pueden clasificar como radiación²,

² Radiación es la transferencia de calor entre superficies que no están en contacto, por medio de ondas electromagnéticas.

conducción³, convección⁴ y evaporación⁵. Las técnicas que contribuyen al control de la ganancia de calor por radiación, facilitan o limitan la incidencia solar sobre la membrana arquitectónica, las superficies exteriores del entorno inmediato y a través de las aberturas del edificio. En el caso de las técnicas para el control de la conducción del calor al interior utilizan el aislamiento y la inercia térmica de los materiales para aumentar el amortiguamiento térmico⁶. (Gálvez, 2008, p. 40)

Dentro de la jerarquización de evaluación energética de edificios, se puede considerar en primer lugar al orden más sencillo donde los edificios que solo se ocupan de conseguir una eficiencia energética una vez construidos, sin incluir más variantes ecológicas de las derivadas del ahorro energético a largo plazo. Se adecua al máximo, desde el diseño del edificio y desde la resolución técnica y constructiva, en donde, se busca un balance energético valorando las ganancias y pérdidas de los requerimientos para lograr un confort climático, obviando las relaciones más complejas que se pueden establecer entre el ambiente y la arquitectura.

En segundo lugar, se sitúan aquellos en donde el balance energético⁷ global incluye el proceso constructivo, desde el proceso de extracción de los materiales, su elaboración industrial, puesta en obra, uso, su reciclaje y destrucción cuando termine su vida útil. Se realiza un análisis de los materiales de construcción y su utilización a menor costo en términos energéticos o su impacto en la contaminación ambiental; al rechazo, a una mejora del sistema productivo, la capacidad de regular las posibles ganancias energéticas obtenidas durante el uso del edificio, priorizando las técnicas capaces de introducir en el proceso de construcción materiales procedentes del reciclaje.

En este punto es donde se centra la presente investigación, se priorizan aquellas técnicas capaces de introducir en la construcción materiales procedentes del reciclaje y, a su vez, se fomentan aquellos otros materiales (en su proceso de mantenimiento o sustitución, utilicen plásticos de un solo uso) que puedan ser introducidos en un nuevo ciclo o lo que denominamos “economía circular”⁸.

En un tercer orden, se situarían aquellas edificaciones que no sólo se preocupan de mantener buenos balances energéticos, sino también, edificios que se adecuan al medio en un sentido más extenso. Es decir, desde aquellas

³ Conducción: es la transferencia de calor entre superficies en contacto directo.

⁴ Convección: es la transferencia de calor a moléculas de gas a líquido en contacto con el organismo.

⁵ Evaporación: se refiere al paso del estado líquido al estado gaseoso. Cuando el fenómeno se produce únicamente en la superficie de la masa líquida se designa como evaporación

⁶ También conocido como decremento **térmico**, mide la reducción de la temperatura cíclica de una de las superficies (generalmente la exterior) respecto a la temperatura cíclica de la superficie contraria. Por lo general se expresa como un valor fraccional.

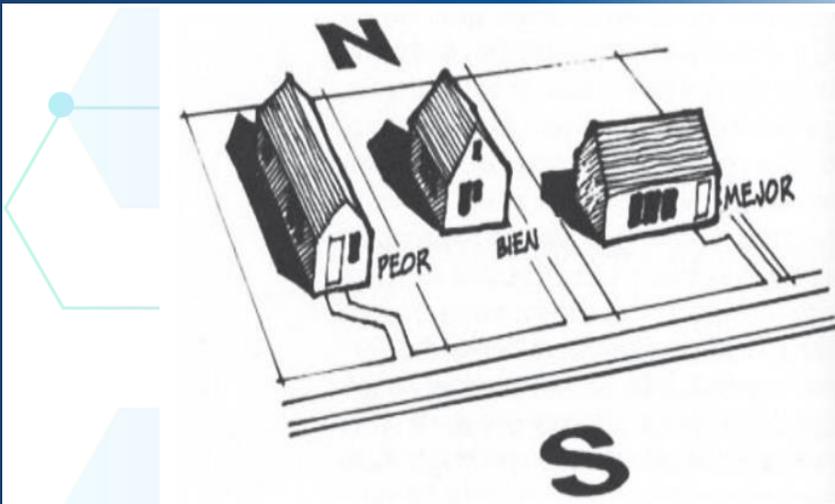
⁷ Diferencia entre los valores totales de energía entrante y saliente. Si el balance es positivo, se produce un calentamiento; si es negativo, sobreviene un enfriamiento.

⁸ La economía circular es un concepto económico que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, reduciendo al mínimo los residuos.

construcciones que se introducen en el paisaje y disminuyen su impacto visual al integrarse de manera orgánica, hasta aquellas otras que se preocupan por los recursos naturales.

Es así que, la inclusión o el mantenimiento de la vegetación (fomentando la integración de especies de la región en el proyecto) y el uso racional del agua (mediante la introducción de redes separativas de aguas grises y negras, la depuración selectiva por filtros verdes o la captación de agua de lluvia) fomentan el aprovechamiento y adecuada integración de elementos arquitectónicos a un entorno natural. En otras palabras, como lo menciona Menjívar (2013) “los sistemas complementarios que, utilizados en beneficio de la edificación, son perfectamente compatibles e incluso coadyuvantes en el ahorro energético del edificio y en la obtención de las condiciones de confort deseadas.” (p. 4)

Figura 1.2 Orientación adecuada de una edificación



Nota: La imagen ejemplifica los criterios prioritarios en el sembrado de viviendas, retomado de Monjivar, R., Arquitectura Bioclimática como parte fundamental para el ahorro de energía en edificaciones, 2013

Algunos de estos criterios de diseño bioclimático no se adecuan a las prioridades que se establecen en el mercado de la vivienda en serie, es decir, a pesar de que diversos estudios indican que un medio pasivo de acondicionamiento climático aporta al regir la orientación que tendrá la vivienda, en dirección al recorrido que tendrá el sol en el transcurso del día, así como, en el transcurso de meses y años, como se observa en la figura 1.2, ya sea para concentrar la mayor parte de incidencia solar o por el contrario minimizar las ganancias solares en condiciones para climas tropicales, con la finalidad de generar confort térmico al interior y así evitar el uso de elementos mecánicos de acondicionamiento climático.

Aunque, en condiciones en las que se proyectan los desarrollos habitacionales se tiende a priorizar el aprovechamiento del área autorizada para construir, buscando

siempre el mayor uso del suelo en la siembra de las viviendas, lo anterior derivado a factores de proyección de mercado, tanto del valor del predio como de las planeaciones financieras del desarrollo del proyecto y las aportaciones en proporción de los usos de suelo autorizados.

Lo anterior, deriva a estar limitado a generar un diseño óptimo en orientaciones, ya que, se cuenta en la mayoría de los casos con las 4 orientaciones⁹ de vivienda dentro del desarrollo, es decir, que para el cálculo de asoleamiento se deben considerar las condiciones para los prototipos de vivienda hacia las 4 orientaciones, por tal motivo se deben considerar otras alternativas más genéricas para el ahorro de energía dentro de las viviendas, como por ejemplo: proporción de superficies acristaladas, protecciones solares, aislamientos, inercia térmica, ventilación e iluminación natural, sistemas pasivos de acondicionamiento, vegetación, entre otros.

Fig. 1.3 Sembrado general de Desarrollo de viviendas



Nota: Se presenta el ejemplo de un sembrado de viviendas de interés social ubicado en Querétaro, obtenido de <http://hogaresherso.com.mx/fraccionamientos-en-queretaro/villas-del-rey/>

En la actualidad la Arquitectura se está tornando a un proceso de transformación y cambio de paradigmas en aspectos de diseño para nuevos

⁹ Norte, sur, este y oeste, definiendo la orientación a 45° en caso de inclinaciones en referencia a los 4 cuadrantes antes mencionados.

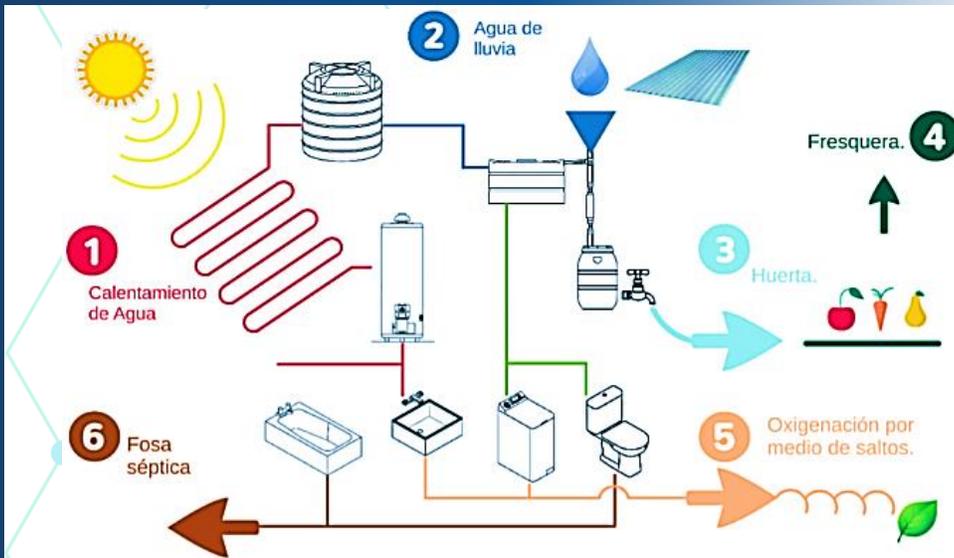
Fig. 1.4 Conjunto Habitacional de interés social en Xalapa México



Nota: Imagen panorámica que ejemplifican la masividad de la vivienda en conjuntos habitacionales, fuente: Los arquitectos en el desarrollo de la vivienda en el México actual, 2010

elementos, materiales, procesos constructivos y en la forma de introducir edificios a los entornos naturales, todo esto bajo un concepto de ecología arquitectónica, aunque no están siendo tomadas en cuenta en su totalidad, pues se evaden: “debido principalmente a que la arquitectura también está ligada a aspectos comerciales y esto en algunas ocasiones incide en decisiones de ejecución de proyectos sin tomar en cuenta los problemas ambientales, pues algunas veces “tecnológicamente” pueden ser corregibles también”, menciona Menjívar M. (2013, p.123)

Fig. 1.5 Diagrama de ejemplos de ecotecnias



Nota: Se ejemplifican ecotecnias aplicables en la vivienda; 1. Calentamiento de agua, 2. Agua de lluvia, 3. Huerta, 4. Fresquera, 5. Oxigenación por saltos, 6. Fosa séptica, obtenido de Ecotecnias. tecnicas respetuosas del ambiente. 2016. miceeconew sumario522.axd

Dos conceptos que engloban las características de estos criterios y sistemas en busca de mejorar el aprovechamiento de recursos y disminución del daño generado por emisión de gases contaminantes son: el de **ecotecnia** y

ecotecnología; ecotecnia proviene del griego, Eco (*oicos*) que significa casa y tecnia (*technía + -la*) que significa técnica. (miceeconew_sumario522.qxd, 2016)

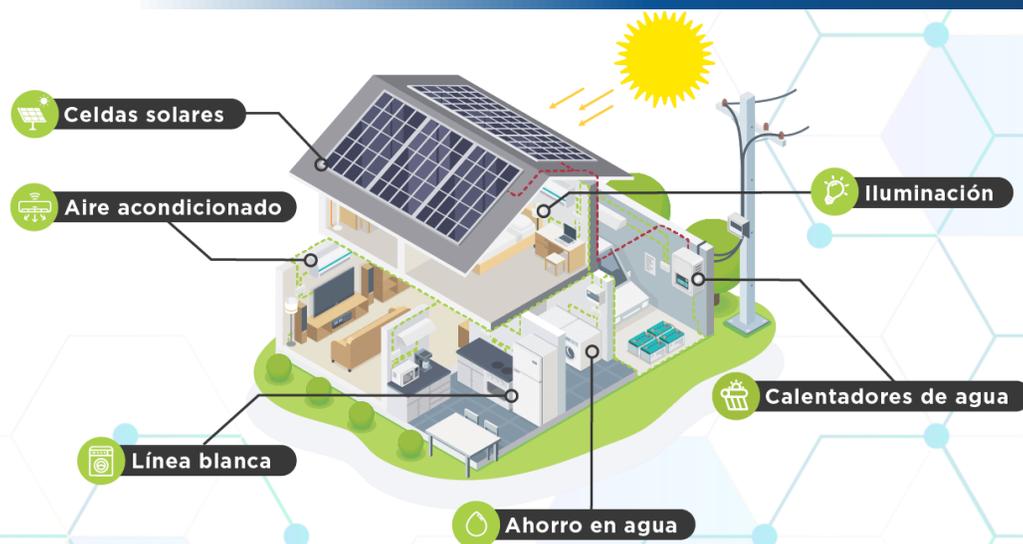
Con base en la definición con la que describe Armando Deffis Caso (1994) a las ecotecnias, es posible entender el funcionamiento y clasificación de las mismas, “las ecotecnias son un conjunto de procedimientos que se sirve de una ciencia para conseguir un objetivo. Es la aplicación de conceptos ecológicos mediante una técnica determinada para lograr una mayor concordancia con la naturaleza” (p. 26).

En cambio, Arias (2009) define a las ecotecnologías como: “la ecotecnología es una ciencia aplicada que integra la tecnología y la ecología. La aplicación práctica de la ecotecnología son las ecotecnias. Son herramientas tecnológicas que ofrecen ventajas ambientales sobre sus contrapartes tradicionales” (pp. 26-27).

Aunque ambos tienen el objetivo de contribuir al mejoramiento de las condiciones en que se utilizan los recursos energéticos, es importante entender la implementación y origen de cada una de ellas, ya que de esto dependerá el alcance y campo de aplicación que a cada una corresponde.

Para el caso de las ecotecnias sirven a una ciencia entendiéndola como una técnica o conjunto de procedimientos para generar productos o servicios, basados en conocimientos empíricos desarrollándose por medio del aprendizaje y la experiencia, y que son utilizados de manera constante perfeccionándose con la constante práctica y con la habilidad de quien lo ejerce. (Deffis Caso, 1994)

Fig. 1.6 Diagrama de ejemplos de ecotecnologías



Nota: Se ejemplifican ecotecnologías aplicables en la vivienda; 1. Celdas solares, 2. Aire acondicionado, 3. Iluminación, 4. Calentadores de agua, 5. Línea blanca, 6. Ahorro en agua, fuente: JJ Materiales sustentables, 3 de septiembre de 2021. <https://jjsustentable.com.mx/vales-de-ecotecnologias/>

En este sentido, las ecotecnias están muy relacionadas con conceptos de Arquitectura Bioclimática, que se enfoca en el aprovechamiento de los recursos haciendo énfasis en propiciar las mejores prácticas de diseño y solución de servicios para generar el mayor confort posible, evitando en lo mayormente posible alterar el entorno en el que se desarrolla el edificio, es más, se preocupa por la integración de los espacios y el mayor aprovechamiento de su entorno, lo que condiciona la solución del mismo a valorar las condiciones generadas por los aspectos que lo rodean, directa e indirectamente.

Es en este punto es donde podemos referirnos a los criterios de equilibrio de uso y generación de energía, ya que, al considerar las condiciones de asoleamiento o ubicación del edificio en la solución del proyecto, se toman bases prácticas y algunos principios que benefician a las condiciones del mismo edificio. El considerar los vientos dominantes o las condiciones de uso para determinar colocar elementos que aporten al desempeño de los espacios tienden a solucionar ciertas necesidades elementales del hombre, sin complicaciones más allá que las que pudieran surgir en la solución técnica de los elementos constructivos, derivado de su fácil acceso en su mayoría no generan costos tan considerables para su aplicación comparado con los beneficios generados (equilibrio costeable).

En cambio, las ecotecnologías representan un conjunto de instrumentos y procedimientos de tipo industrial que permiten resolver problemáticas de carácter técnico, que con el uso de las ciencias pueden comprobarse previo a su aplicación. Esta tecnología suele asociarse a la innovación actual como respuesta a problemáticas en diversos ámbitos, en este caso la emisión de gases contaminantes ha revolucionado en aspectos de eficiencia, programación y monitoreo de diversas funciones aplicables a sistemas autónomos o programables para el correcto manejo de las energías dentro de un espacio construido. (miceeconew_sumario522.qxd, 2016)

Un aspecto importante que en ocasiones limita la incorporación de ecotecnologías a los edificios es el costo de este tipo de soluciones, ya que no es de fácil acceso como las ecotecnias, derivado de las posibilidades económicas de inversión a pesar de obtener un equilibrio económico a cierto plazo, la inversión inicial estanca en muchas ocasiones la aplicación de sistemas autónomos.

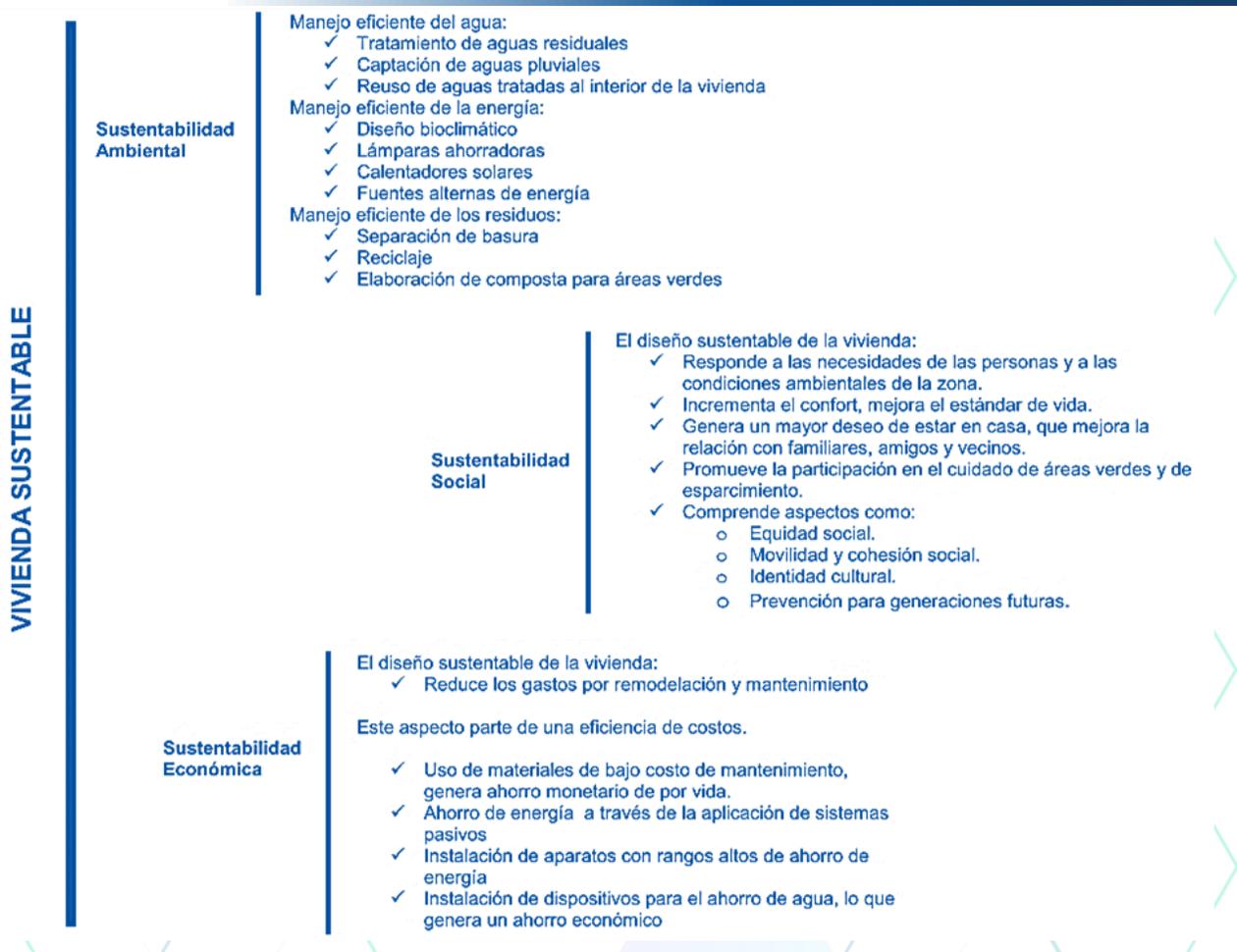
1.1 La vivienda sustentable en México

En el contexto de una mejora y aprovechamiento en el uso de energías, así como, del consumo responsable de agua dentro de los espacios arquitectónicos, se promueve una disminución paulatina en el uso de equipos o sistemas mecánicos que consumen grandes cantidades de energía eléctrica, mismos que están enfatizados a climatizar o acondicionar los interiores de los edificios o espacios habitables; estos sistemas artificiales se utilizan cada vez mas y con mayor frecuencia, lo que representa una solución costosa y carencia de diseño. Tomar en cuenta las

condiciones del entorno en que se desarrolla es fundamental en soluciones arquitectónicas en el presente y a futuro.

Dentro de los Objetivos de Desarrollo Sustentables (ODS) de la ONU, Fenosa (2018) recalca que "...mediante el punto 11 el compromiso de los países firmantes para lograr ciudades y asentamientos humanos inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, pues las estimaciones del sector para 2050, indican que se construirán 7 millones de viviendas capaces de producir 25 millones de toneladas de gases de efecto invernadero" (p. 8). Por tal motivo, empresas y gobiernos están trabajando en entregar alternativas que garanticen la reducción de la contaminación generada por las construcciones.

Figura 1.7 Categorización de la vivienda sustentable por rubro



Notas: Cuadro sinóptico desglose de la categorización de elementos requeridos para una vivienda sustentable. Fuente: Pulido, M., El papel del desarrollo sustentable en los grandes desarrollos de vivienda en México, 2009

Es por ello, que la vivienda sustentable puede categorizarse en 3 grandes rubros, sustentabilidad ambiental, social y económica. Dentro de ellas se engloban un grupo de acciones y características de la vivienda sustentable, como se muestra a continuación (figura 1.7).

De igual forma se retoma el concepto de *vivienda sustentable*¹⁰ y la participación de entidades financieras para poder acceder a un crédito hipotecario, ya que el tema económico es fundamental para cubrir la necesidad de vivienda.

... en México es un tema nuevo (el desarrollo sustentable) que necesita de un gran análisis para determinar tanto su factibilidad técnica como su viabilidad económica. En este sentido, diversas instituciones y dependencias como SHF, SEDESOL, SEMARNAT, SENER, CONAVI, Infonavit, FOVISSSTE, están haciendo un esfuerzo para lograr que el desarrollo de la vivienda se lleve a cabo mediante un desarrollo urbano más ordenado y que contribuya a formar ciudades sustentables, autosuficientes y que constituyan un motor de desarrollo económico y regional. (SEMARNAT, 2017, p.11)

Se hace hincapié en la aparente diferencia en costo de producción de vivienda sustentable comparada con una vivienda tradicional, utilizando algunas alternativas de materiales y soluciones eco-tecnológicas que se encuentran en el mercado. “Es un hecho que construir una vivienda con criterios sustentables eleva el precio de la misma, y la vuelve menos accesible a nichos de población de bajos ingresos. Aunque no existe un consenso respecto al sobre costo que implica construir este tipo de vivienda, algunas opiniones de expertos indican que los costos pueden aumentar hasta un 45% respecto del costo de una vivienda tradicional, dependiendo del nivel de criterios sustentables que se consideren en la misma.”

Por tal motivo, estamos frente a una realidad distinta de lo que plantean las consideraciones englobadas en una Arquitectura bioclimática, dentro de las esferas tangibles que padecen las familias de sectores marginadas de población, por lo que es fundamental apearse a las características de soluciones establecidas por entidades de gobierno con la finalidad de incentivar el uso de materiales y diseños en pro del medio ambiente y el confort de los usuarios.

Dentro de la labor que realiza el Arquitecto frente a una solución sustentable, Pérez (2017) realiza un análisis en la tesis teórica titulada “*La participación del Arquitecto en la construcción de la vivienda sustentable*”, en donde expone de una forma dura y realista la actualidad de la vivienda de autoconstrucción tomando como caso de estudio el Cerro del Judío, ubicada al sur de la Ciudad de México. Pérez expone los principales sistemas constructivos de la zona enfocados a una mejora de

¹⁰ Este término se refiere a la utilización de prácticas y materiales respetuosos con el medio ambiente, que poseen ventajas ambientales para la planeación, diseño, ubicación, construcción y operación de viviendas.

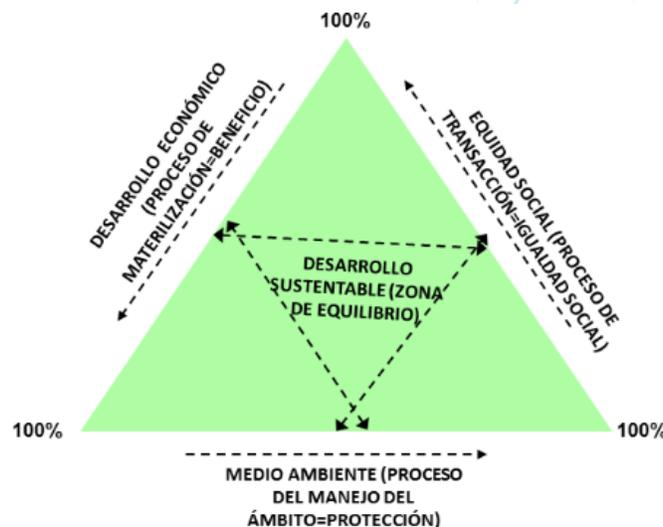
la vivienda sustentable y una visión real a lo que cotidianamente leemos de la vivienda sustentable a nivel mundial.

Conceptos de diseño bioclimático planteados en libros de arquitectura sustentable como por ejemplo La casa ecológica autosuficiente en la que se muestran ejemplos de muros con aislamiento térmico que aparentemente mejoran el acondicionamiento interior de la vivienda son actualmente difíciles de reproducir pues los materiales que se requieren para su construcción no son fáciles de conseguir o bien han quedado obsoletos. (Pérez B. D., 2017, p. 93)

En este documento, Pérez concluye con una visión racional por parte del Arquitecto referente a las condiciones de ubicación, clima y materiales de la zona para la solución de los proyectos de vivienda, ya que en la mayoría de las propuestas de vivienda ecológica no se enfoca en estos factores y por consecuencia no se cumple con el objetivo de construir una vivienda sustentable.

Expone las condiciones económicas en las que se encuentra nuestro país, y es ahí donde el Arquitecto toma un papel fundamental para la solución de la vivienda sustentable. Pues en países de primer mundo que cuentan con sistemas automatizados, avanzados sistemas de climatización o costosos materiales que aumentan el aislamiento térmico y acústico.

Fig. 1.8 Áreas de Desarrollo Sustentable



Nota: En el gráfico se articulan las 3 vertientes del desarrollo sustentable: el desarrollo económico, social y medio ambiental. Fuente: Modificado a partir de la propuesta de Axel Dourojeanni, “Procedimientos de Gestión para el Desarrollo Sustentable”, Santiago de Chile (2000).

Por otro lado, empresas dentro de la industria de la construcción y en específico del aislamiento térmico, emiten manuales y publicaciones con recomendaciones como Fenosa (2018), “Considerando que el sector de la edificación en el mundo es responsable de más del 50% de las emisiones contaminantes, desde la fabricación

de materiales, transporte, procesos constructivos del inmueble y el uso que se le da una vez terminado, el problema del calentamiento global obliga a la industria a adaptarse para utilizar sistemas y recursos menos dañinos...” (p.4)

De la misma forma expone algunos conceptos enfocados a la vivienda sustentable. “El sector de la construcción contribuye de manera importante a ese deterioro en sus distintas fases (extracción y fabricación de materiales, diseño de la edificación y de sus instalaciones que influyen decisivamente en el rendimiento energético de la misma, gestión de la obra y de sus residuos...) y necesita dar un notable giro hacia la adopción de decisiones encaminadas hacia la sostenibilidad” (Fenosa, 2018, p.12).

Dentro de las buenas prácticas resalta la importancia de la sostenibilidad en la vivienda como lo menciona el INFONAVIT en su manual titulado ¿Qué funciona y qué no en la vivienda? (2018). Explica que “el sector vivienda puede incorporar nuevas tecnologías y herramientas, aplicar un diseño innovador y utilizar materiales para fomentar una mayor sostenibilidad ambiental. El diseño de una vivienda, por la distribución de sus espacios y por los materiales que incorpora, puede tener un impacto importante en el ambiente” (p. 54).

También se debe destacar el uso de procesos de reciclaje dentro y fuera de la vivienda, “Para la operación diaria de los edificios y de las ciudades, es posible incorporar mecanismos y herramientas para disminuir el consumo de energía y agua. Asimismo, el reciclaje y reutilización de desechos que se originan de la vivienda contribuye a disminuir el daño al medio ambiente” (INFONAVIT, 2018, p. 54)

1.1.1 La vivienda mínima como núcleo social

En el proceso de construcción de vivienda depende en gran medida del mercado y de las políticas implementadas por los gobiernos para su financiamiento, lo que abre un abanico muy amplio de posibilidades y características; como el precio final en el mercado, forma de producción, superficie construida o número de cuartos, ubicación y servicios, entre otros.

La clasificación más utilizada por la industria de la construcción es determinada por precio. Se toma como fundamento el precio y la forma de producción de la vivienda, por lo que se puede clasificar en económica, popular y tradicional, llamadas comúnmente como viviendas de interés social, así como las viviendas media, residencial y residencial plus, construyéndose en conjuntos habitacionales y fraccionamientos. (Código de Edificación de la Vivienda, 2017)

Según las características de la tipología habitacional en México, se clasifica como de interés social a la vivienda que cuenta de 40 a 71 metros cuadrados de superficie edificada y un programa arquitectónico que incluye cocina-comedor, 1 a 2 recamaras, 1 baño o 1 ½ baños, 1 lugar de estacionamiento y todos los servicios básicos. Estas características en conjunto darían como resultado que la familia

mexicana dispusiera de una vivienda digna, con los ambientes mínimos para poder realizar sus actividades íntimas y privadas a un bajo costo.

De tal modo que, para entender la importancia e interés que representa este tipo de viviendas para la solución de un problema que cada vez es más crítico y creciente, sobre todo en los perímetros de las grandes ciudades, a partir de esta premisa es que se denomina “vivienda de interés social”¹¹, ya que es punta de lanza para logra una conciencia de ser y estar, lo que constituye su patrimonio inicial y posiciona a los integrantes de familias de este sector económico a un mejor desarrollo individual y social.

Tabla 1.1 Clasificación de la vivienda por precio promedio

PROMEDIOS	ECONÓMICA	POPULAR	TRADICIONAL	MEDIA	RESIDENCIAL	RESIDENCIAL PLUS
Superficie construida promedio (en m ²):	40	50	71	102	156	más de 188
Costo promedio:						
Unidad de medida de actualización (UMA)	hasta 118	de 118.1 a 200	de 200.1 a 350	de 350.1 a 750	de 750.1 a 1,500	mayor de 1,500
Número de cuartos y cajones de estacionamiento	1 Baño Cocina Área de usos múltiples	1 Baño Cocina Estancia-comedor De 1 a 2 recámaras 1 cajón de estacionamiento	1 y ½ Baños Cocina Estancia-comedor De 2 a 3 recámaras 1 cajón de estacionamiento	2 Baños Cocina Sala Comedor De 2 a 3 recámaras Cuarto de servicio 1 a 2 cajones de estacionamiento	De 3 a 4 baños Cocina Sala Comedor De 3 a 4 recámaras Cuarto de Servicio Sala familiar 2 o 3 cajones de estacionamiento	De 3 a 5 baños Cocina Sala Comedor De 3 a más recámaras De 1 a 2 cuartos de servicio Sala familiar Más de 3 cajones de estacionamiento Gimnasio Salón de juegos Jardín

Notas: Los conceptos de vivienda económica, popular y tradicional, son considerados como Vivienda de interés social. El cambio de VSMGM (Veces salario mínimo general mensual) a UMA responde al “DECRETO por el que se declara reformadas y adicionadas diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de desindexación del salario mínimo”, obtenido del Código de Edificación de la Vivienda, 2017.

¹¹ Una vivienda de interés social, también conocida como VIS, es una vivienda que cumple con los estándares mínimos de calidad, construcción y habitabilidad.

La vivienda de interés social en México tiene un rezago importante en cuanto a la oferta para los sectores de la población con menos recursos. De acuerdo con informes emitidos por el Registro Único de Vivienda (RUV), conforme a la comparativa del cierre de abril de 2019, el número de proyectos muestra una caída de 24% respecto al mismo periodo del año anterior (economiahoy.mx, 2019), en el caso particular de la periferia de la ciudad de México existe un crecimiento desordenado consecuencia de la mala planeación urbana y una clara imposición de las construcciones sobre el medio natural ya que se han utilizado áreas que originalmente estaban consideradas como zonas de reserva ecológica para la construcción de viviendas (Pérez B. D., 2017, p. 5).

Para entender esta problemática es necesario entender el papel que desempeña la vivienda en la sociedad, y como bien lo describe Pérez-Pérez (2016).

La vivienda, particularmente la de interés social, constituye uno de los ejes más importantes en la planificación urbana; una vivienda adecuadamente diseñada en función de las características, necesidades y expectativas de los usuarios, su entorno y la relación con la ciudad, resulta esencial para el desarrollo psicológico y social, favorece la sustentabilidad urbana y contribuye a elevar el bienestar con un menor costo futuro, reduciendo a la vez el impacto ambiental. Sin embargo, los modelos para la gestión de la vivienda de interés social que han predominado en América Latina durante las últimas décadas, generan soluciones orientadas hacia los aspectos cuantitativos, mientras que la calidad, y particularmente la del diseño, es subvalorada (p. 3).

Otro enfoque es el que aporta García (2009) para determinar el contexto que tiene la vivienda como elemento básico del desarrollo urbano: “El tema de la vivienda es uno de los más importantes a nivel nacional y por lo tanto forma parte de los ejes de la política pública ... destaca la importancia del desarrollo habitacional sustentable como una manera de frenar los impactos generados por la acelerada urbanización que se ha observado principalmente en la ZMCM así como en las principales ciudades del país” (p. 9).

La participación de las empresas desarrolladoras toma un papel fundamental y una alternativa creciente que ha cubierto a gran escala esta necesidad de vivienda en el país, pero con continuas deficiencias de calidad y soluciones para un correcto desarrollo sustentable de viviendas. “Hasta ahora es evidente la falta de interés de los grandes desarrolladores de vivienda, hacia el tema del desarrollo sustentable en los grandes conjuntos habitacionales que producen, ello se ve reflejado en la falta de dotación de equipamientos, en la mala calidad de las construcciones...” (Pulido, 2009 p. 10)

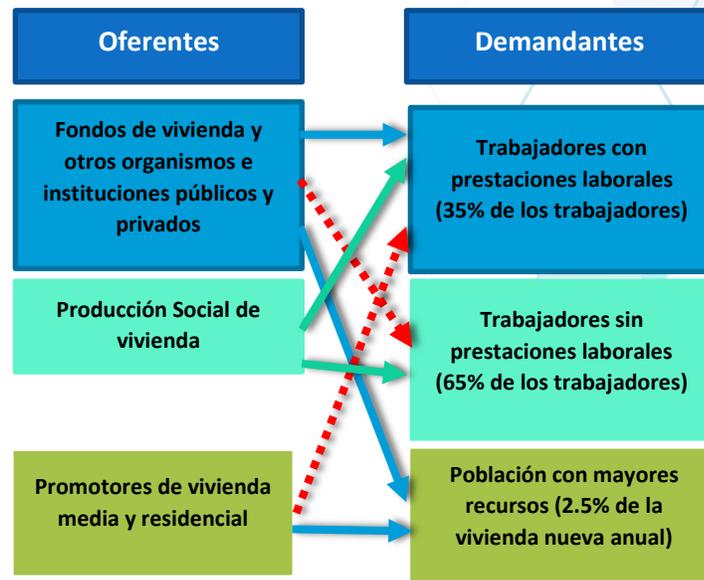
Fernández, D. (2016) por su parte, define su papel como: “La vivienda social es de los sectores que más demanda tiene nuestro país el déficit que existe de ella se fundamenta no solo en la capacidad que tienen las desarrolladoras para construirlas, sino también en la condición económica de la población para adquirirla” (p. 1).

Esto origina un enfoque hacia los procesos de construcción de vivienda de interés social en serie, la cual funge como una herramienta masiva con la finalidad de implementar soluciones sustentables que contribuyen en ambos sentidos. Para las desarrolladoras de vivienda al impulsar la venta e integración al mercado de viviendas sustentables y a los propietarios en cuanto a los apoyos económicos federales. Y en sí a la disminución de consumo de energía y agua, propiciando una vivienda confortable a bajo costo.

1.1.2 Producción de vivienda social en serie

Bajo las características generales de la oferta y la demanda de vivienda en México, podemos clasificar los sistemas de producción habitacional en dos tipos: el institucional y el no institucional; en este último participan tanto los desarrolladores y constructores de menores ingresos que recurren a la autoconstrucción, como los de vivienda residencial cuyo mercado se encuentra en los sectores de mayores ingresos, ya sea por encargo o por iniciativa propia.

Figura 1.9 Esquema general de mercado habitacional en México



En el esquema se muestran las interacciones entre oferentes y demandantes en el mercado habitacional de vivienda. Retomado de Torres, R., "La producción social de vivienda en México", 2006.

Torres, R. (2006), menciona los tipos mayoritarios o principales de vivienda que ofrecen estos dos sistemas de producción habitacional mismos que podemos clasificar, a su vez, en tres grandes grupos:

- i) Vivienda Completa Nueva Institucional (VCNI): corresponde a los créditos otorgados por todos los organismos e instituciones, públicos y privados, en

el programa de vivienda completa nueva (incluye los créditos otorgados en los subprogramas vigentes). Su cuantificación procede de la estadística oficial de financiamiento a la vivienda.

- ii) Producción Social de Vivienda (PSV): corresponde a las viviendas que son construidas con apoyo financiero institucional en los programas de vivienda incompleta (pie de casa y autoconstrucción) y de infraestructura (lotes con servicios), más las viviendas construidas sin apoyo financiero institucional por la población de menores recursos, tanto en el campo como en la ciudad. Su cuantificación se realiza a partir de la estadística oficial de financiamiento a la vivienda y de la información de los censos generales de población y vivienda.
- iii) La construcción de vivienda para la población de mayores ingresos en el país, normalmente autofinanciada o financiada mediante préstamos hipotecarios de las instituciones mercantiles de crédito. Este segmento del mercado habitacional se incorpora al análisis de este estudio sólo de manera residual (p. 16).

De igual forma, como la oferta de vivienda completa nueva institucional está determinada principalmente por:

1. La disponibilidad de recursos de las instituciones y los organismos públicos de vivienda (recursos que provienen mayoritariamente de las aportaciones mensuales que realizan los propios trabajadores a los fondos de vivienda), así como por las características y condiciones que se establecen en sus reglas de operación o en sus condiciones generales de crédito.
2. La política que adopten las instituciones crediticias privadas (SOFOL, Banca), (Torres R. , 2006, p.17)

De acuerdo con Priscilla Connolly (2006) hay muchos modos de clasificar la vivienda. El más utilizado en México identifica tres tipos, según su forma de producción:

1) La vivienda autoproducida de manera progresiva, es la que construye el usuario mismo o manda a construir. Generalmente por etapas y sin la intervención de mecanismos de crédito hipotecario formales (ONAVIs) por lo que puede llamarse “vivienda informal”. Estas viviendas que, constituyen aproximadamente el 60% del acervo habitacional urbano, y prácticamente toda la vivienda rural, son de muy variada calidad. La clave para esta forma de producción de la vivienda está en el acceso al suelo.

2) La vivienda formal producida por empresas constructoras, inmobiliarias o desarrolladores, de acuerdo con la normatividad vigente, y adquirida por familias de ingresos medios y medios bajos, mediante sistemas de crédito subsidiado que otorgan los distintos ONAVIs. Este tipo de “vivienda formal subsidiada” corresponde

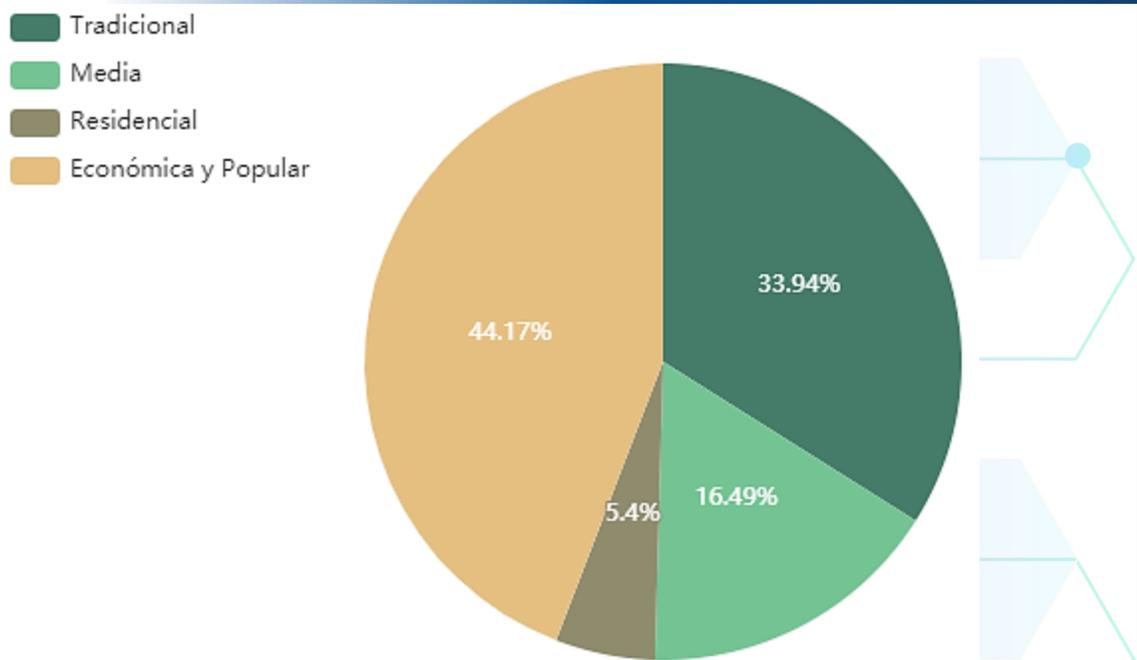
a los primeros cuatro tipos de vivienda definidos en el Programa Sectorial de Vivienda.

3) La vivienda residencial y residencial plus de alta calidad y precio, producida individualmente por encargo o en conjuntos por empresas inmobiliarias, destinada a la población con ingresos mayores a los 10 smm¹². Puede o no involucrar mecanismos crediticios de la Sociedad Hipotecaria Federal (SHF) o los Bancos.

1.1.3 Adquisición de Vivienda en serie en México

En México, la historia en materia de producción de vivienda social, se ubica desde hace más de 40 años, cuando se estableció un sistema institucional de vivienda, basado en un modelo intervencionista de un Estado regulador y rector de la acción

Figura 1.10 Créditos otorgados por tipo de vivienda al 31 de enero de 2021



Notas: En la gráfica se observa el porcentaje de créditos otorgados por tipo de vivienda, siendo la vivienda económica y popular la que compone el 44.17% del total. Obtenido del Boletín de estadísticas hipotecarias, <https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/wcm/connect/59a7a2db-b3ca-4f99-8344-fef55a2e2e03/ReporteAnualVivienda2021.pdf?MOD=AJPERES>

habitacional; sin embargo, este sistema institucional de vivienda se transformó profundamente desde la década de 1990 al adoptarse un modelo facilitador y articulador del conjunto de acciones habitacionales. (Schteingart, 2006)

¹² El salario mínimo mensual (smm) se ha definido como la cuantía mínima de remuneración que un empleador está obligado a pagar a sus asalariados por el trabajo que éstos hayan efectuado durante un período determinado, cuantía que no puede ser rebajada ni en virtud de un convenio colectivo ni de un acuerdo individual.

Es por ello que, en las últimas décadas los programas de financiamiento han delegado la promoción de vivienda social al sector privado, mientras que las instituciones operan como financiadoras de créditos hipotecarios para los adquirentes de vivienda. Es por esta razón que las desarrolladoras de vivienda representan una pieza fundamental para la construcción de conjuntos habitacionales y se convierten en el medio para incentivar el uso de ecotecnologías, materiales de construcción y criterios en la generación de un desarrollo sustentable.

Además, las desarrolladoras de vivienda aportan las condiciones de habitabilidad y desarrollo, como son: servicios (agua potable, drenaje, energía eléctrica), equipamiento urbano, áreas verdes y de recreación, vialidades y urbanización, lo que representa la planeación de ciudades con una perspectiva de regulación enmarcada por normatividad local, estatal y federal, impulsando la planeación y desarrollo sustentable.

Actualmente, el sistema institucional de vivienda se encuentra constituido por un conjunto de organismos articulados por la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI), creada en 2006. La CONAVI tiene la misión de definir la política de vivienda, formular e instrumentar el Programa Nacional de Vivienda y coordinar a los organismos habitacionales en la implementación de esta política.

Los organismos nacionales de vivienda (ONAVIS) son instituciones federales que actúan como entes financieros de la oferta de créditos hipotecarios individuales para la adquisición de vivienda. Los ONAVIS más importantes son: el Instituto Nacional del Fondo de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT) y el Fondo de la Vivienda del Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (FOVISSSTE).

Por su parte, García (2009) expone la participación de las empresas desarrolladoras como una alternativa creciente que ha cubierto a gran escala esta necesidad de vivienda en el país, pero con continuas deficiencias de calidad y soluciones para un correcto desarrollo sustentable de viviendas, “Hasta ahora es evidente la falta de interés de los grandes desarrolladores de vivienda, hacia el tema del desarrollo sustentable en los grandes conjuntos habitacionales que producen, ello se ve reflejado en la falta de dotación de equipamientos, en la mala calidad de las construcciones” (p.10).

Fernández (2016) por su parte, define su papel como: “La vivienda social es de los sectores que más demanda tiene nuestro país el déficit que existe de ella se fundamenta no solo en la capacidad que tienen las desarrolladoras para construirlas, sino también en la condición económica de la población para adquirirla” (p. 14).

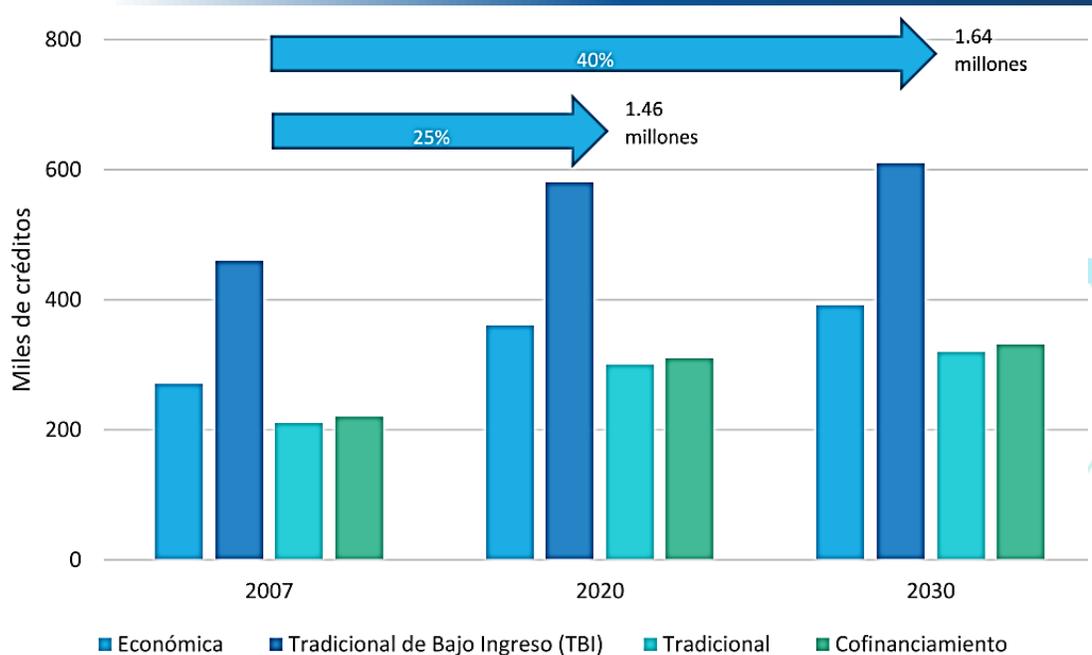
1.2 Características básicas de programas sustentables de vivienda en México

En la tercera década de este siglo, México tendrá cerca de 50 millones de hogares (Estado de las ciudades de América Latina, 2012). Se estima que para satisfacer sus necesidades será necesaria la construcción de casi 11 millones de viviendas nuevas

del 2011 al 2030, y que unos 9 millones de viviendas requerirán renovación parcial o total en el mismo período (Supported NAMA for Sustainable Housing in Mexico, 2014)

El número anual de créditos de vivienda deberá crecer un 25% respecto al 2007, llegando a 1.46 millones hacia el 2020, y un 40% al 2030, en niveles de 1.64 millones anuales para satisfacer la demanda social de casas nuevas (Figura 1.11). Por lo que este análisis refleja la cada vez mas creciente necesidad de adquisición de vivienda social para los proximos 10 años y la amplia cantidad de mercado, en el cual se pueden introducir criterios en pro de la vivienda sustentable.

Figura 1.11 Proyección de Créditos Hipotecarios al 2030



Notas: El gráfico representa la proyección comparativa de los créditos asignados hasta el 2030 conforme a los planteamientos y programas crediticios vigentes, obtenido de Hernández, A., Análisis y alternativas de los programas de vivienda sustentable en México, 2019.

La vivienda es una de las necesidades prioritarias del ser humano, ya que, prevé seguridad, tranquilidad y confort a los usuarios, para algunas administraciones representa una pieza clave para el combate a la pobreza. En México es el Gobierno Federal quien se ha encargado de implementar la mayoría de los apoyos (créditos blandos), que se otorgan a la población para apoyar la adquisición de vivienda, mediante las aportaciones que realizan los trabajadores y empleadores, en la parte proporcional conforme al trabajo desempeñado.

Para delimitar los alcances de lo que se considera una mejora a la vivienda de interés social con criterios sustentables, se toma como punto focal el uso de sistemas constructivos, por lo que es fundamental conocer los criterios establecidos por los organismos gubernamentales aplicables en México, ya que los principales recursos

crediticios para la adquisición y venta de vivienda de interés social se rigen por estos términos.

Retomo el análisis que realiza Amalinalli Velázquez Hernández (2019), en la Tesis *Análisis y alternativas de los programas de vivienda sustentable en México*, en el que evalúa los programas sociales y sus alcances al categorizar los requisitos para los procesos de validación y mejora de las condiciones de un prototipo base de vivienda, para posteriormente compararlo con las mejoras en los factores de sustentabilidad.

Figura 1.12 Esquema Operativo Hipoteca Verde



Notas: Esquema del proceso general del Programa Hipoteca Verde sujeto a modificaciones o actualizaciones por parte de INFONAVIT. Fuente: SEMARNAT, Vivienda sustentable en México, 2013

Destacando el Programa **Hipoteca Verde** que el INFONAVIT implementa desde el año 2007, cuyo objetivo es promover medidas sustentables dentro de la vivienda a través de la inclusión de tecnologías ecológicas o ecotecnologías, es un esquema de crédito bajo el cual se aporta un monto adicional a los derechohabientes para financiar la adquisición de las mismas en sus viviendas. Actualmente, el programa Hipoteca Verde es obligatorio para todo derechohabiente que adquiera cualquier esquema de crédito con el INFONAVIT (Hernández, 2019, p. 18).

Hipoteca Verde, permite la adquisición de vivienda con soluciones tecnológicas ecológicas de eficiencia energética y de energías renovables, como calentadores solares, lámparas ahorradoras, válvulas ahorradoras de agua, aislamientos térmicos, aires acondicionados de alta eficiencia, entre otros.

El Programa Vida Integral Vivienda Sustentable, esta en funcionamiento desde 2011, el Instituto incentiva la vivienda sustentable que incluya 3 atributos base; de calidad de la vivienda, con sus alrededores y que favorezca la toma de responsabilidad de los vecinos con su entorno y comunidad. En este programa se certifica que las viviendas que cuenten con características que le permitan a los derechohabientes conservar el valor de su vivienda con el tiempo y le garanticen una mejor calidad de vida.

Para que las viviendas sean consideradas sustentables deberán reunir la mayoría de los 20 atributos que las distinguen. Estos abarcan diferentes temas que implican la participación proactiva de los gobiernos locales, desarrolladores y derechohabientes y que tocan las tres dimensiones de la sustentabilidad (ambiental, social y económica), con el fin último de proporcionar calidad de vida a los acreditados y salvaguardar su patrimonio. (INFONAVIT, Proveedores externos, 2021)

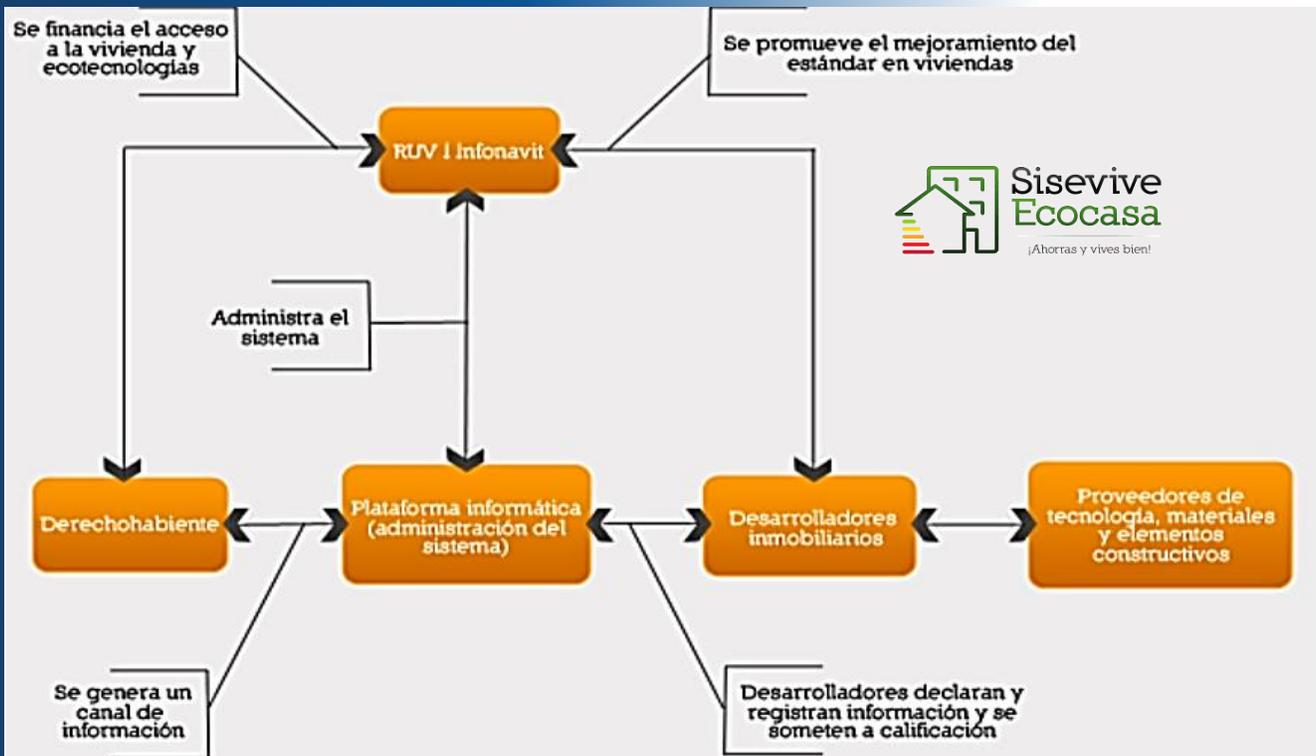
Por otra parte, el **Programa NAMA de Vivienda Nueva**, que determina las Medidas de Mitigación Nacionalmente Apropriadas (NAMA), son instrumentos de financiamiento y conjunto de acciones que los países en vías de desarrollo llevan a cabo de forma voluntaria para contribuir con los esfuerzos globales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los esfuerzos para desarrollar dichos proyectos en México comenzaron en 2010, con el "Proyecto de Vivienda Cero Energía", coordinado por la CONAVI y organismos internacionales. A partir de entonces, se han elaborado programas piloto como el de "Aislamiento Térmico", el "Proyecto de Vivienda Baja en Carbono", "ECOCASA", y desde 2012 comenzó a diseñarse el piloto para el programa Mexicano-Alemán "ProNAMA", que abarca tanto proyectos de viviendas nuevas como incorporación del programa a viviendas existentes y busca, una vez concluido el programa piloto, contar con una vasta cobertura para las viviendas del país.

En 2012 se inició la implementación de la NAMA a través del Programa ECOCASA de la SHF, con cofinanciamiento internacional, que constó de alrededor de 2,780 unidades de vivienda social en 11 ciudades ubicadas en cinco de las regiones bioclimáticas más representativas, y en las que participaron ocho

desarrolladores de vivienda distintos, además de las OREVI¹³ (Hernández, 2019, p.19).

Figura 1.13 Modelo de sustentabilidad del Programa SISEVIVE - ECOCASA



Notas: Se representa el esquema del proceso a seguir y los participantes que intervienen en el programa SISEVIVE - ECOCASA. Fuente: AChEE Agencia Chilena de Eficiencia Energética, 2021.

A finales de 2013, inició el proyecto NAMA Facility México, que vincula la asesoría técnica a la CONAVI por parte de la GIZ (Cooperación Alemana al Desarrollo), y financiamiento con la Sociedad Hipotecaria Federal (SHF) del Banco Alemán de Desarrollo KfW. Así se apoya al objetivo mexicano de promover y adoptar medidas costo-beneficio de eficiencia energética y diseño sustentable para la vivienda social, de la que se espera el mayor crecimiento en el país. (Hernández A. V., 2019)

Este programa es la primera acción a nivel internacional en el sector de la vivienda, con la finalidad de promover el diseño integral de la vivienda mediante conceptos de costo-beneficio y energéticamente eficientes, vinculado al índice de desempeño global de la vivienda (IDG). NAMA pretende transformar el sector de la vivienda del país en un mercado competitivo bajo en carbono, generando beneficios

¹³ Las siglas OREVI hacen referencia a los Organismos Estatales de vivienda, los cuales tienen diversas facultades de apoyo al impulso de la vivienda, dependiendo de la entidad federativa a que pertenezcan.

directos y ahorros económicos en gastos fijos como electricidad, gas y mejor aprovechamiento de agua, mejora la calidad de vida y ambiente al interior de la misma, los procesos de construcción y calidad de materiales.

Bajo los preceptos del cuidado del medio ambiente, este programa se enfoca en evaluar el ahorro del agua y los niveles de gases de efecto invernadero que debe cumplir una vivienda verde, considerando su diseño e implementación de eco tecnologías. El SISEVIVE (*Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde*) tiene como objetivo reducir la emisión de gases de efecto invernadero, por lo que califica mejor a las construcciones donde los niveles sean mínimos y se demande menor consumo de agua. (Fenosa, 2018, p.20)

El proceso de evaluación parte de una vivienda base, que cuenta con todas las especificaciones de eficiencia, y se compara con el proyecto por construir o edificación ya terminada. La ecuación es sencilla, en donde el Índice de Desempeño Global es igual a la Demanda Específica Total (diseño bioclimático, material envolvente, arquitectura) + la Demanda de Energía Primaria (consumo de gas y electricidad). Para mejorar la calificación, el diseño arquitectónico, el sistema de construcción, los materiales y eco tecnologías son factores que tienen que mantener altos niveles de sostenibilidad. (Fenosa, 2018, p.20)

Figura 1.14 Modelo de indicador de Desempeño



Notas: El gráfico representa el modelo de evaluación energética y el aprovechamiento de consumo de agua en la vivienda, apoyado en las 2 herramientas de simulación SAAVi y DEEVi, así como, el simulador IDG para emitir una calificación sobre el comportamiento de mejora entre la vivienda de referencia y la mejorada. Fuente: AChEE Agencia Chilena de Eficiencia Energética, 2021

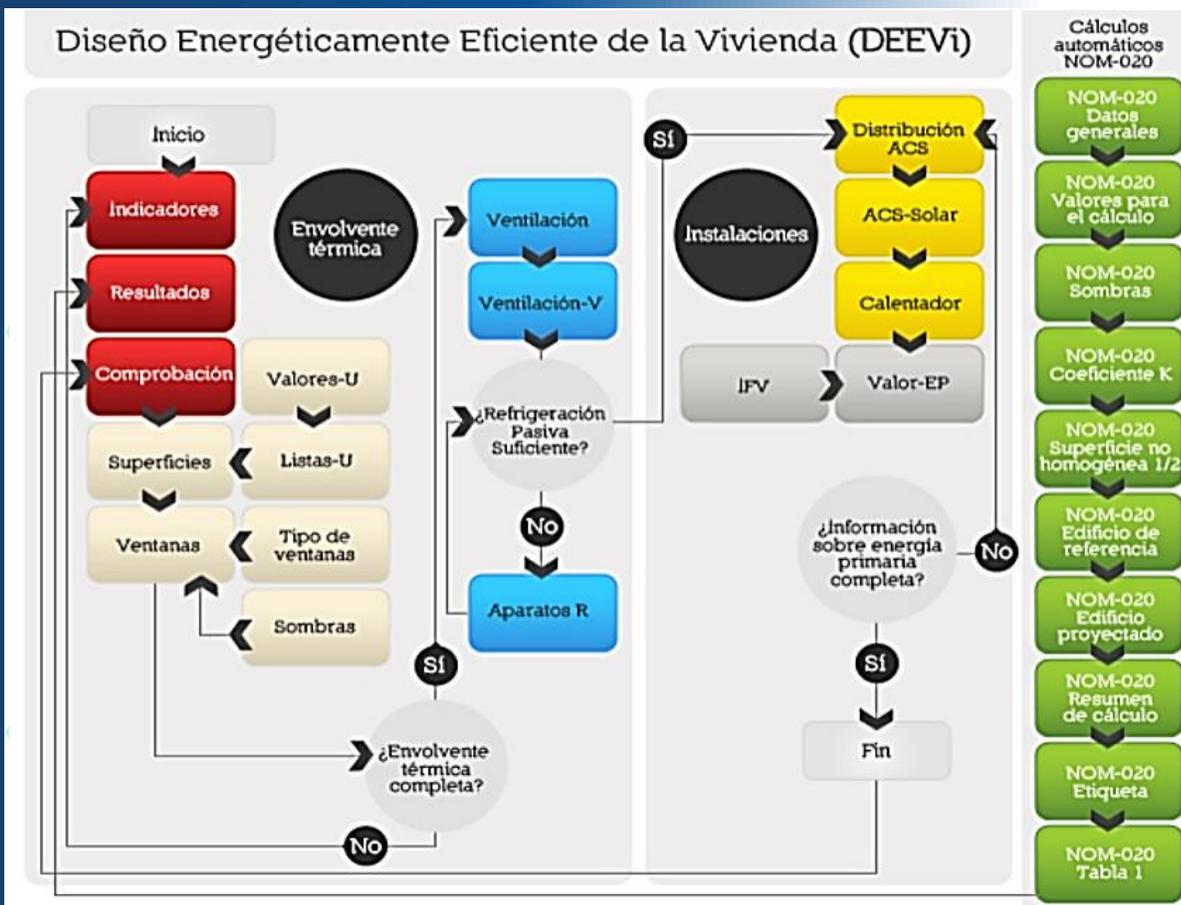
El sistema evalúa y califica el comportamiento energético e impacto ambiental de la vivienda tomando en cuenta la eficiencia del diseño arquitectónico (confort térmico), el consumo de energía y agua, atributos sustentables del conjunto. Para su

evaluación se considera la solución arquitectónica de la vivienda, los sistemas constructivos y materiales utilizados y las ecotecnologías incorporadas.

1.2.1 Evaluación de vivienda sustentable y ahorro energético

El SISEVIVE-ECOCASA responde a la necesidad del mercado de viviendas, así como a las políticas públicas y financieras, para incorporar mejores prácticas, tecnologías y materiales coherentes con las necesidades del mejoramiento de la calidad de vida de los mexicanos, mediante un uso eficiente de la energía y mayor cuidado del medio ambiente.

Figura 1.15 Esquema general de proceso de evaluación DEEVi



Nota: Se muestra el esquema general del proceso de evaluación de vivienda, mismo que se realiza en el Capítulo IV con el material compuesto integrado al análisis de la misma. Fuente: AChEE Agencia Chilena de Eficiencia Energética, 2021.

Las características del programa se especifican en el *Manual de validación de atributos del SISEVIVE-ECOCASA* con su más reciente actualización (2020), se estipulan los lineamientos para la correcta implementación y validación de los criterios aplicados a la vivienda energética y ambientalmente eficiente.

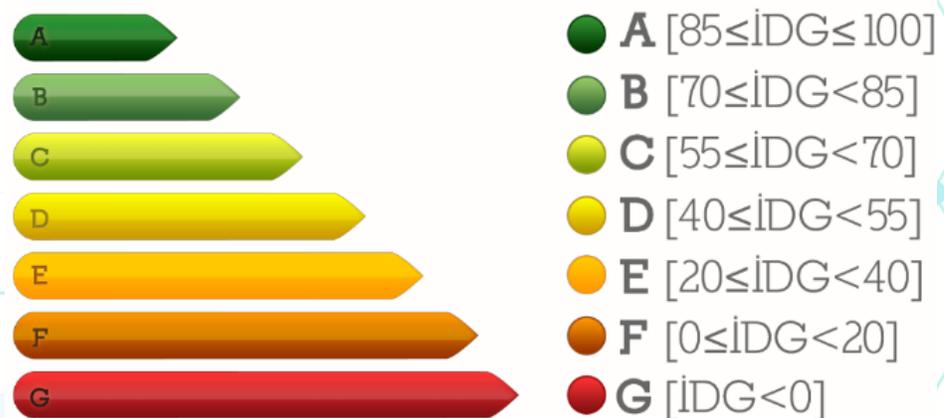
El Metodo de Cálculo se basa en la comparación de la vivienda a construir respecto a una vivienda diseñada y equipada de manera convencional se denomina línea base. Por lo tanto, se realizan mejoras al prototipo en función del diseño arquitectónico, sistemas constructivos, materiales y tecnologías incorporadas a la vivienda a construir obteniendo una calificación final resultado de la comparación de estos dos prototipos. En 2015, se consolidó como una herramienta transversal para la evaluación de las viviendas que forman parte del proyecto NAMA, a través del uso obligatorio para proyectos como “ECOCASA” de SHF y del Subsidio Federal para la Vivienda administrado por la CONAVI.

Cuenta con un sistema de calificación basado en las herramientas:

- **DEEVi** (Diseño Energéticamente Eficiente en la Vivienda): fue desarrollada a partir de la metodología de cálculo del Passivhaus Institut de Alemania (institución pionera en el desarrollo de software de modelación de balance energético), tomando en cuenta las condiciones de México e incorpora funciones que facilitan el cálculo de la NOM-020-ENER- 2011, permitiendo de este modo informar al desarrollador sobre el nivel de cumplimiento con dicha norma.

- **SAAVi** (Simulador de Ahorro de Agua en la Vivienda): es una herramienta que estima el ahorro de agua por vivienda y por habitante, con base en los consumos proyectados de los dispositivos que utilizan agua dentro de la vivienda. Este simulador fue desarrollado por el INFONAVIT, la Comisión Nacional de Agua (Conagua), Fundación IDEA y GIZ/GOPA- INTEGRATION. El consumo proyectado de agua se compara con un caso de referencia, el cual está basado en los consumos máximos de agua establecidos por la normatividad vigente para cada dispositivo.

Figura 1.16 Calificación de indicador de Desempeño Global - IDG



Notas: Clasificación de la evaluación del Índice de Desempeño Global en la vivienda Fuente: INFONAVIT, Manual de validación de atributos SISEVIVE Sistema de Evaluación de la Vivienda SISEVIVE-ECOCASA, 2020

El Índice de Desempeño Global (IDG) es un algoritmo que entrega la calificación de la vivienda, tomando en consideración las variables: Demanda Específica Total (DET) “obtenido de DEEVi: demanda de energía necesaria para satisfacer el confort térmico, definida por el diseño de la vivienda y los materiales de la envolvente”; Demanda de Energía Primaria (DEP) “obtenido de DEEVi en función de las tecnologías de consumo de gas y electricidad” y Consumo Proyectado de Agua (CPA) “obtenido de SAAVi en función del nivel de consumo de agua de los dispositivos”.

Cada una de estas variables cuenta con un ponderador que define su peso específico en la composición del IDG. En el SISEVIVE-ECOCASA las calificaciones van de la A (nivel más alto) a la G (nivel más bajo), y se definen de acuerdo con la puntuación calculada por el IDG. Dentro de las ecotecnologías adicionales se hace énfasis en el aislamiento térmico en muro que es fundamental para la presente investigación, sin incluir materiales a la estructura del muro.

Dentro de este análisis de soluciones se hace énfasis en la envolvente térmica para contribuir a la aportación del material utilizado en muros exteriores, con la finalidad de validar la composición de sistemas constructivos verticales que delimitan el perímetro de la vivienda, enfatizando el uso de materiales reciclados y aportando la mejora de condiciones termo-acústicas y eficiencia constructiva comparado con los materiales constructivos tradicionales.

La envolvente térmica se define como el controrno del edificio habitable, está formada por todos los elementos que separan los espacios habitables del ambiente exterior (aire exterior, terrenos y otros edificios) y de los espacios no habitables. La envolvente se compone de todos los cerramientos opacos verticales y horizontales, huecos y puentes térmicos del edificio.

Tabla 1.2 Criterio de clasificación de componente de envolvente térmica

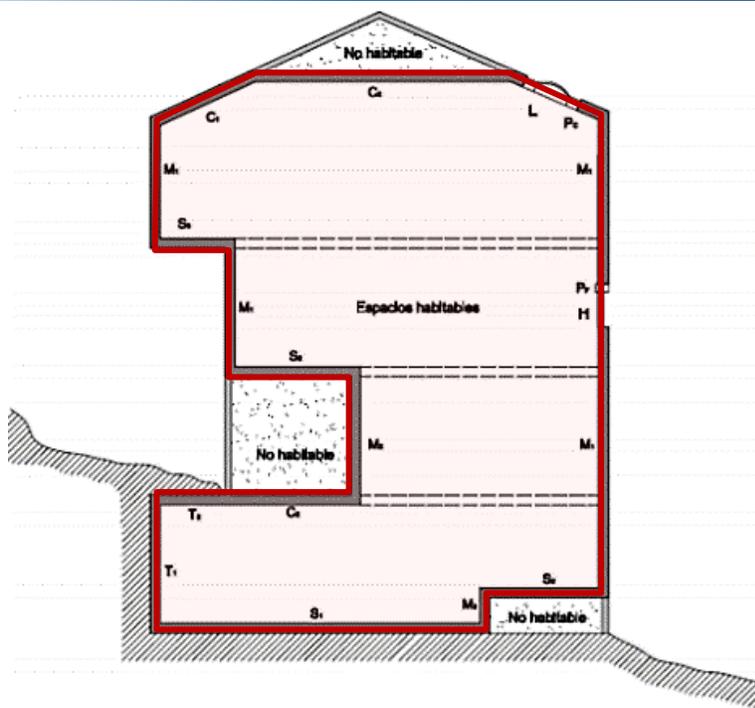
NOMBRE DE LA COMPONENTE Y ÁNGULO DE LA NORMAL A LA SUPERFICIE EXTERIOR CON RESPECTO A LA VERTICAL		PARTES
Techo	Desde 0° y hasta 45°	Opaco No Opaco (domo y tragaluz)
Pared	Mayor a 45° y hasta 135°	Opaca (muro) No Opaca (ventana, vidrio, acrílico)
Superficie Inferior	Mayor a 135° y hasta 180°	Opaca No Opaca (vidrio, acrílico)
Piso	Generalmente 180° (también se deben considerar superficies inclinadas)	Opaco No Opaca (vidrio, acrílico)

Notas: Esta tabla hace referencia a los criterios utilizados en la norma NOM-020-ENER-2011 para clasificar el tipo de elemento constructivo y descripción de sus partes. Fuente: Manual técnico para la aplicación de la NOM-020-ENER-2011, 2015

La Norma NOM-020-ENER-2011, reconoce cuatro componentes principales que conforman la envolvente del edificio de uso habitacional para su cálculo. Estos elementos son: techo, pared, superficie inferior y piso. Los cálculos de transferencia de calor por conducción se realizan para elementos opacos y no opacos. Los cálculos de transferencia de calor por radiación se realizan únicamente para elementos no opacos.

En el proyecto de investigación se enfoca en un elemento estructural vertical, la pared, definido como “un componente de la envolvente de un edificio para uso habitacional, cuya normal tiene un ángulo con respecto a la vertical mayor de 45° y hasta 135°”. Se entiende al componente “pared” como los muros que conforman un espacio.

Figura 1.17 Esquema de envolvente térmica de un edificio.



Nota: Este corte es un ejemplo de los elementos que componen una envolvente térmica en la vivienda, obtenido de Cálculo de la transmitancia térmica, 2018

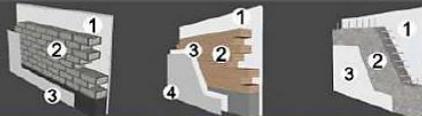
Un muro masivo es aquel elemento con espesor igual o mayor a 10 cm y construido con concreto, bloque hueco de concreto, tabicón, tabique rojo recocido, bloque perforado de barro extruido, bloque o tableros de concreto celular curado con autoclave, bloque de tepetate o adobe, o materiales semejantes.

Dependiendo características de los materiales que integran las diferentes componenetes de la envolvente, los cuales, permitirán una mayor o menor trasferencia de calor entre el espacio habitado y el ambiete exterior.

La cantidad de calor que pasa a través de un material depende de la conductividad térmica que se simboliza con “ λ ”. La conductividad es una propiedad intrínseca de cada material, independiente de su forma o tamaño, las unidades en las que se mide son W/mK . Para determinar la cantidad de calor que pasa entre el área interior y exterior de una componente, se denomina conductancia y se calcula dividiendo la conductividad del material (λ) entre su espesor (l).

El valor de transmitancia térmica es conocido también como coeficiente global de transferencia de calor o valor. Para el edificio proyectado, el valor (K) se tiene que calcular para cada componente de la envolvente de acuerdo a los materiales especificados en el proyecto arquitectónico. Valores (K) más cercanos a cero indican que el material es mejor aislante térmico y, por lo tanto, deja pasar menor cantidad de calor de un lado a otro del componente.

Tabla 1.3 Variables necesarias para calcular el coeficiente global de transferencia de calor para cálculo de edificio proyectado.

M	Es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio, de superficie a superficie, en $m^2 K/W$;
h_i	Es la conductancia superficial interior en W/m^2K , cuyo valor depende de la superficie en estudio:  <p>Superficies Verticales</p> <p>Superficies Horizontales con flujo de calor hacia arriba.</p> <p>Superficies Horizontales con flujo de calor hacia abajo (del techo, hacia el aire interior o del aire interior hacia al piso).</p>
h_e	Es la conductancia superficial exterior, y es igual a $13 W/m^2K$ 
n	Es el número de capas que conforman la porción de la envolvente del edificio en estudio. 
l	Es el espesor de cada uno de los materiales que componen la porción de la envolvente del edificio en metros. 
λ	Es el coeficiente de conductividad térmica de cada uno de los materiales que componen la porción de la envolvente del edificio del edificio para uso habitacional, en W/mK . Dato obtenido del fabricante. (Ver anexo A.2 de este manual).

Notas: En la tabla se establecen las variables requeridas para el cálculo de transferencia de calor, conforme a la NOM-020-ENER-2011. Fuente: Cálculo de la transmitancia térmica, 2018.

Un componente o porción homogénea es aquella que está formada por una o más capas, y cada una de estas capas, son del mismo material. Las capas se presentan de manera ininterrumpida a lo largo de toda la componente. Ejemplos de porciones homogéneas son muros de concreto, muros de tabique, losas planas de

concreto, etc. Para calcular el valor K de porciones homogéneas se utiliza la siguiente fórmula:

$$1/K = M$$

En donde: K es el coeficiente global de transferencia de calor de una porción de la envolvente del edificio para uso habitacional, de superficie a superficie, en W/m²K.

M es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente del edificio, de superficie a superficie en m²K/W.

Para calcular el valor M, es necesario conocer el espesor (l) y la conductividad térmica (λ) de cada capa (1, 2,...n) que forma la porción de la envolvente del edificio proyectado. La ecuación que se utiliza en la Norma para el cálculo de M es:

$$M = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n}$$

Los valores de h_i y h_e son, respectivamente, valores de conductancia superficial interior y exterior. Estos valores están definidos, siendo $h_e = 13$ W/m²K y $h_i = 8.1$ W/m²K para partes verticales, 9.4 W/m²K para partes horizontales con flujo de calor hacia arriba (superficie inferior) y de 6.6 W/m²K para partes horizontales con flujo de calor hacia abajo.

En conclusión, el cumplimiento de estos programas que priorizan el uso de soluciones arquitectónicas y materiales para el mejor aprovechamiento y ahorro de energías, culmina con incentivos monetarios que fortalecen mecanismos económicos de financiamiento para la vivienda sustentable. Los subsidios priorizados de la CONAVI son un apoyo para todas aquellas viviendas que cumplan con los estándares enmarcados en el programa NAMA, es un beneficio que se otorga a los desarrolladores cuyas viviendas utilizan medidas de eficiencia energética para reducir las emisiones de CO₂.

Esta priorización sobre el recurso asignado para subsidio incluye a los proyectos que cumplan con los criterios técnicos de la NAMA y que estén ubicadas en los polígonos de contención urbana (PCU) establecidas por la CONAVI. Las viviendas que apliquen para subsidio prioritario, deben reducir al menos 20% de las emisiones de CO₂ en comparación con una vivienda convencional. (INFONAVIT, 2020)

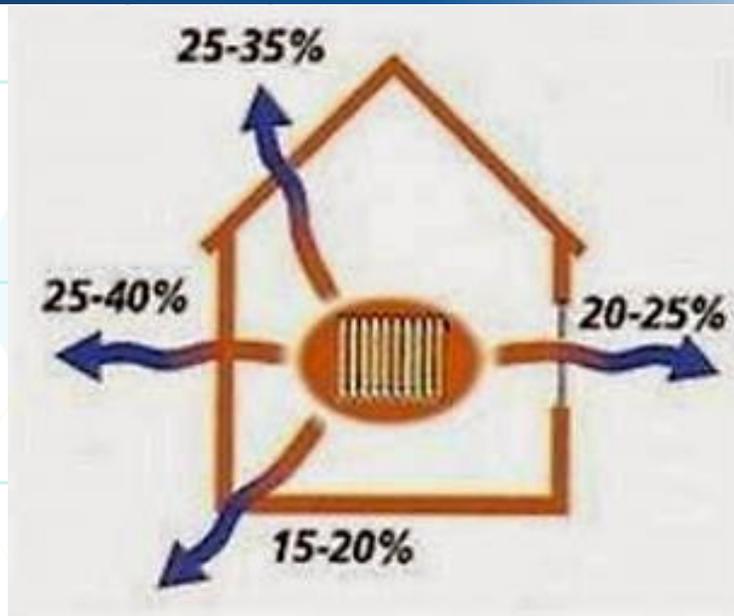
1.2.2 Aislamiento térmico-acústico en la vivienda

Según la Real Academia Española (2021), el aislamiento se define como: “aquella acción de impedir el paso o la transmisión de la electricidad, el calor, el sonido, la humedad, etc.” (párr.2). Lo que nos lleva a la revisión de sus efectos aplicados a los espacios habitables, el confort interior según las condiciones de humedad, temperatura y velocidad del viento adecuadas. Por lo que nos remite a términos de clasificación de aislamiento; el aislamiento en térmico, acústico o térmico-acústico, según se dé solución a cada necesidad.

Los sistemas pasivos se fundamentan en el control de las variables climáticas en el interior de las edificaciones mediante el uso racional de las formas y de los materiales utilizados en arquitectura, incidiendo fundamentalmente en la radiación solar, facilitando o limitando su incidencia, utilizando los aislamientos y la inercia térmica de los materiales como sistemas de control y amortiguamiento térmico. La elección de los vidrios y del material de construcción de los forjados, cerramientos, tabiquería y estructuras se infiere a la obtención de los resultados prefijados. (D'Amico, 2000, p. 6)

Un concepto importante a destacar dentro de la vivienda sustentable es precisamente el aislamiento térmico, Art Chist (2020) lo define de la siguiente manera: “se entienden todos los sistemas y operaciones llevadas a cabo para reducir el flujo térmico intercambiado entre dos entornos a temperaturas diferentes, ya sea interior-interior o exterior-interior” (párr. 3). De igual forma, emite la siguiente definición de aislante acústico: “será el producto que reduce a niveles adecuados y no molestos para la salud la emisión de sonidos. Con la combinación de ambas propiedades, térmicas y acústicas, obtendremos los denominados aislantes térmicos-acústicos” (párr. 5).

Figura 1.18 Esquema de pérdida de calor por envoltente de la vivienda



Notas: En el esquema se puede observar el porcentaje de pérdida de calor para cada elemento de la vivienda. Fuente: Ramírez, M. Materiales aislantes sostenibles, 2015

Por otro lado, María Velásquez Ramírez, en su tesis titulada *Materiales Aislantes Sostenibles* (2015), de igual forma hace referencia a la actualidad de la construcción con el uso de materiales e insumos que, a pesar de ser utilizados por condiciones económicas y rápidas de instalar. Se enfoca en otras variables para dar alternativa sustentable: “El mundo de la construcción está cambiando. Si hasta ahora se adquirirían materiales e insumos teniendo en cuenta los costes para construir más rápido y más barato, ahora se tienen en cuenta otras variables, como las prestaciones medioambientales y sanitarias de estos materiales” (p. 9).

Figura 1.19 Principales zonas climáticas por entidad federativa



Notas: El gráfico presenta la clasificación por climas en la República Mexicana por parte del Instituto Nacional de Ecología (actualmente El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC). Se deberá realizar la revisión correspondiente para las características de climas en programas de cálculo de comportamiento de edificaciones (INE). Fuente: Rodríguez, M., *Materiales aislantes sostenibles*, 2015.

Para determinar las mejores condiciones para el material aislante es fundamental considerar las condiciones de temperatura que predominan en el lugar donde se ubica la vivienda, que “conforme a la clasificación del Instituto Nacional de Ecología¹⁴ (INE), se establecieron 3 grandes climas con 10 sub climas para cada municipio de la República Mexicana, lo que dependerá activamente para el cálculo de la eficiencia energética de la vivienda y determina la mejor elección de materiales constructivos y sus condiciones aislantes”. (Rodríguez, 2015)

En torno al material aislante, se deben considerar las condiciones de costo, mismo que se relaciona directamente con la durabilidad y eficiencia del material, facilidad de instalación, existen algunos materiales que no pueden ser dispuestos por problemáticas de accesibilidad o toxicidad, resistencia a la compresión, la humedad,

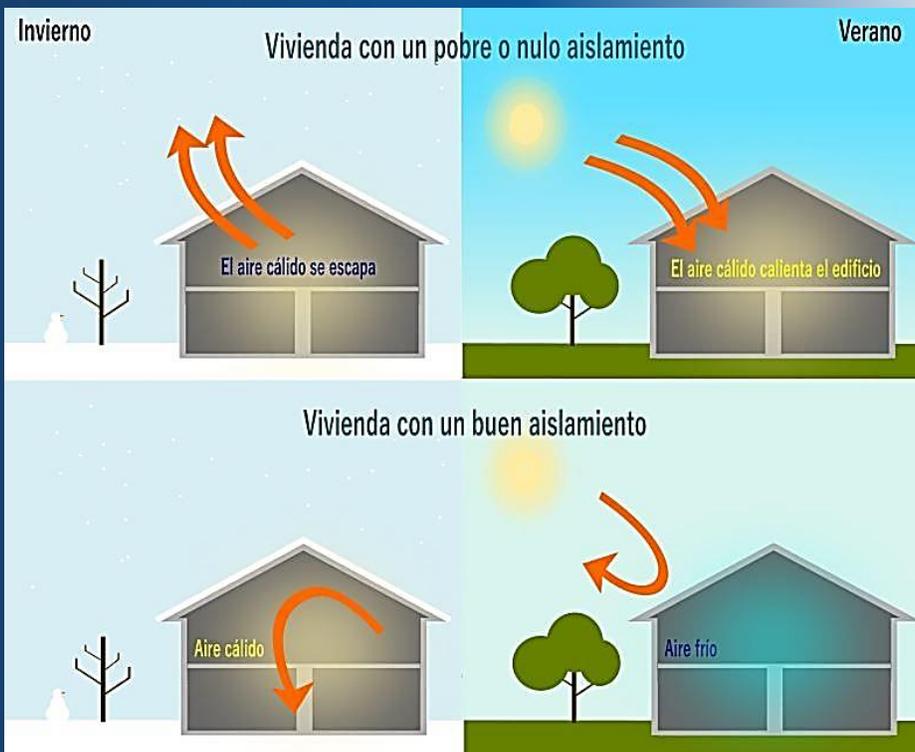
¹⁴ Actualmente Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), es un organismo de investigación del Estado Mexicano que genera e integra investigación técnica y científica en materia de ecología y cambio climático.

la degradación. En cuanto al interior de la vivienda es indispensable conocer las necesidades térmicas en el interior y el tipo de espacio que se precisa aislar, así como, las condiciones de las superficies que están en contacto y la posición del aislante.

Además de las citadas anteriormente, existen otras propiedades no menos importantes y que también deben ser tenidas en cuenta como: tolerancias dimensionales, estabilidad dimensional, deformación bajo condiciones específicas de carga a compresión y temperatura, resistencia a flexión, tensión de compresión, fluencia a compresión, absorción de agua, resistencia a la congelación, clasificación de reacción al fuego y resistencia a la difusión del vapor de agua.

Las funciones y características que debe tener un material aislante térmicamente se deben considerar conforme a las condiciones climáticas, aunque se pueden generalizar definiendo que las funciones de un sistema de aislamiento deben ahorrar en el uso de energías al aumentar la resistencia térmica de la envolvente, para poder generar un confort térmico al interior.

Figura 1.20 La importancia de un buen aislamiento térmico



Notas: Se presentan criterios de aislamiento térmico en referencia a las condiciones climáticas externas. Fuente: <https://www.akiter.com/blog/la-importancia-de-un-buen-aislamiento-termico>

Por último, la variable más relevante a la hora de comparar aislantes es la conductividad térmica como lo menciona Rodríguez (2015), es la capacidad de los

materiales para conducir calor y frío. (p.42) Además de considerar en productos y materiales para los muros se definen mediante las siguientes propiedades higrométricas:

- a) **Conductividad térmica λ (W/mK).** Es la propiedad física que mide la capacidad aislante de un material; cuanto más bajo sea su valor más capacidad aislante tiene el material. Es una característica intrínseca de cada material que no tiene un valor fijo, sino que éste depende de varios factores, tales como la temperatura, la densidad, la humedad, y el deterioro o envejecimiento del material. (Rodríguez, 2015, p.48)
- b) **Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua μ .** Debe ser tenido en cuenta especialmente en los aislamientos que pretenden preservar una superficie fría; si el aislamiento permite que la humedad del aire se ponga en contacto con la superficie fría, ésta se irá condensando y mojando todo el aislamiento, creando problemas de pérdidas de capacidad de aislamiento, superficies mojadas, e incluso problemas higiénicos y de mohos.
- c) **Densidad ρ (kg/m³).** Es la masa de material que existe por unidad de volumen.
- d) **Calor específico c_p (J/kg.K).**

Otra característica que se utiliza para evaluar el aislamiento es la resistencia térmica, es propia de cada producto y cuanto mayor sea su valor mayor es la capacidad aislante del producto. La resistencia térmica de una capa térmicamente homogénea viene definida por la expresión: **$R = e/\lambda$ (m² K/ W) siendo;**

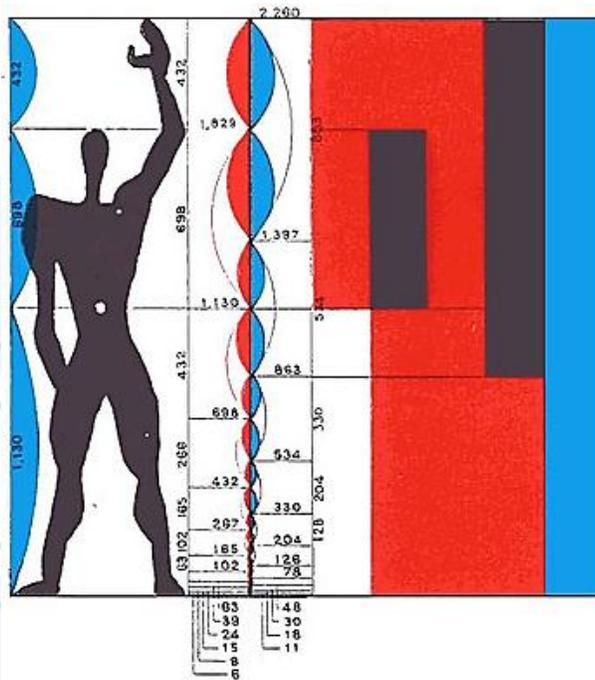
- **e** el espesor de la capa [m]. En caso de una capa de espesor variable se considera el espesor medio.
- **λ** la conductividad térmica de diseño del material que compone la capa.

Dichas propiedades serán fundamentales para el análisis de las características de aislamiento como material compuesto de polietileno de alta densidad reciclado y la arcilla modificada, misma que determinara que estas condiciones mejoren en comparación con materiales tradicionales utilizados para la edificación de vivienda en serie. (Rodríguez, 2015, p. 49)

1.3 Arquitectura modular y prefabricados

Retomando a uno de los Arquitectos más influyentes de su época, el arquitecto Charles-Édouard Jeanneret-Gris, mejor conocido como Le Corbusier, quien publicó su libro titulado *“El modulator”* (1980), la relación matemática de las dimensiones del hombre con la naturaleza, lo que marcó una base en la asociación de las medidas del cuerpo a la Arquitectura. Le Corbusier lo representó con un hombre levantando el brazo, indicando, de esta forma, los puntos importantes de las medidas corporales determinadas por la proporción aurea.

Figura 1.21 Esquema de medidas del cuerpo



Tomado de Le Corbusier (*El Modulator: Ensayo Sobre Una Medida Armónica a La Escala Humana Aplicable Universalmente a la Arquitectura y a la Mecánica*, 1980)

Le Corbusier tomó como base la altura una persona y fue dividiendo la altura entre el número áureo, resultando en medidas que casi siempre coinciden con las medidas del cuerpo humano o para realizar diferentes actividades como sentarse, apoyarse, comer, subir escaleras, análisis de mobiliario, etc.

Esto, generó grandes controversias en la sociedad de arquitectos de la época, ya que es complicado establecer un estándar de altura del hombre, aunque con este aporte sentó precedentes para establecer el análisis y la relación entre el usuario y su espacio habitable, el Modulator se ha incorporado como base en el estudio de la Arquitectura y Diseño Industrial gracias a que forma parte del análisis para encontrar una proporción universal en el diseño, el primero que combinó matemáticas, arquitectura, naturaleza y geometría como solución para los problemas y necesidades modernas.

Podríamos referir la definición de módulo que adopta Andrade (2015), como “...una unidad, pieza o medida. Un patrón y elemento con determinada geometría con el que se pueden constituir componentes de mayor tamaño a partir de la agregación de elementos iguales” (p.7). Lo que obedece a congeniar con la planeación de vivienda en serie y tomar estos conceptos como generadores de procesos constructivos eficientes, eludiendo a la generación sistemática de elementos similares para componer un todo de manera más práctica:

Partiendo de los conceptos de fractalidad y autosimilitud un módulo constructivo es una fracción de un elemento constructivo que al unirse con fracciones similares constituyen un elemento completo, el cual a su vez constituye lo que es una célula habitacional y finalmente una vivienda o un edificio, a partir de la agregación del módulo básico (Andrade, M., 2015, pp. 9-10).

Daniel Roper Rago y Ana Comas Mora (2013), hacen una recopilación de los procesos de industrialización en la construcción, la cual evoluciona de manera paulatina para solucionar problemas de las edificaciones a gran escala por medio de la prefabricación en la vivienda, “la posibilidad cierta de que componentes complejos de distintas procedencias y generados con diferentes formas de producción, bajo directrices de proyecto redactadas con mentalidad y disciplina industrial, propicien como resultado, espacios construidos mayoritariamente con base en componentes producidos por empresas distintas” (p. 69).

Por otro lado, el Arquitecto Juan Aznar Poveda (2011-2012), recapitula las aportaciones de las corrientes arquitectónicas de la segunda mitad del siglo XX y como contribuyen a la corriente de la Arquitectura Modular, identifica por medio de la teoría geométrica de lo que denomina “Policubos” como una alternativa eficiente de generar unidades básicas de diseño prefabricadas como respuesta al desarrollo de la industria y a la debilidad económica de la época. También denomina a la arquitectura prefabricada también llamada “Prefab”:

“ha adquirido gran importancia en los últimos años dentro de diversas industrias incluida la de la construcción debido a la facilidad económica que supone. Partimos de la idea de la industrialización, es decir, de unos modelos de componentes diseñados previamente, pueden acoplarse entre sí, y cuya producción es a gran escala. Lo que origina que su precio disminuya considerablemente, de igual forma reduce el tiempo de construcción. En este proceso comúnmente se suele dar la llamada Panelización, es decir, el uso de un mínimo número de tipologías diferentes de piezas o paneles con las características citadas capaces de dar solución a la necesidad del producto” (Arquitectura Modular, 2011-2012, p. 8)

Estos conceptos nos llevan a relacionar términos de modulación y prefabricación con la finalidad generar una **arquitectura eficiente** dentro de la industria de producción en serie modificando los procesos actuales de diseño y ejecución de las construcciones, aunque el objetivo es contribuir con la reducción del consumo de energías desde los procesos de fabricación de los elementos que integran las edificaciones, hasta reducir el consumo al momento de habitarlas.

Tabla 1.4 Diferencias entre Arquitecturas eficientes

<i>Tipo</i>	<i>Objetivo Principal (Eficiencia)</i>	<i>Objetivo Secundario (Eficiencia)</i>
<i>Prefabricada</i>	<i>Económico</i>	<i>Medioambiental</i>
<i>Bioclimática</i>	<i>Medioambiental</i>	<i>Económico</i>

La tabla representa la combinación entre factores para el desarrollo de Arquitectura prefabricada y bioclimática. Fuente: (Arquitectura Modular, 2011-2012)

Por lo que, se deberá distinguir entre los sistemas prefabricados y la arquitectura bioclimática, misma que se describe al inicio del presente capítulo, por ejemplo, mediante la comparación de sus objetivos fundamentales, tal y como indica la tabla 1.4, donde se observa cómo se prioriza tanto por el factor económico, como por el impacto al medio ambiente que produce:

Entendiendo que la arquitectura prefabricada, se rige por economizar tanto en materiales como en el tiempo de ejecución, utiliza materiales baratos y usados, que para el caso de estudio se utilizan materiales reciclados, por lo que de un modo indirecto estará favoreciendo al medio ambiente. Por el contrario, la arquitectura bioclimática, tiene el objetivo de generar el ahorro de energía para favorecer al medio ambiente y por consecuencia también de reducir sus gastos. Actualmente, es muy común encontrar soluciones que se suelen combinar ambos estilos, consiguiendo tanto eficiencia económica como bioclimática (Arquitectura Modular, 2011-2012, p. 8).

1.3.1 Soluciones modulares de vivienda

Se entiende como sistema al “conjunto de elementos heterogéneos en diferentes escalas, los cuales están relacionados entre sí, con una organización interna que se adapta a la complejidad del contexto”. En el caso de la construcción “los sistemas suelen estar constituidos por unidades, éstas, por elementos, y éstos, a su vez, se construyen a partir de unos determinados materiales” (Carrió M., 2005, p. 45). Una unidad puede ser una célula habitacional, conformada por los diversos espacios y estos a su vez por los elementos constructivos que lo configuran, al conjunto de unidades como la vivienda se puede entender como condominio, conjunto habitacional, poblado o ciudad.

El sistema tipo lego. Es un sistema que está conformado por piezas pequeñas de la misma forma y medida que se van ensamblando de tal modo que se configuran un muro, similar al juego de niños llamado lego, el cual da una gran facilidad de elementos modulares para reproducirlos y formar elementos de mayor dimensión de manera dinámica. (El sol de Puebla, 2016)

Puede ser equiparable a construir con block o tabique, aunque con conceptos de construcción en seco y con elementos exactos sin necesidad de romper piezas evitando generar desperdicios o ajustes, para los cual se generan módulos y medios módulos, que permiten mayor exactitud.

Figura 1.22 Sistema constructivo modular tipo lego.



Nota: La imagen se observa la propuesta de fabricación de block tipo lego para muros.
 Fuente: <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/inventan-en-puebla-los-legoblock-para-construir-casas-de-verdad-835583.html>

Para fabricar este tipo de elementos, el plástico reciclado ha resultado una opción viable, ya que permite usar como materia prima los desechos de plástico de un solo uso y de esa manera reducir los efectos perjudiciales al medio ambiente derivado del mal manejo de este material. Además, el plástico puede proporcionar diversas ventajas constructivas, tanto en el proceso de construcción, de resistencia como en las condiciones de confort térmico y acústicas dentro de un edificio, así como la ligereza del material. Se analizan dos sistemas constructivos con estas características, el sistema Brickarp y el sistema basado en tabiques de plástico reciclado, ambos sistemas siguen el mismo principio, cada elemento tiene un hueco y una saliente.

En cuanto al **Sistema Brickarp**. Se integra a partir de bloques de plástico compacto fundido en una sola pieza, estos módulos son de forma rectangular alargado, de cada elemento sobresale una franja que se inserta en otro elemento igual, pero del lado opuesto, un sistema de amachimbrado que se reproduce para conseguir la modulación deseada, para las instalaciones los elementos tiene 4 perforaciones que coinciden cuando los elementos estén traslapados, es importante

que se ajusten a las dimensiones establecidas para evitar desfases que puedan perjudicar en el remate del elemento. Los elementos estructurales que integran este sistema están fabricados del mismo material, tienen ranuras longitudinales que permite la inserción de los módulos y se unen mediante con conectores metálicos. (Ecoplasso, 2017)

Figura 1.23 Vivienda construida con sistema Brickarp



Notas: Fotografía de sistema constructivo con base en elementos prefabricados de plástico enmarcado por estructura metálica.
Fuente: <http://www.ficidet.com/brickarp/galeria.htm>

Sistemas tipo **Meccano**. En este tipo de sistema modular prefabricado se caracteriza por tener varios tipos de componentes de diferentes tamaños, con usos específicos en la construcción de una cédula habitacional mismos que se diseñan previamente para evitar ajustes o modificaciones en la ejecución de las viviendas, las piezas pueden ser o no reconfigurables a modo de ser aptos para ajustarse a diferentes formas de la envolvente de un espacio. (Meccano, 2021)

La peculiaridad de este tipo de sistemas es que funcionan como si se armara un rompecabezas. Se tienen varias piezas que ocupan un lugar específico para su armado, dependiendo la función se emplean los elementos que componen la envolvente. Este tipo de diseño requiere un proceso complejo de desglose de componentes que integrar la construcción, es una manera menos estandarizada de construir en seco porque comprende un despiece amplio, y se fabrica a medida de cada proyecto y dependiendo la complejidad del sistema, aunque los beneficios en cuanto a rendimiento y eficiencia para proyectos en serie es muy considerable a comparación de otros sistemas.

Figura 1.24 Vivienda construida con sistema de concreto y molde tipo Meccano

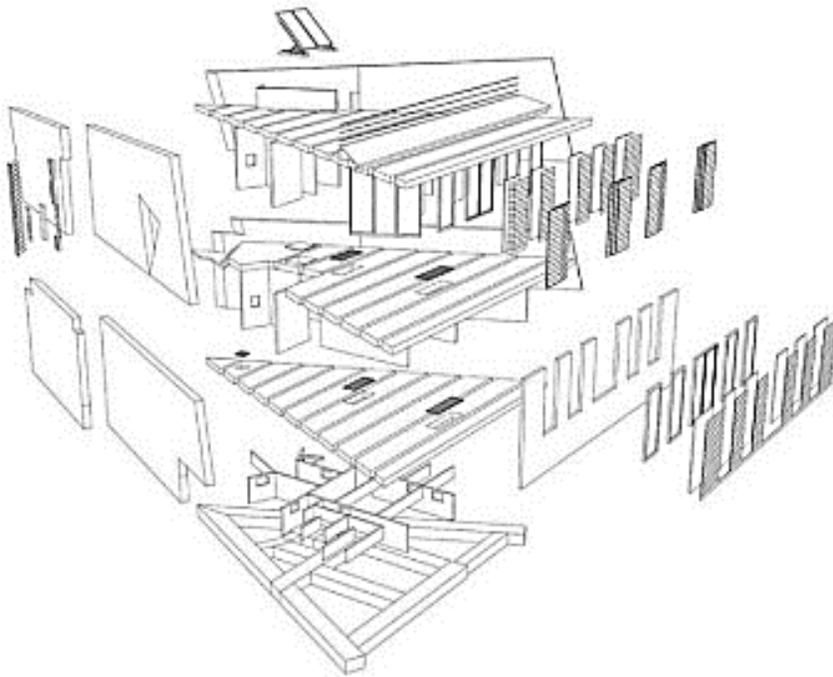


Notas: Este sistema constructivo es muy eficiente en tiempo de ejecución, aunque el costo de fabricación de molde impacta en el presupuesto final y restringe la diversidad de prototipos. Obtenido de <https://www.meccano.mx/>

En este sistema se considera también el sistema constructivo de concreto colado en sitio, el cual se considera un semi prefabricado, ya que, se fabrica el molde en planta para armarse en obra y colar las viviendas. Regularmente se realiza por nivel; previamente armados de muros y losas, así como, colocar las tuberías y cableado, posteriormente se procede a armar el molde bajo diseño de la vivienda, con el objetivo de colar los elementos de manera monolítica¹⁵, garantizando un mejor comportamiento de los elementos estructurales de concreto, para que posterior al proceso de fraguado, se mueva a la siguiente vivienda o al siguiente elemento a colar.

¹⁵ Se hace la obra gruesa del edificio de una sola pieza, de una sola colada. Es un progreso considerable, pues la construcción de la obra gruesa de una vivienda no se verifica ya en su mayor parte a mano, sino que puede ser mecanizada hasta el trabajo en cadena.

Figura 1.25 Despiece de una construcción prefabricada



Notas: Ejemplo del despiece de un sistema de construcción prefabricada, componentes posibles. Obtenido de: <http://www.esamedistatoarchitetto.com/arquitectura-sostenible-para-la-felicidad/>

1.3.2 Elementos de mampostería

Existen diferentes alternativas en la construcción de vivienda, una de las que destaca entre las más utilizadas en el desarrollo de vivienda en serie es el uso de elementos colocados uno sobre otro, a este sistema se le denomina mampostería, como lo menciona Esqueda, R. (2014), “es un sistema constructivo en el cual un muro o estructura se rige a partir de sobre poner piezas o bloques manualmente (a estas piezas se les denomina mampuestos)” (p.75).

Para lo cual, se tienen diversas soluciones estructurales en las que el componente principal es el elemento de mampostería, estos pueden ser un sistema de mampostería confinada, la cual consiste en elementos de contención de concreto (castillos, cerramientos, columnas, traveses) y el muro integrado por elementos de mampostería (tabiques, block, tabicón, entre otros).

Otro sistema, es el que puede carecer de estos elementos de confinamiento, y en su lugar, se ahogan varillas de refuerzo dentro de los huecos del block, denominados “castillos ahogados”.

Figura 1.26 Croquis de muro de mampostería confinada

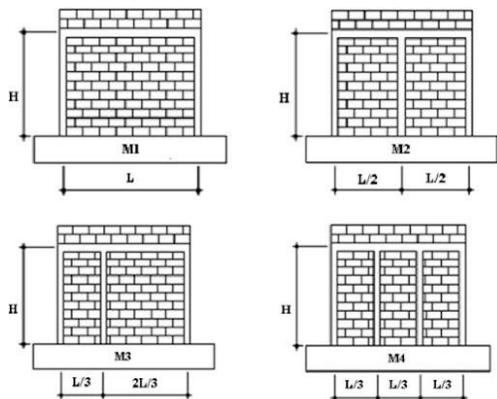
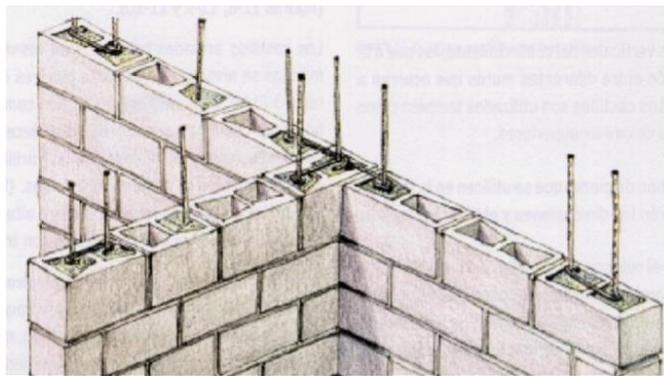


Figura 1.27 Croquis de muro de mampostería con castillos ahogados en alveolos



Notas: Un muro de mampostería confinada consiste básicamente en un paño de mampostería rodeado en todo su perímetro por elementos esbeltos de concreto reforzados y vaciados in situ luego de la construcción del paño. Obtenido de A. Marinilli, et. al. Evaluación sismorresistente de muros de mampostería confinada con dos o más machones, Boletín técnico, 2007.

Notas: Cuando se presenta la intersección de dos muros y no se pretende colar un castillo de concreto, es conveniente colocar varillas distribuidas en los huecos del block y ligarlas entre sí por grapas de alambro #2 en cada hilada, en número suficiente para que ligan las varillas verticales entre sí. Obtenido de http://tecnicasenlaconstruccion.weebly.com/uploads/1/3/6/6/13669342/clase_2p_castillos_y_columnas_concreto_y_acer0_24oct.pdf.

Las propiedades mecánicas¹⁶ de los materiales son muy características de los elementos de mampostería, mismas que están en función de su composición, estructura o comportamiento ante algún agente externo o interno, ya sea, físico o químico. Para un elemento vertical es importante definir la resistencia mecánica del material, por ello es importante la revisión de su capacidad de resistir esfuerzos.

Esfuerzo a la flexión: Es el esfuerzo resultante de aplicar fuerzas perpendicularmente al eje principal del elemento que tienden a doblarlo. La flexión produce compresión en la parte cóncava del elemento y tracción en la opuesta, la convexa. (Rada, 2021, párr 10)

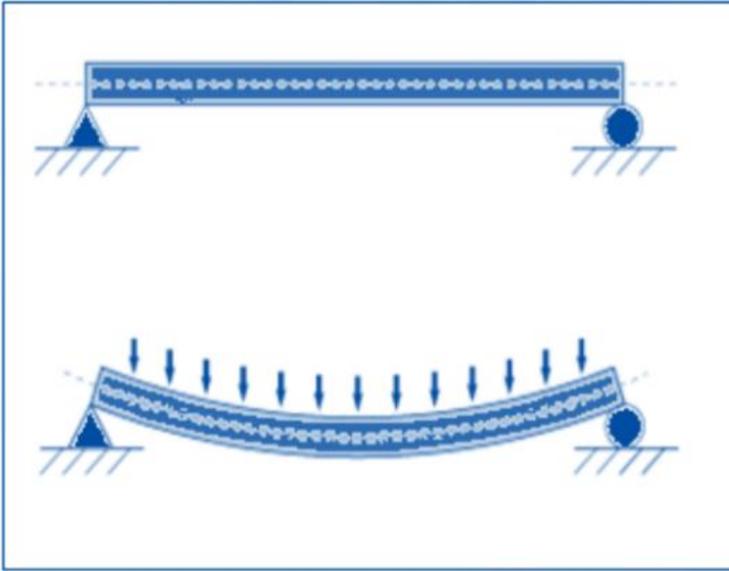
Cualquier fuerza externa que se aplique sobre un material causa deformación, la cual se define como el cambio de longitud a lo largo de la línea de acción de la fuerza. Para estudiar la reacción de los materiales a las fuerzas externas que se aplican, se utiliza el concepto de esfuerzo.

El esfuerzo tiene las mismas unidades de la presión, es decir, unidades de fuerza por unidad de área. En el sistema métrico, el esfuerzo se mide en Pascales (N/m²). En el

¹⁶ Las propiedades mecánicas son las que describen el comportamiento de un material ante las fuerzas aplicadas sobre él, por eso son especialmente importantes al elegir el material del que debe estar construido un determinado objeto.

sistema inglés, en psi (lb/in²). En aplicaciones de ingeniería, es muy común expresar el esfuerzo en unidades de Kg /cm². (Torres R. E., 2014)

Figura 1.28 Elemento sometido a flexión



Notas: En ingeniería se denomina flexión al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. Obtenido de Universidad Distrital, Ensayo de flexión, Bogotá Colombia, 2016.

Esfuerzo de compresión: Es el resultante de las tensiones o presiones que existe dentro de un sólido deformable, se caracteriza porque tiende a una reducción de volumen o acortamiento en determinada dirección, ya que las fuerzas invertidas ocasionan que el material quede comprimido, también es el esfuerzo que resiste el acortamiento de una fuerza de compresión. (Andalucía, Federación de Enseñanza de CCO. OO. de, 2011, p. 8)

Figura 1.29 Elemento sometido a compresión

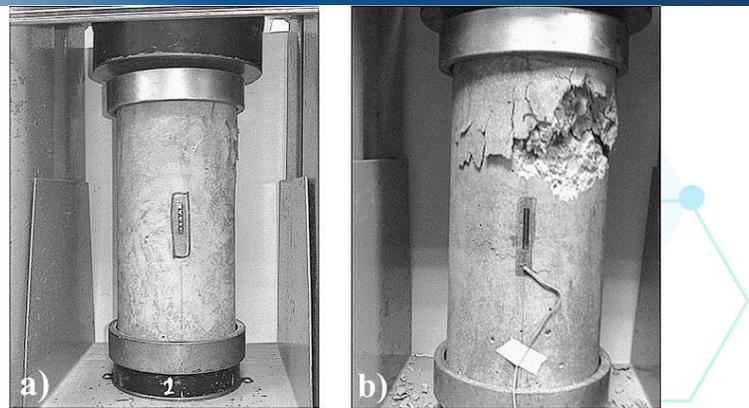


Notas: Un cuerpo está sometido a un esfuerzo de compresión cuando se le aplican fuerzas en el mismo eje y provocando un abombamiento en su parte central y reduciendo su longitud inicial. Obtenido de elementos amovibles y fijos no estructurales, <http://amoviblesio.blogspot.com/2015/11/compression-traccion-flexion-torsion.html>, 22 de noviembre de 2015.

La resistencia a compresión se determinará para cada tipo de piezas de acuerdo con el ensayo especificado en la norma NMX-C-036. Sin embargo, estas resistencias obtenidas individualmente sufren una disminución drástica cuando se ensayan formando parte de un panel de mampostería. La resistencia de diseño a compresión de la mampostería, (f_m^*), sobre área bruta, se determinará con alguno de los siguientes tres procedimientos:

Resistencia a compresión: La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm^2 , MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi).

Figura 1.30 Configuración del ensayo de resistencia a compresión.



Notas: a) espécimen preparado, b) espécimen fallado. Obtenido de León, H., et. al., Desempeño en compresión de hormigones con mezclas binarias y ternarias de cementantes Portland, 2016.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión, se emplean fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada ($f'c^{17}$) para una estructura determinada. (CEMEX, 2019, párr. 2)

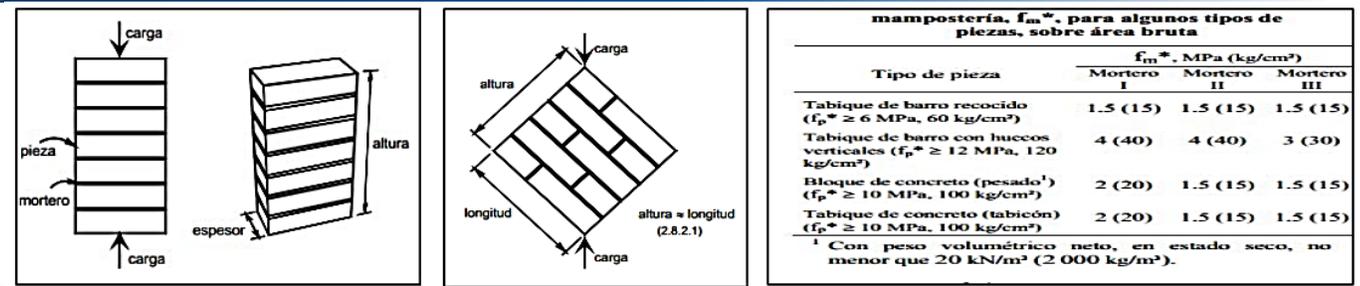
Resistencia a compresión diagonal: Ensayos de muretes construidos con las piezas y morteros que se emplearán en la obra.

Valores indicativos: Si no se realizan determinaciones experimentales podrán emplearse los valores de (f_m^{*18}) que, para distintos tipos de piezas y morteros, se presentan en la siguiente tabla.

¹⁷ Las siglas $f'c$ representan la resistencia del concreto con unidad de medida kilogramo sobre centímetro cuadrado (kg/cm^2), técnicamente es el esfuerzo máximo de compresión en el concreto, medido en carga por unidad de área.

¹⁸ f_m^* resistencia de diseño a compresión de la mampostería, referida al área bruta, MPa (kg/cm^2)

Figura 1.31 Ensayos para obtener la resistencia a compresión de la mampostería: Pilas, Murete v Valores indicativos.

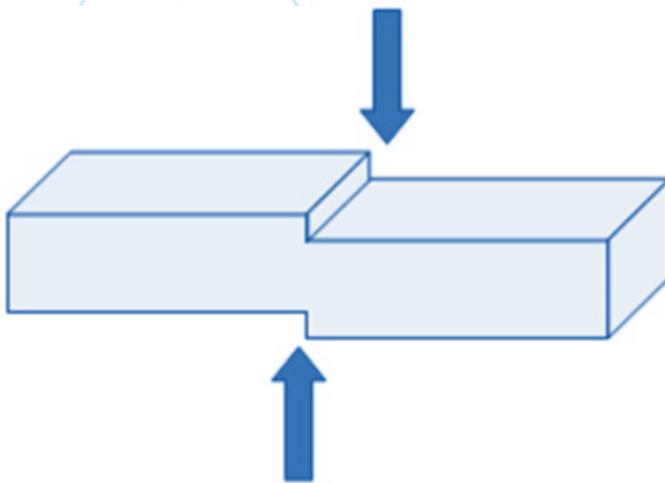


Notas: Se deberá realizar una revisión al Reglamento de Construcciones para el cumplimiento de los requisitos mínimos para elementos de mampostería, obtenido de Arnal S. y Betancourt M. (2005), Normas Técnicas Complementarias para de Mampostería p. 682,684 y 685.

Esfuerzo de cortante: Se conoce como esfuerzo cortante al que resulta de aplicar dos fuerzas paralelamente a una superficie y en sentido contrario. De esta forma se puede dividir a un objeto en dos partes, haciendo que las secciones deslicen una sobre otra. Se obtiene con la siguiente formula:

$$\tau = \frac{\text{Fuerza tangencial al área transversal del elemento}}{\text{Área de corte elemento}} = \frac{V}{A_c}$$

Figura 1.32 Elemento sometido a un esfuerzo cortante.



Notas: Las dos fuerzas mostradas ejercen un esfuerzo que tiende a separar la barra en dos. Obtenido de <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>, consulta el 13 de junio de 2022.

1.3.3 Sistemas constructivos en seco¹⁹

Respecto a esta línea de investigación y contrarrestando las condiciones tradicionales de construcción húmeda, las cuales presentan ciertas deficiencias considerables, que, ante la producción masiva de prototipos se reproducen en un sin número de elementos, “Los tipos de falla comunes que presentan son: a) agrietamiento de las piezas o del mortero cuando el estado de esfuerzos actuante sobrepasa la resistencia en compresión o tensión, b) pérdida de adherencia en la unión pieza-mortero si el esfuerzo cortante excede el esfuerzo resistente” (Andreaus, 1996, p. 37) y, c) agrietamiento de los elementos confinantes por efecto cortante después de la falla de la mampostería (Flores, 2001, p. 119)

Además, se presenta una excesiva demolición de elementos de mampostería con la finalidad de alojar o liberar tuberías de instalaciones hidro-sanitarias y eléctricas, lo que repercute en la afectación de estos elementos estructurales.

Figura 1.33 Deficiencia en procesos constructivos de mampostería



Nota: En las imágenes se observan deficiencias en el habilitado de piezas de mampostería, originadas por el mal manejo de las piezas, demoliciones parciales para alojar instalaciones y cantidad inadecuada de mortero utilizado en las juntas, elaboración propia.

Aunado a esto, el uso de un sistema constructivo en seco presenta grandes ventajas en comparación con los sistemas tradicionales, ya que, a diferencia de estos métodos constructivos, los sistemas en seco se basan en el ensamble de elementos prefabricados, lo que permite simplificar el proceso en la elección de determinados materiales, en la transformación de los mismos y su cuantificación. Se reduce la especialización de la mano de obra en el proceso constructivo, reducción de desperdicio en los ajustes de piezas al modular cada elemento, conforme al proyecto

¹⁹ La obra en seco es un modelo de construcción abierto en el que los materiales no requieren conglomerantes húmedos para el armado de estructuras u otros componentes, regularmente se realizan por medio de ensambles.

de vivienda requerido, se enfatiza en el ahorro económico y disminución de las afectaciones al medio ambiente.

Otra opinión es la que expone Andrade (2015), en la que determina que: “los sistemas constructivos en seco se integran por elementos más complejos que deber permitir uniones reversibles entre elementos, para cumplir con los planteamientos de flexibilidad y adaptabilidad, que permitan recuperar los componentes para su reuso” (p. 6).

Esbozando así, una posible solución a las problemáticas de fallas en sistemas constructivos tradicionales, que de igual forma, refiere las ventajas de estos sobre sistemas tradicionales, “... el montaje en seco ofrece grandes ventajas, pues la humedad es [...] la causa directa de la mayoría de los fallos de los antiguos sistemas de construcción [...] con la eliminación de la humedad y el ajuste perfecto de cada elemento, la casa prefabricada permite establecer un precio fijo y un periodo de tiempo definido” (Strike, 1991, p. 142).

Para entender el concepto y características de sistemas constructivos en seco es fundamental entender conceptos básicos en la arquitectura y construcción que determinan el funcionamiento y composición de espacios edificados o por construir, de inicio podemos entender por sistema constructivo como:

“El conjunto de elementos y unidades de un edificio que forman una organización funcional con una misión constructiva común, sea ésta de sostén (estructura) de definición y protección de espacios habitables (cerramientos) de obtención de confort (acondicionamiento) o de expresión de imagen y aspecto (decoración). Es decir, el sistema como conjunto articulado, más que el sistema como método.” (Carrió J. M., 2005)

Figura 1.34 Construcción de viviendas modulares



Notas: En la imagen se muestra el proceso de ensamblaje de elementos prefabricados.
 Fuente: <https://estudiotecnicoeinteriorismo.es/construccion-de-casas-modulares-vs-construccion-de-casas-tradicionales/>

Estos sistemas requieren de un diseño conforme a las exigencias y necesidades de cada proyecto, además de tomar en cuenta las posibilidades de los materiales para ser utilizados para la solución de espacios, esto en función de sus características, cualidades y de su vulnerabilidad. Aunque dentro de los diferentes tipos de sistemas constructivos de producción sistemática y diseño previo, se puede definir como construcción industrializada.

Los sistemas constructivos prefabricados se pueden clasificar dependiendo las soluciones que se han presentado, como soluciones dentro de la industrialización, para este caso así lo menciona Escrig Pérez (2020), se puede hablar de cuatro tipos de sistemas:

Sistemas cerrados: Estos elementos se fabrican conforme a especificaciones internas del propio sistema. Responden únicamente a reglas de compatibilidad interna y el proyecto arquitectónico ha de subordinarse a los condicionantes del sistema, en este tipo sistemas los elementos se unen de manera monolítica, permanente.

Empleo parcial de componentes: Dentro de la industria de la construcción la gama de productos y prestaciones es más o menos fija admitiéndose ciertas variaciones dimensionales o de pequeña entidad. Su empleo no requiere un grado de industrialización determinado de sus realizaciones y pueden utilizarse en obras o proyectos claramente tradicionales.

Sistemas tipo mecano: son resultado de la evolución hacia una apertura “acotada” de los sistemas cerrados, preparados para combinarse en múltiples soluciones suministradas por distintos productores que respetan voluntariamente un lenguaje combinatorio definido y acotado.

Sistemas abiertos: constituidos por elementos o componentes de distinta procedencia aptos para ser colocados en diferentes tipos de obras, industrializadas o no, y en contextos diversos. Suelen valerse de juntas universales, gamas modulares acotadas y flexibilidad de proyecto prácticamente total (p.1).

Figura 1.35 Ejemplo de sistema prefabricado cerrado



Notas: La imagen ejemplifica el uso de sistemas cerrados para vivienda vertical, al ajustar el diseño a los componentes del sistema constructivo. Obtenido de Salas J., los sistemas de prefabricación cerrada a la industrialización sutil de la edificación: algunas claves del cambio tecnológico. 2008.

Los sistemas prefabricados se pueden lograr parcialmente, de hecho, se puede considerar a los tabiques, bloques, ladrillos como un elemento modular prefabricado, por lo que el nivel de prefabricación de un edificio se puede valorar según la cantidad de elementos que se desechan en el proceso de la obra; cuanta mayor cantidad de residuos se generan en el proceso, menos índice de prefabricación presenta la construcción.

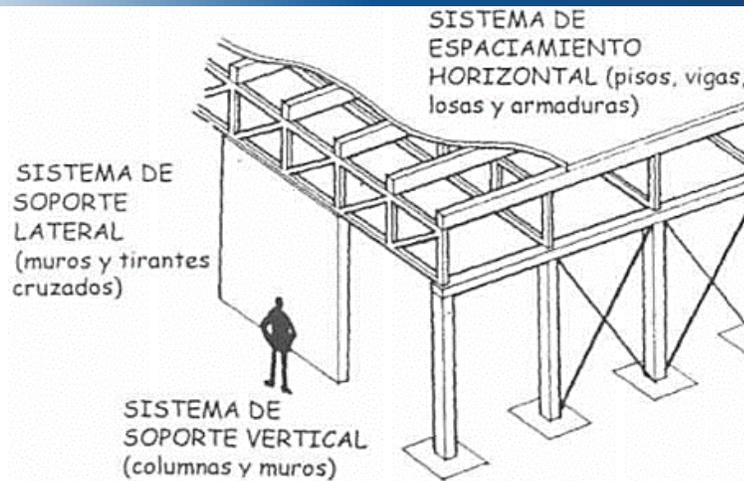
Los elementos constructivos se pueden clasificar en elementos estructurales y no estructurales y de acuerdo con esto, las funciones que cumplen en una envolvente arquitectónica son diferentes. El diseño y la disposición de los elementos de un sistema constructivo puede variar conforme al proceso y tipo de sistema propuesto, aunque se pueden englobar en 4 características fundamentales que serán determinantes para el proyecto de investigación, las cuales son: seguridad (resistencia), funcionalidad, habitabilidad y durabilidad.

La seguridad se puede comprender como la capacidad de las construcciones para soportar las acciones de la intemperie (lluvia, viento, sismos, etc.), que se potencia aún más cuando se considera el papel que representa la vivienda, las cargas a las que se somete la estructura, así como su mismo peso y resistencia al fuego. Esta parte es la más importante siendo que una vivienda tiene como función principal resguardar al ser humano de la intemperie. Los elementos estructurales deben de cumplir con las características de resistencia para dar estabilidad necesaria a la envolvente.

Un sistema utilizado de manera recurrente en la industria de la vivienda tradicional es el de marcos y mampostería confinada, el cual transfieren cargas al suelo a través de sus elementos horizontales y elementos verticales que son resistentes a la flexión y al pandeo como resultado de sus momentos de reacción internos. Los elementos verticales son las columnas y muros de carga, mientras que los horizontales son las trabes y las losas. Moore (2000), define cada elemento constructivo de la siguiente manera:

- **Columna:** es un elemento estructural lineal (comúnmente vertical) que está sometido a esfuerzos de compresión a lo largo de su eje.
- **Muro de Carga:** es un elemento de compresión que distribuye continuamente cargas verticales en una dirección, las cuales se propagan de manera gradual a los cimientos.
- **Viga:** es un elemento estructural lineal al que se le aplican cargas perpendiculares a lo largo de su eje; a tales cargas se les conoce como carga de flexión.
- **Losa:** es un componente de flexión que distribuye la carga horizontalmente en una o más direcciones dentro de un solo plano (p. 60)

Figura 1.36 Sistema común de marcos con sus elementos



Notas: Esquema de los elementos que componen un sistema de marcos rígidos
 Fuente: Moore F., Comprensión de las estructuras en la arquitectura, 2000.

La funcionalidad de la envolvente constructiva se genera mediante diversos factores, principalmente en la solución y el diseño arquitectónico, donde se define la distribución de los espacios que dan pauta a un óptimo uso de los espacios, una eficiente solución funcional y la relación de las áreas que integran el edificio. Sin embargo, en términos constructivos, los elementos de cerramiento interfieren para cumplir esta parte. Los componentes que se pueden considerar son básicamente para cubrir las funciones mediante tres tipos de elementos: muros o elementos divisorios, vanos para puerta y para ventanas, mismos que se consideran elementos opacos, parcialmente opacos y no opacos respectivamente a la función que realizan.

Estos elementos constructivos utilizados para cumplir con estas funciones pueden ser desde elementos prefabricados de dimensiones menores como blocks o tabiques e incluso de mayor tamaño como paneles, en el mercado existen paneles muy variados, que cumplen funciones diferentes de acuerdo con sus características. Tanto en piezas pequeñas como placas o paneles de mayor tamaño existen una gran variedad de sistemas que permiten la flexibilidad en la solución de espacios. En la mayoría de las construcciones tradicionales se utilizan componentes que se unen de forma monolítica, mismos que se pueden simplificar: una trabe, una columna, una losa.

La habitabilidad dentro de una vivienda se refiere a las condiciones estables y adecuadas con respecto a la temperatura, humedad, acústica, iluminación, ventilación y calidad de aire (CORMA, 2007), lo que garantiza espacios confortables dentro de una vivienda. Asumiendo que a estas características se da por entendido que cumple con las condiciones de dimensiones mínimas de espacios, y que cuente con cada uno de ellos para la solución de necesidades de dormitorio, preparación y consumo de alimentos, almacén, descanso, realizar necesidades fisiológicas y de recreación, circulación, distribución y acceso. Adicional a esto, y para considerar que una vivienda sea habitable, debe contar con la dotación de servicios de agua potable,

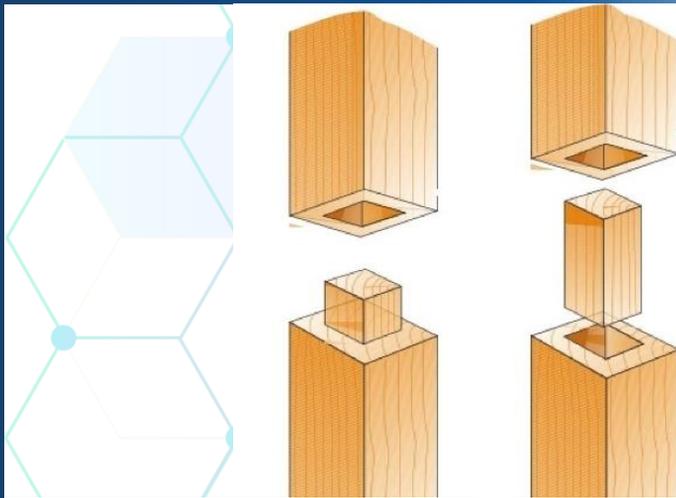
drenaje sanitario y pluvial, alumbrado público, energía eléctrica, vialidad de acceso y en algunas ocasiones acondicionamiento de aire o clima.

Mientras que la durabilidad se refiere a los materiales que estructuran los elementos, la composición de los materiales ya sean permanentes o temporales, deben resistir a las condiciones a las que está expuesta la envolvente, tanto interior, como exterior. La durabilidad se puede prolongar aportando al material estructural acabados para la protección de los elementos estructurales ya sea de acero, concreto, madera, etc. Con la finalidad de que tengan una larga duración de manera que no implique mucho mantenimiento y pueda garantizar su permanencia.

1.3.4 Sistema de unión de componentes: Ensamblajes

Al unir dos o más elementos constructivos en diferentes planos se generan nudos o uniones, que pueden acoplarse con elementos de fijación ya sea del mismo material o diferente, al no tratarse de elementos monolíticos pueden presentar puntos débiles o de falla al momento de ponerlos en servicio (juntas frías²⁰), su comportamiento dependerá de la forma y dimensiones del elemento, así como, el diseño y disposición para la bajada de cargas a la cimentación y posteriormente descargarlas al suelo, por lo que las uniones pueden representar un punto débil en el comportamiento mecánico del elemento. Las opciones de fijación mayormente utilizados son de acero, por la gran resistencia que se puede lograr al utilizar piezas metálicas pequeñas para unir elementos constructivos que pueden ser de acero, madera, concreto o de cualquier otro material.

Figura 1.37 Sistema de empalme o espiga cuadrada



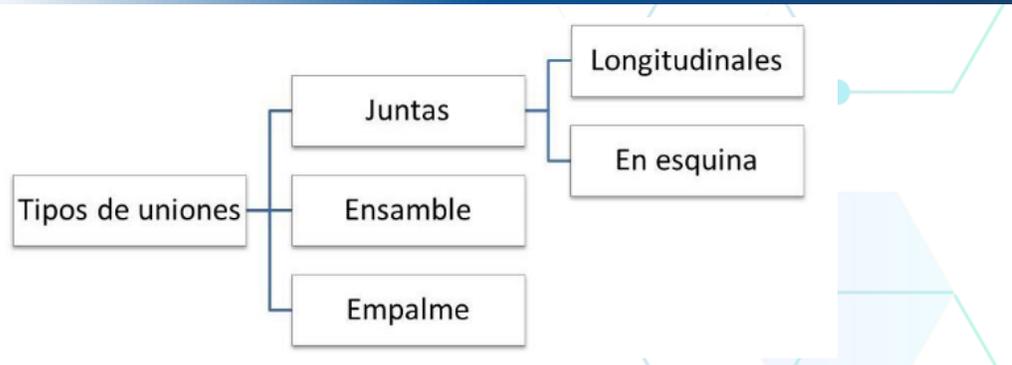
Notas: Esquemas del tipo de unión de empalme o espiga para unir dos elementos verticales. Tomado de Empalmes de madera, https://bricolaje.facilissimo.com/tipos-de-empalmes-para-madera_961441.html, 4 de diciembre de 2021

²⁰ Una junta fría se refiere al efecto ocasionado por la diferencia de materiales, la cual interrumpe la continuidad de comportamiento lineal u homogéneo produciendo una separación entre los materiales originado por fuerzas o agentes externos.

Las uniones realizadas in-situ²¹ pueden ser de dos tipos secas o húmedas. “Uniones secas son por sistemas de atornillado, soldado o uniones adhesivas (se pueden poner en carga tras su ejecución o al poco tiempo); uniones húmedas: por hormigonado o unión de pasta o morteros (hay que esperar hasta que el material se fragüe antes de la puesta en carga)” (Barluenga, 2015). Las uniones en seco a diferencia de las uniones húmedas tienen más posibilidades de recuperar los elementos una vez terminada la vida útil de algún elemento constructivo. Las uniones determinadas por un sistema en seco son aquellas que pueden revertir la unión de elementos, donde es posible recuperar las piezas.

Estas uniones pueden acoplarse ya sea con el mismo material, mediante machihembrado²² que permiten que dos piezas se ensamblen o mediante fijaciones mecánicas, en el caso de la construcción con madera, CORMA (2007). Estas fijaciones se definen como elementos metálicos, generalmente cilíndricos y de acero que se hincan, insertan o atornillan en las piezas de madera que constituye la unión. “Las fijaciones deben ser sencillas, obtenerse con la mínima pérdida de material, dar una seguridad suficiente para su uso y ser de rápida ejecución, las más utilizadas son: clavos, tornillos, tirafondos, pasadores, pernos, placas dentadas y conectores” (p. 132).

Figura 1.38 Tipos de uniones



Notas: En el esquema podemos observar la clasificación de uniones posibles a utilizar en el proyecto del panel modular, Obtenido de Martínez, A. Sistema constructivo modular con materiales alternativos que favorezca a la flexibilidad en la construcción de vivienda, 2015.

1.3.5 Materiales constructivos alternativos

Dentro de los procesos de fabricación de materiales constructivos denominados tradicionales, se han utilizado materiales que promuevan la disminución de su transformación y procesamiento, optando por el uso de materiales industrializados

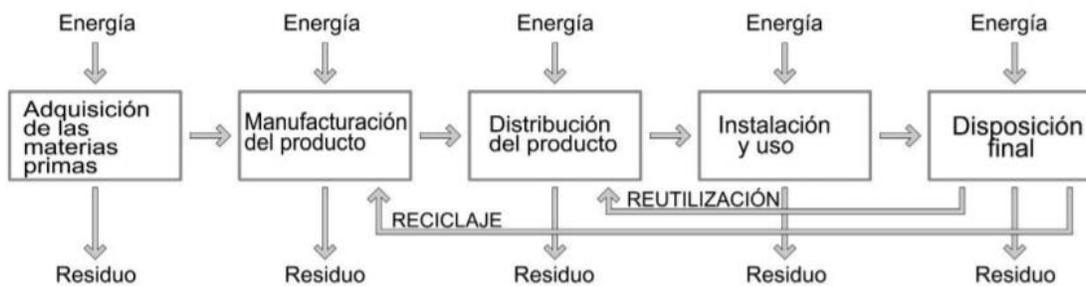
²¹ In-situ es una locución de origen latino que significa ‘en el lugar’, ‘en el sitio’, ‘sobre el terreno’.

²² La palabra machihembrado está compuesta por la palabra macho y hembra, significa que está formado por dos piezas, con una que se denomina “macho”, porque tiene un saliente que se acopla a la entrante de la otra, que se entiende como la “hembra”.

cuyos procesos de transformación de la materia prima implican un derroche energético y altas emisiones contaminantes, en donde el concreto y tabique se han convertido en materiales convencionales en la construcción, principalmente por la asociación con su durabilidad y resistencia, que para el caso de la vivienda ha predominado el uso de estos materiales en la configuración estructural de estos espacios.

Cuando hablamos de materiales alternativos nos referimos a la opción del uso de materiales constructivos distintos a los utilizados de manera tradicional utilizados en la construcción de vivienda, como son el concreto, acero, block y tabique principalmente. Algunos materiales alternativos que se destacan en la última década deben cumplir con características como el bajo costo, suficiente y fácil obtención de

Figura 1.39 Ciclo de vida de un material



Notas: En el esquema se observa el proceso de ciclo de vida de un material, enfatizando el uso de energía y procesos de reciclaje y reutilización de residuos. Obtenido de Dobón B. Materiales de construcción reciclados y reutilizables para la arquitectura sustentable, 2018.

materia prima, y que sean materiales que tengan cuidado con el medio ambiente. Se denomina alternativo por la inclusión y procedencia de los materiales naturales distintos a lo que comúnmente se utiliza en la industria de la construcción, materiales tradicionales.

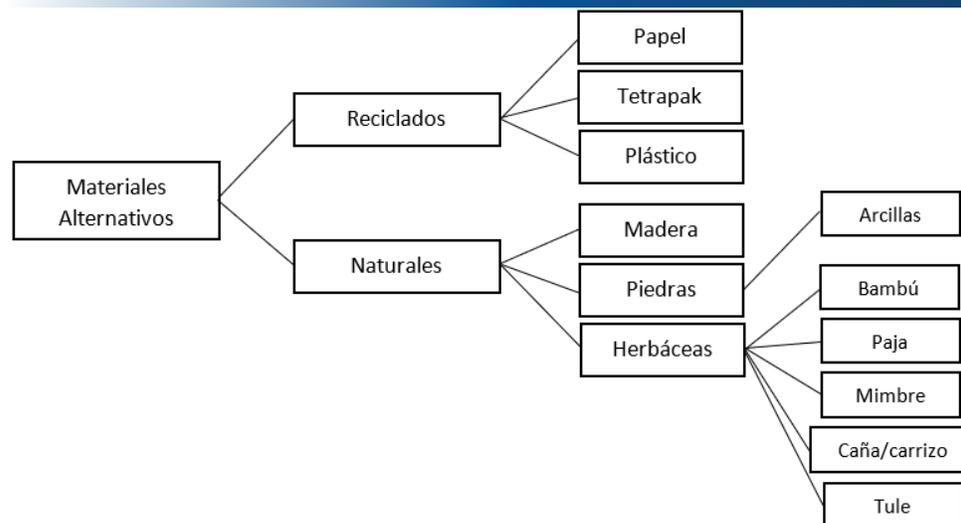
Los materiales producto del reciclaje a pesar de no considerarse naturales, debido a los procesos productivos a los que son sometidos y por su procedencia a partir de los desechos urbanos producto de diversas industrias, se consideran una alternativa con grandes posibilidades para integrarse a la industria de la construcción, entre los más utilizados se encuentran diversos tipos de plásticos, papel, basura agrícola, envases de Tetrapak, etc.

Existen algunos autores como King (2000) que considera algunas de las razones por las que no se utilizan los materiales alternativos en comparación del uso de los materiales tradicionales. Principalmente la falta de información y experimentación al respecto originan que estos materiales no destaquen como una posibilidad viable dentro de la industria de la construcción: “habiendo aprendido a trabajar casi exclusivamente con los “grandes cuatro” materiales (concreto, piedra,

acero y madera) muchos ingenieros son muy cauteloso o renuentes a trabajar con materiales de los que nunca han leído en libros” (King, 2000). Sin embargo, hoy en día es posible encontrar diversos estudios acerca de materiales naturales de uso ancestral y sus propiedades térmicas y mecánicas principalmente. Dentro de soluciones de arquitectura vernácula se retoman conceptos y soluciones de uso de materiales como la tierra, el bambú, la paja, inclusive algunos otros productos del reciclaje.

En este sentido para esta investigación se plantea utilizar materiales alternativos de dos tipos, principalmente productos reciclados de polímeros derivado de desechos plásticos y por otra parte un material natural como son las arcillas, con la finalidad de exfoliar los plásticos y compatibilizarlo para mejorar las condiciones del polímero reciclado.

Figura 1.40 Clasificación de materiales alternativos



Notas: Se presenta un esquema general de los materiales alternativos dividido entre reciclados y naturales, mostrando algunas opciones para uso de posibles materiales para uso en la construcción. Retomado de Dobón B. Materiales de construcción reciclados y reutilizables para la aquitectura sustentable, 2018.

La posibilidad de aplicación de estos materiales se analiza en función de dos alternativas de manera lineal o superficies compuestas, mismas que serán elementos confinados por estructuras de concreto con base en marcos rígidos, muy similar al sistema de mampostería confinada, como se describe en el presente capítulo.

Es importante tomar en cuenta estas alternativas desde el punto de vista de la planeación del proyecto, al momento de definir los procesos constructivos y materiales a utilizar para dar solución a las necesidades específicas de cada espacio y con las condiciones de cada región. Es importante considerando el ciclo de vida de los materiales y en conjunto los edificios, ya que, al cumplir con su vida útil se convierte en residuo en el que no se observan claras acciones para dar soluciones

concretas con miras hacia un desarrollo sustentable y destacando el enfoque ambiental, económico y social.

En conclusión, se retoman conceptos y alternativas hacia una arquitectura eficiente enfocada a uno de los sectores de vivienda más amplios y con mayor necesidad de mejorar las condiciones en los que se desarrollan. La vivienda de interés social en serie representa un sector muy amplio en cuestión del número de viviendas que se construyen año con año, lo que impacta en una sociedad que presenta graves problemas económicos y de rezago habitacional.

Es por ello, que la inclusión de sistemas modulares que enfatizan el uso de procesos de planeación, proyecto, ejecución y uso en las soluciones de vivienda, estén enfocados en el desarrollo de edificios sustentables, los cuales abren un panorama para la aplicación de parámetros y uso de materiales alternativos.

El uso de materiales alternativos dentro de la propuesta para una solución en la cual se exploran sistemas prefabricados y la industrialización dentro de la construcción de vivienda en serie, se exploran procesos y elementos que conforman estos sistemas constructivos en una arquitectura prefabricada. Lo que permite replantearnos el futuro de la arquitectura y el desarrollo de ciudades con el objetivo claro de reducir el impacto al medio ambiente y la generación de gases de efecto invernadero, por medio del uso de materiales reciclados o naturales que reducen el consumo de energía y replantean la vida útil de dichos materiales, enfatizando el uso de una economía circular.

Capítulo II

El plástico reciclado y su refuerzo con nanoarcillas

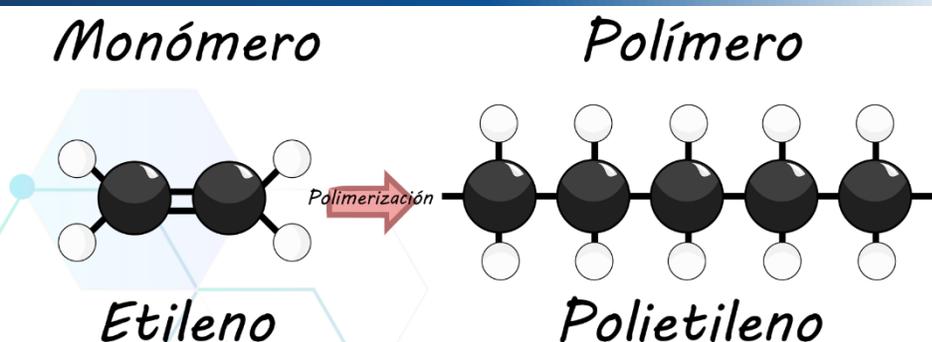
“El ingenio y las habilidades de los artesanos desde la antigüedad, y ahora de los científicos, muestran que, en este caso, la nanotecnología siempre ha estado presente en la vida humana.” Adriana Lira Oliver (2017)



Capítulo II. El plástico reciclado y su refuerzo con nanoarcillas

Los plásticos son materiales sintéticos fabricados a partir de derivados del petróleo; a causa de su versatilidad y características se han utilizado en diversas industrias entre las que destacan la alimentaria, médica, automotriz, embalaje, entre otras. Los plásticos están formados por macromoléculas de polímeros²³ sintéticos que se obtienen por medio de reacciones químicas a partir de los monómeros (molécula pequeña de masa molecular). Se pueden clasificar por homopolímero, en el caso de la composición del plástico, sea por la unión de un solo tipo de monómero (Figura 2.1), o en dado caso de que esté formado por la unión de dos tipos de polímeros diferentes se denomina copolímero.

Figura 2.1 Síntesis de los monómeros y polímeros



Notas: El gráfico representa el proceso de síntesis de los monómeros y polímeros por medio de un proceso de polimerización, en este caso el etileno a un polietileno. Obtenido de Polimerización Raft, 13 de noviembre de 2017. Sin autor, <http://poliuriel.blogspot.com/2017/11/la-palabra-polimero-puede-definirse.html>

El uso de materiales plásticos se ha tornado como una de las soluciones más accesibles económicamente y flexibles para diversos usos de la vida cotidiana y parte fundamental de múltiples industrias. El creciente consumismo ha generado problemas agravantes ante el deficiente manejo de los residuos sólidos en casas, comercios, instituciones, industrias y áreas públicas en general, producto de las diversas actividades cotidianas y el corto periodo de uso, mismo que deriva en problemas de contaminación, repercusión de la salud pública y en daños al medio ambiente.

Este problema de acumulación de residuos produce complicaciones ambientales muy graves, que a inicio de los años 70's parecía no representar un riesgo importante para la sociedad y el uso del plástico representó la solución ideal para sustituir productos como el vidrio, el metal y la tela, aunque la planificación de la parte final de su vida útil y manejo de los residuos producidos del uso de estos materiales, no fue una prioridad durante muchos años. La creciente escasez de

²³ Los polímeros son moléculas muy grandes (macromoléculas) que están formadas por unidades menores o monómeros.

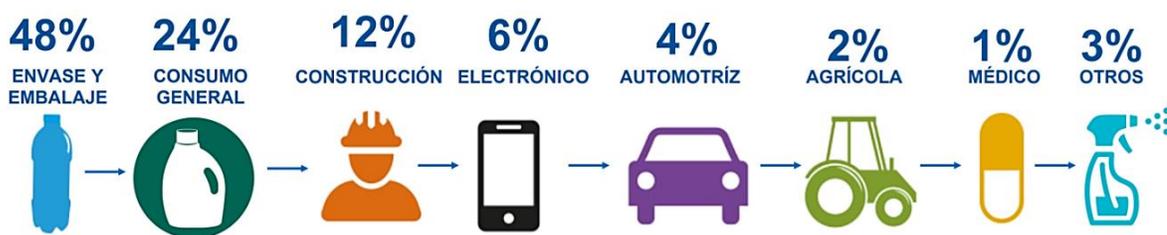
materias primas para la síntesis de plásticos, su recuperación y la protección del ambiente, son razones suficientes para su reciclaje.

Deffis (1994), hace referencia a un problema grande con pequeñas soluciones como es la basura o como él lo menciona:

Lo que estamos acostumbrados a llamar basura sería más propio denominarla residuos, puesto que las definiciones de desperdicios, desechos o basuras, presuponen un deseo de eliminarlos, de deshacerse de ellos, ya que no se les atribuyen el valor suficiente para conservarlos (...) la solución principal que la sociedad ha dado a este problema ha sido bastante primitiva; quitárselos de la vista, arrojarlos en las afueras de las ciudades, u ocultar el problema, enterrándolos. (p. 271)

Estudios estadísticos realizados por la industria del plástico en México, destacan que el uso de plásticos de envase y embalaje lideran el consumo a nivel nacional con un 48%, mientras que el consumo de artículos de limpieza y para el hogar se ubica en el 24% de consumo de este material, mientras que en tercer lugar lo ocupa la construcción con un 12%. De este modo el uso de un material de residuo sólido como el plástico, se plantea como una alternativa con grandes posibilidades para desarrollar materiales con nuevos usos y características para su incursión en un nuevo ciclo productivo en la industria de la construcción. (Anuario Estadístico ANIPAC, 2017)

Figura 2.2 Segmentación por proceso y uso de los plásticos



Nota: Gráfico de representación de estudios estadísticos realizados en el Anuario Estadístico ANIPAC, 2017, en referencia al uso de los plásticos en la República Mexicana.

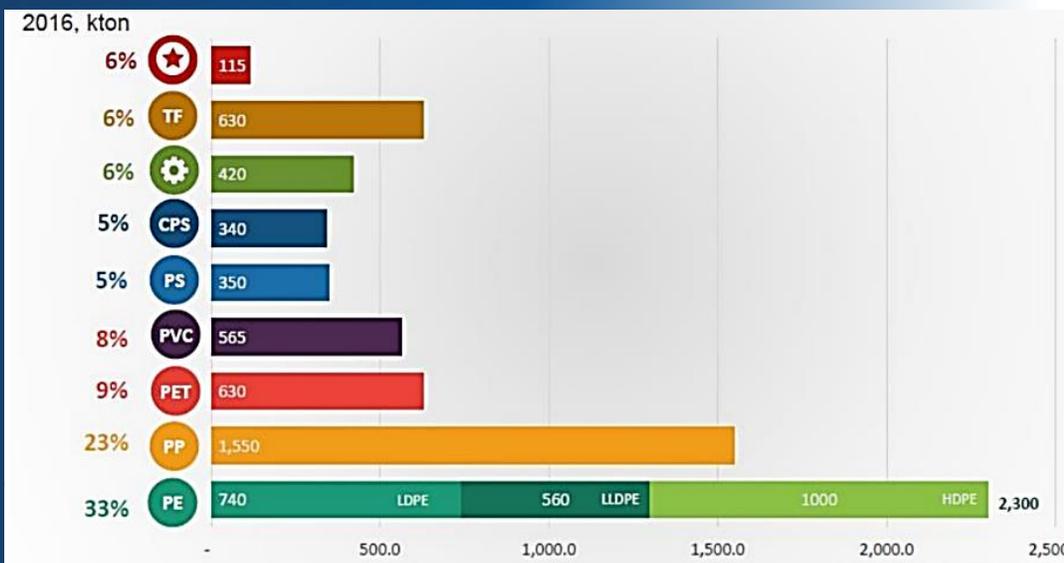
Estos porcentajes nos dan un panorama sobre cuáles son los artículos y tipos de plástico que posibilitan su reciclaje, por una parte, el uso de materiales reciclados se ha acrecentado en gran medida, a pesar de que los esfuerzos por reducir la contaminación apenas comienzan a dar frutos. En cuanto a sus propiedades fisicoquímicas como la elasticidad, maleabilidad, resistencia química y mecánica, impermeabilidad, resistencia a la corrosión, ductilidad, entre otras, hacen del plástico una materia prima adecuada en ingeniería, para la fabricación de objetos diversos y que su manejo que requiere de procesos tecnológicos para su producción, reciclaje y disposición final.

Por otro lado, si nos referimos a la industria de la construcción existen grandes beneficios del uso de materiales plásticos si los comparamos con ciertos procesos tradicionales en la edificación, como son la maleabilidad de formas a necesidad del espacio u objeto, la fácil instalación y mantenimiento, durabilidad y resistencia a la corrosión, aislante acústico y térmico, es ligero y de fácil transporte, además de su bajo costo.

Tal como lo representa una de las empresas pioneras del uso del plástico reciclado en la configuración de sistemas constructivos de vivienda, “Más del 80% de todos los plásticos son usados una sola vez y terminan en rellenos sanitarios, que producen la mayoría de los gases contaminantes del efecto invernadero. Muchos desechos plásticos terminan en el mar, lo cual no solo produce contaminación, sino que también ocasiona problemas a la fauna marina dado que gran cantidad de animales marinos mueren cada año.” (Bloqueplas por Ecoplasso, 2020)

El plástico es un material artificial muy versátil, aunque demandante en su proceso de extracción, lo cual es altamente contaminante, ya que, para su producción se utiliza gas natural o petróleo crudo lo que consume un número importante de recursos y produce en la misma cantidad de contaminantes al ambiente. Dado que esta producción ha ido en crecimiento por las características antes mencionadas, el valor del plástico en la economía mundial depende del mercado del petróleo que en ocasiones se vuelve muy volátil.

Figura 2.3 Clasificación de plásticos por tipo de consumo



Notas: La gráfica representa los porcentajes de consumo por tipo de plásticos en México, lo que muestra el panorama del posible plástico con posibilidades a utilizar, de Ambiente Plástico, ANIPAC, 2016, p.17.

En cuanto a la clasificación conforme al uso de materiales plásticos dentro de diversas industrias, destaca entre los 3 primeros el polietileno, con porcentajes

variables entre el LPDE (polietileno de baja densidad), LLPDE (polietileno de baja densidad lineal) y el HDPE (polietileno de alta densidad por sus siglas en inglés) destacan con un 33%, posteriormente el PP (polipropileno) se ubica en segundo lugar con un 23% y el PET (tereftalato de polietileno) en 9% ubicándose en la tercera posición dentro de los indicadores de consumo de acuerdo con datos de la Asociación Nacional de la Industria del Plástico, ANIPAC (2016).

Ante la versatilidad de aplicaciones y las diversas características que presentan los materiales poliméricos, surge una inquietud por introducir los plásticos en un sistema constructivo de vivienda lo que da origen a la presente investigación. Este material representa grandes retos para poder configurar un elemento constructivo de vivienda, aunque, ya existen diversas propuestas que han puesto en marcha la solución de edificios con elementos que emulan los bloques de cemento, aún presentan ciertas limitantes ante las condiciones a las que se expone un elemento estructural.

Entre las principales características que debe cumplir un material constructivo de vivienda se puede mencionar su comportamiento mecánico, resistencia a diversas fuerzas externas, resistencia a la intemperie, a las condiciones climatológicas (frío-calor), aislamiento térmico, entre otras. Es por ello, que el reforzar los polímeros reciclados se volvió fundamental para la solución de este proyecto.

Ante esta búsqueda de alternativas que puedan aportar mejores condiciones a los plásticos reciclados, se describen en diversos artículos que hacen referencia a la arcilla como material que puede reforzar las condiciones de los plásticos, es así, como lo menciona Rafailovich y otros investigadores de la Universidad Stony Brook, EE UU, en el artículo, *“La arcilla inspira la fabricación de superplásticos”* (Interempresas, 2011), en la que exponen las posibilidad de utilizar arcillas modificadas para mejorar las condiciones de los plásticos:

Una sustancia hecha de arcilla natural, la misma que se utiliza para hacer vasijas de cerámica, se está convirtiendo en la base para una nueva generación de nanocompuestos plásticos de alta resistencia a prueba de fuego. Un grupo de científicos ha validado teórica y experimentalmente la primera arcilla orgánica para su utilización como relleno en la fabricación de plásticos. El material, de bajo coste y que se puede producir a gran escala, se fabrica con arcilla natural, que lo hace más seguro y más respetuoso con el medio ambiente que los productos químicos actualmente utilizados en la fabricación de plásticos compuestos de alto rendimiento.

Lo que da apertura a investigar la posibilidad de integrar las arcillas modificadas como un viable refuerzo de los plásticos reciclados, se presenta como una alternativa para la fabricar un nanomaterial con posibilidades para su uso dentro de la construcción.

2.1 Plástico reciclado, el desecho de un solo uso

Los polímeros se consideran materiales de diversas características y variantes, tales como los plásticos, hule, caucho o adhesivos, estos se pueden clasificar en tres tipos principales: los termoplásticos, termofijos y elastómeros. Aunque dentro de las condiciones del mercado actual se ha optado por la recuperación de polímeros de tipo termoplástico debido a la facilidad de reintegración a un nuevo proceso productivo.²⁴

Los polímeros **Termoplásticos** son fáciles de reciclar ya que se ablandan cuando se someten a altas temperaturas lo que permite que puedan moldearse varias veces sin que sus propiedades originales se vean significativamente alteradas. Dentro de la familia de los termoplásticos se han clasificado siete tipos estándar: poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET), polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD), cloruro de polivinilo (PVC), y por último el grupo que incluye plásticos como el policarbonato (PC), la poliamida (PA), el ABS, el poliuretano (PU); el Acrílico (PMMA), etc.

Figura 2.4 Clasificación por código de color de resinas plásticas



Notas: Se presenta la simbología de clasificación de los 7 tipos de plástico conforme al Código de Identificación de plásticos, con la finalidad de facilitar los procesos de reciclaje de los mismos, del Estudio de nuevas tecnologías de la construcción con bloques de materiales plásticos reciclados por Betancurt F. 2019.

Los plásticos están diferenciados según un Código de Identificación de Plásticos, que es un sistema utilizado internacionalmente en el sector industrial, para distinguir la composición de resinas en los envases y otros productos plásticos. Esto fue realizado por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI) en el año 1988, con el fin de propiciar y dar más eficiencia al reciclaje. (Hernández Tomas, citado por Justicia B., 2019)

²⁴ Se trata de pasar de un modelo lineal, basado en el usar y tirar, a un nuevo paradigma que ya se ha denominado como Economía Circular.

Para obtener mejores resultados en los procesos de reciclaje es fundamental la clasificación de los materiales plásticos con la finalidad de facilitar la separación e identificación de manera más sencilla y de forma gráfica, los diferentes tipos de plástico se identifican con un número del 1 al 7 ubicado en el interior del clásico signo de reciclado (triángulo de flechas en seguimiento).

Conforme a los referentes de indicadores de plástico reciclado en México, Justicia A. (2019), destacan 3 tipos de plásticos como piezas fundamentales en el desarrollo de la industria del reciclaje y su incursión en el mercado nacional, retoma definiciones, usos y reciclado de los códigos de identificación de resinas de plásticos de Hernández Tomas (pp. 5-8); y las propiedades fueron extraídas de (RIVERA TÁVARA, 2004, p. 31).

En primer lugar, se encuentra el 1 PETE o PET (tereftalato de polietileno), este es uno de los plásticos que tienen mayor cantidad de reciclaje, en gran medida al consumo de líquidos como agua embotellada, refrescos o jugos, que toman un lugar importante en el consumo de la sociedad mexicana en los últimos 30 años. Algunas propiedades del PET son su alta resistencia, transparencia, buena barrera de CO₂ y a la humedad, impermeable, puede estar en contacto con los alimentos y es de fácil reciclaje.

El segundo lugar, lo ocupa el 2 HDPE (polietileno de alta densidad), este tipo de plásticos son un referente de su uso en los procesos de reciclado y reintegración en diversos ciclos productivos, los usos más comunes que tienen estos materiales son en aplicaciones como envases para detergentes, aceites automotores, champú, lácteos, bolsas comerciales, cajas, cubetas, tambores, tubería para gas, telefonía, agua, potable, minería, drenaje y uso sanitario, macetas, bolsas tejidas, industria médica y usos en la agricultura.

Figura 2.5 Tipos de plásticos y cómo se reciclan



Notas: El gráfico explica el nivel de facilidad de reciclaje dependiendo el tipo de plástico que se trate y los posibles artículos en los que se utilizan las resinas. Obtenido de Tuya M. PET, PVC, PS... ¿qué tipos de plásticos se pueden reciclar y cuáles no?, <https://www.20minutos.es/noticia/4085684/0/que-tipos-plastico-pueden-reciclar/>, 12 de diciembre de 2019.

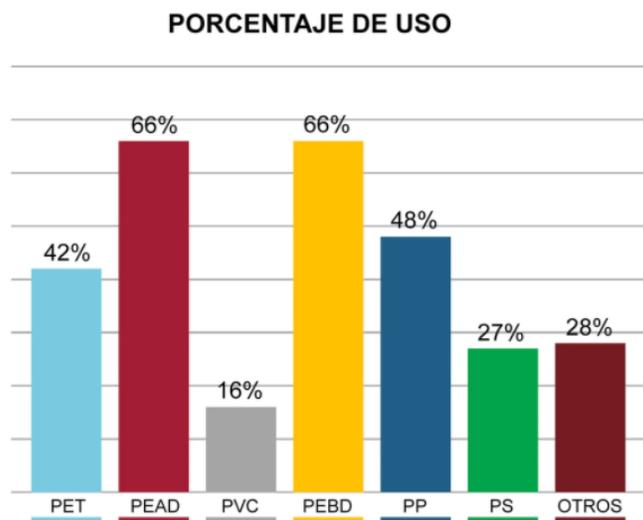
De este tipo de plástico destacan sus características de alta resistencia química y térmica, resistencia a los impactos, solidez, incoloro, facilidad de procesamiento y reciclaje, flexible, pero con rigidez, ligero, impermeable, reciclable, resistente al agua, a ácidos y a varios disolventes.

Por último, se encuentra el 4 LDPE (polietileno de baja densidad), este tipo de plástico reciclable, se utiliza en algunos empaques de pan y bolsas de comida congelada, botes de basura, bolsas de uso industrial y comerciales, bolsas tejidas, industria médica y usos en la agricultura (acolchados, invernaderos, ollas de agua, etc.). Este material plástico tiene alta resistencia química y térmica, resistente a los impactos, fácil de procesar, flexible, transparente u opaco, tiene dificultades para imprimir, pintar o pegar sobre su superficie.

El polietileno es uno de los polímeros de mayor consumo y producción a nivel mundial derivado a las buenas propiedades que posee facilidad de procesado, buena resistencia química, termo soldabilidad, baja barrera al agua, junto con su bajo coste, hacen que esté presente en una gran variedad de aplicaciones (envases de alimentos, envases industriales, película, bolsas, tuberías, usos agrícolas, cableado, automoción).

Por tal motivo, el HDPE se torna como la mejor opción debido a las condiciones mecánicas y físicas en comparación con otros tipos de plásticos, además de su facilidad de procesamiento y su creciente participación dentro del mercado del reciclaje. De igual manera el procedimiento de transformación de este plástico presenta condiciones similares a los de procedimientos industriales de fabricación de elementos arquitectónicos, un ejemplo claro es con la denominada madera plástica o plastimadera, misma que ha sido introducida dentro de la arquitectura como un sustituto viable de la madera decorativa como vigas, piso e incluso para la fabricación de muebles para exterior.

Figura 2.6 Porcentaje de uso de plásticos en México



Notas: En el gráfico se representan los porcentajes de plásticos por su uso en relación con la clasificación de tipo de polímero. Robayo, 2020 retomado de Comisión de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable (CESPEDES), <https://cce.org.mx/2020/07/01/cespedes/>.

2.2 Características del Polietileno de alta densidad reciclado

Se distinguen dos tipos de polietilenos: de baja densidad ($0,92 - 0,93 \text{ g/cm}^3$) y el de alta densidad ($0,94 - 0,97 \text{ g/cm}^3$).

El de baja densidad es un polímero ramificado, es decir: a la cadena principal a la que se le “pegan” lateralmente trozos de polietileno, lo que lo hace menos compacto. La polimerización se hace en masa y vía radicales libres y a alta presión. El material resultante es un sólido ligeramente flexible, dependiendo de su grosor, ligero de peso y buen aislante eléctrico.

Presenta, además, una gran resistencia mecánica y química. Dado su bajo coste se utiliza mucho como papel de envolver, bolsas plásticas, envasado, revestimiento de cables eléctricos, fabricación de tuberías y en la producción de materiales de inyección por moldeo. A partir del polietileno de baja densidad se prepara el polietileno reticulado (resultante de la formación de enlaces entre cadenas de polímero), rígido y resistente a la tracción y al cambio de temperaturas, su mayor uso es en la protección y aislamiento de líneas eléctricas de baja y media tensión.

La polimerización del polietileno de alta densidad se lleva a cabo a baja presión y utilizando catalizadores en suspensión. El polímero obtenido es altamente cristalino, de cadena lineal y muy poco ramificada. Su resistencia térmica y química, su dureza, opacidad e impermeabilidad es muy superior a la del polietileno de baja densidad; solo que es menos resistente al agrietamiento y al impacto. Su uso común es en envases contenedores de gases, líquidos, combustibles, como materiales prostéticos y en la industria de la construcción. (Perdomo, 2002)

El HDPE (polietileno de alta densidad) es un homopolímero, considerado por su composición química como el polímero más simple y derivado a su alta producción mundial, es considerado el más común y barato en la industria de los plásticos. Se obtiene de la polimerización del monómero de etileno, con fórmula química $\text{CH}_2=\text{CH}_2$. Dependiendo de las condiciones de polimerización se obtienen polietilenos con diferentes ramificaciones, es decir, con diferente densidad y cristalinidad.

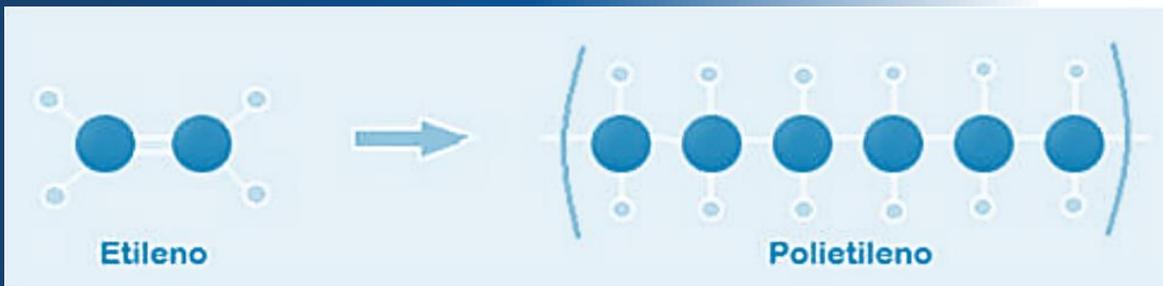
Figura 2.7 Estructura de HDPE



Notas: En el gráfico se observa la representación de una estructura simple de Polietileno de alta densidad, obtenido de <https://goo.gl/iHdXoC>, 12 de agosto de 2021.

En la figura 2.7 se muestra la estructura con base en polietileno, ejemplo de un polímero sintético, así como el monómero que lo conforma, que está clasificado como una poliolefina, altamente usado como embalaje pues cuenta con una gran estabilidad química, ligereza, impermeabilidad y bajo costo. (Arias C. &, 2017)

Figura 2.8 Estructura del monómero del etileno y del polietileno



Nota: De E. Flores et. al., Compuestos poliméricos y sus aplicaciones - Polymeric compounds and their applications, 2019. Esquema de la estructura del monómero de etileno y del polietileno:

Un aumento en la densidad del polietileno conlleva variaciones en las propiedades como por ejemplo mayor resistencia al estiramiento y a la flexión, aumento del brillo y reducción de transparencia, aumento de la resistencia térmica y reducción de la termo soldabilidad. (R. Gendron, 1996)

Tabla 2.1 Variación de propiedades en función de la densidad

Propiedad	Densidad creciente	→	Propiedad
Flexibilidad	Aumenta	Decrece	Cedencia textil
		Decrece	Rigidez
Resistencia al impacto	Aumenta	Decrece	Resistencia a la deformación
		Decrece	Impermeabilidad
Resistencia al resquebrajamiento	Aumenta	Decrece	Resistencia a la abrasión
Resistencia a deformación	Aumenta	Decrece	Contracción en el moldeo
		Decrece	Dureza

Notas: En la tabla se expresan las posibles variaciones de propiedades y como afectan al comportamiento del polímero, de A. Lartre en el Estudio de los plásticos como material reciclado para la obtención de material de construcción, 2019

Como se puede observar en esta tabla comparativa, las propiedades de este tipo de polímeros dependen de varios factores como la densidad, por lo que en el mercado existen una gran cantidad de resina de HDPE, dependiendo el uso que se requiere y las características que se desean obtener en el objeto a fabricar. Por tal motivo, si se incrementan las propiedades de resistencia a la tensión, rigidez,

resistencia a la deformación, impermeabilidad, resistencia a la abrasión, contracción en el modelo y dureza al incrementarse la densidad y es lo que diferencia al polietileno de alta y de baja densidad. Por otra parte, se incrementa la resistencia al impacto, la flexibilidad y la resistencia al resquebrajamiento por intemperización al disminuir la densidad. (Latre, 2019)

Tabla 2.2 Variación de propiedades en función del peso molecular

Propiedad	Peso molecular creciente →		Propiedad
Resistencia de impacto	Aumenta	Decrece	Flujo de polímero fundido
Resistencia a la tracción	Aumenta	Decrece	Índice de fusión
Elongación	Aumenta	Decrece	Procesabilidad
Resistencia a la fusión e hinchamiento	Aumenta	Decrece	Estiramiento de la masa fundida
Resistencia al resquebrajamiento	Aumenta		
Resistencia a deformación	Aumenta		

Notas: En la tabla se expresan las posibles variaciones de propiedades en función del peso molecular del HDPE, de A. Latre en el Estudio de los plásticos como material reciclado para la obtención de material de construcción, 2019

Las propiedades mecánicas de los plásticos dependen de su procesamiento y su interacción con variaciones de temperatura, existen diferentes factores de tipo estructural que determinan las propiedades mecánicas como son: peso molecular, ramificaciones, cristalinidad, orientación molecular, aditivos modificadores. Además de otros factores ambientales como temperatura y presión.

Una propiedad muy importante del PE y que favorece su uso en muchas aplicaciones como son: envasado de alimentos, recubrimiento de papel y cartón, es su reducida permeabilidad al vapor de agua. Sin embargo, tiene una elevada permeabilidad a vapores orgánicos, aromas, dióxido de carbono y oxígeno. La permeabilidad aumenta con la temperatura.

El procesamiento del polietileno tiene diversas alternativas y facilidad de transformación muy alta lo cual representa una ventaja muy importante ante otros tipos de polímeros como el policloruro de vinilo (PVC), tal como lo menciona Villanueva (2009):

El polietileno se puede procesar mediante distintas técnicas dependiendo del uso o aplicación. Cuando el material fluye a través de un orificio, como por ejemplo en la extrusión, existe una orientación de las moléculas, que pasan al estado no orientado si se mantiene el estado en fundido, pero permanecen orientadas en

estado sólido si el material se enfría rápidamente como ocurre normalmente en los procesos de fabricación (extrusión, inyección). Este grado de orientación depende de la longitud media de la cadena y del grado de ramificación. Los polietilenos de alto peso molecular muestran más orientación que los materiales de peso molecular bajo, y la orientación disminuye a medida que sube la temperatura.

Dentro de los métodos de procesamiento más utilizados son la extrusión, por moldeo a inyección, por termoformado, por moldeo por espuma y por moldeo rotacional. En algunas circunstancias especiales se utiliza el moldeo por compresión o el moldeo mecánico.

Tabla 2.3 Propiedades mecánicas y reológicas del polietileno de alta densidad

Propiedades Típicas			
	Unidades		Método ASTM
	Inglésas	SI	
Densidad	-	0.955 g/cc	D 4883
Índice de Fluidez	-	0.35 g/10 min	D 1238
Resistencia a la Tracción @Rendimiento (2 in/min)	4000 psi	27.6 MPa	D 638
Elongación @Rotura (2 in/min)	>700%	>700%	D 638
Elasticidad del Módulo de Tensión	217,000 psi	1497 MPa	D 639
Módulo de Flexión	180,000 psi	1241 MPa	D 790
Rigidez en la Fricción	100,000psi	690 MPa	D 747
Resistencia a la Tensión	132 ft-lbf/in	277 kJ/m ³	D 1822
Resistencia al Impacto Izod con muesca	3.5 ft-lbf/in	0.19 kJ/m	D 256
Dureza (Shore D)	65	65	D 2240
Punto de reblandecimiento Vicat	268 °F	131 °C	D 1525
Temperatura de Fragilidad	<103 °F	<-75 °C	D 746
Temperatura de Deflexión @66psi	165 °F	74 °C	D 848

Notas: La tabla presenta las propiedades de la resina típica de alta densidad la cual sirve de referencia y como comparativo con el material reciclado y el compuesto que se fabrica en la presente investigación. Obtenido de M. Pérez en Caracterización de nanocompuestos PEAD para el aligeramiento de botellas de PEAD, UAEM (2014).

El polietileno tiene una variedad de aplicaciones debido a su versatilidad de propiedades. Su buena resistencia química, no toxicidad, baja permeabilidad al agua, ligereza, su capacidad de aislamiento eléctrico, su facilidad de procesamiento además de su abundancia y su bajo coste, hace que se pueda utilizar en artículos de diversas industrias como la del embalaje para envolturas de alimentos, recipientes de leche, tuberías, fibras (fibra textil para tapicería de automóviles), películas, aislamiento eléctrico, revestimientos (del papel), envases, utensilios caseros, aparatos quirúrgicos, juguetes, artículos de fantasía, instalaciones químicas, etc.

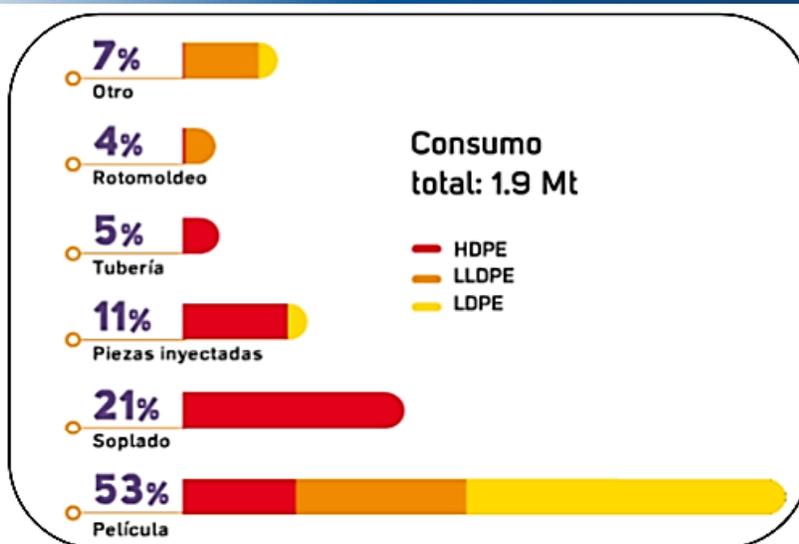
Una de las características de los polímeros que han representado un gran problema derivado del mal manejo de los residuos sólidos, es el periodo de degradación, mismo que se agudiza si este material se encuentra enterrado, para el caso del HDPE, puede tardar en descomponerse más de 150 años, para el caso del plástico reciclado es importante considerar que cada proceso térmico al que es expuesto el material plástico, sufre cierto deterioro, ya que se afecta la composición de estas largas cadenas moleculares, reduciendo sus características.

Para poder contrarrestar este deterioro por el periodo de transformación producto del reciclado y con la finalidad de utilizarse como material para fabricación de elementos constructivos de vivienda es necesario mejorar sus propiedades, por lo que se han estudiado algunas alternativas como lo menciona Sagredo (2017).

El plástico puede usarse como matriz para dar origen a un material compuesto o compósito, que es aquel formado por dos o más materiales de diferente naturaleza y, con una fase continua, conocida como matriz y una fase dispersa o discontinua conocida como carga, aditivo o relleno. Los compósitos se pueden clasificar según la escala de integración de los rellenos teniendo los de integración macro, micro y nano escala.

El polietileno es la resina más consumida en el mercado doméstico de México, aunque no la de mayor crecimiento en los últimos años, debido a un escaso desarrollo de nuevas investigaciones para el mejoramiento de la productos, procesos y tecnologías para la transformación del mismo. Actualmente los mercados sobre el consumo de PE han cambiado drásticamente. Las bolsas se volvieron el blanco favorito de legisladores y autoridades ambientales debido al consumo que se tiene, ya que ocupa el 53% del PE que se produce en México. (Conde, 2013)

Figura 2.9 Segmentación por tipo de producto de PE en México 2013



Notas: El gráfico representa el porcentaje de usos del Polietileno en la industria y sesgado por HDPE, LLDPE y LDPE. Obtenido de M. Conde, "Polietileno. La fórmula 1 del plástico", Revista ambiental del plástico, 2013.

Las bolsas no son el único producto con riesgos de regulación, en segundo lugar, se encuentran los envases plásticos rígidos, moldeados por soplado, los cuales ocupan alrededor del 21% de la producción nacional. Donde las botellas y contenedores de PEAD, son utilizadas para leche, jugo, refresco, aceite para autos y detergentes. El tercer lugar, lo ocupa la inyección de piezas de PE, abarca productos para el hogar, juguetes y algunas tapas. Las tuberías y perfiles son otro pequeño segmento del consumo de PE, que se obtienen por el proceso de extrusión.

2.3 El reciclaje en México

El manejo de los residuos sólidos es uno de los problemas más complejos del siglo XXI, el cual va sumamente ligado a la conciencia social y cultural, por el cuidado del medio ambiente, es evidente que estos conceptos han sido muy bien manejados en la mayoría de países desarrollados. La educación para clasificar los residuos sólidos facilita los procesos de reciclaje de los diferentes materiales que tienen esta posibilidad, es distinto en países en vías de desarrollo, aunque en América Latina los procesos de reciclaje de plástico han tomado mucha relevancia.

De acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), son aquellos generados en las casas-habitación que resultan de la eliminación de los materiales que se utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

Tabla 2.4 Generación total y per cápita de residuos sólidos urbanos 2013-2016

GENERACIÓN	AÑO															
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Total anual (Millones de toneladas)	31.49	32.17	32.92	34.6	35.41	36.14	36.87	36.7	38.33	40.06	41.06	42.1	42.76	43.71	44.66	45.62
Per cápita (Kg/hab/día)	0.87	0.88	0.89	0.9	0.91	0.92	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1.02	1.03	1.04	1.05

Notas: Estimación propia con datos de 2001 al 2012 del SNIARN e información de la Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. Sedesol. México. 2013.

El dato oficial más reciente corresponde al año 2012. La generación de RSU del país fue de 42.1 millones de toneladas con una generación per cápita de 0.99 kg/hab/día. Considerando los datos de 2001 a 2012, se puede estimar que en 2016 corresponde a 45.62 millones de toneladas al año.

De acuerdo al reporte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) sobre la Situación de la gestión de residuos sólidos en América Latina y el Caribe 2015, la

generación promedio es de 0.9 kg/hab/día²⁵, por lo que la de México está por sobre la media de la región. En cuanto a la generación estatal, los grandes generadores de residuos del país son: Estado de México, Ciudad de México, Jalisco, Veracruz y Nuevo León.

De las 12.816 toneladas diarias de basura que se generan en Ciudad de México, 48% proviene de casas, 15% de comercios, 15% de servicios, 10% de mercados, 5% de la Central de Abastos, 4% de otros lugares no identificados y 3% de residuos hospitalarios, de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA).

Figura 2.10 Gráfica de origen de residuos por día en la CDMX



Notas: Esta gráfica indica los resultados del estudio del origen prioritario de los residuos para la CDMX, que impacta en gran medida al aumento de desechos plásticos. Obtenido de “El reto contra el plástico de Ciudad de México: dejar de usarlo 18 meses”, verne.elpais.com/verne/2019/05/11/mexico/1557527647_615307.html, 11 de mayo de 2019.

En la Ciudad de México habitan casi 9 millones de personas, que en conjunto tiran mil 350 millones de bolsas de plástico al año, además, esta cantidad no considera las bolsas que se utilizan y se desechan en la zona conurbada, en la que

²⁵ La generación de residuos sólidos per cápita, es un parámetro que se obtiene con base en el promedio de generación de los residuos sólidos por habitante, expresado en kg/hab/día, de cada uno de los estratos socioeconómicos y por la fuente generadora.

habitan más de 12 millones de personas (Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2019).

Conforme a estudios publicados por Greenpeace (2018), “En México se producen más de siete millones de toneladas de plástico al año; el 48 % se destina a envases y embalajes. Muchos de ellos son reciclables, aunque no todos terminarán siéndolo, pues la capacidad real de reciclaje del total de residuos valorizables en el país apenas llega al 6.07%”.

De ahí la importancia de desarrollar una cultura del reciclaje, ya que vivimos en un país con una muy alta producción de desechos, así que tenemos que aprender a aprovecharlos al máximo y dejar de considerarlos basura, más bien tomarlos como residuos que tienen un gran potencial para darles otro uso. El manejo y separación de residuos se ha delegado a personas de bajos recursos que optan por este oficio para buscar el sustento de sus familias, desde la recolección en las calles, hasta la separación en los vertederos o tiraderos locales. Es así que no se le ha dado el valor y la importancia a esta industria, aunque en los últimos años ha sido foco de atención de las empresas dedicadas a la producción de artículos de plástico.

Dentro de las expectativas del reciclaje de termoplásticos, es posible fabricar una infinidad de artículos necesarios para la vida cotidiana, por la flexibilidad de los materiales y el hecho de que se pueden producir tanto en grandes industrias, como en pequeños termo inyectores o maquinas simples de fabricación artesanal. Esto ha desencadenado una variedad de propuestas surgidas de ideas muy simples, pero que han aportado al desarrollo de tecnologías para la construcción de viviendas.

Aunque el desarrollo tecnológico en el campo de la industria y la construcción ha marcado una tendencia en la producción de materiales y sistemas constructivos altamente industrializados con base en componentes adosados a los elementos estructurales, los cuales sirven de aislantes, poco se ha trabajado en el desarrollo de sistemas constructivos a partir del reciclaje de materiales y el aprovechamiento materia prima disponible en la región, dejando de lado las amplias posibilidades de ser una alternativa para ser implementada como tecnologías pasivas para utilizar elementos arquitectónicos reguladores de los mecanismos de transferencia de calor de los edificios.

En su libro “Building from waste” (construcción de basura), Hebel, Wisneiwski y Heisel (2014), describen diversos materiales constructivos cuya materia prima proviene de los desechos; materiales que en su gran mayoría han sido probados en prototipos de construcciones y presentan diversas ventajas, además de la reducción de la basura en el medio ambiente, han demostrado tener propiedades térmicas, acústicas, ligereza, entre otras, además de ser alternativas de bajo costo.

2.4 Tipo y clasificación de reciclaje

El reciclaje se puede definir como aquella transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca al ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos (Código de Edificación de la Vivienda, 2017).

El enfoque de ver la basura como un recurso es referente de diversos estudios, por ejemplo: “la ciudad del futuro no hace distinción entre basura y recurso” (Hebel, Wisniewska and Heisel, 2014, p. 18). En este estudio se realiza una clasificación de algunos materiales obtenidos a partir de basura, los cuales son: material de basura densificada, reconfigurada, transformada, diseñada y cultivada. Los primeros tres se refieren al reciclaje y reusó de los recursos.

Material de residuos densificada: en este proceso el principal objetivo es reducir el volumen de la basura por medio de la compactación, éste puede ser mediante la colocación del material de desecho en moldes y comprimirlo; o bien comprimir el material suelto para obtener pellets uniformes altamente densos. En cualquiera de las dos formas el material permanece inmodificable en su composición química, y mientras no sean mezclados con algún otro elemento o sustancia, pueden ser nuevamente reciclados.

Los materiales de basura densificada pueden tener propiedades como el buen aislamiento térmico, acústico, y dependiendo de su grado de compactación pueden tener buena resistencia al fuego. El papel y la paja, por ejemplo, muestra alto potencial de resistencia al fuego en forma comprimida. Sin embargo, este tipo de materiales deben tener buena protección contra la humedad.

Material de residuos reconfigurada: comprende todos los productos donde los componentes de los residuos en bruto han sufrido cambios antes de ser procesados en un nuevo elemento constructivo. Cortar en tiras, romper, aserrar o moler, son unas de las formas de aplicar la fuerza mecánica para cambiar la configuración original del material de estos residuos. Los resultantes: pellets, pequeños trozos, tiras, fibras, material triturado etc. Después siguen otros procesos, donde usualmente se mezclan con otros componentes como adhesivos orgánicos, inorgánicos o minerales y se presionan en un molde de cualquier forma y tamaño.

En términos estructurales los materiales de residuos reconfigurados pueden estar limitados, por lo tanto, para su uso se opta por mezclarlos con diferentes materiales (pueden ser de desecho o no) para crear nuevos productos que forman parte de un proceso cíclico. Sin embargo, este uso se hace teniendo especial cuidado en cuanto a la cantidad de material reciclado permitida.

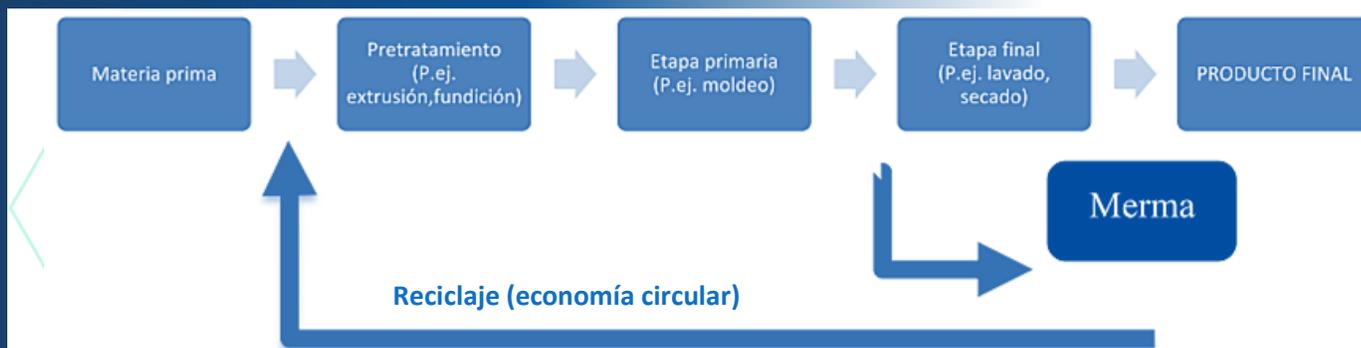
Material de basura transformada: la transformación implica una alteración del estado material por la incorporación de otros materiales o formas de energía utilizada. Este proceso representa la conversión de la basura en un nuevo estado de existencia

en diferente manera, composición, forma y función a través de la pérdida completa de la estructura organizacional del material.

Otra clasificación que se puede hacer es conforme con las etapas del proceso de reciclaje, en el cual se describen 4 categorías principales:

Reciclaje primario o re-extrusión: también conocido como reciclaje in-situ, de ciclo cerrado o reprocesamiento. Consiste en reintroducir los residuos de origen industrial durante la producción. En el proceso de extrusión que se lleva a cabo durante la manufactura, con el fin de fabricar productos de manera similar. Esto se realiza principalmente en plantas productoras de artículos de plástico, ayudando a disminuir la demanda de materia prima. La proporción en que los residuos plásticos se añaden debe ser la adecuada para que no se afecten las propiedades del producto final.

Figura 2.11 Reciclaje primario o re-extrusión y sus etapas



Notas: El diagrama representa el proceso de reciclaje primario y los componentes que lo integran. De la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo, 2020.

Reciclaje secundario o mecánico: este tipo de reciclaje no modifica la estructura química o composición de los residuos plásticos. Pueden realizarse a partir de residuos industriales o post consumo, mediante tratamientos térmicos son transformados en otros productos como pellets. El proceso general puede tener variantes dependiendo de la tecnología disponible, mismos que se describen en la figura 2.12.

Figura 2.12 Reciclaje secundario o mecánico.



Notas: El diagrama representa el proceso de reciclaje secundario o mecánico y los componentes que lo integran. De la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo, 2020.

Reciclaje terciario o químico: también conocido como proceso de despolimerización, los residuos plásticos cambian su estructura y forman nuevas moléculas. Estos nuevos compuestos se utilizan como materia prima o como combustibles. Todo se logra mediante procesos térmicos y mediante el control de la cantidad de oxígeno y el uso de catalizadores. Las principales modalidades son la pirolisis, la gasificación, la hidrogenación y la fragmentación (cracking) catalítica (INECC hace referencia a Al-Salem et al., 2009), obteniendo un gas con alta capacidad calorífica, una fase líquida y un residuo sólido.

Entre sus desventajas se encuentra el alto requerimiento energético (Barlow y Morgan, 2013), el costo del equipo y su mantenimiento, además de un estricto control para no introducir plásticos clorados y no generar dioxinas y furanos, por lo que se produce alta contaminación y afectación.

Reciclaje cuaternario o recuperación de energía: a través de este proceso se recupera la capacidad calorífica de los residuos plásticos, al reaccionar con oxígeno durante la combustión, usándolos como combustible. Este calor liberado se puede usar en otros procesos. Este proceso se debe reconsiderar ya que genera CO₂ y otros contaminantes, como los NO_x, SO_x, COV y partículas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

Para este proyecto de investigación se tomará como base algunos procesos similares a los que se realizan en el procesamiento de reciclaje que se utilizan dentro de la industria de los plásticos, a continuación, se analizan algunos de los procesos generales dentro del reciclaje de polímeros.

Dentro de los procesos de reciclaje se deben considerar los costos de recolección de los residuos en pequeñas cantidades mixtas, su transporte a las instalaciones de manipulación para clasificarlos, limpiarlos, re-empacarlos y luego transportarlos nuevamente a un mercado que utilice estos como materia prima para nuevos productos, y esto es casi siempre más costoso que llevar los residuos a un sitio de disposición final.

Figura 2.13 Etapas generales del



Notas: En el gráfico se representan las diversas fases el proceso del reciclaje de plásticos para integrarlos dentro de una economía circular. De la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo, 2020.

2.4.1 Recolección, separación y clasificación

El proceso de recolección se puede originar desde pequeños recolectores de casa en casa que realizan la separación de manera particular, arrojando residuos domésticos dentro de los que sobre salen materiales como: metales, vidrio y plástico. De esta forma, la recolección municipal o por medio de recolectores locales cuenta con mayor posibilidad de encausar el objetivo de la disposición, manejo y clasificación de materiales de residuo plástico.

Por último, pero no menos importante, se encuentran las grandes industrias que principalmente se dedican a la fabricación de materiales con necesidad de embalaje, contenedores o recipientes para diversos productos, juguetes o utensilios de desecho, entre otros, que tienen grandes posibilidades de aportar materia prima con potencial para ser reciclados.

El planteamiento ideal para la recolección de residuos sólidos lo describe Cicloplast (2020), propone lo siguiente:

- Se deben separar los envases en el domicilio del generador y depositar en contenedores para su posterior recolección. Los contenedores pueden distinguirse usando diferentes colores y se recomienda agregar un etiquetado frontal para facilitar la identificación.
- Se deben clasificar los residuos plásticos y separar de manera manual o automática para asegurarse que todos los contaminantes se eliminen del flujo de entrada del proceso de reciclaje.
- Es necesario que cada pieza individual del residuo plástico se separe de acuerdo con su composición y tipo.
- En plantas de selección de materiales, una cinta transportadora eleva las bolsas de residuos donde se abren y se separan los mismos plásticos de manera manual o automática en sus diferentes familias, principalmente en: 1) PET: botellas de agua y refrescos, 2) PEAD: envases de detergentes y contenedores de alimentos, 3) Película plástica: bolsas y envolturas y 4) Plástico mixto: envases de alimentos (como bandejas, botes de yogurt, etc.), entre otros residuos (ibidem, 1996).

En un principio, para recuperar los residuos plásticos, se deben separar de otros tipos de residuos. Los polvos o partículas finas se eliminan en un cilindro rotatorio (trommel) u otro tipo de criba; los metales por medios magnéticos y el papel, dada su ligereza, empleando aire. Una vez obtenida una mezcla que solo contiene plásticos, ésta puede separarse por distintos métodos, como se muestra a continuación (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020):

- Separación manual. Utilizada por su alta eficiencia, pero con limitaciones dependiendo del volumen de residuos a separar.
- Separación por densidad. Utilizando tanques con líquidos para aprovechar las diferentes densidades de cada tipo de plástico. Si se combina con un proceso mecánico, como hidrociclones, su eficiencia aumenta.

- Separación por medios ópticos. Basados en la diferente estructura química de los plásticos, se utilizan sensores que transfieren señales a una computadora que activa una respuesta a esa señal de ondas infrarrojas, UV o rayos X, separando los plásticos por medio de disparos de aire y elevadores neumáticos, detectores confiables y software sofisticado de decisión y reconocimiento, que mejoran la productividad y precisión de la clasificación automática.
- Separación triboeléctrica. Genera cargas eléctricas en los plásticos por frotación y se separan por medios magnéticos.

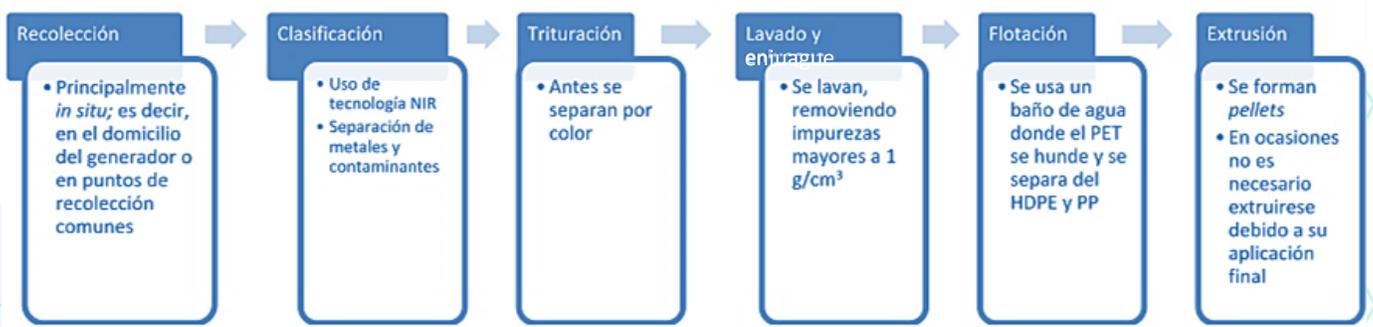
2.4.2 Proceso de triturado y lavado

Las pacas de plástico separado y clasificado se envían a molinos de trituración para formar trozos pequeños que alimenten la siguiente etapa del proceso. Estos trozos se denominan “hojuelas”, también hay residuos de menor tamaño que se les denomina “finos”.

Las piezas trituradas se someten a varias etapas de lavado para remover impurezas, como etiquetas y adhesivos. Esto mejorará la calidad del producto final. En ocasiones utilizan agentes químicos que después son enjuagados para evitar que sus remanentes lleguen a la siguiente etapa del proceso.

Al obtener las hojuelas limpias, éstas se secan, se funden y extruyen formando filamentos largos homogéneos. Para distinguir los materiales a veces se agregan colorantes a cada lote. La temperatura aplicada durante el proceso incrementa la calidad de las hojuelas y los finos.

Figura 2.14 Descripción de las etapas del reciclaje.



Notas: En el gráfico se puede observar la descripción general de las etapas que participan en el proceso del reciclaje de plásticos para integrarlos. De la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en el Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo, 2020.

En función del destino que se le dé al producto final, se forman trozos llamados “granzas” o “pellets”²⁶ que se almacenan en sacos para su distribución y uso como materia prima disponible para nuevas aplicaciones, como tuberías, piezas industriales, bolsas de basura, entre otros (Cicloplast, 2020).

2.4.3 Sistemas de reciclaje mecánico

En general, las tecnologías de reciclaje mecánico (también conocido como reciclaje secundario) que son las más aplicadas actualmente en el mundo, implican el procesamiento de residuos plásticos por medios físicos; molienda, trituración y fusión para obtener nuevamente productos plásticos; sin modificar la estructura química de los polímeros, pero agregando aditivos (como agentes de curado, lubricantes y catalizadores) para mejorar el proceso, así como colorantes y agentes de corrección para restablecer algunas propiedades al material secundario.

Para poderse aplicar apropiadamente, estas tecnologías requieren que los plásticos de desecho se limpien y se clasifiquen con antelación. Sumado a esto y para tener viabilidad económica, se requiere un volumen de entrada grande y constante de residuos (Villanueva, 2020). Un paso importante para lograr la recuperación de polímeros como materia prima a partir del reciclaje mecánico es la molienda de los residuos plásticos a fragmentos de un tamaño adecuado que permita su tratamiento posterior.

El primer paso de este proceso es el corte, que consiste en que los residuos plásticos de tamaño grande se cortan con sierras o cizalla. Posteriormente, se aplica una trituración para obtener pequeñas escamas. En esta etapa es posible efectuar una fase adicional de clasificación y separación de fragmentos de otros materiales (como metales, vidrio o papel) o de diferentes tipos de plásticos (Villanueva y Elder, 2014).

Para lograr una fragmentación adecuada, diversas empresas se han especializado en la generación de trituradoras de alta eficiencia, el plástico es reducido a partículas de diversos tamaños que serán tamizadas. En el caso del proyecto de investigación y para el proceso de fabricación inicial de probetas, se adquiere el material triturado y lavado para iniciar con el proceso de mezcla y extrusión por medio del tratamiento térmico.

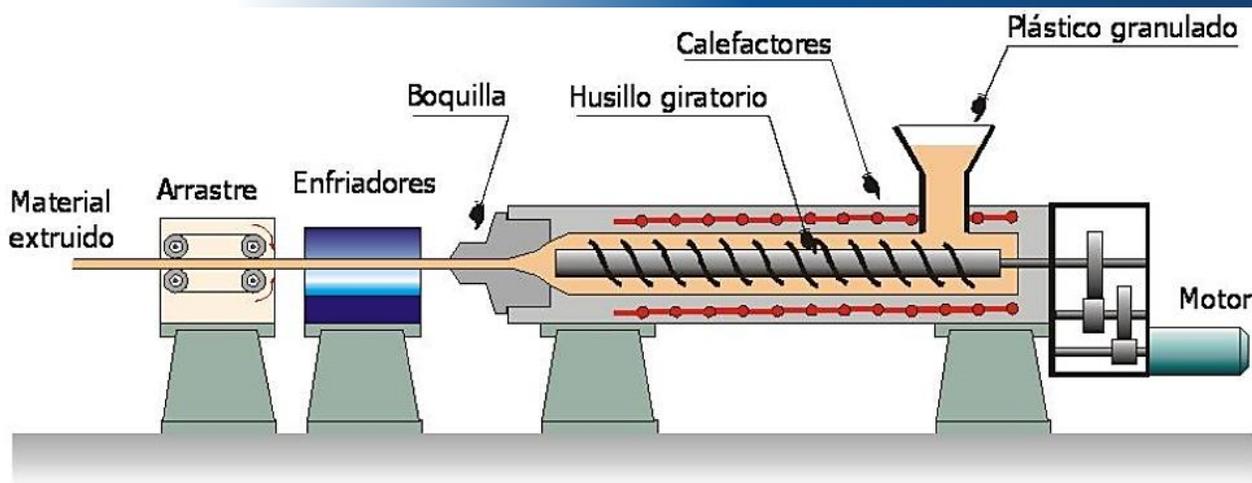
En la etapa de reciclaje mecánico, la descontaminación que se requiere es aquella que elimina la suciedad a nivel microscópico, es decir, la que está parcialmente adherida (como pegamentos), la incrustada (como tierra alojada en los poros del material) o la adsorbida (como los aromatizantes, aceites esenciales, solventes, pinturas, remanentes de alimentos o detergentes, unidos a las superficies del material). Esta contaminación microscópica puede deberse a la calidad inicial de

²⁶ Un pellet de plástico es un tipo de material plástico de tamaño inferior a 5 mm que se utiliza en la fabricación de productos de este material. Estos pellets son micro plásticos y se fabrican principalmente con polietileno, polipropileno, poliestireno, cloruro de polivinilo y otras resinas sintéticas.

la fuente de residuos, pero también a su empaqueo, transporte y manejo. Por lo que, depende de la capacidad de adsorción que tengan los polímeros y de las propiedades de los contaminantes, que difieren entre sí.

Una vez que los residuos han sido fragmentados y lavados, las escamas, pellets o aglomerados resultantes se alimentan a una extrusora, donde se calientan al estado de fusión y se les aplica presión para convertirlos en un producto de polímero continuo en forma de hilos. Los hilos se enfrían con agua y se cortan en gránulos, que pueden usarse para la fabricación de nuevos productos.

Figura 2.15 Esquema general del proceso de extrusión del plástico.



Notas: El esquema ejemplifica los componentes de un sistema de extrusión en mono husillo básico para plástico, obtenido de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en su informe Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo, 2020.

El último paso de extrusión puede implicar una filtración a través de una malla metálica (por ejemplo, de 100-300 micras). Una parte de los plásticos reciclados mecánicamente se convierten en intermediarios de material crudo (por ejemplo, copos, aglomerados, molidos, gránulos, regranulados y perfiles), mientras que el restante se convierte directamente en diversos artículos. Por lo general, este plástico que se reprocesa directamente en productos proviene de las corrientes más contaminadas y da como resultado usos finales de menor calidad.

Hay algunos problemas que se destacan durante el reciclaje mecánico, según Awasthi A.K. Shivashankar M (2017), entre los más comunes se encuentran:

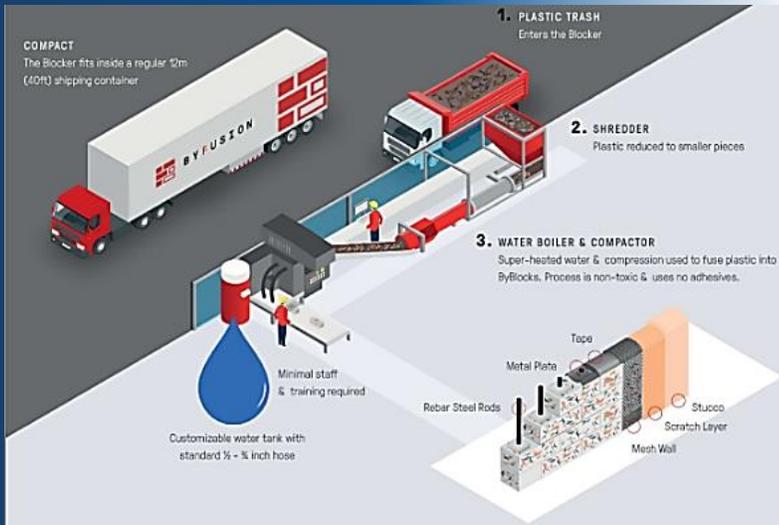
- La degradación o foto-oxidación de los polímeros ocurridas durante etapas en las cuales se usa calor.
- Las dificultades asociadas a la heterogeneidad de la composición de los residuos plástico debida a reacciones químicas extrañas durante la polimerización del material original.

- La formación de cadenas lineales y ramificadas en los polímeros por oxidación o por exposición a condiciones climáticas extremas.

2.5 Aplicaciones de plásticos reciclados en la construcción

En diversas partes del mundo incluyendo México y en especial en América Latina, existen numerosos ejemplos de soluciones constructivas con materiales plásticos reciclados.

Figura 2.16 Proceso de fabricación Byfusión



Nota: En esta imagen se ejemplifica el proceso de fabricación de Byfusión y los elementos que lo integran, de <https://www.byfusion.com/byblocks/>, fecha de búsqueda 16 de agosto de 2021.

El proceso consiste en reducir los plásticos en piezas pequeñas, las cuales experimentan una fase de compresión y someterlo a agua a altas temperaturas, este tratamiento no es tóxico, ni requiere aditivos adicionales, lo cual representa una gran ventaja ante otras propuestas ya que es más económico y en su fabricación no requiere grandes cantidades de energía.

- Una empresa que retoma las problemáticas de escasez de vivienda en su país de origen, Colombia, es la empresa Conceptos Plásticos, misma que aporta una solución por medio del reciclaje. Esta patentó un sistema constructivo alternativo con base en residuos plásticos y caucho. Con esta propuesta se pueden construir viviendas temporales y permanentes, no es necesaria mano de obra especializada para su habilitado y se requiere de 5 días con 4 personas para construir una vivienda de 40m². Por cada vivienda se utilizan alrededor de 6 toneladas de plástico y es un 30% más económico que un sistema tradicional.

- Byfusión es una empresa estadounidense con sede en New York, Los Ángeles y Dunedin, con una propuesta acerca de un bloque prefabricado utilizando cualquier tipo de plástico reciclado, de este modo se promueve la economía circular. Reciclan y esterilizan 7 tipos de plásticos por lo que no es necesario el proceso de clasificación ni un lavado previo, por lo que el ahorro en estos trabajos disminuye los recursos invertidos.

Un sistema similar es la propuesta generada por Bloqueplas, el cual es un elemento constructivo con base en bloques fundidos que se unen a otros elementos estructurales como vigas y columnas acoplándose como un sistema autoportante. Estos elementos son livianos, modulares y resistentes, se integran a las necesidades de realizar instalaciones rápidas y a costos reducidos. Se obtienen con base en el proceso de extrusión, mediante el cual se funde la materia prima al aplicarle calor e inyectarla en un molde.

Figura 2.17 Proceso de habilitado Conceptos Plásticos



Notas: La imagen del proceso de habilitado de bloques plásticos por medio de ensambles en seco. Obtenido de la página oficial de la empresa <http://conceptosplasticos.com/conceptosplasticos.html>, Fecha de consulta 7 de junio de 2021.

- Ladrillos de concreto y plástico reciclado, es una propuesta sumamente interesante desarrollada por el CEVE (Centro Experimental de la vivienda Económica), el cual desarrollo una investigación para la fabricación de ladrillos con el fin de influir de manera positiva en el medio ambiente y en el ámbito social. El proceso de fabricación consiste en triturar e incorporar los residuos plásticos en la masa del cemento, sin necesidad de ser lavados previamente, aunque no se pueden integrar plásticos que han estado en contacto con alguna sustancia tóxica. La intención es reemplazar a los áridos por el material plástico lo que reduce considerablemente el peso del material (Latre, 2019).

Estas propuestas representan puntos claves para el estudio de los procesos que integrar un material de residuos plásticos en elementos constructivos, ante las ventajas que puede representar el uso de un material alternativo frente a las problemáticas que presentan las características del material en sí y ante los sistemas constructivos tradicionales. De igual forma, tiene amplias posibilidades de mejorar a las condiciones en las que se presentan estas alternativas constructivas, enfatizando la permanencia y comportamiento mecánico que representan características cruciales para un elemento estructural.

Figura 2.18 Bloques de concreto y plástico



Notas: Se muestra otra propuesta de integración de plástico reciclado en elementos de mampostería, Obtenido de <https://goo.glkXEpEY>, fecha de consulta 7 de junio de 2021.

2.6 La arcilla como integrador polimérico

Como resultado de la búsqueda de una alternativa de reforzamiento de los plásticos reciclados, con el objetivo de mejorar las características y comportamiento de este desecho sólido urbano, se plantea recurrir a una de las materias primas más antiguas y nobles utilizadas por el hombre, que desde inicios de la humanidad, si es que podemos referirnos a algunas religiones monoteístas, la arcilla como el material que originó la creación del hombre.

Con el paso del tiempo la arcilla, una roca compleja formada por silicatos aluminicos hidratados, se volvió un material muy trabajable en la cerámica, ya que posee una cierta naturaleza plástica y que endurece al secar o ser sometida a altas temperaturas. Al perfeccionar las técnicas de trabajar el barro, se inicia la producción de ladrillos y el desarrollo del arte alfarero que coincide con diversas civilizaciones y que ha quedado como vestigios de la forma de vida de nuestros antepasados (Suero J. C., 2007).

El diccionario de la RAE dice lo siguiente respecto a la palabra arcilla: “Substancia mineral, ordinariamente blanca, combinación de sílice y alúmina; empapada en agua da un olor característico y se hace muy plástica, y por la calcinación pierde esta propiedad y se contrae”.

Si retomamos lo que menciona Rendon (2009), “en los últimos años ha crecido el interés en diversas disciplinas por mejorar muchas de las propiedades del polietileno con la adición de filosilicatos laminares, especialmente de arcillas, principalmente en ciencias como la médica, electrónica, automotriz, etc.” (p. 279). Por lo que representa un amplio abanico de posibilidades para modificar soluciones con base en polímeros que exijan propiedades específicas y que configuren una solución dinámica y de producción industrial.

Existen investigaciones que han demostrado que estos procesos dan resultados positivos para el comportamiento de estos materiales:

Una solución que se ha desarrollado es incluir materiales que se consideraban de desecho para la transformación y obtención de un producto de valor agregado como un composite..., creando un material polimérico con propiedades mecánicas aumentadas, cuyas potenciales aplicaciones son muy variadas, pues el material es de similar aspecto al producto comercial. (Aperador, 2015, p.76)

Estas condiciones y probabilidades de uso de la arcilla nos remiten a una de las ciencias que a pesar de tener varios años de estudio parece ser muy reciente su aplicación, la “nanociencia” definida por Ramírez, O. (2017) como: “Nanociencia se define comúnmente como el estudio de fenómenos y manipulación de materiales a escala nano (prefijo griego para la formación de nombres y adjetivos que significa ‘muy pequeño’ -generalmente se refiere sólo a medidas-) donde las propiedades difieren significativamente de las que se manifiestan a mayor escala” (p. 4).

Por tal motivo, el uso de un nanomaterial representa una puerta hacia posibilidades de mejorar las condiciones del plástico por medio de la adición de materiales modificados a nivel nanométrico. “Un nanomaterial es un objeto que tiene al menos una dimensión en la escala nanométrica (aproximadamente de 1 a 100 nm)” (O. Ramirez, 2017, p. 5). Un ejemplo muy utilizado para entender las dimensiones de un nanomaterial, es el nanobalón, mismo que hace la comparación de un material nanometrico con el tamaño de un balón de futbol, lo que es similar, a la proporción de este mismo balón con las dimensiones del planeta.

Figura 2.19 Relación de tamaños entre nanomaterial, balón y planeta



Notas: Imagen denominada ejemplo del nano balón, la cual representa la relación de tamaños entre una molécula a nivel nanométrico, en comparación con un balón, ya que tiene la misma relación entre el balón y la dimensión del planeta, de M. Álvarez et. al., Nanotecnología: máquinas moleculares o cómo hacer que algo se mueva cuando tú quieres, Universidad de Valladolid, 2019.

Para obtener un nanomaterial es factible realizarlo por medio de la integración de dos o más materiales para producir un compuesto, existen procesos físicos o químicos, por medio de los cuales se integran para crear un nanocompuesto. “Dentro de estos materiales los nanocompuestos de polímero y arcilla han atraído mucho la atención debido a las propiedades mejoradas de estabilidad dimensional, deflexión a

la temperatura, barrera a los gases, retardancia a la flama y propiedades mecánicas, comparadas con los polímeros puros o compuestos micrométricos convencionales (Solis, 2019, p.57).

La arcilla es la nano carga más utilizada en nanocompuestos, debido a su elevada relación de aspecto, su disponibilidad y bajo costo, lo que representa en este proyecto de investigación una alternativa viable que empata con los objetivos que se buscan en este material. Este tipo de filosilicato laminar²⁷ es por naturaleza hidrófilo, en contraposición con el carácter de las principales matrices plásticas empleadas en aplicaciones industriales. Por ello, las arcillas suelen ser modificadas químicamente, confiriéndoles un carácter organofílico²⁸ que facilita la dispersión de las mismas en el seno de la matriz polimérica (Redón, 2009).

Figura 2.20 Arcilla esmectita del tipo montmorillonita



Notas: Imagen representativa de arcilla montmorillonita, obtenida de <https://arcilla.top/montmorillonita/>, fecha de consulta 12 de octubre de 2021.

Es por ello, que como lo menciona Jacobo, M (2010), “las órganoarcillas (arcillas modificadas con soluciones de alquil amonio) mejoran la compatibilidad de una matriz polimérica y la intercalación del polímero”. (p. 16)

Dentro de los filosilicatos laminares, la arcilla esmectita del tipo montmorillonita²⁹ (descubierta por Damoury y Salvetar en Montmorillon, Francia) es hoy en día la arcilla mineral más extensamente utilizada como fase reforzante en

²⁷ Los filosilicatos son silicatos de estructura laminar en los que los tetraedros se comparten de forma que se organizan en una disposición en hojas o capas. La propiedad más importante es la exfoliación perfecta en láminas y su poca densidad.

²⁸ La distancia entre dos laminillas consecutivas depende del tamaño de los cationes alojados en el espacio interlaminar por lo que, sustituyendo los cationes sodio o calcio por cationes orgánicos de mayor tamaño, tales como alquil-amonios, se puede incrementar dicha distancia considerablemente. Esta sustitución da lugar a lo que se conoce como silicatos "organofílicos", con su superficie laminar modificada y su espacio interlaminar expandido.

²⁹ La montmorillonita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas. Es un hidroxilisilicato de magnesio y aluminio, con otros posibles elementos.

matrices poliméricas debido a la facilidad que presenta para ser modificada por su mecanismo de unión entre láminas consecutivas. Además, se encuentra en numerosas partes del planeta, ya que la mayoría de los casos se ha formado de la erosión de materiales de erupciones (Franco Urquiza, 2009).

Otra arcilla con un uso potencial en la obtención de nanocompuestos de matriz polimérica es la caolinita. Esta arcilla, pese a ser más común y más económica que la montmorillonita, aunque ha sido poco estudiada en sistemas de nanocompuestos debido a la dificultad que presenta a la hora de disgregarse en el seno de la matriz polimérica.

El plástico puede usarse como matriz para dar origen a un material compuesto o compósito, que es aquel formado por dos o más materiales de diferente naturaleza y comportamiento molecular, y con una fase continua, conocida como matriz, y una fase dispersa o discontinua conocida como carga, aditivo o relleno. Estos materiales se pueden clasificar según la escala de integración de los rellenos teniendo como grado de integración macro, micro y nano escala (Sagredo, 2017 citado por E. Flores, 2019).

2.7 Mezcla del material polímero-arcilla

Esta posibilidad de poder integrar un material polimérico reciclado por medio de arcillas abre un abanico de posibilidades para el análisis del comportamiento para este compuesto, dentro de las condiciones y comportamiento que presenta un elemento estructural, si bien el campo de aplicación para este tipo de materiales se enfoca en áreas de especialización de la medicina, electrónica o ingeniería, puede ser un detonante para la arquitectura, a pesar de contar con algunas propuestas como recubrimientos, aislante, pinturas o aditamentos dentro de procesos muy definidos, es importante explorar su uso para la mejora de materiales con mayores dimensiones y comportamiento estructural más exigente.

Los composites o polímeros compuestos, son materiales con mejoradas propiedades mecánicas, elevada dureza y resistencia a la tracción. Los nanocompuestos poliméricos se obtienen con pequeñas cantidades de arcilla, y sus propiedades exhiben marcadas diferencias en comparación con polímeros no reforzados. En este sentido la adición de órgano-arcilla (alrededor de un 3% en peso) aumentan considerablemente las propiedades térmicas, así como su tenacidad a la fractura, además las arcillas reducen la permeabilidad y aumentan sus propiedades mecánicas (Franco Urquiza, 2009).

Como lo indica Solís (2019), “la parte fundamental para producir nanocompuestos es tener un mezclado que permita la total interacción de las nanopartículas con la matriz polimérica, sin esto se tendrán las propiedades de un micro compuesto con pobre dispersión” (p.57). Lo que hace pensar que es necesario tener los equipos y materiales adecuados para lograr el objetivo de integrar la arcilla en el polímero.

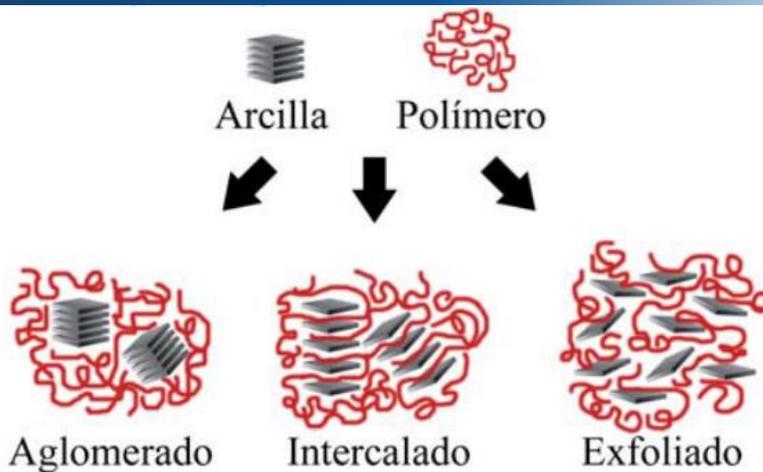
Es importante recalcar, que uno de los inconvenientes de la mezcla física entre el polímero y las partículas de arcilla no forma a priori un nanocompuesto. Por lo que, dependiendo de la naturaleza de los componentes, se pueden obtener tres tipos básicos de nanocompuestos como se presentan en la figura 2.21.

1. Los **nanocompuestos aglomerados**, ocurren cuando el polímero es incapaz de intercalarse entre las láminas de la arcilla, obteniéndose una fase separada.
2. En los **nanocompuestos intercalados**, la difusión del polímero promueve el desarrollo de una morfología de multi láminas muy ordenadas.
3. Mientras que la tercera clasificación corresponde a los **nanocompuestos exfoliados**, donde las láminas de la arcilla se encuentran totalmente dispersas y desordenadas dentro de la matriz polimérica.

Este último, el exfoliado o en su defecto el material intercalado es el principal objetivo para la obtención del nanocompuesto de matriz polimérica, al reforzarlo con la arcilla modificada, ya que, en este caso es el que presenta las mejores condiciones en las propiedades del material. Aunque en diversas investigaciones las láminas de la arcilla no se encuentran exfoliadas en su totalidad dentro de la matriz, suele asociarse a diversos factores como la ausencia de compatibilidad molecular, la excesiva cantidad de partículas de arcilla o la degradación del modificador durante el procesado de la mezcla.

Por este motivo, se plantea la necesidad de utilizar agentes externos o de acoplamiento que funcionen como un acoplante entre ambos materiales, con la finalidad de facilitar las condiciones de integración del material, ya que, por ser materiales de diferente origen no es sencillo su acoplamiento. En el caso de este proyecto de investigación se busca obtener un proceso de exfoliado o en su defecto intercalado para comparar su comportamiento y propiedades con los materiales tradicionales o comunes.

Figura 2.21 Tipos de integración de compuestos de matriz polimérica



Notas: En la imagen se representan los posibles resultados en el proceso de fabricación de compuestos polímero-arcilla, de F. Urquiza et. al. en Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos, 2009.

2.8 Nanoarcilla, diseño e integración plástica

Para la obtención de compuestos polímero-arcilla existen diferentes métodos de procesamiento, dentro de las principales alternativas se describen 4:

Síntesis de la nano carga in-situ: Esta ruta consiste en la formación in situ del silicato en una disolución acuosa que contiene disuelto el polímero. Dicha ruta ha sido ampliamente utilizada en los nanocompuestos de LDH (hidróxidos de doble capa o hidrotalcitas). Esta técnica basada en las fuerzas de atracción del polímero y la nano carga, el polímero ayuda a la nucleación y al crecimiento de cristales de la carga inorgánica, atrapándolos dentro de la matriz, lo que conduce a una estructura exfoliada. Esta técnica es particularmente adecuada para polímeros solubles en agua como polivinil pirrolidona (PVP), hidroxipropil-metil celulosa (HPMC), poliacrilonitrilo (PAN), polidimetil-dialilamonio (PDDA) y polianilina (PANI). Cabe destacar que el tamaño de las laminillas obtenidas no puede competir con el de las nano cargas naturales, de tal forma que su longitud media suele estar en torno a la tercera parte de las naturales.

Vía líquida: Esta ruta consiste en disolver el polímero y suspender la arcilla en un disolvente común en el cual ambos componentes sean solubles. El mecanismo de formación de nanocompuestos por esta técnica abarca dos pasos: 1) el hinchamiento de las laminillas de arcilla y 2) intercalación de las cadenas poliméricas en la galería interlaminar de la arcilla expandida por el disolvente, desplazando las moléculas de disolvente fuera de la galería. Después de esto el sistema es calentado para evaporar todo el disolvente. Una vez eliminado el disolvente, el sistema de arcilla intercalada queda intacto y se obtiene el nanocompuesto. Varios polímeros como el alcohol de polivinilo (PVOH), polietileno (PE), óxido de polietileno (PEO), etc, han sido utilizados para preparar nanocompuestos por esta ruta.

Por polimerización in situ: Esta ruta se basa en la intercalación de monómeros en estado líquido o en disolución en la galería interlaminar de la arcilla para posteriormente llevar a cabo una polimerización “in situ”. La polimerización puede ser iniciada por calor o radiación, por la difusión de iniciador adecuado o por iniciadores o catalizadores insertados en la galería interlaminar. La disolución es introducida en un reactor de altas presiones para llevar a cabo la polimerización. La reacción se produce a altas temperaturas y presiones para llevar a cabo la polimerización. En 1988, Okada et al. de la compañía Toyota patentó el primer desarrollo de nanocompuestos de poliamida-arcilla mediante esta ruta. No obstante, este trayecto también se ha utilizada en otro tipo de polímeros como el poliestireno (PS), las resinas epoxi, el polietilen-tereftalato (PET), el polietileno (PE), el polimetacrilato de metilo (PMMA), etc.

Figura 2.22 Configuración de doble husillo para extrusión

Por mezclado en fundido: Esta ruta se basa en el mezclado de la arcilla con el polímero en estado fundido. Bajo estas condiciones si las láminas de arcilla son lo suficientemente compatibles con el polímero, las cadenas poliméricas pueden insertarse en la región interlaminar y formar un nanocompuesto intercalado y/o exfoliado. En esta técnica no se requieren disolventes.

La forma habitual para preparar los nanocompuestos mediante esta técnica es su procesado en una extrusora de doble husillo. El calor y la fricción generados por los husillos de la extrusora facilita la intercalación o la exfoliación de la arcilla. En 1993, Giannelis et al. (p. 1694), reportaron que los nanocompuestos polímero-arcilla podían ser desarrollados por mezclado en fundido. Varios nanocompuestos basados en PA, PET, PE, PP, PS, etc. han sido sintetizados por esta ruta obteniendo resultados favorables en cuanto al comportamiento de estos materiales.

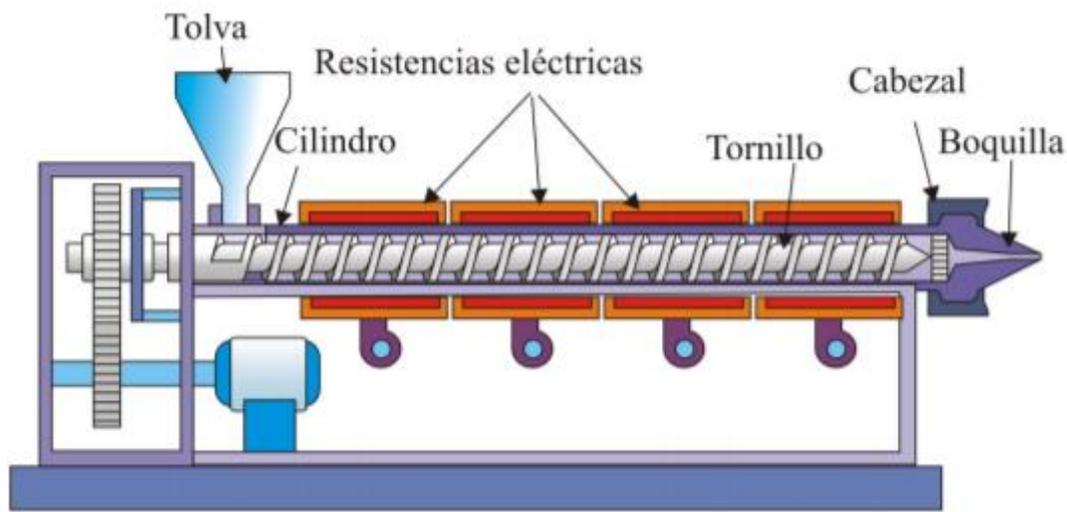


Notas: Se observan las variedades de doble husillo dependiendo el diseño del proceso de extrusión, retomado de <https://todoenpolimeros.com/procesos-de-extrusion/>, consultado el 16 de febrero de 2020.

El desarrollo de este proceso es mucho más interesante que las anteriores desde el punto de vista industrial y medioambiental. Se pueden obtener nanocompuestos mediante esta ruta por cualquiera de las tecnologías habitualmente utilizadas en la industria de polímeros: mezclado, extrusión, inyección, entre otros, (REDÓN, 2009).

En este método, el grado de dispersión de las nano láminas depende no solamente de las condiciones de procesado tales como los parámetros de extrusión-mezclado (temperatura, velocidad de extrusión, velocidad de alimentación, grado de cizalla, y perfil del husillo) sino también de la afinidad y las interacciones que se pueden producir entre las laminillas de arcilla y las cadenas del polímero. Este último parámetro es incluso esencial para poder obtener una morfología exfoliada en la que las laminillas de la arcilla se encuentren completamente dispersas en la matriz del polímero.

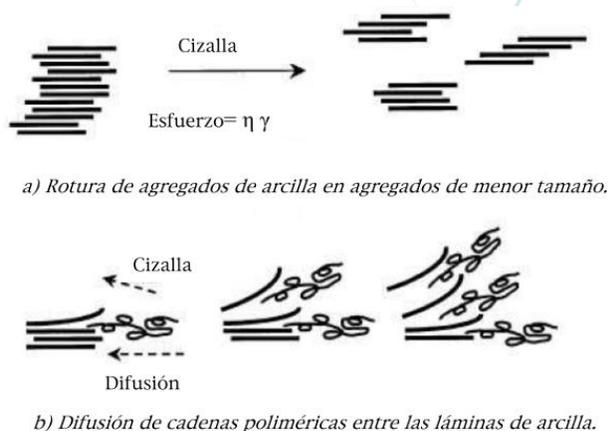
Figura 2.23 Representación esquemática de extrusora



Notas: El gráfico es una representación de las principales partes de la extrusora doble husillo y el esquema del funcionamiento de la misma. Obtenido de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16897/1/TEMA_4_extrusion.pdf, fecha de consulta 20 de octubre de 2021

Conforme investigaciones realizadas por Fones (2001), la interacción/exfoliación de las laminillas de la arcilla se produce por la combinación de dos mecanismos. Figura 2.24

Figura 2.24 Mecanismo de rotura de agregados por mezclado en fundido según Fones



Notas: Esta figura es una representación gráfica del proceso de ruptura por el efecto de cizalla en el mezclado en fundido, obtenido de M. Rendón del documento Materiales Nanocompuestos Basados en Polietileno y Filosilicatos Laminares Obtenidos por Mezclado en Fundido. Estructura y Propiedades, 2009.

- 1) La rotura de grandes agregados de arcilla (“staks”) como el los denomina, en agregados más pequeños formados por un número más pequeño de laminas

(tactoides), debido al efecto de grandes fuerzas de fricción durante el mezclado en fundido.

- 2) La difusión de las cadenas de polímero dentro de la galería interlamina. De esta forma se rompen los enlaces entre laminas consecutivas. Esta fase es fundamental y toma gran relevancia que la superficie de la arcilla sea químicamente compatible con la matriz polimérica.

La dispersión de la arcilla en la masa polimérica juega un papel muy importante en la mejora de las propiedades finales de nanocompuestos. En la ruta de preparación de nanocompuestos por fundido existen algunas variables del proceso que influyen de forma clara en la dispersión de la arcilla. Estas variables son: temperatura o perfil de temperaturas del proceso, velocidad de mezclado o extrusión, configuración de los husillos de la extrusora, relación longitud/diámetro (L/D) de la extrusora, velocidad de alimentación del polímero.

Sin embargo, también hay otro tipo de factores a tener en cuenta antes de empezar el procesado de los nanocompuestos como lo son el acondicionamiento de la arcilla (secado, purificación o reducción del tamaño de partícula), la selección del tipo de compatibilizador y del tipo de arcilla o de modificante, el método utilizado para alimentar la arcilla (en polvo o en masterbatch³⁰), así como la sección de la extrusora en la cual se alimentará la arcilla.

Equipo utilizado para el mezclado en fundido (mezcladora, extrusora monohusillo, extrusora de doble husillo (TSE)). Por lo general, el uso de una extrusora monohusillo no proporciona suficiente fricción entre los componentes para romper los agregados de la carga. Por lo tanto, el uso de dos rotores y las extrusoras de doble husillo en la mayoría de los casos pueden resultar equipos eficaces para dispersar cargas laminares en una matriz polimérica. En el caso de las extrusoras de doble husillo, las extrusoras co-rotantes y contra-rotantes con unas condiciones de procesado y un diseño de husillos optimizado son los equipos que producen un mayor nivel de exfoliación.

Configuración de los husillos. El efecto del diseño de los husillos en extrusoras de doble husillo también ha sido analizado para diferentes sistemas polímero/arcilla. Mehrabzadeh et al. (2004), determinó para el caso de nanocompuestos de polietileno que la dispersión de la arcilla y el efecto reforzante en la matriz era mayor para el caso de configuraciones de husillo con una mayor cizalla y con un mayor tiempo de residencia.

Condiciones de procesado (perfil de temperaturas, velocidad de extrusión, tiempo de residencia). Las condiciones de mezclado o extrusión tienen una especial

³⁰ Masterbatch es la forma más sencilla de agregar aditivos o color a un plástico. El masterbatch es un compuesto granulado de un polímero, elastómero u otros portadores (carrier) que contiene una alta concentración de ingrediente activo o pigmentos coloreados, cuya concentración es claramente mayor (de 10 a 90%) que la del producto final.

importancia en la dispersión de las nano cargas. Se ha comprobado que, en nanocompuestos de polipropileno, a mayor velocidad de extrusión (entre valores de 10 y 150rpm) y a mayor tiempo de residencia (entre 5 y 30 minutos) se produce un mayor grado de dispersión de la arcilla (W. Lertwimolnun, 2006).

El número de veces que un nanocompuesto es procesado en una extrusora está relacionado con el tiempo de residencia, y en el caso de nanocompuestos poliamida 6/montmorillonita se ha observado que el tamaño medio de agregado disminuye al aumentar el número de procesados desde uno hasta tres (F. Chavarria R. S., 2004).

Por el contrario, la temperatura de procesado (entre 240°C y 270°C) no ha ejercido una gran influencia en los resultados obtenidos en nanocompuestos de poliamida 6 (F. Chavarria D. P., 2004). Aunque, se ha observado que la temperatura de procesado puede degradar los surfactantes presentes en las órganomontmorillonitas. Shah et al. (2006) observaron en determinados nanocompuestos de polietileno, que la modificación de las arcillas se perdía para temperaturas de procesado por encima de 180°C.

Es por ello, que este proceso resulta un continuo proceso de prueba y error en el que las diversas variables descritas determinan el grado de integración entre ambos materiales, Solís (2019), menciona estas complicaciones:

A pesar de su alto potencial los resultados no son enteramente positivos, lo que se refleja en la limitada aplicación comercial. Algunos de los problemas más recurrentes son asociados al procesamiento, la dispersión-distribución de las nanopartículas en la matriz, la modificación superficial y compatibilidad entre las diferentes fases, además de la habilidad de las nanopartículas a coalescer debido a su actividad superficial. (párr. 8)

A pesar de esto, el desarrollo e investigación de nuevos materiales basados en procesos a nivel nanométrico, amplía las posibilidades en aplicaciones y desarrollo en disciplinas como la medicina, electrónica, automotriz, la industria manufacturera o embalaje, sin dejar de lado la posibilidad de implementar estos materiales en la construcción y la arquitectura, en busca de una mejor alternativa a los desafíos que la industria requiere.

Metodología de fabricación del panel prefabricado

La arquitectura se basa en la ciencia tanto como en la intuición – Jørn Utzon

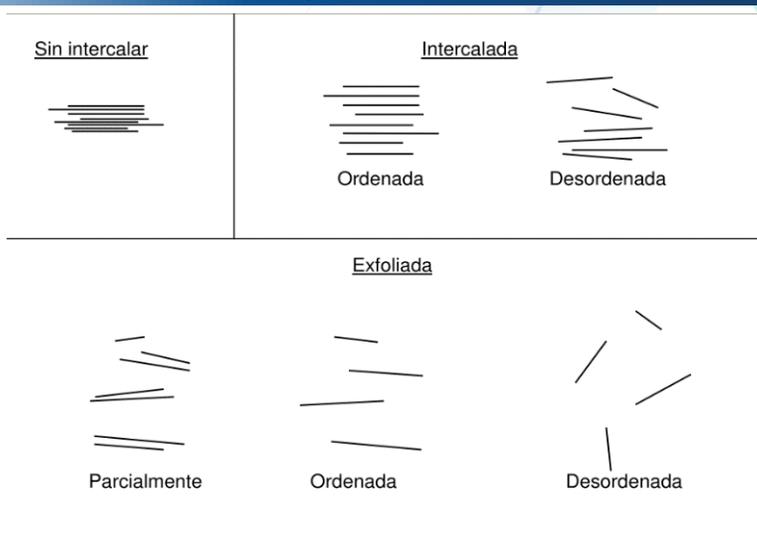


Capítulo III. Metodología de fabricación del nanocompuesto

En este capítulo se presenta el planteamiento del diseño experimental, ejecución de los trabajos de fabricación del compuesto y pruebas de laboratorio para el material de arcilla y polietileno de alta densidad, con el objetivo de conocer el comportamiento mecánico de las mezclas propuestas, caracterizarlo y reconocer sus propiedades, con la posibilidad de dar cumplimiento a las normas y propiedades requeridas para un material constructivo para muros de vivienda.

Un factor importante para obtener un nanocompuesto con las propiedades requeridas para las condiciones de un material constructivo, es la arcilla dispersa de manera regular en el polímero, como lo menciona Flores (2010), “Para obtener un nanocompuesto efectivo, las capas de arcilla deben estar intercaladas o exfoliadas. Intercalación significa que el polímero está presente en las capas de arcilla, pero dichas capas han mantenido su posición inicial relativa. En una estructura exfoliada, el polímero ha separado las capas de arcilla y ha causado que éstas estén dispersas aleatoriamente en la matriz” (pp. 24-25). Esto se puede ver de manera gráfica en la figura 3.4.

Figura 3.1 Esquema de las estructuras de arcilla intercalada y exfoliada.



Nota: El gráfico representa las condiciones de la mezcla entre estructuras de arcilla y polímero, con objeto de realizar un proceso de mezclado en fundido para obtener un compuesto exfoliado, o por el contrario intercalarlo, con la finalidad de mejorar sus propiedades, tomado de “*Materiales compuestos a base de polietileno de alta densidad reciclado*” (p. 25), por A. Flores (tesis de grado), 2010, Universidad Nacional Autónoma de México.

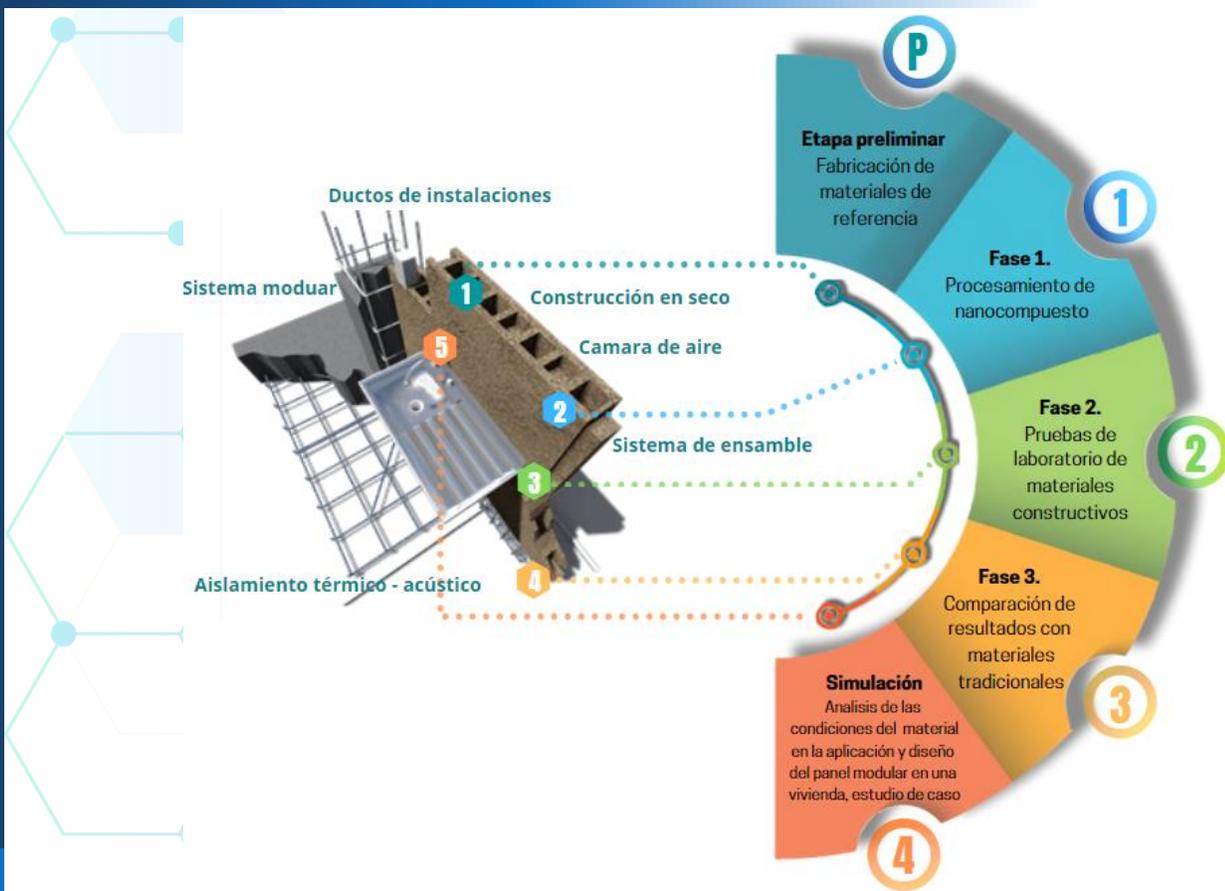
Existen diversos estudios que hacen referencia a la mezcla de polietileno de alta densidad y arcillas modificadas, en los que se encontraron que una dispersión exfoliada/intercalada de las capas de arcilla en la matriz polimérica, podía ser alcanzada en ciertos polímeros con grupos funcionales polares. Aunque las

poliolefinas, como el HDPE son un sistema no polar, por lo que es muy difícil dispersar la nanoarcilla en la matriz polimérica para obtener una nanoestructura (Flores A., 2010, pp. 25).

Por tal motivo, es necesario utilizar un compatibilizante para garantizar que el proceso de mezcla sea correcto, además que, al tratarse de un material reciclado, no es posible asegurar que sea exclusivamente este polímero el que se encuentre al 100% como materia prima, existe la posibilidad que este contaminado con otro polímero o material externo.

Se plantean 3 fases principales de experimentación y una fase previa (fase preliminar), misma que sirve de referencia para tener un parámetro de comparación con los materiales y procesos que se realizan actualmente con el plástico reciclado. Las 3 fases principales se describen en la figura 3.2, en las que se busca explorar las alternativas de fabricación al aplicar un refuerzo con arcilla, mismas que se presentan a continuación:

Figura 3.2 Esquema general de las etapas del proceso experimental



Nota: El gráfico representa el planteamiento de las etapas generales del proceso experimental, iniciando con una etapa preliminar o de referencia, a la par que se proyectan 4 fases, iniciando con la fabricación del nanocompuesto y probetas de diversas mezclas. Posteriormente en la Fase 2. Se realizan pruebas de laboratorio para determinar su comportamiento mecánico y térmico. Para la fase 3. Se realizará una comparativa con los resultados obtenidos en la etapa previa. Y por último se realiza una simulación de las condiciones del panel modular en una vivienda, caso de estudio, Elaboración propia.

3.1 Análisis de materia prima

Se analizan los componentes utilizados como materia prima, definiendo las posibles variantes para la fabricación del nano compuesto, dichas variantes se consideran tanto en el origen del material plástico, como la proporción de la arcilla y material de acoplamiento a utilizar.

3.1.1 Polímeros

A continuación, se muestran los polímeros con los que se trabajan para realizar el nanocompuesto. El objetivo es analizar las características iniciales que presentan diferentes tipos de polímeros que sirven como materia prima y que permiten compararlas con las características del polímero modificado, con ello determinar si existe una mejora en sus propiedades para ser empleado como material constructivo.

- **Polímero A. HDPEr (l,t) + arcilla común**

Figura 3.3 Descripción e imagen del polímero A. Polietileno de densidad reciclado (HDPEr – lavado y triturado)

Descripción	Imagen
A. Polietileno de alta densidad reciclado (HDPEr) sometido a un proceso de triturado y lavado en hojuelas de diversas dimensiones, adquirido a la empresa ECOPLAST.	

Nota: Imagen de materia prima para fabricación de probetas grupo de probetas A, elaboración propia.

Características:

Tabla 3.1 Valores típicos de la resina Polímero A

Pruebas físicas, mecánicas y químicas	Método de prueba	Resultado
Densidad (g/cm ³)	ASTM-D-792	0.96
Resistencia a la compresión (transversal al flujo kg/cm ³)	ASTM-D-695-02	138.06
Deformación permanente bajo carga (%)	ASTM-D-638-03	20.01
Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	ASTM-D-638-03	5892.94
Resistencia al impacto (IZOD)	ASTM-D-256-03	46.6
Resistencia a aceites	ASTM-D-471-89	2.8%
Resistencia a solventes	ASTM-D-543-95	Sin cambios
Absorción al agua	ASTM-D-570-87	1%
Resistencia a la flama	ASTM-D-635-03	0.78 cm/min
Intemperismo acelerado (resistencia a la exposición a rayos UV)	ASTM-D-4329	No sufre cambio

Nota: Estos estudios fueron elaborados por CIQA laboratorio certificado, los datos contenidos en la presente tabla son emitidos por el fabricante en la ficha técnica del producto (ECOPLAST). El material puede tener una elongación o contracción de un par de milímetros.

Aplicaciones: En la fabricación de perfiles plásticos utilizados como sustituto de perfiles de madera, uso en muebles de jardín, barreras para corrales, límites de campos de Polo, bajo piso de madera, vigas decorativas, puertas, juegos infantiles, tejas plásticas, tarimas de transporte, etc.

- **Polímero B. HDPEr (l,t,p) + MAH + arcilla M**

Figura 3.4 Descripción e imagen del polímero B. Polietileno de densidad reciclado (HDPEr – lavado, triturado y granulado color negro)

Descripción	Imagen
B. Polietileno de alta densidad reciclado (HDPEr) sometido a un proceso de triturado, lavado, secado y granulado por medio de peletizadora mono husillo, en forma de gránulos, adquirido a la empresa recicladora OPT Plásticos.	

Nota: Imagen de materia prima para fabricación de probetas grupo de probetas B, elaboración propia.

Características:

Tabla 3.2 Valores típicos de la resina Polímero tipo B

Pruebas físicas, mecánicas y químicas	Método de prueba	Resultado
Índice de fluidez (2.16kg/190°C)	ASTM-D-1238	(0.30 (+0.15 / -0.10)) g/10 min (190°C 2.160kg)
Densidad (g/cm ³)	ASTM-D-4883	0.955 ± 0.010 g/cc
Cenizas	-	Máximo 2%
Color	-	Negro
Negro Carbono (negro)	-	Mínimo 1%

Nota: Los valores expresados son resultados promedios de pruebas que no deben ser considerados como especificación y sirven solo como guía para la identificación por proximidad a la especificación del producto definitivo. Los ensayos se realizan según las normas UNE de métodos de ensayo que se citan dentro de la norma UNE 53978. Datos emitidos por el fabricante con el código de producto HDPE NEGRO, referencia UNE 53978

Aplicaciones: La principal aplicación es en la fabricación de bolsa negra, cinta para invernadero, fibra óptica en diversos porcentajes con material virgen, botellas de detergente, juguetes, embalaje, tarimas plásticas, soplado de cuerpos huecos, extrusión de tubería, entre otros.

▪ **Polímero C. HDPE + MAH + arcilla M**

Figura 3.5 Descripción e imagen del polímero C. Polietileno de densidad (resina HDPE)

Descripción	Imagen
C. Copolímero de polietileno de alta densidad para soplado-extruido con aditivo antiestático (HDPE resina virgen) en forma de gránulos, adquirido a la empresa POLIMADE - PEMEX (HBM 5502).	

Nota: Imagen de resina de polietileno de alta densidad para fabricación de probetas grupo de probetas C, elaboración propia.

Características:

Tabla 3.3 Valores típicos de la resina tipo C

Pruebas físicas, mecánicas y químicas	Método de prueba	Resultado
Índice de fluidez (2.16kg/190°C)	ASTM-D-1238	< 0.3 g/10min
Densidad (g/cm ³)	ASTM-D-4883	0.955
Resistencia a la tensión a la rotura (psi)	ASTM-D-638	2,000
Deformación	ASTM-D-638	7%
Deformación a la rotura	ASTM-D-638	530%
Módulo de flexión (psi)	ASTM-D-790	200,000
Impacto de tensión (ft*lb/in ²)	ASTM-D-1822	94
Resistencia al agrietamiento por tensión ambiental (hrs)	ASTM-D-1693	> 24
Temperatura de deflexión (66psi)	ASTM-D-696	191 °C
Temperatura de fusión (°C)	---	191

Nota: Los valores expresados son resultados promedios de pruebas que no deben ser considerados como especificación y sirven solo como guía para la identificación por proximidad a la especificación del producto definitivo. Pruebas realizadas basadas en los métodos propuestos por la American Society for Testing and Materials (ASTM D 1238, ASTM D 4883, ASTM D 746, ASTM D 1525, ASTM D 638, ASTM D 790, ASTM D 1693 y ASTM D 1822). Los datos expuestos en esta tabla son emitidos por el fabricante en la ficha técnica del producto HBM 5502 (Polimade).

Aplicaciones:

Este material se utiliza para la fabricación de contenedores industriales, empaques farmacéuticos, productos de cuidado personal, contenedores alimenticios y juguetes entre otros.

▪ **Polímero D. HDPE (l,t,e³¹)**

Figura 3.6 Descripción e imagen de la probeta D. Polietileno de alta densidad reciclado (HDPEr – lavado, triturado y extruido)

Descripción	Imagen
<p>D. Polietileno de alta densidad reciclado (HDPEr) sometido a un proceso de triturado, lavado, secado y extruido por medio de extrusora mono husillo, piezas rectangulares con dimensiones 6.5cm (2.5”) x 19.3cm (7.6”) x 30.48cm (12”).</p>	

Nota: Imagen y características de probetas tipo D, elaboración propia.

Aplicaciones:

Son perfiles plásticos utilizados como sustituto de perfiles de madera, uso en muebles de jardín, barreras para corrales, límites de campos de polo, bajo piso de madera, vigas decorativas, puertas, juegos infantiles, tejas plásticas, tarimas de transporte, etc.

3.1.2 Arcilla modificada

El proceso de tratamiento de la arcilla se realizará en el Instituto de Materiales de la UNAM a cargo del Dr. Antonio Sánchez Solís³², quien, asimismo proporcionara a la presente investigación la arcilla modificada (M) para fabricar las probetas del material compuesto, el cual se ha realizado previamente por medio del intercalado de L-lisina³³ y arcilla. La lisina presenta una carga neta positiva la cual se absorbe de mejor manera que cualquier otro aminoácido en la arcilla montmorillonita (X. C. Wang, 1993, p. 23).

El proceso para llevar a cabo la modificación de la arcilla se determinó por medio de trabajos previos por parte del Dr. Sánchez Solís:

³¹ Las siglas l,t,e representan el proceso al que fue sometido el material para su fabricación final; lavado, triturado y extruido.

³² La arcilla modificada se proporciona por parte del Dr. Antonio Sánchez Solís ya que el proceso de fabricación no forma parte de la presente investigación.

³³ La sal del aminoácido L-Lisina en la arcilla producirá un efecto de compatibilidad con el polietileno de alta densidad injertado con anhídrido maleico. La mezcla en fundido tendrá mejor dispersión y distribución de las láminas de arcilla, este método producirá un nanocompuesto polimérico exfoliado con mejores propiedades físicas que el polímero precursor.

Mediante una titulación con azul de metileno en un medio de agua oxigenada y ácido sulfúrico. Con el resultado de este procedimiento se calculó la cantidad de lisina necesaria para la modificación de la bentonita.

Una vez calculada la cantidad de lisina, esta se pesó y disolvió en agua destilada, la cual se agregó lentamente a una mezcla de bentonita pura con agua, el resultado fue una mezcla pastosa y grumosa. Se agregó más agua y se mezcló hasta eliminar los grumos, se secó en una charola y luego se pulverizó, obteniendo así la bentonita modificada con lisina.

Luego se volvió a determinar la capacidad de intercambio iónico de la bentonita modificada mediante titulación con azul de metileno. El resultado es la cantidad de equivalente sin sustituir, los cuales, al compararse con los equivalentes totales obtenidos de la bentonita pura, determinaron el porcentaje de intercambio iónico presente en la bentonita modificada. El resultado fue 20% de intercambio iónico (Flores, 2010, p. 26).

El uso de estos materiales se determinó por el descubrimiento de algunos estudios en los que se establece que la estabilidad térmica de los aminoácidos intercalados en la arcilla montmorillonita, es mayor que la arcilla pura (A. Fudala, 1999, p.35).

Se ha hecho evidente en diferentes investigaciones y aplicaciones que la arcilla Montmorillonita presenta características favorables para su aprovechamiento en fabricación de nanomateriales tal como lo menciona Flores M. (2006), “numerosas son las bondades y aplicaciones de la arcilla, producto de las modificaciones que sufre la estructura laminar al ponerse en contacto con otras especies químicas, por ejemplo, el agua, las moléculas orgánicas y los polímeros inorgánicos de tamaño variable.” (p. 25).

Figura 3.7 Descripción e imagen de arcilla modificada

Descripción	Imagen
<p>Arcilla montmorillonita modificada químicamente con ácido 11-aminoundecanoico</p>	

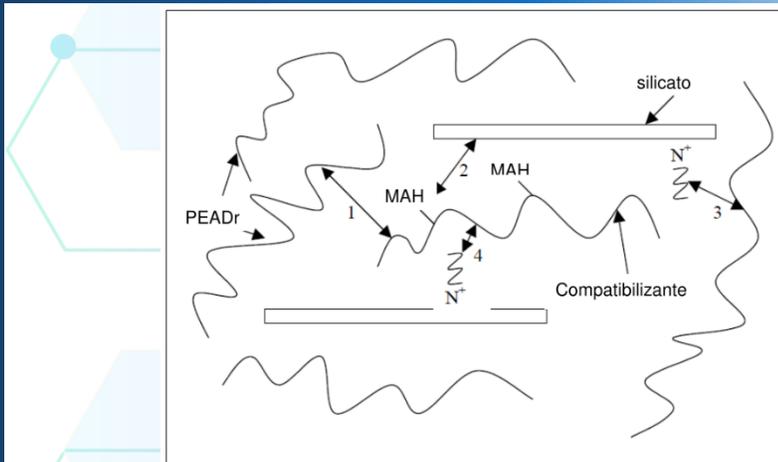
Nota: Imagen y características de arcilla modificada, elaboración propia.

Es posible referirnos al nombre de montmorillonita que proviene del material original, descrito por Damour y Salvétat, en 1874, en la localidad de Montmorillon, Francia. Es una arcilla pegajosa y plástica, su densidad varía desde 1.6 a 2.7 g/cm³, de acuerdo al grado de hidratación. Flores M. (2006, p.25).

3.1.3 Agente de acoplamiento, Fusabond AU-514D (Anhídrido Maleico)

Para garantizar que el proceso de compatibilización se realice de forma adecuada, se analizan técnicas aplicadas para nanocompuestos de poliolefinas con arcillas; el proceso más utilizado se obtiene al injertar anhídrido maleico a las cadenas poliméricas. El anhídrido maleico, que se utiliza en este caso, es Fusabond AU-514D (2% Maleico MAH)³⁴, con el cual se busca que este compuesto reaccione con la matriz polimérica para ser atraídos y crear grupos polares, por su naturaleza en las capas de arcilla de sílice.

Figura 3.8 Compatibilización del nanocompuesto de HDPEr



Nota: El gráfico representa las condiciones de compatibilización entre la arcilla modificada, el polímero y el Fusabond, tomado de *“Materiales compuestos a base de polietileno de alta densidad reciclado”* (p. 28), por A. Flores (tesis de grado), 2010, Universidad Nacional Autónoma de México.

Por tal motivo, como lo describe Flores (2010), existen tres intercalaciones principales dentro de la compatibilización por medio del anhídrido maleico³⁵:

1. Interacciones entre la matriz polimérica y la cadena de polietileno del compatibilizante.
2. Interacción entre el grupo polar del anhídrido maleico y la capa polar de sílice de la arcilla.

³⁴ MAH. Compuesto comercial de la marca DOW FUSABOND E265

³⁵ MAH, Las siglas hacen referencia la Anhídrido Maleico (Fusabond)

3. Interacción entre el tratamiento de la arcilla y la matriz polimérica o el polímero compatibilizante (p.27).

Figura 3.9 Descripción e imagen de agente de acoplamiento

Descripción	Imagen
<p>Agente de acoplamiento, polietileno de alta densidad modificado con anhídrido Maleico Fusabond AU-514D de la marca Dow.</p>	

Nota: Imagen y especificaciones de agente de acoplamiento base de Anhídrido Maleico para compatibilizar el polietileno de alta densidad con la arcilla, elaboración propia.

Características:

Tabla 3.4 Valores típicos de agente de acoplamiento

Pruebas físicas, mecánicas y químicas	Método de prueba	Resultado
Densidad (g/cm ³)	ASTM-D-792	0.93
Índice de fluidez (190°C/2.16kg)	ASTM-D-1238	2.5g / 10min
Punto de fusión (DSC)	ASTM-D-3418	101°C (213.8°F)
Punto de congelación (DSC)	ASTM-D-3418	83°C (181.4°F)
Temperatura máxima de procesamiento	---	310°C (590°F)

Nota: Los valores expresados son obtenidos de las pruebas realizadas por el fabricante Du Pont, y referidas en la ficha técnica emitida para el producto Fusabond UA-514D.

Aplicaciones:

Modificador de polímero, basado en Anhídrido Maleico mínimo al 2%, el cual tiene la función de agente acoplante entre el polietileno de alta densidad y la arcilla modificada.

3.2 Equipos y herramientas experimentales

Los equipos descritos se utilizaron para la mezcla del compuesto de matriz polimérica y refuerzo de arcilla por medio de extrusión, mismos que se presentan a continuación:

- Extrusora doble husillo³⁶ COPERION Tipo ZSK 18 ML, A110 con un husillo alimentador a dos árboles y alimentación lateral para procesamiento de aditivos.

Figura 3.10 Extrusora doble husillo COPERION ZSK 18 ML



Nota: Equipo de extrusión de doble husillo para la fabricación de probetas del compuesto polímero - arcilla

En la tabla 3.5, se muestra a continuación el resumen de sus características básicas:

Tabla 3.5 Ficha de datos técnicos de Extrusora/Husillo alimentador a dos árboles

Tipo	ZSK 18 ML
Potencia	0.37 W
Número de revoluciones del accionamiento	1380 min^{-1}
Diámetro de husillo	Ø 17 mm
Altura de la punta del husillo	1100 ±10 mm
Par de giro por cada eje de husillo	Máx. 3 Nm
Número de revoluciones del eje del husillo	60 – 600 min^{-1}
Establecimiento de presión	máx. 30 bar

Nota: Los datos indicados corresponden al Manual de proyecto 64057330, Coperion GmbH, 70469 Stuttgart, info@coperion.com, www.coperion.com.

³⁶ Tornillo de metal fijado por un extremo a un motor que lo hace girar a una velocidad angular previamente decidida en los procesos de Moldeo por inyección y extrusión.

- Peletizador de filamentos COPERION SP 50 pure, con aislamiento de vibración, con rodillo accionado de alimentación superior para fabricación de pellet ³⁷.

Figura 3.11 Peletizador de filamentos COPERION SP 50 pure



Nota: Equipo de peletizado, se usó para convertir el filamento en pequeños gránulos o pellets, con el objetivo de poder manipularlo para la fabricación de probetas.

En la tabla 3.6, se muestra a continuación el resumen de sus características básicas:

Tabla 3.6 Ficha de datos técnicos de Extrusora/Husillo alimentador a dos árboles

Tipo	SP 50 pure
Potencia	1.35 W
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	460 V
Ancho de gránulos	50, 100, 150 mm
Rendimiento	30 a 1000 kg/h

Nota: Los datos indicados corresponden al Manual de proyecto A15-23533, Coperion GmbH, 70469 Stuttgart, info@coperion.com, www.coperion.com.

³⁷ Los pellets son pequeñas partículas típicamente creadas por la compresión de un material original. La peletización es el proceso industrial usado para crear gránulos, usando un molino de pellets o equipo para extrusión.

3.3 Fase preliminar o de referencia

Previo a comenzar con el procesamiento del nano compuesto, es importante tener un parámetro de referencia en cuanto a los materiales que se encuentran en el mercado y de las mezclas del polietileno de alta densidad y la arcilla montmorillonita común, esto con la finalidad de comprobar el nivel de integración de los materiales y con esto obtener datos preliminares que puedan ser comparables con la mejora del material compuesto.

3.3.1 Polietileno de alta densidad extruido

Figura 3.12 Polietileno de alta densidad reciclado HDPEr



Dentro de la industria de los polímeros, los materiales reciclados están tomando un papel importante en los procesos productivos de economía circular, en mercados de artículos y elementos extruidos que pretenden sustituir materiales como la madera, por plásticos.

Es por ello que se fabrican probetas con material reciclado por medio de un proceso de extrusión, se utiliza una extrusora *Cincinnati Milacron* mono husillo, en este caso la materia prima es polietileno de alta densidad reciclado misma que ha pasado por un proceso de triturado y lavado³⁸, con la finalidad de depurar partículas contaminantes y desalojar otro tipo de materiales.

Nota: En este gráfico se presenta la materia prima para la fabricación de muestras de referencia, elaboración propia.

El material polimérico se ingresa a la tolva de alimentación, para posteriormente pasar por el barril para ser extruido por la boquilla o dado, la cual le da la forma del perfil que se desea obtener ya sea sólido, tubular o laminar.

En este caso se obtuvieron perfiles con dimensiones de 2" x 6" (5 x 15.2 ± 0.05cm) y 2.5" x 7.5" (6.4 x 18.9 ± 0.05cm) para adaptarse a las dimensiones de probetas que sea necesario. Es importante mencionar que la flexibilidad de corte es similar a la que presenta la madera y las herramientas destinadas para este material se pueden utilizar para el HDPE. Estos elementos lineales salen por el dado y atraviesa por una etapa de enfriamiento bajo un baño de agua en el depósito final de

³⁸ Este material se encuentra disponible para adquirirlo en el mercado de plásticos, se utiliza principalmente para mezclarlo con resina de HDPE para disminuir costos o en la fabricación de artículos como cinta para riego, envases o perfiles para sustitución de madera.

este proceso de extrusión, para posteriormente realizar los cortes pertinentes con las dimensiones necesarias para su manejo final.

Figura 3.13 Proceso de extrusión de muestras a base de HDPEr



Nota: El proceso de fabricación de estas muestras es el que comúnmente se realiza para producir elementos plásticos para diversos usos como el de fabricación de muebles, tarimas, estructuras bajo piso, barreras de polo, corrales para caballos, principalmente como sustituto de la madera, por lo que se pueden utilizar las mismas herramientas y sistemas de anclaje o ensambles que en procesos de la madera, elaboración propia.

Para el desarrollo de la etapa experimental, este grupo de probetas de denomina “D” las cuales se adaptan en dimensiones conforme a la norma correspondiente, ya que se toma como material de referencia con el cual se fabrican elementos arquitectónicos como vigas, bajo suelos, deck´s o bloques.

3.3.2 Compuesto HDPE y arcilla montmorillonita común

El siguiente grupo de probetas se fabrica con polietileno de alta densidad reciclado, que de igual forma que el grupo “D” la materia prima se somete a un proceso de separación, lavado y triturado para quedar como hojuelas de diversos tamaños y colores. En esta parte se adiciona en la etapa de fabricación, arcilla montmorillonita común utilizada regularmente en la cerámica, con la finalidad de corroborar el grado de integración de ambos elementos al someterse a un proceso de extrusión simple.

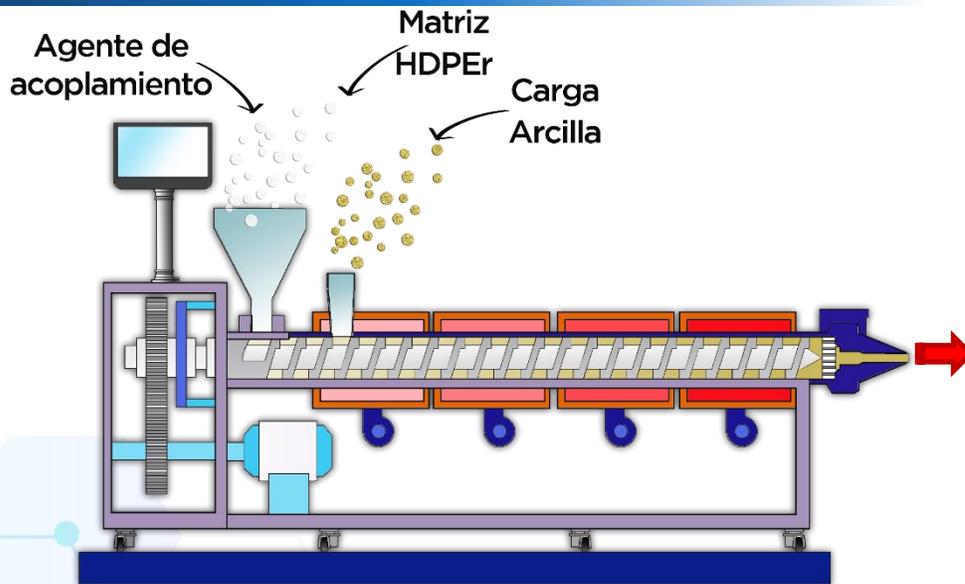
3.4 Fase 1. Procesamiento del nanocompuesto

El método que se utiliza para la integración de los componentes es el intercalado en fundido, tal y como se analiza en el Capítulo II, es necesario el uso de una extrusora de doble husillo³⁹. La arcilla modificada es agregada al cañón o tubo de forma directa y uniforme por medio de la tolva de aditivos, a la par que se agrega el polietileno o

³⁹ Extrusora doble husillo COPERION Tipo ZSK 18 ML, A110 con un husillo alimentador a dos árboles y alimentación lateral para procesamiento de aditivos, se describen sus características en el apartado 3.3.1 del presente Capítulo.

matriz del compuesto en la tolva principal, ambas ubicadas en la parte superior del equipo.

Figura 3.14 Diagrama del proceso de integración de materiales en la extrusora



Nota: El proceso de vaciado del polímero se realizó por medio de un dosificador ubicado en la parte superior de la tolva principal, con la finalidad de regular el ingreso de este material, en el caso de la arcilla se colocó de forma manual con la intención de regular la presión al interior del cañón, elaboración propia.

En esta etapa se funden ambos materiales (polietileno de alta densidad y arcilla) al interior del cañón, al igual que el agente de acoplamiento quien tiene la función de compatibilizarlos, para el caso de las mezclas que así se determinaron, este proceso se realiza por medio de un mezclado intensivo derivado del efecto de cizalla que generan los husillos; al realizar este paso se pretende que las cadenas poliméricas migren entre las capas de la arcilla lo que se origina por la integración de la matriz polimérica y la arcilla, las capas de arcilla deben separarse y dispersarse como resultado de la fuerza de corte de los husillos, misma que se experimenta durante el proceso de fusión y mezclado.

Posteriormente, el material sale por el dado o boquilla al final del equipo de extrusión obteniendo un filamento delgado denominado "línea", la cual pasa por una tina de enfriamiento, la cual cuenta con agua fría⁴⁰, para disminuir su temperatura y solidificarlo. Esta línea termina en el equipo de peletizado, misma que sirve como jalador y cumple también con su función de transformar el filamento lineal en pequeños gránulos o pellets para su mejor manejo y posibilidad de fabricar las probetas.

⁴⁰ El agua de la tina de enfriamiento cuenta con un sistema de cambio de agua, es decir, se recicla el agua que baja de temperatura para sustituirla por agua fría con el objetivo de garantizar que el agua siempre se encuentre a baja temperatura para que pueda solidificar el material.

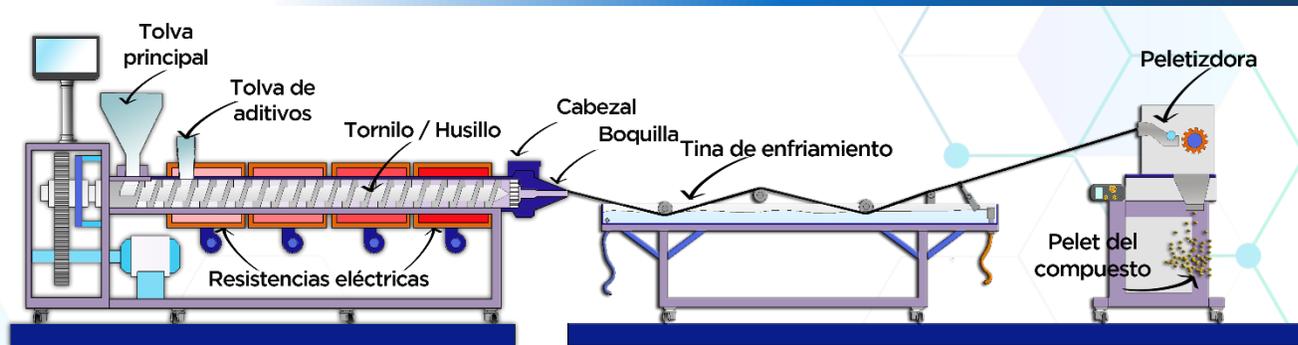
Figura 3.15 Imágenes del proceso de integración de materiales en la extrusora



Nota: En la imagen se presenta el proceso de adición manual de la arcilla para integrarla al cañón de la extrusora, mientras que el HDPE se coloca por medio de un dosificador para propiciar que el material se agregue de forma regular, elaboración propia.

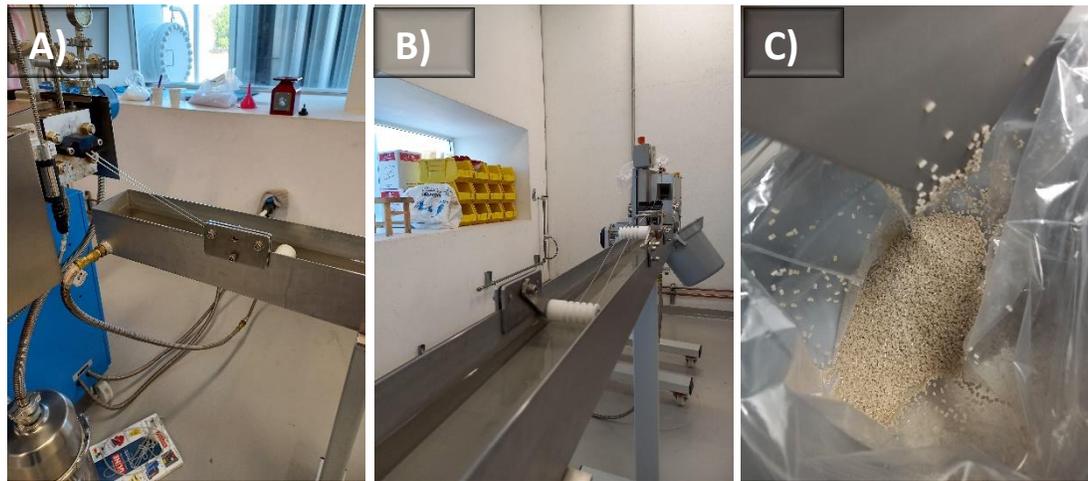
Al final de la línea de procesamiento se recolecta el material granulado, que para este caso se determinó esta presentación del material para poder fabricar las probetas, aunque es importante mencionar que en esta etapa es posible extruir de manera directa el perfil que se desea obtener como producto final.

Figura 3.16 Diagrama del proceso de extrusión, enfriamiento y granulado del material compuesto



Nota: Se presenta el esquema general del proceso de fabricación del material compuesto, dividido en las 3 fases: el de extrusión, enfriamiento y granulado, obteniendo como resultado pellets del compuesto polímero – arcilla, elaboración propia.

Figura 3.17 Imágenes del proceso de integración de materiales en la extrusora



Nota: Las imágenes presentan las 3 fases del proceso de fabricación del material compuesto: A) Proceso de extrusión (doble husillo), B) Proceso de enfriamiento con tina de agua y C) Proceso de granulado y recolección del material polímero – arcilla, elaboración propia.

Es importante determinar los factores que intervienen en el proceso de extrusión (temperatura, velocidad de husillos, tiempo de residencia, presión, porcentaje de ocupación del cañón), ya que de esto dependerá el correcto comportamiento del compuesto, por lo que en la Figura 3.17, se determinan los parámetros que se establecieron conforme a las características recomendadas por el fabricante para la matriz.

Figura 3.18 Imagen de la pantalla de la extrusora con los parámetros de procesamiento del material.



Nota: Se muestran los parámetros de temperaturas en las diferentes fases del cañón iniciando con 120°C hasta llegar a los 215°C al final en la zona del cabezal para la salida del material, elaboración propia.

Parámetros de procesamiento:

- Tiempo de residencia: 1.44 min.
- Presión promedio en el cañón: 14 bar.
- Temperatura máxima: 215°C
- Ocupación de cañón: 46% < 60%
- Rango de temperatura: 120°C – 215°C distribuido en 9 zonas de calentamiento con un rango de temperatura de 95°C.

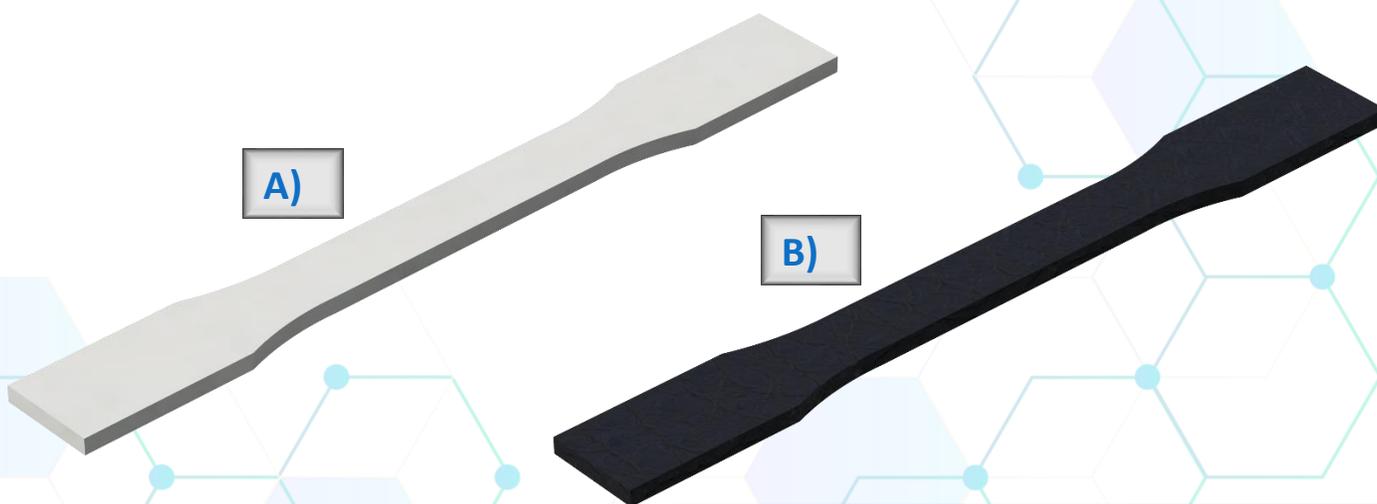
El objetivo de esta fase es determinar la mezcla más eficiente en cuanto a su comportamiento mecánico, por lo que, se fabrican los pellets con variaciones de porcentajes entre la arcilla y el agente de acoplamiento, además, tomando como matriz la resina de HDPE y el HDPE reciclado color negro como se muestra a continuación, para posteriormente llevarlo a la Fase 2 del proceso experimental.

3.4.1 Dosificación de materiales en la producción del material compuesto

En el proceso de producción del material compuesto se integran las variables; la matriz, la carga de refuerzo y el agente acoplante, por ello, que se plantea explorar diversas mezclas en los que la dosificación en porcentajes de dichas variables logre que la dispersión de la arcilla dentro del polímero sea la más eficiente.

En este sentido se analiza como matriz 2 tipos de polímeros. En primer lugar, el polietileno de alta densidad reciclado color negro, definido como Polímero B. HDPEr (l,t,p) + MAH + arcilla M. Por otro lado, la resina de polietileno de alta densidad definido como Polímero C. HDPE + MAH + arcilla M.

Figura 3.19 Probetas de tensión material matriz (de referencia)



Nota: El gráfico representa la matriz polimérica utilizadas como referencia para las pruebas de laboratorio. A) Polietileno de alta densidad resina B) Polietileno de alta densidad reciclado color negro, elaboración propia.

Los materiales que complementan el compuesto son el agente de acoplamiento y la carga de refuerzo (arcilla modificada), tomando como parámetros base los procesos experimentales de Flores (2006), en el que los rangos variables de porcentaje varían al rededor del 2 phr⁴¹, es por ello que se plantean las siguientes proporciones de materiales:

Tabla 3.7 Porcentaje de dosificación del material compuesto

<i>Material matriz</i>	<i>No.</i>	<i>Materiales adicionados</i>	
		<i>Mezcla</i>	<i>Arcilla %</i>
<i>HDPE virgen (B)</i>	BrefB*	0	0
	B.1	2	0
	B.2	0	2
	B.3	2	2
	B.4	3	2
	B.5	2	3
<i>HDPEr NEGRO (C)</i>	BrefN**	0	0
	C.10	2	0
	C.11	0	2
	C.12	2	2
	C.13	3	2
	C.14	2	3

Nota: La propuesta de porcentajes de materiales adicionados se determinó mediante la revisión de procesos experimentales para la fabricación de nanocompuestos, por lo que es posible revisar en las referencias bibliográficas.

* BrefB - Material de referencia resina HDPE (familia B)

** BrefM - Material de referencia HDPE reciclado color negro (familia C), elaboración propia.

Las diferentes formulaciones se produjeron en 2 pasos:

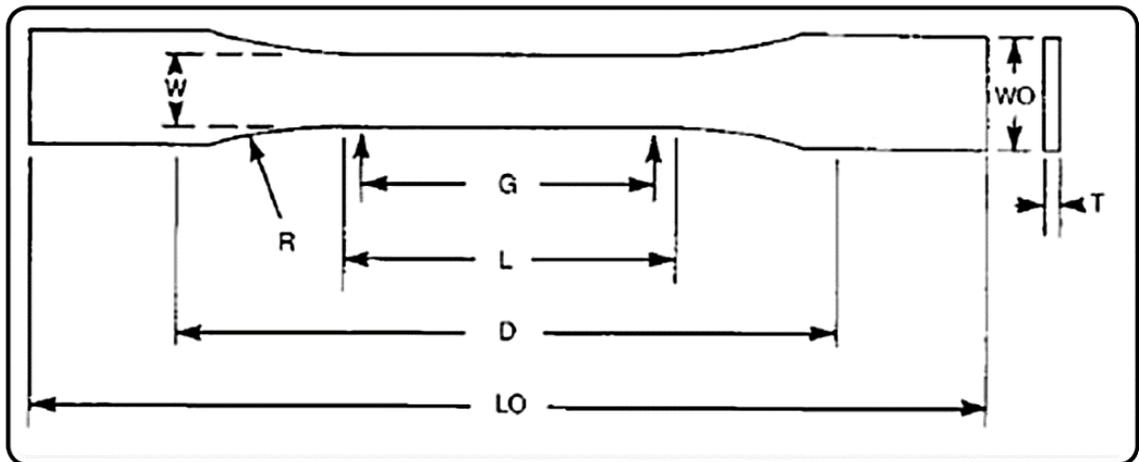
- 1) Extrusión de mezclas por medio de extrusora de doble husillo y granulado para obtener el material en pequeños pellets.
- 2) Inyección de probetas sobre molde conforme a la Norma ASTM D-638 para someterlas a pruebas de tensión y con ello determinar los parámetros de su comportamiento mecánico.

⁴¹ Las siglas phr representan en partes por cien de resina.

3.4.2 Moldeo por inyección de probetas de tracción

Con el objetivo de realizar la caracterización de las mezclas y determinar las propiedades mecánicas de las mismas fue necesario inyectar probetas normalizadas con forma de halterio⁴², esto conforme a la Norma ASTM D-638, "Método Estándar de Prueba para las Propiedades en Tracción de los Plásticos". Las dimensiones principales de las probetas se muestran en la figura 3.19.

Figura 3.20 Dimensiones de probetas de tensión



En donde:

- G es la longitud de prueba de 50 [mm].
- L es la longitud de la sección recta de 57 [mm].
- D es la distancia de entre mordazas de 135 [mm].
- LO es la longitud total de 183 [mm].
- W es el ancho de la sección recta de 6 [mm].
- WO es el ancho total de 19 [mm].
- R es el radio del filete de 76 [mm].
- T es el espesor de 3.2 [mm].

Nota: La Norma ASTM D-638 Define los parámetros del ensayo y la geometría de la probeta, las cuales se presentan en este gráfico (ASTM, 2003, p.4).

⁴² Son una de las formas más habituales de ensayo de muestras de un material, debido a que se consiguen unos parámetros geométricos de probeta controlados y por tanto el cálculo de las características del material es mucho más sencillo y preciso.

La probeta se fabricó por medio de un proceso de inyección apoyado del equipo Babyplast 610P, con la finalidad de dar cumplimiento a las dimensiones requeridas, es importante mencionar que, para la obtención del área de elongación, se midieron cada una de las probetas con la finalidad de obtener el área de la sección central de dichos elementos.

Figura 3.21 Equipo de inyección para pruebas de tracción



Nota: Las probetas se fabricaron con apoyo de un equipo de inyección de polímeros Babyplast 610P, con la finalidad de cumplir con las dimensiones que especifica la norma y producir piezas de mejor calidad, autoría propia.

Para esta fase de experimentación se elaboran 2 familias de probetas (B y C), ya que, el material de la familia A no fue posible fabricarse debido a que el material tenía muchos contaminantes de cartón, metales y otros polímeros. Dichas probetas realizaron con las mezclas indicadas en la tabla 3.7, se obtuvieron un total de 10 mezclas.⁴³

Por lo que, se define la familia del grupo B⁴⁴ (HDPEr I, t, p, MAH, arcilla M) y la familia del grupo C⁴⁵ (HDPE, MAH, arcilla M), con variaciones en el porcentaje de la arcilla modificada y el agente de acoplamiento, con la finalidad de realizar las

⁴³ Se fabrican 5 probetas por cada mezcla (para un total de 50 probetas) conforme lo indica la Norma ASTM D-638, Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los plásticos.

⁴⁴ El grupo B corresponde a la mezcla entre polietileno de alta densidad reciclado (HDPEr) en estado triturado (t), lavado (l) y granulado negro (p), aditado con el agente de acoplamiento (MAH) y la arcilla modificada (M).

⁴⁵ El grupo C corresponde a la mezcla entre la resina virgen de polietileno de alta densidad (HDPE), aditado con el agente de acoplamiento (MAH) y la arcilla modificada (M).

pruebas de laboratorio correspondientes, para determinar la mezcla con las mejores propiedades mecánicas y así, poder fabricar el panel modular.

Figura 3.22 Equipo de inyección para pruebas de tracción



Nota: En el esquema se presentan las variantes de las probetas fabricadas para la familia "B" y "C" correspondientes a las proporciones de materiales indicadas en la tabla 3.7, el consecutivo de las probetas 6, 7, 8 y 9, corresponden al material que se descartó, autoría propia.

3.4.3 Pruebas de tensión para el material compuesto

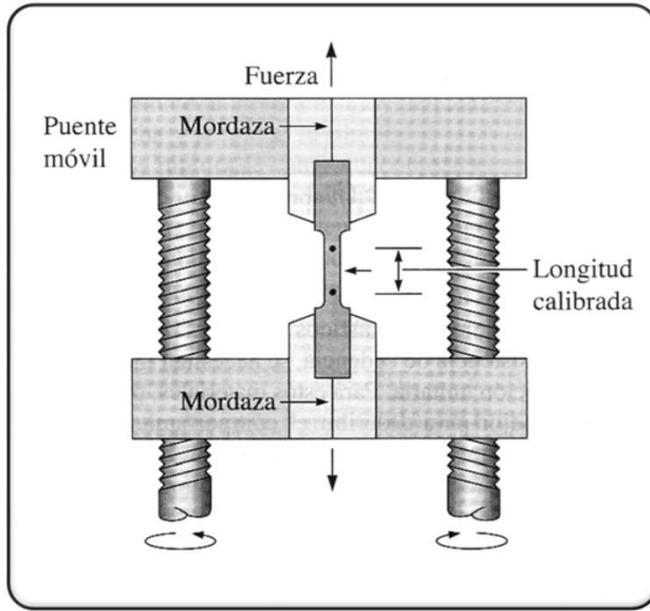
Se realizan pruebas de tensión mediante una máquina universal para determinar la resistencia que tiene el material al aplicar una fuerza de manera lenta y prolongada, la cual se somete a un esfuerzo de tensión progresiva hasta llegar al punto de ruptura del material denominado falla.

En este proceso conforme se aplica la fuerza de tensión en el material, la parte más esvelta de la probeta se va deformando, de esta manera se registra el tiempo y la carga aplicada, llegando comúnmente al punto de fractura del material con lo que termina la prueba (Askeland, 2004).

De igual forma, la finalidad de este ensayo es determinar las propiedades mecánicas del material, como son: la deformación, esfuerzo de cedencia, resistencia o esfuerzo máximo, ductilidad y módulo elástico. Al final de la prueba se obtienen los datos para graficarlos y determinar cuál es el material que presenta el mejor

comportamiento al momento de aplicar una fuerza. La prueba se realiza como se indica en la figura 3.23.

Figura 3.23 Esquema de ensayo de tracción



Nota: El esquema ejemplifica el proceso de ensayo de tracción mediante un puente o cabezal móvil. Obtenido de Askeland (2004) citado por Mancilla (2013, p. 25).

La probeta se somete a una fuerza de tensión prolongada, para este caso de misma que deforma el material con lo que se obtienen propiedades mecánicas del material polimérico como: el porcentaje de deformación, esfuerzo de cedencia, esfuerzo máximo, resistencia, módulo de Young (módulo elástico) o ductilidad.

Figura 3.24 Pruebas de tensión en equipo universal



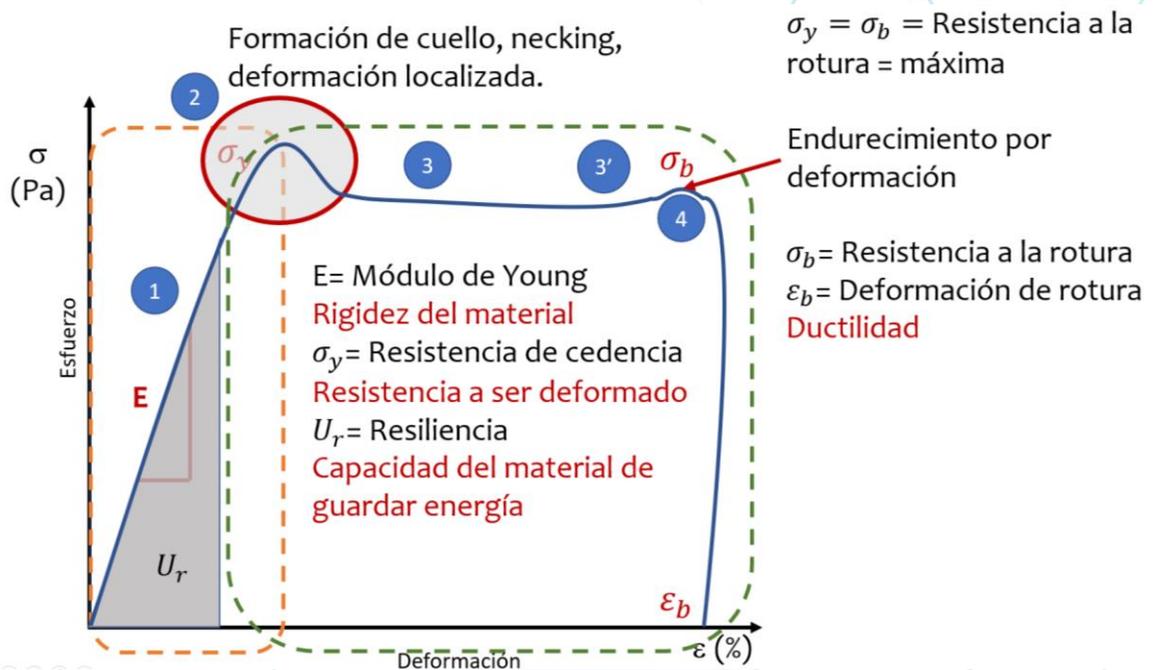
Nota: Imágenes del proceso de ejecución de pruebas de tracción en maquina universal, autoría propia.

La deformación es “cuando el material es sometido a una fuerza externa, primero se lleva a cabo una deformación (ϵ) elástica, es decir, el material regresa a su forma original cuando la aplicación de la carga se retira” (Mancilla, 2013, p. 25), aunque si dicha carga continua o aumenta ocasiona una deformación que es permanente (plástica), en este caso este material pierde su forma y no es posible volver a su forma inicial.

Otra propiedad es el esfuerzo de cedencia (σ_y), que en la figura 3.25 se identifica con el número 2 y se define como “el punto en el cual el material empieza a sufrir una deformación plástica, es decir, el material pasa la zona de deformación elástica y comienza a deformarse permanentemente” (Mancilla, 2013, p. 25). Al llegar al punto máximo de esfuerzo la curva comienza a disminuir, es entonces cuando el material comienza a reducir el espacio del material en su zona más endeble.

Al seguir incrementando la fuerza sobre el material posterior al límite de cedencia llega a un punto máximo de fractura en el que sufre un endurecimiento final o una resistencia a la rotura (σ_b) previo a llegar a un estado límite máximo o de fractura, como se muestra en la figura 3.25 en el punto 4.

Figura 3.25 Esquema de parámetros mecánicos de tracción en polímeros termoplásticos (curva esfuerzo-deformación)



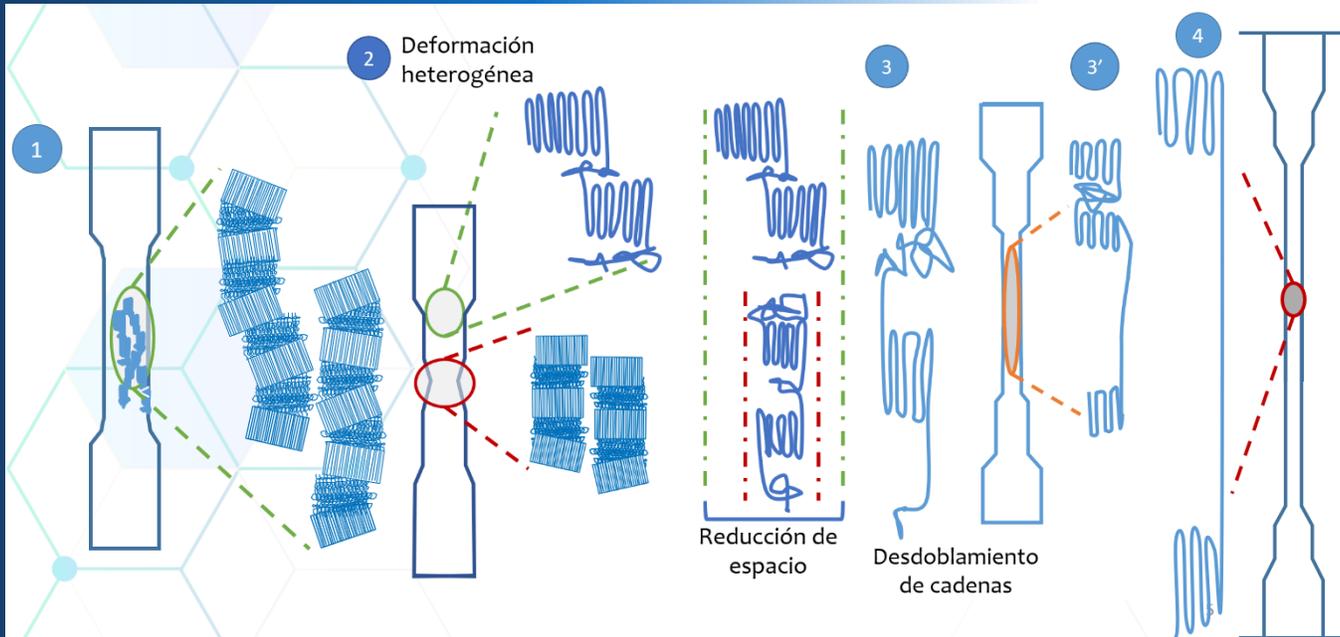
Nota: El esquema es la descripción de los parámetros mecánicos obtenidos en la prueba de tracción de un polímero, se describen las zonas ubicadas en la curva de esfuerzo-deformación generada por los datos obtenidos en dicha prueba, obtenido de Franco (2022).

La ductilidad es una propiedad que toma suma importancia en los polímeros, ya que de ello depende el correcto manejo del material en los procesos de transformación de los plásticos, ya que es según Mancilla (2013):

una medida del grado de deformación plástica que puede soportar el material antes de llegar a la fractura. Un material que se fractura con poca, o ninguna, deformación plástica se denomina frágil. Y, por el contrario, si un material presenta una mayor deformación plástica antes de llegar a la fractura, entonces, se denomina dúctil (p. 27).

En cuanto al módulo de elasticidad o módulo de Young consiste en un parámetro que indica la rigidez del material, en un rango elástico de deformación, “también, se le conoce como la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación del material. Mientras mayor sea el módulo, más rígido será el material, es decir, cuando se le aplica un esfuerzo, su límite de deformación elástica es menor” (Smit, 2004 citado por Mancilla, 2013, p. 27). Este módulo se obtiene con el valor de la línea de inclinación de la curva ascendente (E) de esfuerzo-deformación.

Figura 3.26 Esquema de comportamiento del material polimérico en el proceso de esfuerzo-deformación



Nota: El esquema representa el proceso que sufre el material polimérico sometido a una fuerza externa:

1. Acomodo inicial de cadenas poliméricas al aplicar la fuerza de tensión.
2. Se realiza una deformación homogénea y se comienzan a adelgazar las paredes con mayor fragilidad.
3. Se desdoblán las cadenas y llega a una resistencia de rotura.
4. Se elongan las cadenas hasta llegar a un endurecimiento por deformación previo a la rotura del material.

Obtenido de Franco (2022).

Como resultado de las pruebas de tracción, se obtienen los datos correspondientes para obtener las gráficas de esfuerzo, el cual se refiere a la relación que existe entre la fuerza aplicada perpendicularmente sobre una superficie determinada o la carga por unidad de área; por lo que el esfuerzo (P) magnitud de la fuerza y A de aplicación, el esfuerzo σ es el cociente:

$$\sigma = P/A$$

Las unidades del esfuerzo normal en el Sistema Internacional son Newton entre metros cuadrados (N/m^2), conocidas como Pascales y abreviadas Pa (Zapata, 2020, párr. 2). Es por ello, que se realizan mediciones de la parte central de cada probeta para determinar el área en la que se va a aplicar la fuerza de tensión.

Por otro lado, la deformación se define como “el cambio de dimensión por unidad de longitud y se determina dividiendo el cambio de longitud calibrada Δ entre la longitud inicial calibrada del espécimen” (Palencia, 2021, párr. 6-8), por lo que es importante tener identificada la medida de la distancia entre mordazas y dividirla entre el elongamiento de la probeta. Es importante considerar que la deformación se mide en porcentaje de aumento de dimensiones respecto a la medida inicial, por lo que se multiplica por 100 para obtener el porcentaje.

Estos datos se analizan en el capítulo V, para determinar las propiedades y características que arrojan las diferentes mezclas y su análisis para el cumplimiento de requerimientos mínimos conforme a la norma de materiales tradicionales.

3.5 Fabricación de prototipo

Debido a que el proceso de producción del nano panel requiere equipo especial, lo que genera una alta inversión por la adquisición del dado de extrusión y sistema de moldeo, se optó por fabricar un molde metálico en el que se coloca el material extruido. Este proceso hace referencia al que se utiliza en algunas empresas del ramo, que ya se encuentran posicionadas en el mercado de construcción con materiales poliméricos reciclados.

En este caso el molde se conecta al final de la extrusora por medio de un manifold⁴⁶, el cual distribuye el material extruido por medio de dos boquillas conectadas a un molde metálico con la forma de la pieza deseada. Se lleva a cabo el proceso de extrusión hasta saturar uno de estos moldes y se abre paso al siguiente molde alternando el flujo de material.

Posterior al llenado de material al interior del molde se desconecta y se envía a una tina de enfriamiento, donde el choque térmico contribuye a la estabilidad mecánica del material, después de 30 minutos se pasa a la zona de desmoldeo y se procede a desarmar el molde hasta obtener la pieza deseada. A pesar de ser un

⁴⁶ El manifold es parte del sistema de tuberías de cargue, descargue o manejo de productos, en el cual confluyen varios tubos y válvulas.

proceso todavía manual se encuentra en proceso de automatización con el objetivo de hacer más eficiente y económico este proceso.

Figura 3.27 Imágenes del proceso de fabricación de elementos por medio de moldeo



Nota: En las imágenes se observa el proceso que se lleva a cabo en la planta de la empresa Bloqueplas para fabricar las piezas que configuran los muros de espacios arquitectónicos, este sistema es más económico que el de extrusión lineal, aunque es un proceso más tardado y manual, autoría propia.

Es por ello, que se opta realizar el prototipo con este proceso, por lo que se elaboró un molde con las dimensiones mínimas del panel modular y que se asemejan a la configuración de un block hueco de cemento, el objetivo es que este molde pueda entrar en un horno para calentarlo a 200°C y derretir el material plástico, además, debe ser desensamblado fácilmente para obtener la pieza para su producción.

El molde consta de 3 piezas, dos de ellas configuran la parte exterior que da forma en los límites al bloque y una tercera pieza interior que permite dar forma a los alvéolos internos. A pesar de ser un proceso de prueba sirve para tomar en cuenta criterios en la mejora continua del panel y el método de fabricación a nivel industrial de estos elementos.

Figura 3.28 Molde para fabricar prototipo de panel



Nota: En las imágenes se muestran las piezas que conforman el molde para la fabricación del prototipo de panel, consta de 2 piezas exteriores y una pieza interior, autoría propia.

Debido a que no se cuenta con un sistema de extrusión para poder adaptar el molde y considerando que el material obtenido está en pellets se opta por saturar el interior del elemento hasta llegar al tope de su capacidad y comprimirlo con la tapa superior, con la finalidad de compactar el material lo más posible, con ello se busca evitar que queden espacios sin material.

Figura 3.29 Saturación de molde con material compuesto



Nota: Se muestran las imágenes del proceso de saturación del molde con material plástico, resina de polietileno de alta densidad (lado izquierdo) y compuesto polietileno de alta densidad – arcilla (lado derecho), autoría propia.

El siguiente paso es calentar el horno para llegar a un rango de temperatura entre los 180°C a 200°C, para lograr obtener un proceso de fundido sin degradar el

material, el tiempo promedio es de 2 horas, posteriormente se retira del horno y se lleva a un proceso de enfriamiento con agua.

Figura 3.30 Calentamiento del molde en horno



Nota: En las imágenes se presenta el proceso de fusión del plástico dentro del molde, se realiza en un horno de calentamiento industrial de resistencias, autoría propia.

Por último, se desmolda la pieza quitando los tornillos laterales y forzando a su extracción, es importante mencionar que este es un proceso de mejora continua por lo que se podrán hacer mejoras y adecuaciones conforme se obtengan los primeros resultados. Al final, se acondiciona el elemento eliminando impurezas y rebabas producto de la presión interna del molde.

Figura 3.31 Desmoldeo de prototipo de panel



Nota: En las imágenes se muestran las piezas resultantes del proceso de moldeo, posterior a su extracción, autoría propia.

Es posible ajustar dimensiones conforme a las necesidades de cada proyecto, aunque el objetivo es dar una solución que sea posible de manejar y modular a las necesidades del cliente final. El proceso de industrialización facilita la fabricación y aumenta la eficiencia por lo que se genera una solución prefabricada.

Figura 3.32 Prototipo de panel modular



Nota: En las imágenes se muestran los prototipos resultantes del proceso descrito líneas arriba, y el criterio de ensamblaje para empotrarlos por medio de un sistema de anclaje en seco, autoría propia.

Diseño de panel modular prefabricado

*La arquitectura comienza con poner dos ladrillos juntos cuidadosamente.
Ludwig Mies van der Rohe.*

Capítulo IV



Capítulo IV. Diseño del panel modular prefabricado para muros de vivienda.

En el cuarto capítulo, se presenta el planteamiento descriptivo y diseño del panel modular, se retoman las condiciones del material, en cuanto a las posibilidades de producción y fabricación de los paneles, así como, las restricciones y limitantes que se presentan en el desarrollo de las piezas y componentes de anclaje.

El proceso de diseño que se describe en el presente capítulo busca generar un elemento modular, mismo que pueda ser instalado con un sistema constructivo en seco, como se describió en el capítulo II. El panel modular se implementa en un prototipo de vivienda de interés social por medio de anclajes y ensambles de los módulos, elementos complementarios de empotramiento, elementos de desplante y cerramiento, tanto, lateral como superior e inferior.

El objetivo es diseñar un elemento que cumpla con los requisitos y lineamientos indicados por norma y sujeto a criterios de materiales tradicionales, retomando características principales del sistema industrial de producción de plástico, pero también de materiales constructivos. A la par que se proponen soluciones a las problemáticas que comúnmente se presentan en la ejecución de sistemas constructivos de mampostería confinada.

El planteamiento general del proceso de diseño se describe en la figura 4.1 y consiste de inicio en plantear los parámetros a considerar, así como, la demanda del elemento constructivo. Posteriormente, se realiza la modulación y dimensionamiento del prototipo, descripción de los componentes y tipos de ensambles, para después aplicarlo en el caso de estudio planteado. Por último realizar la simulación digital con las condicionantes externas que interactúan con la edificación, con la finalidad de determinar el comportamiento del panel en la vivienda.

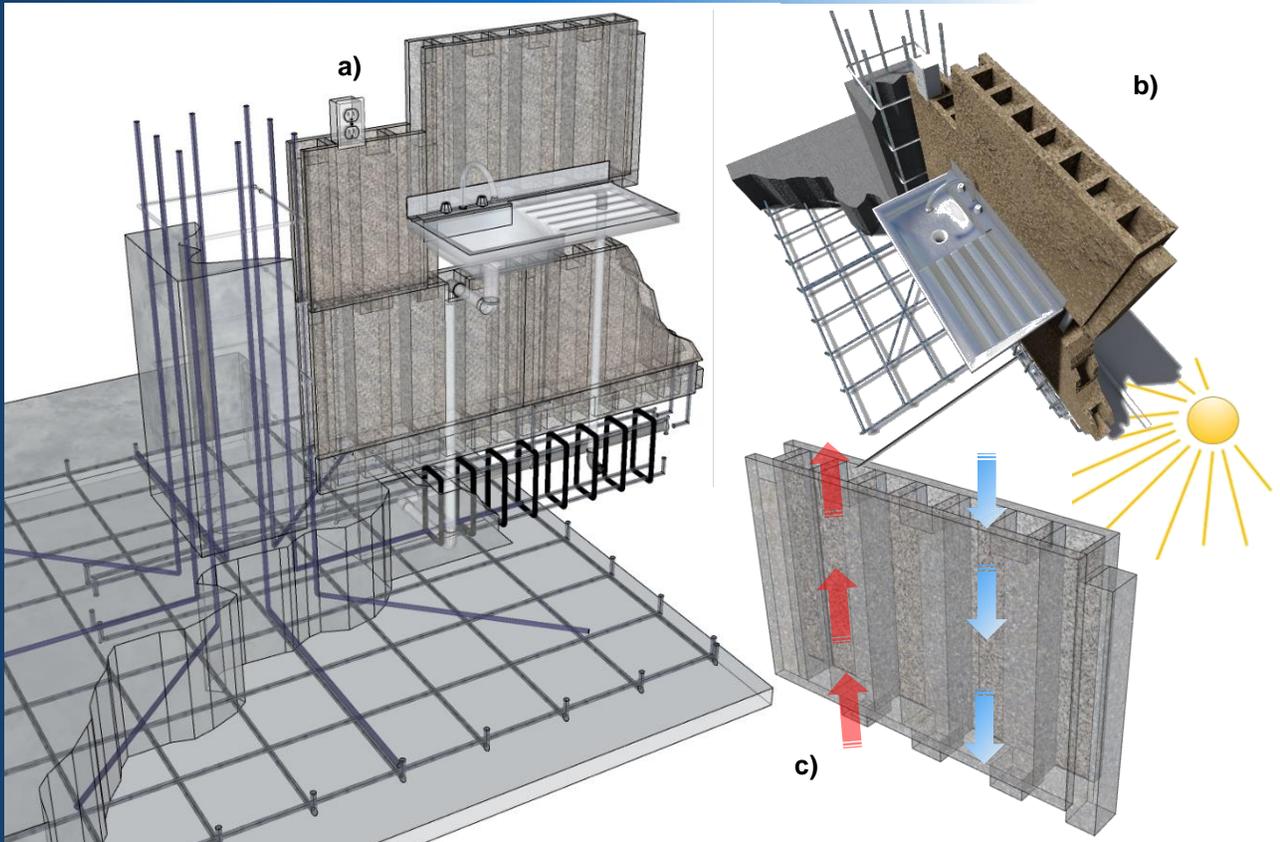


Figura 4.1 Planteamiento general del proceso de diseño del panel modular prefabricado.

4.1 Parámetros de diseño

El módulo base del panel prefabricado, debe cubrir las necesidades requeridas para su uso en muros, permitir el acoplamiento de los elementos, alojar instalaciones al interior de los alvéolos libres, por lo que debe tener la flexibilidad adecuada para poder determinar si el hueco sirve como negativo de anclaje, ducto de instalaciones o simplemente como cámara de aire al interior del muro, mismo que propicié regulación termo-acústica al interior de la vivienda.

Figura 4.2 Parámetros de diseño en panel modular



Nota: Representación de los parámetros de diseño considerados para el mejoramiento de las condiciones de construcción, habilitado y mejora de la vivienda por medio de los paneles en muro.

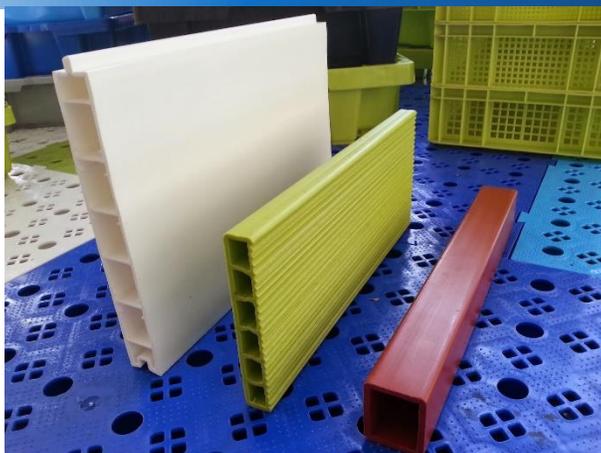
- Se consideran alvéolos para alojar instalaciones eléctricas, hidráulicas, sanitarias y pluviales, con la finalidad de evitar demoliciones de los elementos estructurales.
- El método de anclaje se apegará al sistema de empalme o espiga en sentido vertical y machihembrado de manera lateral.
- Los huecos que no sirven para anclaje, fungen como cámaras de aire para poder regular o aislar la temperatura interna de la vivienda.

Elaboración propia.

De igual forma, es importante considerar que a pesar de plantearse la adaptación y despiece previo en el proyecto de la estructura, es importante tomar en cuenta la flexibilidad necesaria para ser adaptado en obra, , se pueden utilizar las mismas herramientas que en la madera y el diseño del panel puede adaptarse sin afectar el mecanismo de anclaje.

Es importante considerar las limitaciones que se derivan del proceso fabricación, el cual se realiza por medio de una extrusión lineal, lo que representa depender de la forma o plantilla del dado, este aspecto influye en el desarrollo de producción industrial de los elementos constructivos del material polímero-arcilla.

Fig. 4.3 Elementos de extrusión lineal en plásticos



Nota: Los perfiles y planchas de polietileno de alta densidad son piezas plásticas fabricadas por extrusión, con los que se trabaja en la carpintería de plástico para aportar múltiples soluciones a aquellos clientes que necesiten un producto resistente y duradero, obtenido de GISEVI Soluciones Integrales, <http://gisevi.blogspot.com/2014/01/ideas-y-soluciones-medida-los-perfiles.html>, 5 de enero de 2014.

En el proceso se utiliza un molde metálico, el cual se adapta a la salida de la extrusora, se inyecta el material al interior del molde hasta saturarlo y al ser llenado se somete a un proceso de enfriamiento por medio de agua fría, para posteriormente desmoldarse. El inconveniente es que es un proceso de producción manual y que lleva más tiempo realizarlo, pero es una alternativa más en la fabricación de los paneles o bloques, como se muestra en la figura 4.4.

Al ser un elemento constructivo que configura un espacio arquitectónico, presenta grandes retos en términos de comportamiento mecánico, es por ello, que las características del panel modular pretende apoyarse de la configuración lineal y

la anisotropía⁴⁷ de este material, que, posee refuerzos entre las celdas que permiten mejorar el comportamiento ante las cargas y esfuerzos a los que se ve expuesto.

Fig. 4.4 Proceso de extrusión por moldeo



Nota: En las imágenes se presenta un proceso de extrusión e inyección a un molde metálico el cual puede ser una alternativa para fabricar el panel modular debido a la masividad del elemento y a la cantidad de material que se requiere para la fabricación de las piezas, autoría propia.

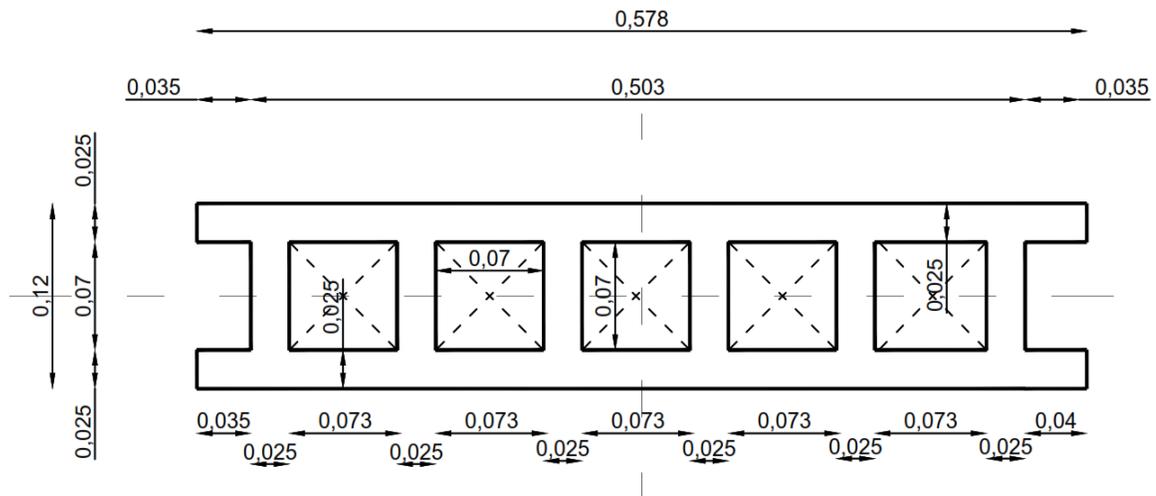
El uso del sistema de anclaje por medio de uniones de múltiple machihembrado, permite un movimiento libre con respecto de los propios de la estructura del edificio, ya que reduce el daño por fuerzas cortantes de movimientos sísmicos, viento o asentamientos producto del peso del edificio, así como, del mobiliario o de las cargas vivas.

4.1.1 Modulación y dimensiones

El planteamiento arquitectónico y las condiciones de habilitado, exigen condiciones de modulación y ensamble que faciliten el proceso de construcción, lo que nos lleva a considerar tres variables principales: funcionalidad, eficiencia y adaptabilidad. El módulo propuesto parte del análisis del sistema constructivo a utilizar, y las posibilidades que nos permite un sistema de extrusión lineal, para ello, se plantea definir una sección del perfil en eje "X" y "Y", considerando espacios en dos sentidos, para alojar instalaciones y para permitir el anclaje en sentido horizontal.

⁴⁷ En los polímeros plásticos, la anisotropía es la capacidad que puede tener una pieza moldeada o una parte extruida y/u orientada de tener un valor de una propiedad física a lo largo (eje Y) diferente del valor a lo ancho (eje X).

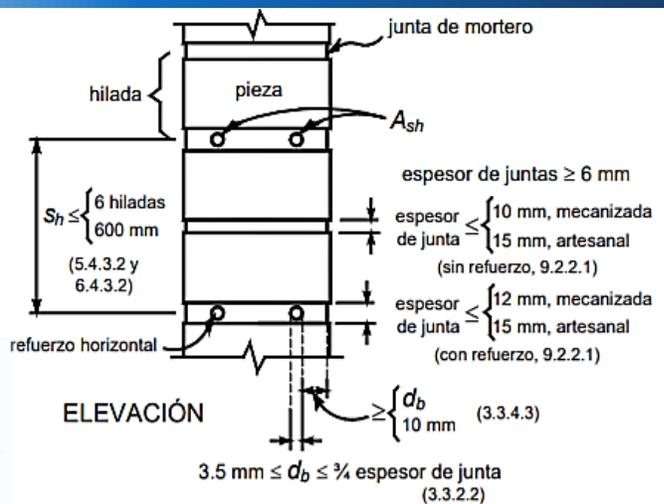
Fig. 4.5 Planta de panel modular, sección de perfil plástico



Nota: El gráfico representa las dimensiones propuestas para el panel modular, en planta, el perfil tiene dimensiones generales de 0.12m. x 0.60m., y vanos de 0.07m.x0.07m., las paredes tienen de sección 0.03m de espesor, autoría propia.

Las dimensiones que componen el panel modular se basan en espesores similares a los de piezas de mampostería tradicionales que se encuentran en el mercado, se propone un ancho de 0.12 m.⁴⁸, aunque en la extensión lateral se propone una dimensión de 0.58m. por facilidad de manejo y en cuanto a la altura de la pieza (eje Z), tiene la flexibilidad de variar en esta dimensión, pero para el prototipo de análisis se proponen 0.60m refiriendo a la dimensión en la que se colocan refuerzos horizontales⁴⁹, conforme se observa en la figura 4.6.

Fig. 4.6 Esquema de refuerzo horizontal en muro

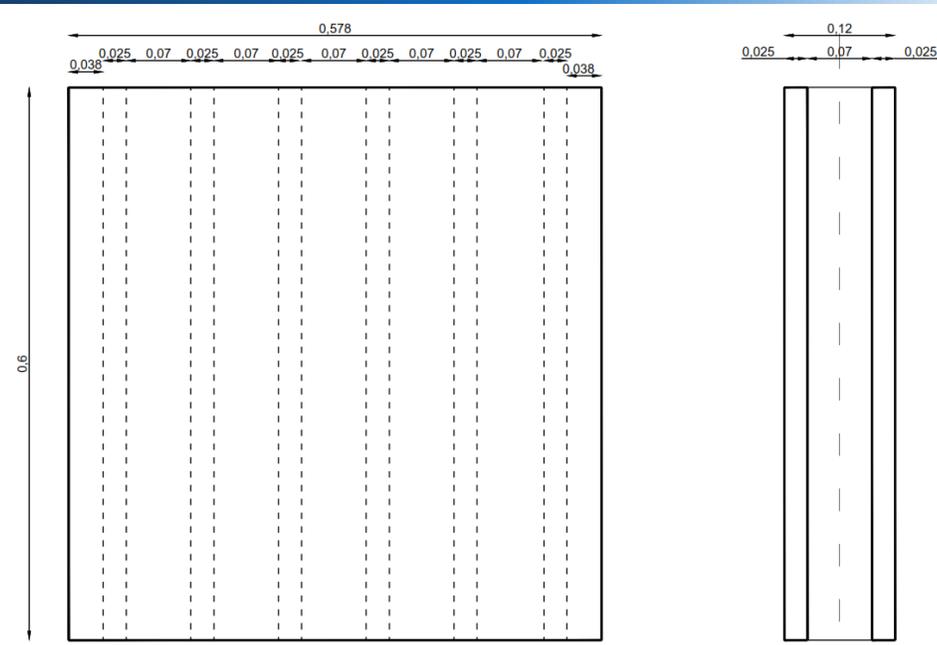


Nota: Esquema del refuerzo horizontal en muro con separación máxima de 600 mm. Obtenido de Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de mampostería, RCDF, 2019, p. 21.

⁴⁸ Sin ser restrictivo, ya que podrá variar entre 0.10m hasta 0.40m. en caso de ser requerido.

⁴⁹ Se deberá colocar un refuerzo horizontal en muros de mampostería a cada 6 hiladas en caso de tabiques, a cada 3 hiladas en caso de block o en caso de otras piezas a cada 0.60m.

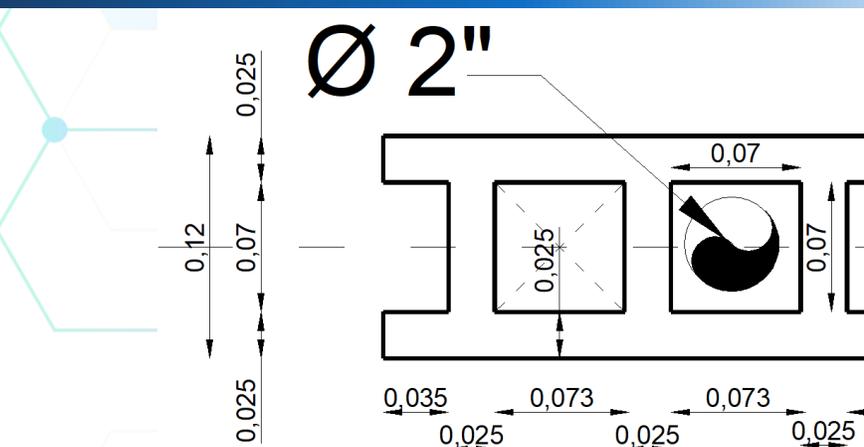
Fig. 4.7 Alzados de panel modular



Nota: El gráfico representa los alzados lateral y frontal de la propuesta para el panel modular, el perfil tiene dimensiones generales de 0.12m. x 0.68m. contando con los elementos de anclaje lateral, autoría propia.

La dimensión de los alvéolos se determina de 0.07m con la finalidad de poder alojar tuberías hidrosanitarias y eléctricas de una dimensión hasta de 2" (0.05m), además de mantener un espesor de pared de 1" con lo que se mantiene la estabilidad del elemento y a la par que disminuye la cantidad de material utilizada para configurar el panel. Dichos alvéolos tienen como finalidad servir como cavidad para el anclaje de polines de 0.07 x 0.07m los cuales estructuran el sistema y permiten dejar de lado sistemas húmedos con base en cementantes.

Fig. 4.8 Detalle de alojamiento de instalaciones

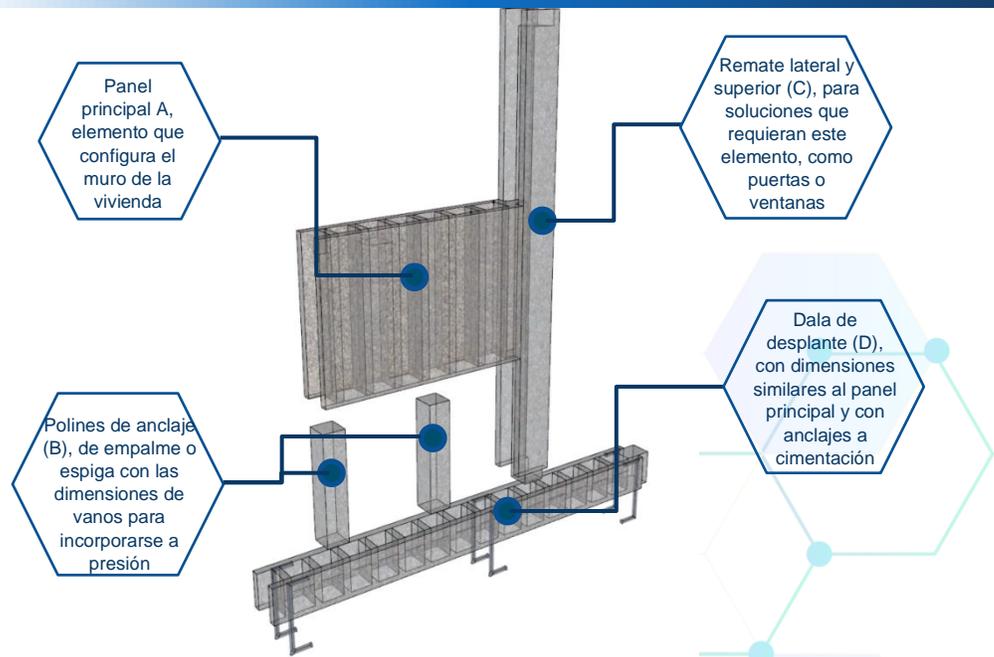


Nota: El gráfico indica el detalle en el que pueden ser alojadas las instalaciones dentro de los alvéolos del panel, con el objetivo de evitar demoliciones excesivas o ranuras en la estructura, autoría propia.

4.1.2 Componentes y ensambles

En el desarrollo del prototipo del panel modular, se planea el elemento principal (A) que se describe al inicio del presente capítulo, aunque para que la propuesta funciones es necesario implementar piezas adicionales que permiten anclar, ajustar, desplantar o rematar los muros, mismos, que pretenden cumplir con las características planteadas para el elemento A, las cuales se describen a continuación:

Fig. 4.9 Componentes del sistema constructivo del panel modular



Nota: Referente gráfico de los componentes del sistema del panel modular, se presenta el sistema de anclaje, desplante y remates con el componente principal (A), polines de anclaje (B), remate lateral y superior (C) y dala de desplante (D).

Con el objetivo de generar un sistema constructivo eficiente se propone un número reducido de elementos que den versatilidad y facilidad en su instalación, lo que evita el uso de mano de obra especializada. La visión integral de elementos con base en el material CPC⁵⁰ pueden configurar otros elementos como columnas, travesaños o cerramientos, siempre y cuando se realicen las pruebas requeridas por la norma.

En este caso se propone analizar su uso como muros confinados con estructura tradicional, este material puede ser adaptado a elementos de concreto o metal considerando las preparaciones en el mejor de los casos o realizar un anclaje por medio de platinas metálicas y tornillería.

⁵⁰ CPC se denomina al material polímero-arcilla por sus siglas en inglés Clay Polymer Composite.

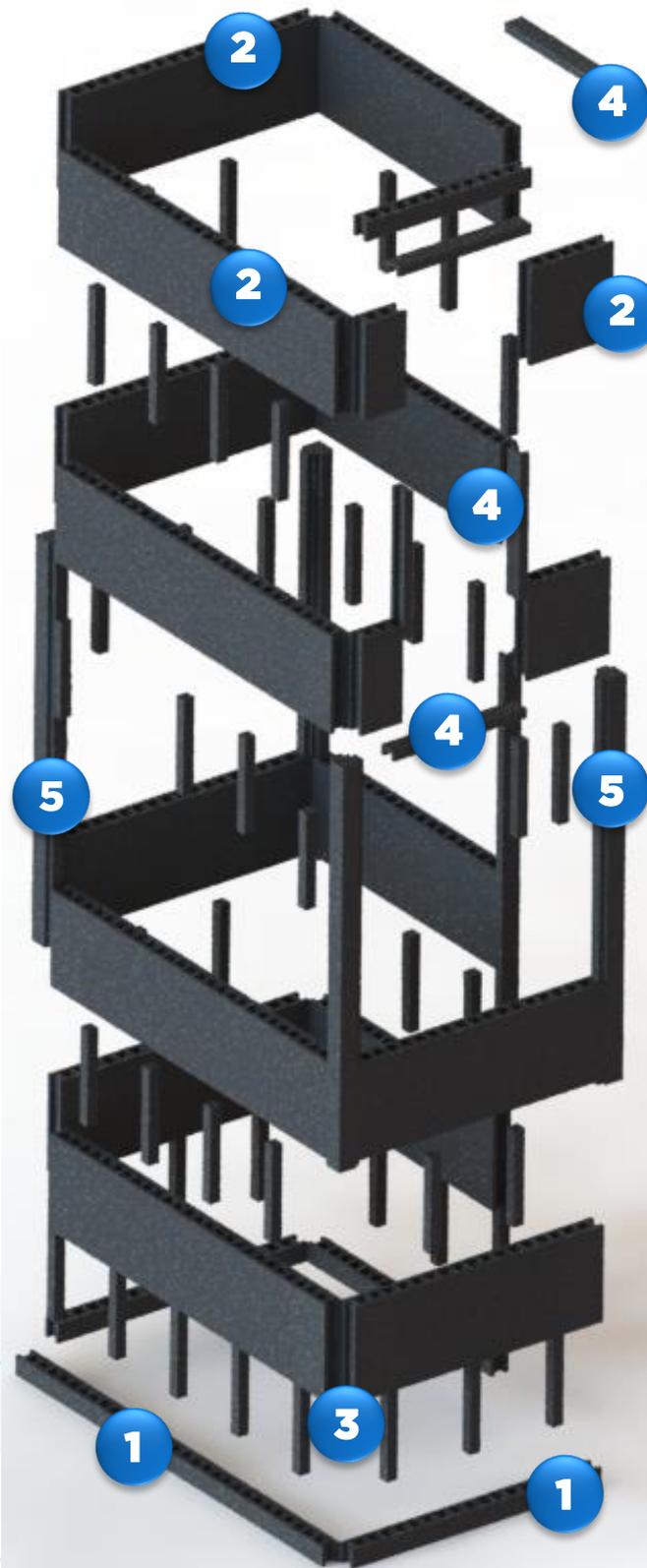
Fig. 4.10 Sistema de anclaje por medio de platinas metálicas y tornillería.



Nota: Se muestran ejemplos de anclajes por medio de platinas metálicas y tornillería para garantizar la sujeción de elementos plásticos. En caso de sismo los tornillos están diseñados para ceder y absorber los movimientos de la estructura, con este sistema no se evita el uso de algún agente adherente o cementante. Obtenido de Manual de Grupo Bloqueplas de México, (2022, p. 6).

1. **La dala de anclaje:** es un elemento lineal que sirve como desplante de los muros, lo que asegura trazar la trayectoria de estos y con ello evitar el desfase de castillos al momento de colar la losa de cimentación, este elemento cuenta con varillas co-extruidas, las cuales quedan ahogadas en el concreto.
2. **Panel principal:** el elemento base que configura el sistema consta de un panel que consta de dos paredes de 1" (0.025m) de espesor, con alvéolos internos de 0.07m e interconexiones del mismo espesor, estos paneles se montan para hacer coincidir los huecos en los que se ajusta el poste de anclaje para unir un elemento con otro.
3. **Polines de anclaje:** es un elemento lineal de 0.07 x 0.07 de sección y se plantea largo de 0.60m., el cual entra a presión en los alvéolos de los otros elementos (panel, dala y remates). Este elemento tiene la función de sujeción de los paneles modulares y complementa el sistema de anclaje entre dichos elementos.
4. **Remate lateral y superior:** este elemento es complementario en los casos que se requiera dar un cierre al muro, en el lugar donde exista alguna puerta, ventana o vano en general, dando fin a la continuidad de los alvéolos y manteniendo un elemento cerrado para recibir algún acabado, colocación de algún elemento o simplemente remate de muro.

Fig. 4.11 Despiece de una recámara con los componentes del sistema de anclaje



5. **Columnas o castillos:** estos elementos tienen la función de confinar, en el caso que se proponga este material para estructurar el confinamiento del muro. Se puede colocar en las intersecciones entre ejes y en las esquinas que se generan en la trayectoria de los muros. Estos elementos tienen las preparaciones necesarias para recibir al panel modular y cumple con la flexibilidad de ser adaptado a la altura requerida, ya que, como se comentaba en líneas anteriores la extrusión da la posibilidad de ajustar la extensión del perfil a la dimensión que se necesite.

Este sistema tiene como objetivo aportar eficiencia a la instalación debido a que no requiere de un sistema húmedo como en los sistemas constructivos tradicionales, además de asemejar un sistema de ensamble similar al tipo lego, pero tiene una peculiaridad al tener la flexibilidad de ajustarse en obra e integrarse a un sistema mixto de estructura de concreto o acero.

Como se presentó en capítulos anteriores la propuesta del panel modular busca generar una propuesta que cubra las necesidades del usuario, pero también del constructor y del diseñador, planteando soluciones específicas a problemáticas repetitivas en la ejecución de la construcción de las edificaciones, en este proceso no es viable para el presente proyecto construir una vivienda con este sistema, por lo que se opta por generar

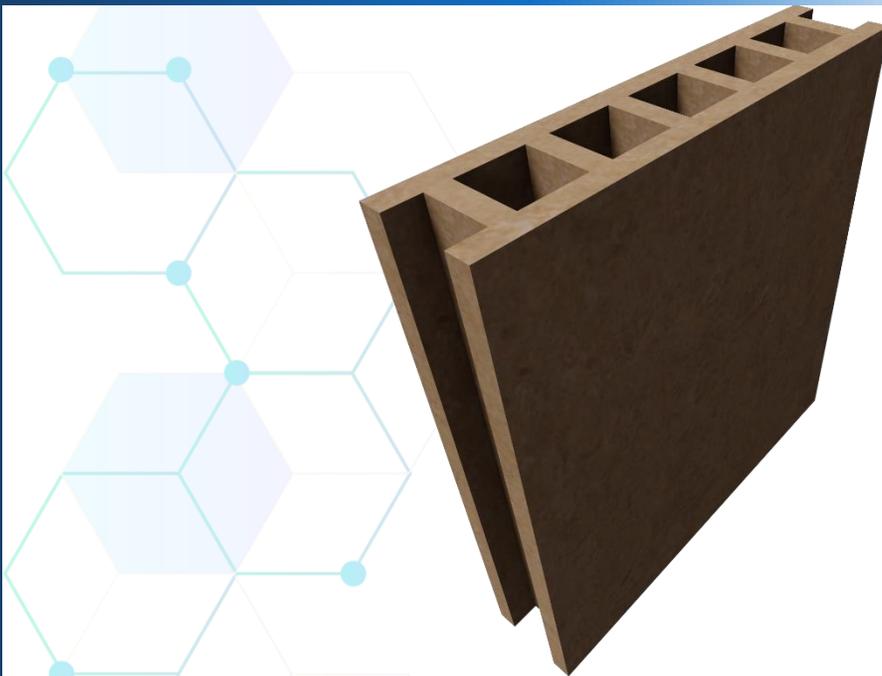
Nota: Se muestra un despiece de los elementos que integran la habitación, mismos que hacen referencia a cada uno de los componentes que integra el sistema constructivo en seco y la propuesta de ensamble, se indican con número los componentes, 1. Dala de anclaje, 2. Panel principal, 3. Polines de anclaje, 4. Remate lateral y superior y 5. Columnas o castillos, autoría propia.

simulaciones en el programa SolidWorks, con la finalidad de analizar el comportamiento mecánico y térmico tanto de manera individual como en el conjunto de sus componentes.

4.2 Simulación digital de comportamiento

Con los parámetros de diseño y dimensiones del panel modular se realiza el modelado, con la finalidad de utilizar herramientas digitales de simulación. Los parámetros establecidos en cuanto a características del material son los correspondientes al polietileno de alta densidad y las condiciones a las que se expone dicha simulación se retoman de la normatividad para elementos de mampostería, como lo indica el Reglamento de Construcción del Distrito Federal para materiales nuevos.

Fig. 4.12 Modelo de panel modular para simulación



Nota: El modelo se realizó en el programa Sketchup y el renderizado en Lumion, para generar un render con la apariencia del material polímero-arcilla, autoría propia.

4.2.1 Comportamiento mecánico

El RCDF⁵¹ en el capítulo III, de los materiales y procedimientos de construcción, en su artículo 200, inciso II. Indica:

Quando se proyecte utilizar en una construcción algún material nuevo del cual no existan Normas o Normas Oficiales Mexicanas o Normas Mexicanas, el Director

⁵¹ Siglas del Reglamento de construcción del Distrito Federal.

Responsable de Obra debe solicitar la aprobación previa de la Secretaría de Obras y Servicios para lo cual presentará los resultados de las pruebas de verificación de calidad de dicho material (Gobierno de la Ciudad de México, 2004, p. 106)

Es por ello, que se hace referencia a la Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012, Industria de la construcción – mampostería – bloques, tabiques o ladrillos y tabicones para uso estructural – especificaciones y métodos de ensayo, en la cual se apegan los rangos de resistencia que debe cumplir el material polimérico.

Tabla 4.1 Parámetros de resistencia a la compresión

Tipo de pieza	Configuración	Resistencia media \bar{f}_p MPa (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual f_{pMn} MPa (kg/cm ²)
Bloque	Macizo	15 (150)	12 (120)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)
Tabique (largo >300 mm)	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	9 (90)	7(70)
Tabique (largo <300 mm)	Macizo	11 (110)	7 (70)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)

Nota: En la tabla se presentan los elementos de mampostería tradicional con los valores de resistencia que deben cumplir según la norma, obtenido de ONNCCE Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, (2012, p. 9).

Esta tabla refleja los rangos de resistencia que deben cumplir las piezas del panel modular, por lo que, en la simulación del comportamiento mecánico para este elemento se considera una fuerza superior a los 15 MPa⁵², conforme a la bajada de cargas del prototipo de vivienda como caso de estudio arroja una w⁵³ total de 60 toneladas, mismo que se incluye como carga aplicada al panel modular.

El criterio de anclaje utilizado es estático con una carga en el plano de apoyo⁵⁴ (cara inferior del panel) para indicar que el elemento está colocado de manera vertical y que tiene este apoyo, la carga aplicada al panel se plantea en la cara superior⁵⁵ simulando el comportamiento de este elemento en condiciones de servicio de manera individual.

⁵² El MPa es 10⁶ pascales, lo que equivale a N/mm² (mega pascal) y un pascal es la unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades. Se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a la misma.

⁵³ La sigla w total se refiere a la suma de cargas (carga viva, carga muerta, carga de peso propio, cargas accidentales) que afectan a un elemento estructural.

⁵⁴ La fuerza que infringe en el panel por anclaje estático se muestra en la Figura 4.13 con flechas de color naranja.

⁵⁵ La fuerza aplicada de 60 ton. como carga total, se muestra en la Figura 4.13 con flechas en color morado.

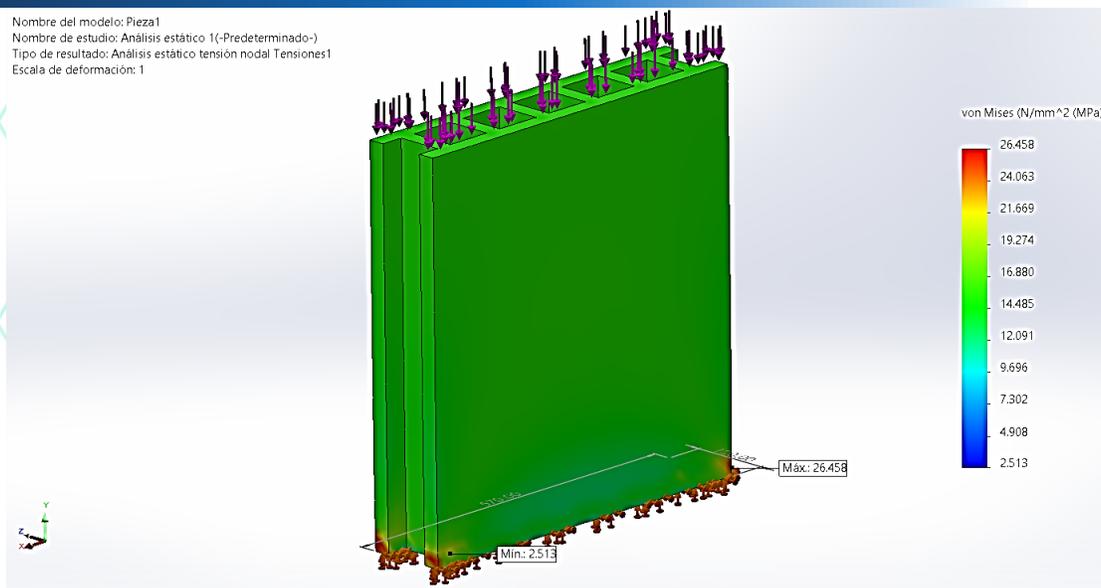
Tabla 4.2 Propiedades del material polimérico

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	1070	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.4101	N/D
Módulo cortante	377.2	N/mm ²
Densidad de masa	952	kg/m ³
Límite de tracción	22.1	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico		N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica	0.461	W/(m·K)
Calor específico	1796	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Nota: En la tabla se presentan las propiedades del polietileno de alta densidad, con las que se realizaron las simulaciones de comportamiento mecánico y térmico, autoría propia.

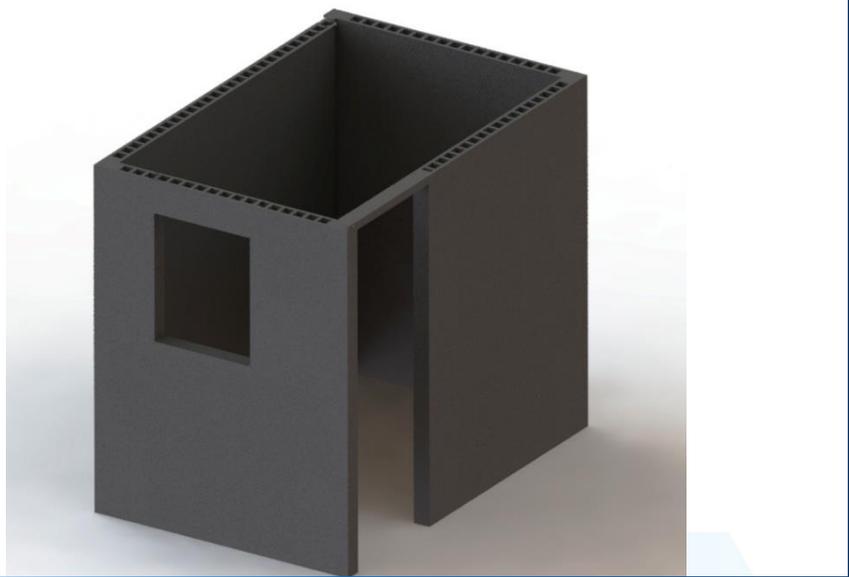
En relación a la figura 4.13 se presenta el comportamiento del panel expuesto a cargas verticales, con los colores se puede identificar el comportamiento del material, el cual es aceptable al tener un rango de resistencia de entre los 14 y 16 MPa (color verde) y presenta algunas zonas en color amarillo y rojo donde la resistencia sube hasta los 26 MPa, esto debido a que son las zonas de empotre con otro elemento, es por ello, que se realizó un esquema de acoplamiento de componentes, para hacer la revisión de comportamiento de sistema de anclaje y la interacción entre paneles.

Fig. 4.13 Simulación y análisis estático de panel



Nota: En el modelo se presentan las cargas en la parte superior y la fuerza de empuje ubicada en la cara inferior, la escala de la izquierda indica los rangos de resistencia aplicada al panel rondando en un rango de entre los 14 y 16 MPa, autoría propia.

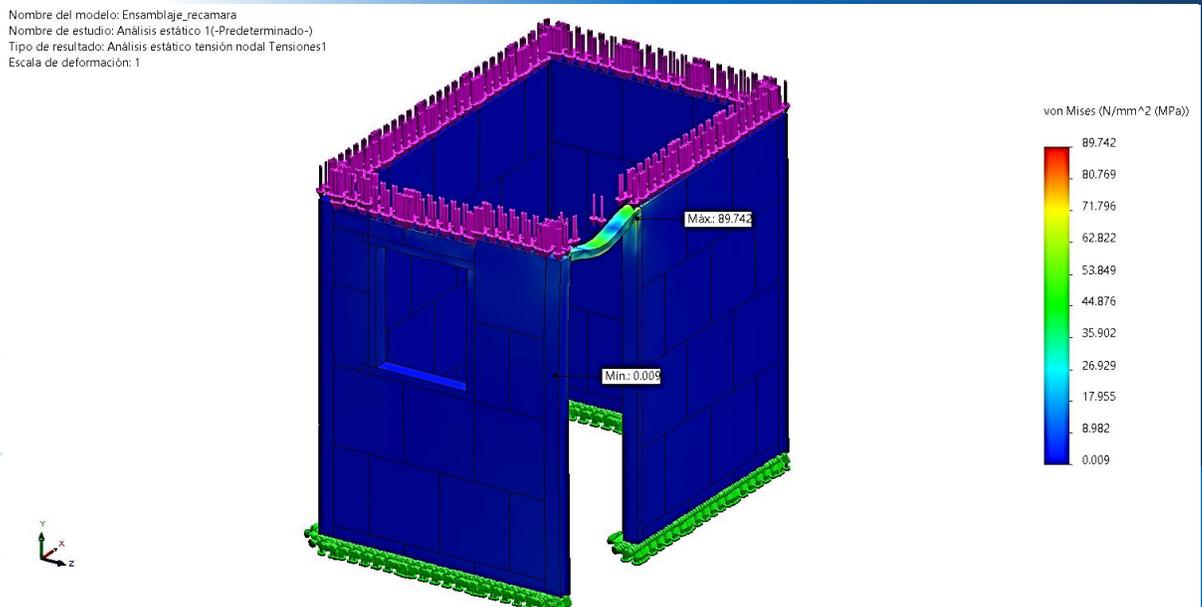
Fig. 4.14 Modelo de recámara basada en el sistema de panel modular para simulación



Nota: El modelo se realizó en el programa SolidWorks por medio de un sistema de ensambles con la unión de archivos por cada pieza para configurar una recámara que integran algunas variables posibles para el uso de vanos de puertas y ventanas, autoría propia.

Se mantienen los mismos parámetros en la aplicación de cargas y las características del material, el ensamble se constituye por las 5 diferentes piezas colocadas conforme a la propuesta de sistema constructivo, con lo que se obtienen los siguientes resultados:

Fig. 4.15 Simulación y análisis estático de recámara



Nota: En este modelo se presentan las cargas en los paneles superiores y la fuerza de empuje ubicada en las piezas de desplante, se puede observar una distribución de la carga aplicada a diferencia del panel aislado en este caso la escala de la izquierda indica los rangos de resistencia aplicada al panel rondando en un rango de los 8 MPa, autoría propia.

Estos rangos de cargas y tensiones aplicadas en los elementos que conforman la recámara, están relacionadas con las pruebas de laboratorio del material polimérico reforzado con arcilla, las propiedades obtenidas nos marcan el rango de validación de esta simulación. Esta prueba cumple con el análisis del comportamiento para las uniones y ensambles, cuando los elementos se ponen en condiciones de servicio y como interactúan unas con otras.

4.2.2 Comportamiento térmico

Una propiedad fundamental para el análisis de los materiales constructivos es el comportamiento térmico, ya que, de esta característica dependen las condiciones de temperatura al interior de los edificios a lo largo del día y en el transcurso de las estaciones del año. Es por ello, que se realizó un estudio para determinar la conductividad térmica (k) del material polimérico reforzado con arcilla, este coeficiente sirve para cuantificar la capacidad de transferir energía térmica (calor) que pasa entre dos puntos de calor por unidad de área (Franco et al., 2022, p. 2).

Para determinar el coeficiente de conductividad térmica del compuesto polímero arcilla se utilizó una cámara adiabática⁵⁶, elaborada con una estructura de aluminio y muros de poliestireno de 10cm de espesor, estos sirven como aislante térmico para garantizar que no existan pérdidas de temperatura. En una de sus caras cuenta con una ventana en la que se coloca la pieza a analizar, dicha probeta es de 29 x 29cm y se fabricó por medio de fundición en moldeo con el pellet resultado del proceso de extrusión descrito en el capítulo III.

Fig. 4.16 Proceso de fabricación de probeta térmica



Nota: Se muestra el proceso de fabricación de la probeta de 29 x 29 cm, por medio de fundición en horno a 200°C sobre molde metálico, autoría propia.

⁵⁶ Un proceso adiabático es un proceso termodinámico, en el que no hay transferencia de calor dentro o fuera del sistema. Una pared aislada se aproxima bastante a un límite adiabático.

Al interior de la cámara se coloca un foco incandescente como fuente de calor, en cada una de las paredes se colocaron sensores de temperatura (termopares), así como al interior de la cámara y al exterior con el objetivo de medir la temperatura ambiente y poder compararla con la temperatura al interior como se puede observar en la figura 4.17. Para la lectura de las temperaturas se utilizó un módulo de control de temperatura W1209 (Franco et al., 2022, p. 4).

Fig. 4.17 Proceso de prueba para determinar el coeficiente de conductividad térmica del material compuesto



Nota: Se muestra el proceso de prueba en la cámara adiabática para determinar el coeficiente de conductividad térmica del material compuesto, se realizaron mediciones tanto al interior como al exterior de la cámara para monitorear el comportamiento térmico en un promedio de 5 horas, autoría propia.

En este proceso se tuvo sumo cuidado para detectar alguna pérdida de calor o fuga en las uniones de las paredes de la cámara o en el perímetro de la pieza de polímero, se utilizó una cámara termográfica testo 875.

Fig. 4.18 Cámara termográfica Testo 875



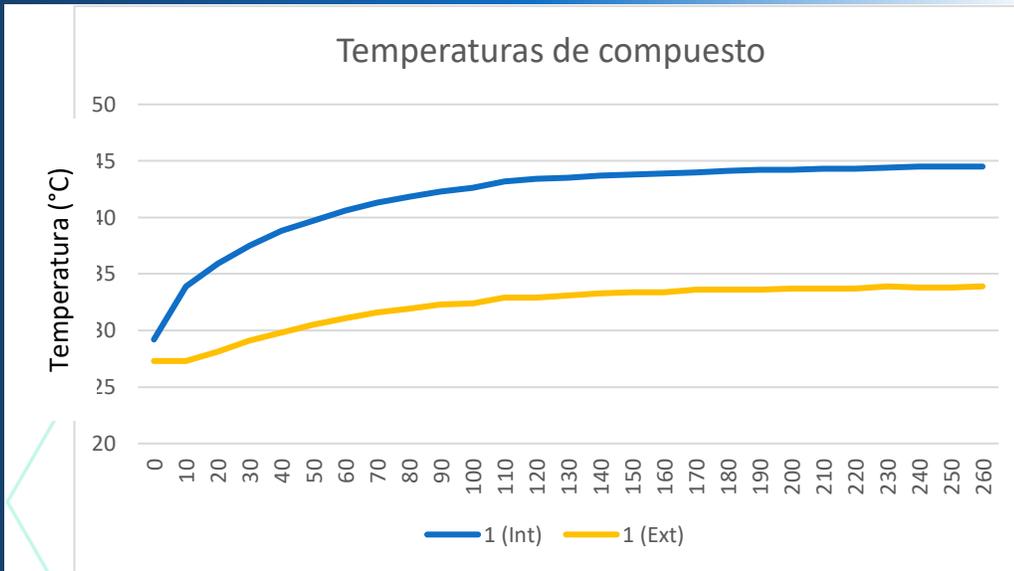
Características:

- Rango de temperatura: 400 a 3000°C
 - Diseño robusto que reduce el riesgo de daños (resiste prueba de caída de 1 m)
 - Opciones de mira de doble láser y mira telescópica
 - Tecnología de mira "Red Dot" para una visión precisa del objetivo contra fondos "al rojo vivo"
 - Detector de advertencia resistente al calor y alarma "Red Nose"
 - Óptica de alta resolución garantiza mediciones de temperatura precisas a distancias más largas
- Temperatura ambiente de operación: 0 a 50°C

Nota: Se muestra la imagen y características de la cámara termográfica con la que se mantuvo un constante monitoreo de fugas de calor y temperaturas en la cámara. Obtenido de Construcción de cámara adiabática para determinar resistencia térmica de cubiertas arquitectónicas, Franco et al., 2022, p. 5.

Se procedió a calibrar la cámara para realizar las pruebas del material compuesto, se obtuvieron los siguientes resultados de temperatura en un periodo de 260 min. Con el aumento de temperatura interior al generar calor por medio del foco se busca estabilizar ambas temperaturas para determinar el factor de conductividad térmica (k) del material, como se muestra en la siguiente gráfica (Figura 4.19).

Fig. 4.19 Gráfica de comportamiento térmico de cámara adiabática



Nota: En la gráfica se presentan las mediciones de las temperaturas interior y exterior de la cámara. Inicia en un rango de 25 a 30°C y se mantiene por debajo de los 45°C al interior y por debajo de los 35°C al exterior, autoría propia.

En cuanto se mantienen ambas temperaturas tanto interior como exterior; se llega a una estabilidad térmica, que, en este caso se obtuvo en un tiempo de 260 minutos los siguientes resultados:

Tabla 4.3 Lecturas de compuesto HDPE-arcilla

T _{int} (°C)	T _{ext} (°C)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Q (W)
44.5	33.8	128	0.0879	11.2512
44.5	33.8	128	0.0877	11.2510
44.5	33.9	128	0.0878	11.2511

Nota: En la tabla se expresan los datos obtenidos en el momento de la estabilidad térmica con lo que se determina el coeficiente de conductividad térmica, autoría propia.

Un aspecto que se considera la pérdida de calor en las paredes de la cámara, ya que, el material con el que se constituye tiene un valor de conductividad térmica de origen. Por lo que para determinar las pérdidas de cada pared se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_{Perd} = -k_{PE}A_{PE} \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Donde:

Q_{Perd} es el flujo de calor que se pierde a través de las paredes de la cámara.

k_{PE} es la conductividad térmica del poliestireno que es de 0.06 W/m K.

A_{PE} es el área de la pared de la cámara adiabática.

ΔT es la diferencia entre la temperatura de la pared y la temperatura dentro de la cámara.

Δx es el espesor de la pared de la cámara adiabática que es de 10cm.

Por lo que se obtienen los siguientes resultados en el cálculo de la pérdida de calor de las paredes:

Tabla 4.4 Pérdida de calor de poliestireno

P2 (W)	P3 (W)	P4 (W)	P5 (W)	P6 (W)
0.1481	0.0963	0.1740	0.1740	0.7368
0.1481	0.0926	0.1777	0.1777	0.7405
0.1444	0.0926	0.1703	0.1703	0.7368

Nota: En la tabla se expresan los datos obtenidos por la pérdida de calor de cada pared de la cámara, al sumarse se obtiene la cantidad de calor total que se cede la cámara en esta prueba, autoría propia.

Posteriormente, se calculó el flujo de valor útil a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = Q_{Util} + Q_{Perd}$$

Donde:

Q es el flujo de calor eléctrico (voltaje por intensidad de corriente)

Q_{Util} es el flujo de calor que el sistema utiliza.

Q_{Perd} es el flujo de calor que se pierde a través de las paredes de la cámara.

Y finalmente, se calcula el coeficiente térmico del compuesto de matriz polimérico y refuerzo de nanoarcillas con la siguiente ecuación:

$$k = - \frac{Q\Delta T}{A\Delta x}$$

Tabla 4.5 Coeficiente térmico del compuesto de matriz polimérica reforzado con nanoarcillas

Q (W)	Q _{perd} (W)	Q _{Util} (W)	K (W/mk)
9.9220	1.3292	8.5928	0.42415
9.9146	1.3366	8.5780	0.42980
9.9368	1.3144	8.6224	0.42415

Nota: En la tabla se expresan los datos obtenidos en el cálculo del flujo de calor útil menos la pérdida de calor y obteniendo el coeficiente de conductividad térmica del material, autoría propia.

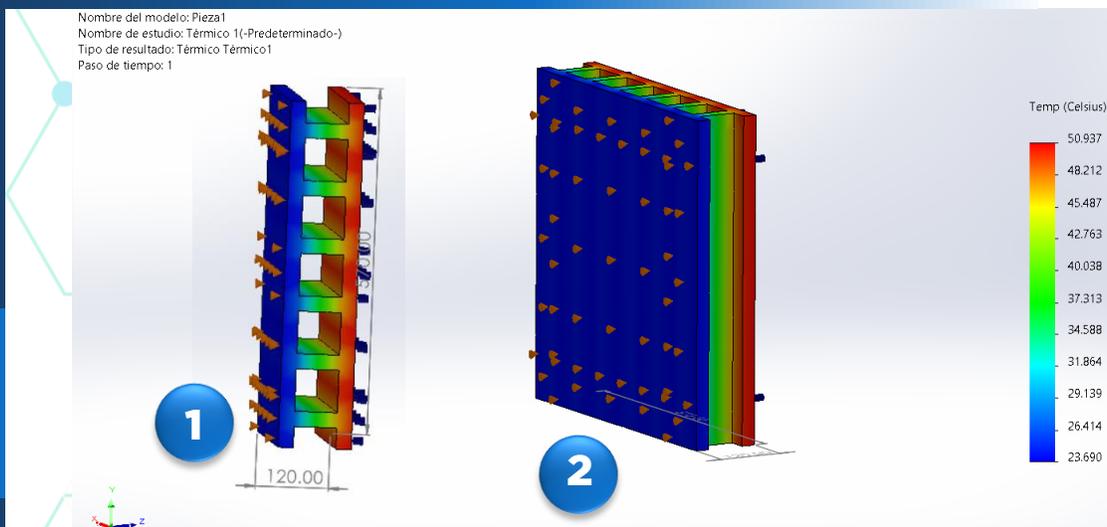
Como resultado de las pruebas realizadas se tiene un promedio del coeficiente de conductividad del compuesto polímero-arcilla de **0.428 W/mk**, lo que se encuentra en los rangos similares a lo que indican bibliografías sobre el polietileno de alta densidad es de 0.43 W/mk.

Un segundo análisis de comportamiento térmico por medio de simulación digital se realizó por medio de dos mecanismos de transferencia de calor. En primer lugar, se encuentra la convección que se define como:

El mecanismo de transferencia de calor en escala atómica a través de la materia por actividad molecular, por el choque de unas moléculas con otras, donde las partículas más energéticas le entregan energía a las menos energéticas, produciéndose un flujo de calor desde las temperaturas más altas a las más bajas. Los objetos malos conductores como el aire o los plásticos se llaman aislantes (Conesa, 2013, p. 2).

La exposición prolongada a la intemperie determina las propiedades que buscan tener los elementos que configuran la envolvente de los edificios, en este caso específico se analiza la radiación solar y su impacto al material polímero-arcilla, es por ello, que las propiedades de aislamiento del material son fundamentales para reducir el consumo energético en el uso de equipos de climatización, en la simulación se aplicó una temperatura directa superior a los 50° C.

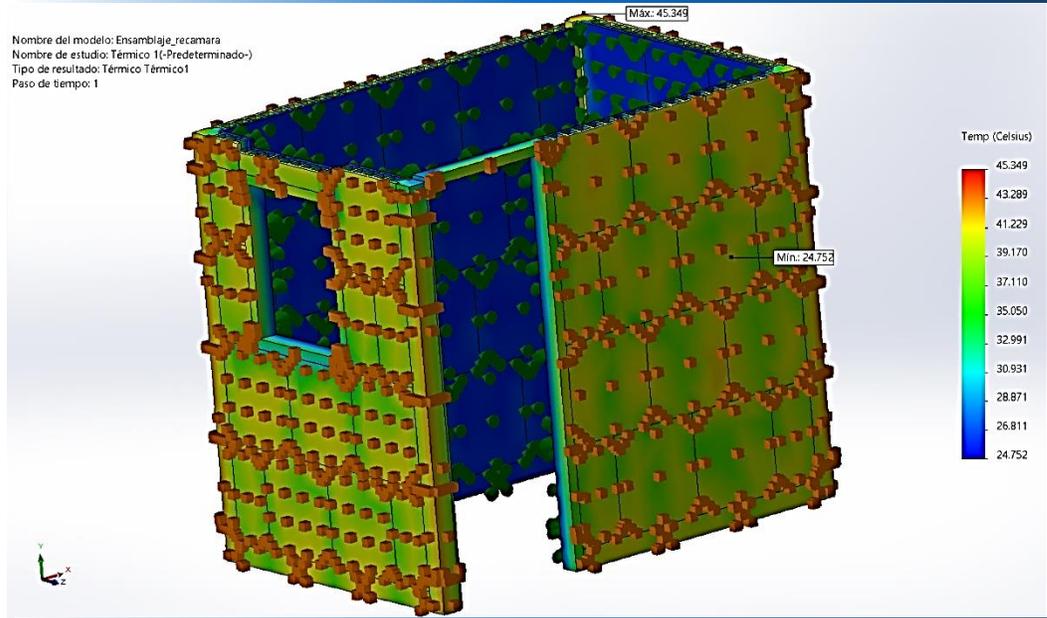
Fig. 4.20 Simulación y análisis térmico de panel



Nota: En este modelo se presenta el análisis del comportamiento térmico del panel modular, se evalúa la transferencia de calor y como actúa este elemento como aislante térmico, autoría propia.

Los resultados de simulación presentan una disminución paulatina de temperatura por medio del paso del calor por el panel, los canales que estructuran los alvéolos llegan a una temperatura en la pared interior entre los 23 y 26°C. De la misma forma que se analizó el comportamiento mecánico de una recámara, en el caso del análisis térmico se realizó con las mismas condiciones del panel.

Fig. 4.21 Simulación y análisis térmico de recámara



Nota: En este modelo se presenta el análisis del comportamiento térmico de la recámara, se puede observar la dispersión del calor en los paneles que conforman los muros y su transferencia de temperatura al interior del espacio, autoría propia.

4.2 Prototipo de vivienda, caso de estudio

Para realizar un análisis en la aplicación del panel modular en una vivienda de interés social, se plantea la aplicación y modulación en el prototipo Siena, mismo que cuenta con las siguientes características:

- **Prototipo de vivienda Siena**
- Área construcción (vivienda progresiva): 83.98 m²

Espacios de la vivienda

- Planta Baja: sala, comedor, cocina, alacena, patio de servicio, ½ baño, estacionamiento 1 auto, jardín, cubo de escaleras.
- Planta Alta: recámara 1, recámara 2, recámara 3, vestíbulo, baño 1, cubo de escaleras.

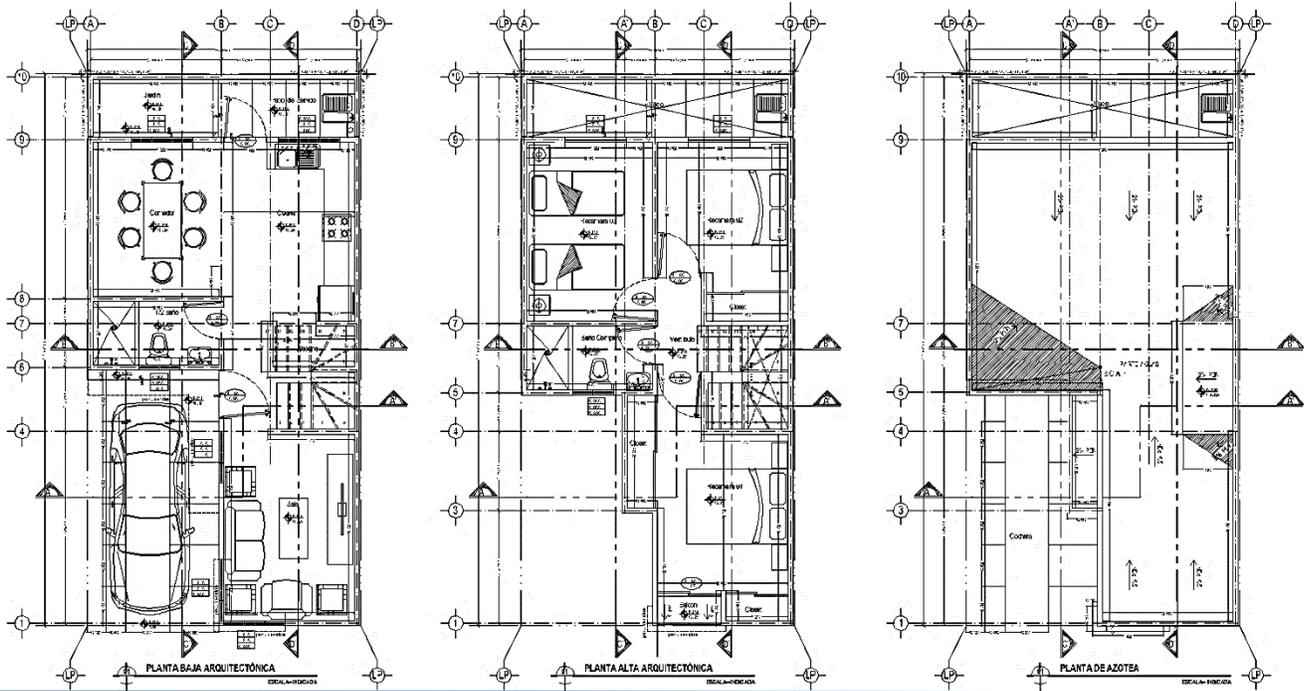


Fig. 4.22 Render de prototipo Siena

- Lote tipo: 11.00 m x 5.45 m

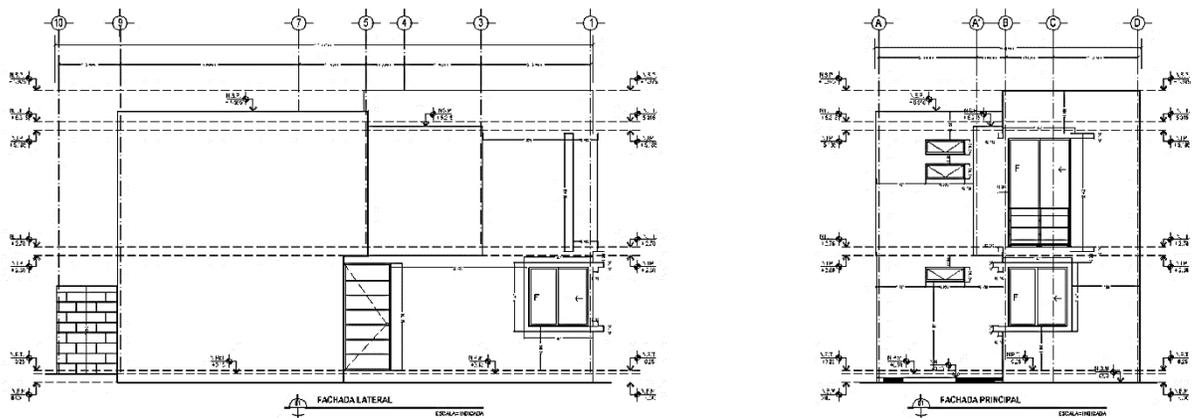
A continuación, se presentan las plantas y alzados del prototipo de referencia con el que se evalúan rendimientos y cantidades de material requerido en esta vivienda⁵⁷.

Fig. 4.23 Proyecto arquitectónico prototipo - plantas



Nota: La vivienda cuenta con 2 niveles, mismos que se presentan las plantas arquitectónicas y la planta de azoteas del prototipo de vivienda, la cual es motivo de análisis como caso de estudio.

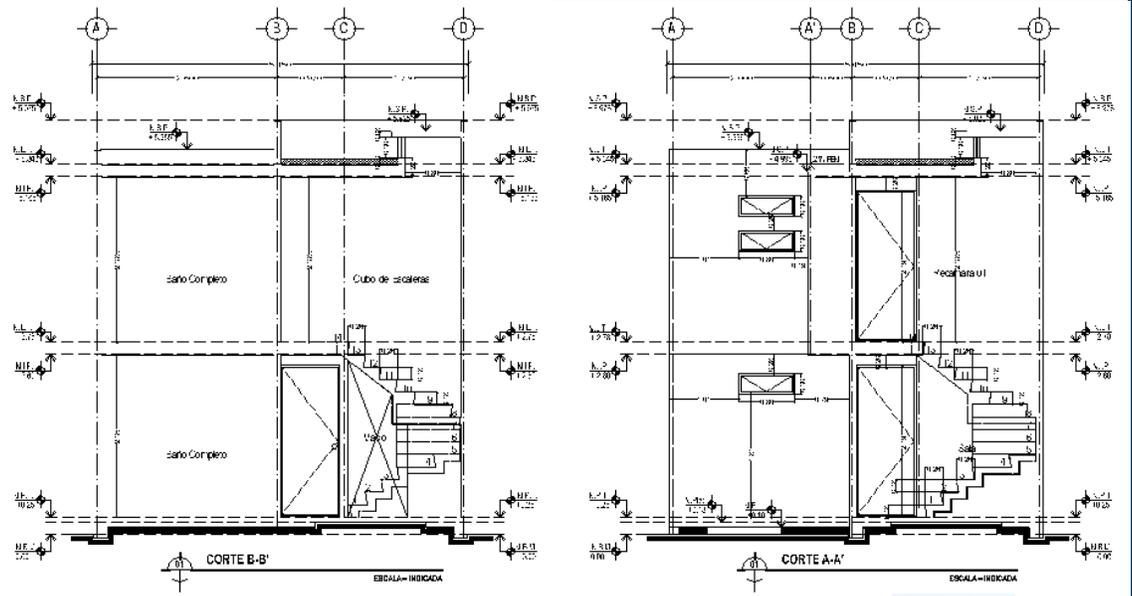
Fig. 4.24 Proyecto arquitectónico prototipo Sienna - fachadas



Nota: Se presentan los alzados de fachada principal (derecha) y la fachada lateral (izquierda) del prototipo de vivienda, la cual es motivo de análisis como caso de estudio.

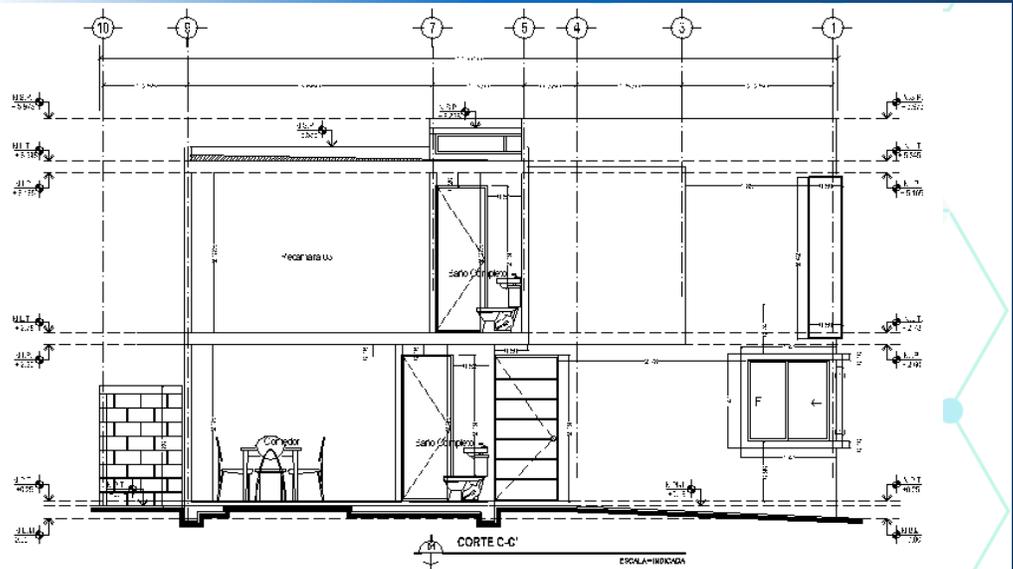
⁵⁷ Ver planos con mayor calidad en Anexos.

Fig. 4.25 Proyecto arquitectónico prototipo – cortes A y B



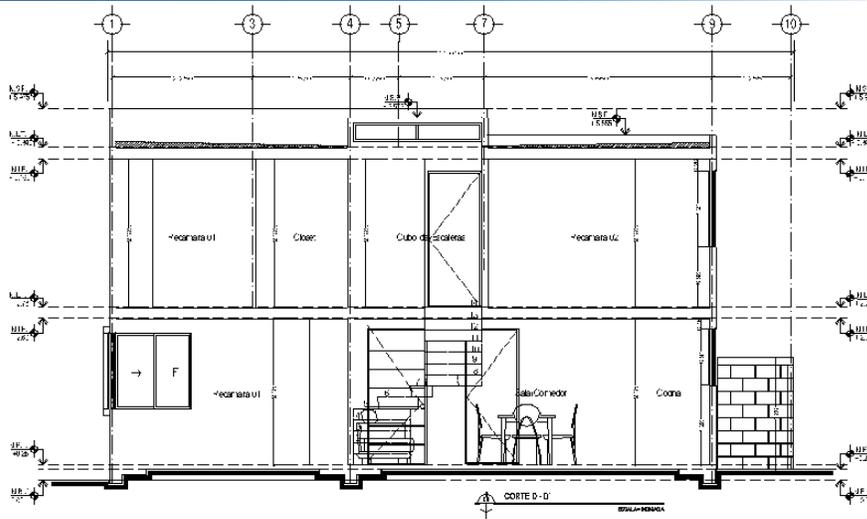
Nota: Se presentan los alzados de corte A-A' (derecha) y corte B-B' (izquierda) del prototipo de vivienda Sienna, la cual es motivo de análisis como caso de estudio.

Fig. 4.26 Proyecto arquitectónico prototipo – corte C



Nota: Se presenta el alzado del corte C-C' del prototipo de vivienda, la cual es motivo de análisis como caso de estudio.

Fig. 4.27 Proyecto arquitectónico prototipo – corte D



Nota: Se presenta el alzado del corte D-D' del prototipo de vivienda, la cual es motivo de análisis como caso de estudio.

4.3.1 Rendimiento y habilitado del material

El rendimiento de un material se considera como la cantidad necesaria para desempeñar una tarea o actividad, incluyendo los desperdicios. Existen diversos factores que inciden en variaciones del rendimiento del material, entre los principales se encuentran: la calidad de los materiales, controles de producción, perfil de la mano de obra, condiciones del ambiente, sistema de producción, organización del proyecto, tecnología, entre otros.

En el caso de materiales constructivos, en específico materiales que estructuran los muros de los edificios, es posible enfocarnos en los principales referentes de procesos constructivos tradicionales como el tabique rojo recocido, block gris hueco o tabicón de cemento.

El rendimiento del material incide directamente el rendimiento de la mano de obra y herramienta necesaria para ejecutar los trabajos correspondientes para la construcción de los muros en las edificaciones, por tal motivo, es fundamental obtener el parámetro de piezas por metro cuadrado que se obtiene conforme a las dimensiones de cada elemento y en el caso de materiales que requieren cementantes en la junta entre una pieza y otra.

En el caso de la propuesta, motivo de la presente investigación, no se requiere de materiales cementantes, ya que el sistema que se utiliza son ensamblajes y empotes laterales, configurados en los elementos descritos en las líneas de arriba.

Tabla 4.6 Comparativa de rendimiento de materiales para muros

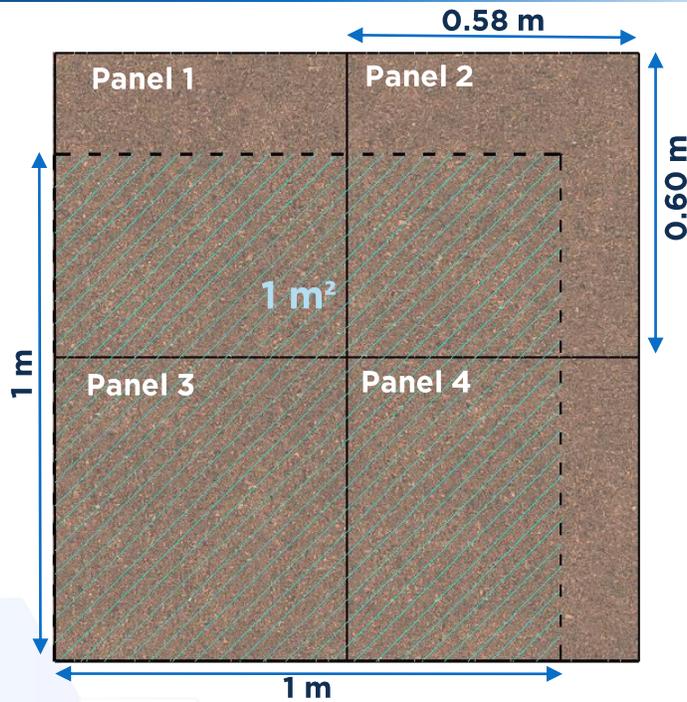
	Pieza	Espesor (cm)	Piezas (Pza./m ²) Espesor de junta (cm)		
			1.00	1.50	2.00
Tabique	Tabique de barro rojo recocido 7X14X28 cm	14	54	50	47
	Tabique de barro rojo recocido 6X12X24 cm	12	72	66	61
Tabicón	Tabicón de concreto 10X14X28	14	35	33	31
	Tabicón de concreto 11X14X28	14	32	30	29
Block	Block hueco 12X20X40	12	13	13	12
	Block sólido 12X20X40	12	21	20	19
Panel nano plast	Panel modular 12x60x58	12		2.88	

Nota: Se muestran los datos de rendimiento de materiales tradicionales en comparativa con el panel modular, en donde se observa un panorama viable en el uso de mayores dimensiones para los elementos constructivos, datos obtenidos del precio unitario, <https://elpreciounitario.com/wp-content/uploads/2017/11/CANTIDAD-DE-MATERIALES-MURO.pdf>, Consulta mayo 2022.

Mientras que con algunos materiales tradicionales de mampostería se requiere una gran cantidad de piezas para configurar 1m² de muro, con el panel modular se requieren menos de tres piezas, lo que determina en gran medida la eficiencia en el habilitado de los muros y la reducción de uniones o aditivos para unirlos.

Con la posibilidad de eliminar el uso de cementantes se ve beneficiado el proceso y al comportamiento mecánico del elemento, se reduce el costo y el tiempo de fraguado, lo que permite levantar un muro completo en la misma jornada. Otro aspecto es el comportamiento ante asentamientos o cargas accidentales como sismos o viento, ya que al no estar sujeta de manera fija, las juntas pueden absorber estos movimientos evitando la ruptura de las piezas y la generación de fisuras en el material.

Fig. 4.28 Rendimiento del panel modular



Nota: El esquema representa el cálculo de piezas necesarias para cubrir un metro cuadrado de muro, se requieren 2.88 paneles por m², autoría propia.

En cuanto al habilitado o instalación de los paneles, se busca optar por un proceso sencillo sin necesidad de herramientas especiales ni mano de obra especializada, es decir, que puede ser instalada por el mismo usuario. La herramienta necesaria es un martillo de goma simplemente para encausar los polines de anclaje dentro de los alvéolos y de esta forma poder incrustar los paneles.

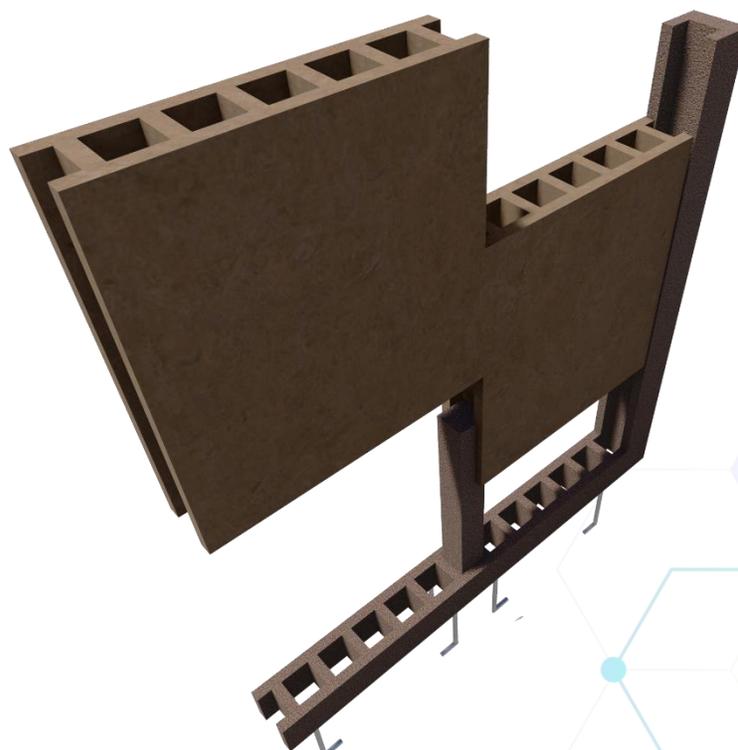
Para obtener mejores resultados en obra, es importante modular los proyectos con el objetivo de contar con las piezas y ajustes necesarios para cubrir en su totalidad el área de muro requerido. Se despiezará cada panel con los ajustes y mitades necesarias con la posibilidad de realizar ajustes y cortes con herramientas utilizados en elementos de madera.

El tipo de cimentación que se utilice dependerá de cada proyecto, aunque el diseño de la dala de desplante va sujeta por medio de varillas adosadas al material polimérico, las cuales quedan ahogadas a la losa de cimentación, zapatas o firme de concreto, lo cual contribuye al correcto trazado de los ejes de los muros cuidando el correcto trazo y nivelación de los elementos.

Posteriormente se deberán hincar los polines de anclaje en los que se acoplan los paneles modulares, dichos polines entran a presión en los alvéolos y los extremos

del panel tornando un acomodo de tresbolillo⁵⁸, similar al de los elementos de mampostería, con la finalidad de distribuir la carga por todo el elemento y así evitar generar puntos de fractura en el muro.

Fig. 4.29 Esquema de habilitado de componentes



Nota: En el esquema se presentan los componentes del sistema de panel modular, el proceso de habilitado se realiza de manera vertical al distribuir de abajo hacia arriba cada uno de los elementos que configuran la estructura del muro, autoría propia.

4.4 Tiempo y costo de construcción

El tiempo y el costo de una edificación son fundamentales para que pueda ser un producto eficiente y sostenible en términos de negocio, pero también para garantizar un desarrollo de viviendas con un menor impacto ambiental al disminuir el uso de recursos como el agua, energía, la reducción de desperdicios y residuos en el proceso de construcción. Un material prefabricado supera los parámetros en comparación de los sistemas tradicionales.

Debido a que se omiten procesos húmedos, es decir, que requieren de tiempos prolongados de fraguado, mejora en gran medida los tiempos de habilitado, además de que se generan piezas de mayor tamaño, también contribuye a bajar los costos de traslado de material y de mano de obra.

⁵⁸ A tresbolillo, es un sistema de distribución en que cada elemento forma un triángulo equilátero que, permite una distribución de cargas equitativas evitando focalizar a un solo punto la bajada de cargas.

Es por ello que se realiza un análisis de los parámetros en cuanto a tiempos y precio del mercado, basado en el caso de estudio y prototipos de vivienda en serie.

Tabla 4.7 Comparativa de tiempo y costo de construcción de vivienda en serie

<i>Prototipo</i>	Tipo de construcción	Área const. (m ²)	Precio (\$xm ²)	Costo total (\$)	Tiempo de const.
 <p><i>Sienna 1 nivel</i></p>	- Estructura de concreto -Muros de mampostería -Los de vigueta y bovedilla	41.80	\$ 8,481.11	\$354,510.40	90 días
	-Estructura de concreto -Muros de panel nanocompuesto polimérico -Los de vigueta y bovedilla		\$ 7,200.00	\$300,960.00	60 días
	-Estructura de nanocompuesto polimérico -Muros de nanocompuesto -Los de vigueta y bovedilla		\$ 6,500.00	\$271,700.00	12 días
 <p><i>Sienna 2 niveles</i></p>	-Estructura de concreto -Muros de mampostería -Los de vigueta y bovedilla	83.98	\$ 8,481.11	\$712,243.62	135 días
	-Estructura de concreto -Muros de panel nanocompuesto polimérico -Los de vigueta y bovedilla		\$ 7,200.00	\$604,656.00	90 días
	-Estructura de nanocompuesto polimérico -Muros de nanocompuesto -Los de vigueta y bovedilla		\$ 6,500.00	\$545,870.00	32 días

Nota: En la tabla se presenta una comparativa de 3 sistemas constructivos distintos con el objetivo de enfatizar las condiciones de mejora en los procesos de edificación al utilizar elementos prefabricados con base en el material plástico reciclado.

Los precios presentados en la presente tabla se obtuvieron de manera paramétrica en relación al precio actual de los materiales, por lo que es importante mencionar que son precios directos de producción de vivienda en serie, así como los tiempos están basados en parámetros de desarrollos de vivienda de interés social, autoría propia.

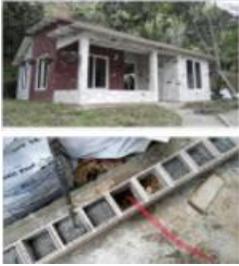
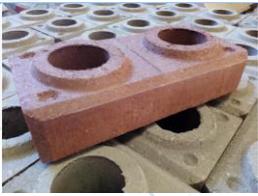
4.5 Características del panel modular

Las características y propiedades de los materiales son un punto determinante en la elección de los sistemas constructivos, ya que establece las condiciones del manejo, producción, habilitado, apariencia, mantenimiento y vida útil de los elementos arquitectónicos, es por ello que es determinante conocer y evaluar alternativas de materiales constructivos que se han estudiado e implementado en la industria de la construcción.

A continuación, se presenta una comparativa de materiales que integran el plástico en la construcción:

Tabla 4.8 Tabla comparativa de propuestas de bloques de plástico reciclado

Ubicación		Descripción		
País	Tipo de elemento	Características	Dim. / peso	Bibliografía
Italia		Ecomat, es un material de construcción producido por Ecomat Research, su diseño asemeja a una pieza de lego que se ensambla para formar un elemento constructivo.	16 x 25 x 33 cm 3.32 kg	https://renovables.wordpress.com/2012/09/19/casas-a-partir-de-ladrillos-de-plastico-tipo-lego/ , consulta 7 de marzo de 2021
Argentina		Ladrillos ecológicos realizado a la intemperie, utiliza materiales plásticos mezclados con cemento tipo "portland" como aglomerante, y un aditivo químico para mejora de la adherencia de las partículas del plástico	5.50 x 12.50 x 26.20 cm 1.40 kg	http://www.exporenovables.com.ar/2018/descargas/actas/asades-tema-1-165.pdf , consulta 7 de marzo de 2021
Argentina		Ladrillos de plástico reciclado de PP, un sistema con base en medios bloques que se unen para formar muros de la vivienda, consta también de piezas especiales para el paso de instalaciones y refuerzos.	15 x 30 x 15 cm Entre 0.90 y 1 kg	https://ecoinventos.com/easy-brick-ladrillos/ , consulta 7 de marzo de 2021
Colombia		Son bloques que se obtienen por medio de un proceso que derrite el plástico y se procesa por medio de moldeo. Se añaden aditivos para	50 x 7 x 13 cm 5 kg	http://bloqueplas.com.mx , consulta 7 de marzo de 2021

		hacerlos resistentes al fuego, la empresa bloqueplas enseña a los clientes a construir con este material, ya que no requiere mano de obra especializada.		
Colombia		Son bloques huecos, lo que repercute en sus buenas propiedades aislantes térmicas y acústicas, aunque pueden rellenarse con estructuras metálicas, poliuretano o arena. Cuenta con retardantes de llama y puede recibir cualquier acabado, como estuco o repellado de mortero.	10 x 10 x 20 cm	http://www.ecohomece ll.com/Galeria.html , consulta 7 de marzo de 2021
México		Es un ecoladrillo compuesto por un 80% de arena (reciclada) y un 20% de plástico reciclado. Son ladrillos que pueden ser ensamblados como piezas tipo lego, estos ladrillos son calentados a 200 °C	30 x 15 x 8 cm	https://rte.mx/ladrillos-de-plastico-reciclado-en-mexico , consulta 7 de marzo de 2021
México		Es un panel modular hecho con un nanocompuesto de matriz polimérica y refuerzo de arcilla, con lo que mejora las propiedades mecánicas del material reciclado de polietileno de alta densidad para uso estructural en viviendas.	60 x 58 x 12 cm 3 kg	Autoría propia

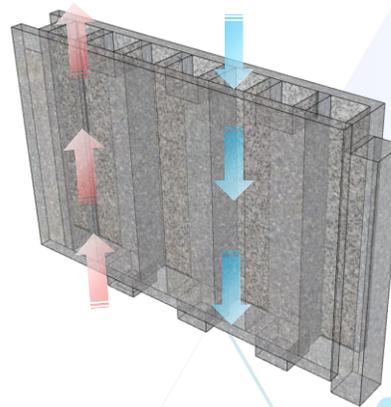
Nota: Se presenta la tabla con las características de elementos constructivos en los que integran plásticos reciclados en la construcción, estos materiales tienen como base entre otros PP, PET, PEAD. Retomado de Valderrama, P. et al. Detalles gráficos del sistema constructivo basado en bloques de plástico reciclado, 2020, p.13.

Por tal motivo, es importante mencionar algunas de las propiedades que destacan en el uso de materiales poliméricos en la industria de la construcción, enfatizando el uso de un elemento constructivo de muro como lo es el nano panel, que representa una propuesta viable para solucionar diversas necesidades en busca de una mejora en eficiencia contractiva y económica.

Las principales características de los polímeros son sus propiedades de aislamiento térmico, y su repelencia a gases tóxicos, aunque para la aplicación en construcción el tema de conductividad térmica es importante porque contribuye al confort, el polietileno de alta densidad tiene un coeficiente de conductividad térmica⁵⁹ (λ) que ronda entre los 0.43 W/mK, mientras que materiales como el ladrillo tiene un λ de entre 0.49 - 0.87 W/mK.

En cambio, el bloque de concreto ronda entre 0.35 – 0.79 W/mK lo que indica que el polietileno tiene mejor comportamiento como aislante que materiales tradicionales, aunque también depende de la configuración y espesor de los materiales. En el diseño del panel se colocaron alvéolos que cumplen con la función de túneles de aire aportando a la regulación entre la temperatura exterior con la interior.

Fig. 4.30 Esquema de regulación de temperatura del panel modular



Nota: En el esquema se presenta el planteamiento de la circulación de aire que se produce por medio de los alvéolos del panel. El aire caliente circula hacia arriba y el aire frío baja para refrescar los muros, autoría propia.

Una de las principales preocupaciones cuando se habla de polímeros es su resistencia al fuego, aunque otro de los beneficios de los plásticos, en este caso del polietileno de alta densidad, es que se pueden agregar aditivos o materiales que modifican el comportamiento del material para retardar el fuego en el nano panel se agrega a la fórmula carbonato de calcio⁶⁰, con la finalidad de proteger el material de algún siniestro de emisión de llama y con esto evitar dañar la estructura de la construcción.

⁵⁹ El coeficiente de conductividad térmica mide la capacidad que tiene un material de conducir el calor que se produce al transferir la energía cinética presente en las moléculas que forman este material a otras adyacentes.

⁶⁰ El carbonato de calcio es capaz de formar una barrera física que limita, hasta cierto rango, el efecto de la llama, también es capaz de descomponer el calor.

Fig. 4.31 Prueba contra fuego de material plástico



Nota: En el gráfico se puede observar una prueba de fuego a 500° C sobre un material compuesto de polímeros utilizados para la construcción, a este material se le añadió carbonato de calcio como protección contra el fuego, obtenido de Grupo Bloqueplas de México, 2021, p. 10.

Otra de las características de este material es su duración, ya que, los polímeros como el polietileno tardan en degradarse 150 años, aunque algunos autores indican que, hasta 500 años. Para otras industrias que generan residuos de este material de manera acelerada esto resulta un problema grave, aunque para la construcción es una gran ventaja considerando que al final de su vida útil es posible reciclarse nuevamente.

Además de ser amigable con el medio ambiente, este material tiene la característica de ser muy fácil de limpiar y dar mantenimiento, no genera astillas ni plagas como es el caso de la madera, por ejemplo, además de que no requiere aditivos o pegamentos para su instalación lo que beneficia al proceso de instalación, incluso no requiere de mano de obra especializada, esta característica impacta de manera importante en el tiempo de construcción de los muros, ya que se puede reducir hasta en un 60% del tiempo que lleva en construir los muros de las viviendas.

Se pueden enumerar un gran número de ventajas en comparación con materiales que comúnmente se utilizan en la construcción de vivienda a nivel mundial, como son la madera, el concreto o estructuras de metal, se presentan en la siguiente tabla comparativa (tabla 4.32).

Cumple	No cumple	Tabla 4.32 Comparativa de las propiedades de materiales de construcción			
		Nano panel	Madera	Concreto	Metal
No requiere mantenimiento	Ahorro de tiempo y recursos económicos				
Durable y resistente a la intemperie	Incluso en condiciones meteorológicas extremas				
Resistente a la Humedad	Impermeable, no absorbe, resistente al agua marina				
Inmune a insectos, roedores y microorganismos	No requiere inmunización, no es atacado por animales				
Anticorrosivo	No requiere pintura				
A prueba de la putrefacción	No presenta lixiviación				
No propaga la llama	Debido a inhibidores, es completamente ignífugo				
Aislante térmico, acústico y eléctrico	Bajo coeficiente de conductividad térmica				
Resistente a impactos, tracción y flexión	Excelentes propiedades mecánicas y resistencia al impacto				
Instalable	No se astilla y no se parte con facilidad				
Facilidad de acabados	Recibe pañete, pintura y enchapes				
Facilidad de maquinado	Cortar, taladrar, clavar, perforar con puntilla o tornillos				
Fácil y rápida instalación	No requiere mano de obra especializada				
Fácil limpieza	Bajo mantenimiento				
Ecológico	95% Materiales reciclados				

Nota: En la tabla se enlistan propiedades de materiales que se enfocan en la mejora de procesos constructivos y espacios habitables, por lo que se realiza una comparativa del compuesto polimérico con la madera, concreto y metal, recuperado de Grupo Bloqueplas de México, 2021, pp. 4-5.

4.5.1 Aplicaciones en la vivienda

El uso de materiales alternativos en la vivienda es cada vez más recurrente debido a la versatilidad de sus propiedades, mismas abren un sinfín de posibilidades para solucionar espacios arquitectónicos. La presente investigación no solo se enfoca a la integración de plásticos reciclados en un elemento estructural, también pretende enfocar a nuevas posibilidades de aplicación de nanocompuestos a la vivienda.

El hecho de que los materiales tradicionales aumentan su precio y se dirigen a una tendencia que continua a la alza, abre un panorama de indagar nuevos modelos de fabricación y uso de materiales con características diversas. En el caso de los plásticos se han enfocado a la sustitución del vidrio, papel o la madera, desencadenando grandes ventajas en cuanto a su durabilidad y posibilidad de reutilizarse.

Los plásticos han estado presentes en muchas de las actividades cotidianas y las posibilidades en su aplicación como un material que se vuelve motor de una economía circular potencial, representa un reto en cuanto a la investigación, pero también se convierte en una oportunidad para revalorizar los residuos y convertir la industria del reciclaje en una opción económica – ecológicamente viable.

En el mercado actual existe una gran diversidad de aplicaciones que se mantienen en una mejora continua, como ejemplo tenemos; la calefacción sin tuberías, esta ha integrado baldosas para producir calor utilizando láminas de plástico que actúan como resistencias al conectarse a la electricidad. Otro ejemplo, son paredes que optimizan el consumo energético, son materiales en recubrimientos interiores que pueden almacenar calor y cuando se requiere pueden liberarlo optimizando el consumo de energía.

También destacan soluciones en torno a las ventanas, desde la perfilería hecha con base en plásticos como el PVC, pasando por materiales que reflejan la radiación solar evitando el aumento de temperatura al interior de la vivienda, o incluso el uso de madera transparente que abre la posibilidad de utilizar la corteza de los árboles para aclararla y utilizarla como sustituto del vidrio.

Como elementos decorativos, pergolados, muebles de jardín, tuberías, mosquiteros que tienen propiedades insecticidas y repelentes, a la vez son materiales que resisten a la intemperie en comparación con materiales tradicionales como la madera, metal o concreto. Por último, la fabricación de elementos como paredes, techos y suelos con propiedades mejoradas que los hacen perdurables al interior y exterior de las viviendas, los nano materiales.

Capítulo V

Análisis de resultados

No se trata nada más de resguardarse, se trata de manifestar la civilización a través de sorprendentes y prácticas construcciones.
Álvaro Ancona.



Capítulo V. Análisis de resultados.

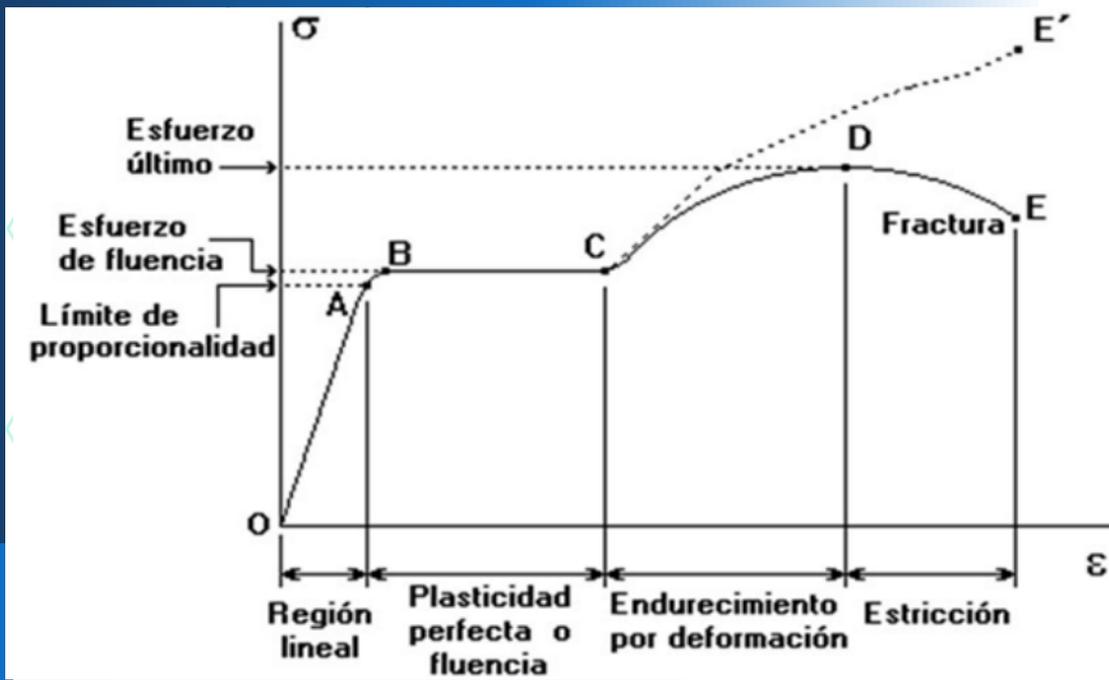
En el quinto capítulo se analizan los resultados de las pruebas mecánicas obtenidas en las diferentes mezclas del compuesto polímero-arcilla, esto con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas y evaluar la mezcla que presenta mejor comportamiento.

Las propiedades mecánicas en los materiales indican su respuesta al someterlas a fuerzas o cargas externas, en el caso del compuesto se evalúan debido a la relación que existe entre su composición química y estructura del material conforme al procesamiento realizado. Es posible ver de manera clara el comportamiento de los materiales por medio de gráficas de esfuerzo-deformación, mismas que se obtienen por el análisis de datos matemáticos resultantes de las pruebas de tensión.

5.1 Gráficas de esfuerzo-deformación para pruebas de tracción

Las gráficas de esfuerzo deformación nos permiten obtener rangos de comportamiento de manera precisa por medio de un cálculo matemático que interpreta los datos obtenidos en el transcurso de la prueba de tracción, el comportamiento del material ante la aplicación de una fuerza prolongada puede darnos parámetros que determinan las posibles aplicaciones de estos.

Fig. 5.1 Diagrama esfuerzo-deformación de materiales dúctiles



Nota: En el gráfico se muestran las partes que componen las gráficas de esfuerzo-deformación y los rangos que representa el comportamiento de materiales dúctiles, obtenido de Santillán, 2019, p. 21.

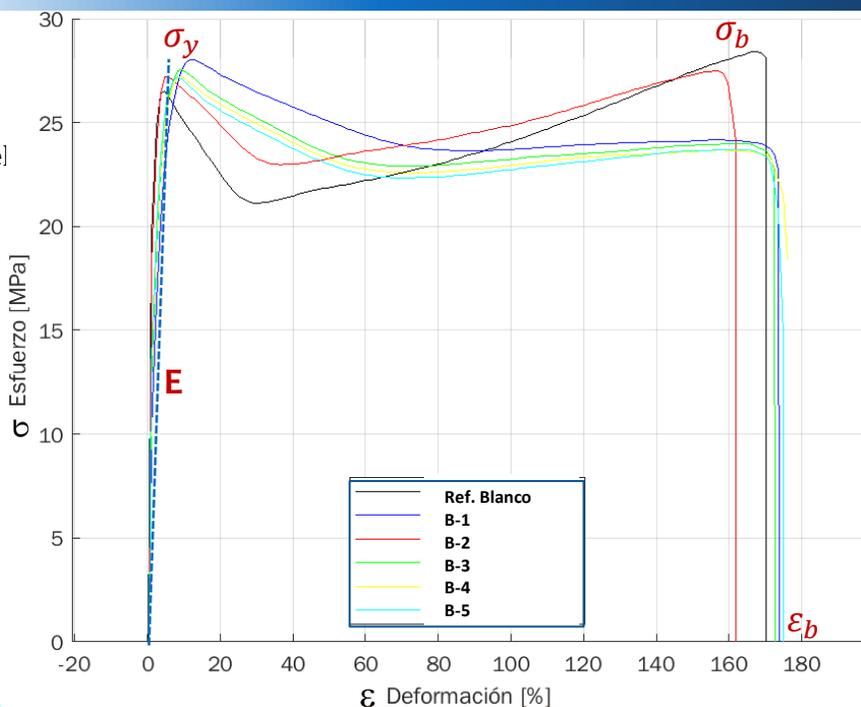
Podemos interpretar la gráfica en donde el eje horizontal (X) muestra la deformación que sufre el material, esta se puede definir dependiendo el tipo de gráfica en centímetros, milímetros, metros o en porcentaje, este último como es nuestro caso se interpreta el porcentaje deformación del material en relación a la dimensión inicial.

En el eje vertical (Y) se encuentra el esfuerzo, en este punto es importante diferenciar el esfuerzo del material con la fuerza aplicada, ya que, el equipo universal está aplicando una fuerza constante y prolongada, pero este no es el rango que se presenta en la gráfica, “Este dato representa la resistencia que opone el material a ceder ante la fuerza aplicada” (Santillán, 2019, p. 21).

Se presenta una gráfica comparativa por cada familia de probetas⁶¹ (B y C), cada una de estas familias se integra por 5 variantes (B-1, B-2, B-3, B-4, B-5: C10, C-11, C-12, C-13, C-14) y un grupo de probetas del material de control o referencia. De igual forma de cada mezcla se hacen 5 probetas, por lo que en la gráfica comparativa se muestra el promedio de estas dando como resultado 2 gráficas con 6 líneas que representan el promedio de cada mezcla.

Fig. 5.2 Gráfica esfuerzo-deformación mezclas tipo B

E = Módulo de Young, rigidez del material
 σ_y = Resistencia de cedencia, Resistencia a ser deformado
 σ_b = Resistencia a la rotura
 ϵ_b = Deformación de rotura ductilidad



Nota: La comparativa de resultado de probetas para la familia B se realizó por medio de la herramienta MATLAB y determina el comportamiento mecánico de las mezclas entre la resina de polietileno de alta densidad y la arcilla, autoría propia.

⁶¹ Las variantes y composición de cada grupo de familias se especifican en el capítulo III, el grupo B corresponde a la matriz de resina de polietileno de alta densidad y el grupo C correspondiente a la matriz de polietileno de alta densidad reciclado negro.

El proceso para obtener esta gráfica radica en recopilar los datos del equipo de prueba universal, que para el caso del esfuerzo se determina con la fórmula F/A , la fuerza aplicada entre el área donde se aplica, en este caso el área es la dimensión que tiene la parte angosta de la probeta, entonces la fuerza aplicada en ella se divide para obtener el esfuerzo del material.

Por otra parte, la deformación se obtiene dividiendo la dimensión de la probeta en aumento progresivo entre la longitud inicial de la misma o distancia inicial entre las mordazas y se multiplica por 100 para dar un rango de porcentaje. Estas formulaciones nos dan como resultado 4 principales parámetros: el módulo de Young o de elasticidad (E), cedencia máxima (σ_y), deformación máxima (ϵ) y la tensión a la rotura (σ_b).

En la tabla 5.1 se muestra la comparativa de los valores obtenidos para las muestras correspondientes a la familia B.

Tabla 5.1 Propiedades mecánicas de la familia de probetas B

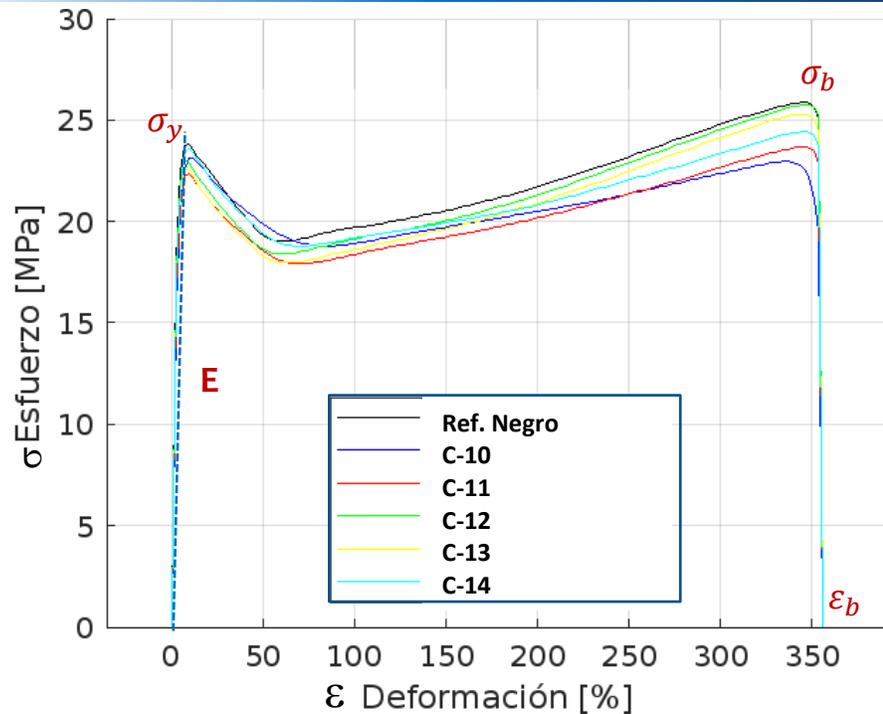
Mezcla	Matriz	Arcilla (%)	Agente (%)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	σ_b (MPa)
B-1	Resina DHPE	2	0	8.86	26.46	140.09	22.68
B-2		0	2	8.04	24.94	308.53	25.45
B-3		2	2	8.85	26.10	184.94	22.75
B-4		3	2	8.47	24.94	177.80	21.49
B-5		2	3	8.67	25.42	194.93	22.01
B ref. B		0	0	8.11	26.11	300.74	26.62

Nota: En la tabla se presentan los datos obtenidos en las pruebas de tensión para la familia B conformada por la resina de polietileno de alta densidad, se muestran las proporciones de mezclas y el material de referencia blanco, autoría propia.

Con los datos obtenidos podemos observar que las probetas rondan en el esfuerzo máximo entre 25 y 27 MPa, lo que representa datos superiores a los que indica la norma como mínimo para materiales de mampostería que ronda entre los 7 y 15 MPa (70 y 150 kg/cm²), lo que indica que puede soportar las cargas que afectan un elemento constructivo para muro.

De igual forma, se realizó la gráfica de esfuerzo deformación de la familia de probetas C, la cual tiene como matriz el polietileno de alta densidad reciclado color negro y que es el material objetivo de la presente investigación, del cual se pretenden mejorar las propiedades con este material con la adhesión de la arcilla modificada e incluso igualar o superar las condiciones de la resina virgen.

Fig. 5.3 Gráfica esfuerzo-deformación mezclas tipo C



Nota: La comparativa de resultado de probetas para la familia C se realizó por medio de la herramienta MATLAB y determina el comportamiento mecánico de las mezclas entre la resina de polietileno de alta densidad reciclado color negro y la arcilla, autoría propia.

En la tabla 5.2 se muestra la comparativa de los valores obtenidos para las muestras correspondientes a la familia C.

Tabla 5.2 Propiedades mecánicas de la familia de probetas C

Mezcla	Matriz	Arcilla (%)	Agente (%)	E (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	σ_b (MPa)
C-10	DHPEr Negro	2	0	7.01	21.53	313.01	21.26
C-11		0	2	6.10	20.68	425.67	21.96
C-12		2	2	6.95	21.42	410.58	24.03
C-13		3	2	7.04	21.23	404.91	23.87
C-14		2	3	7.39	22.18	349.36	22.96
B ref. N		0	0	7.44	22.58	397.64	24.56

Nota: En la tabla se presentan los datos obtenidos en las pruebas de tensión para la familia C conformada por el polietileno de alta densidad reciclado color negro, se muestran las proporciones de mezclas y el material de referencia negro, autoría propia.

Los rangos de resistencia de las probetas de la familia C disminuye debido a que el material utilizado como matriz, un material reciclado, lo cual afecta a la estructura de las cadenas del polímero, los rangos de esfuerzo máximo rondan entre los 22 y 24 MPa, lo que representa datos superiores a los que indica la norma como mínimo para materiales de mampostería que ronda entre 7 y 15 MPa (70 y 150 kg/cm²), estos rangos de comportamiento también indica que puede soportar las cargas que afectan un elemento constructivo para el muro.

5.2 Producción de segunda fase de nano compuesto

Aunque por la desviación estándar y los resultados son similares entre las mezclas y los materiales de referencia (B ref. B y B ref. N), indica que se logró fabricar un micro compuesto en el que no se logran integrar las moléculas de arcilla en los átomos del polímero, pero se homogeneizaron ambos materiales a nivel macro molecular.

Es por ello, que se opta por realizar otro proceso de extrusión en el Instituto de Investigaciones de Materiales de la UNAM, en donde se utiliza una extrusora de doble husillo y se siguen los mismos procesos de integración de los componentes de la mezcla, se incorporó la arcilla modificada en un 2% y el agente de acoplamiento (Fusabond E-265) en un 2%.

Fig. 5.4 Proceso de extrusión de material compuesto



Nota: Se realizó el proceso de extrusión de la matriz de resina de polietileno de alta densidad (B) y la matriz de polietileno de alta densidad reciclado negro (C), por medio de otro equipo de extrusión de doble husillo y se aditaron arcilla modificada, se cambió el agente de acoplamiento por Fusabond E-265 con base en Anhídrido Maleico, elaboración propia.

Uno de los factores por los que no se pudo lograr el nanocompuesto en el proceso anterior, fue debido al diseño de los husillos los cuales repercuten en la integración a nivel molecular de la matriz polimérica y el refuerzo de arcilla, ya que el diseño de los husillos es una de las características más importantes para lograr fabricar un nanocompuesto:

Los husillos están formados por elementos dispersivos y/o distributivos e incluso con elementos reversivos. Con los elementos de tipo distributivo se logra que todos los materiales se encuentren en igual proporción en la muestra; con los dispersivos se consigue que los componentes no se aglomeren, sino que formen partículas del menor tamaño posible y con los reversivos se produce un retroceso del material en sentido contrario al de avance de los husillos, aumentando de este modo la cizalla y el tiempo de residencia (Villanueva, 2009, p. 283).

Fig. 5.5 Ejemplos de secciones de husillos



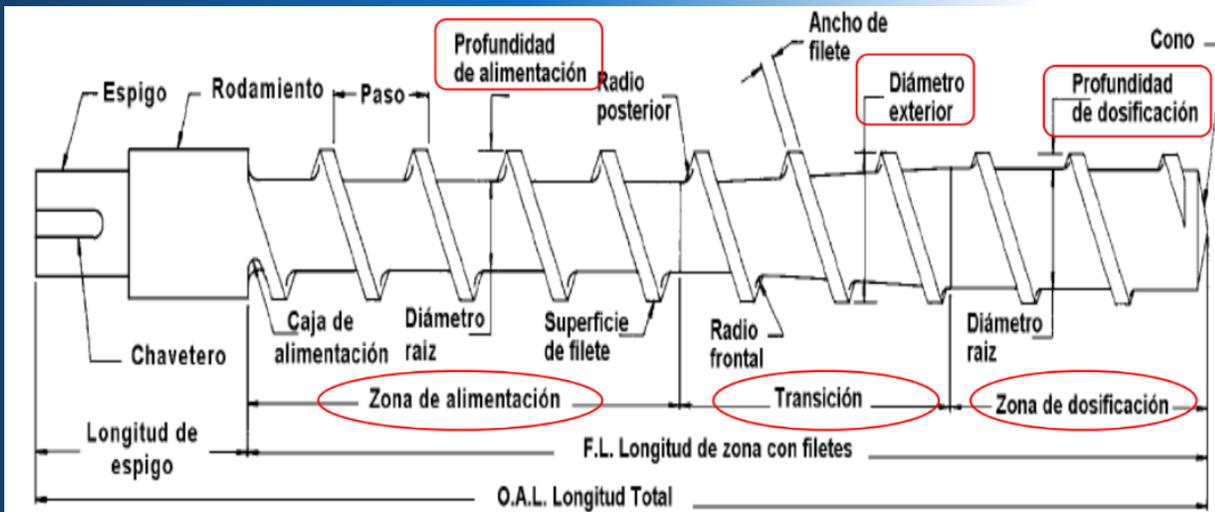
Nota: Se presentan ejemplos de configuración de secciones de husillos conforme al tipo de mezclado y etapa del proceso, ya sea alimentación, distribución o dispersión, obtenido de Villanueva, 2009, p. 289.

La función del husillo es fundir, levantar presión, homogeneizar la masa fundida, así como, transportar el polímero fundido al cabezal para que con la presión necesaria pueda fluir a través del cañón hasta la boquilla o cabezal, aunque el doble husillo también cumple la función de integrar de manera nanométrica los compuestos que integran el nanomaterial.

La estructura del husillo se compone en tres zonas principales por las cuales transita el material a lo largo del cañón interno. De inicio se encuentra la sección de alimentación, que como su nombre lo dice, es por donde se alimenta el equipo, recibe el material y los traslada a la siguiente fase interna del proceso, de esta primera sección depende la velocidad de alimentación.

Posteriormente, se encuentra la zona de compresión en donde se realiza el proceso profundo de integración de los materiales, es importante resaltar que al paso de la trayectoria se va aumentando la temperatura, para este caso se especifican en la Figura 5.6. Por último, se encuentra la zona de dosificación en la que se homogeneiza la mezcla y se prepara para salir por la boquilla o dado de extrusión.

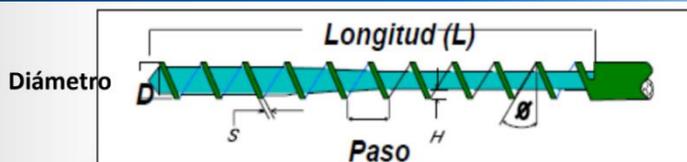
Fig. 5.6 Diagrama de composición del husillo



Nota: En el esquema se pueden observar los diversos componentes de un husillo común, así como las zonas que componen este elemento, obtenido de Velázquez, 2021, p. 7.

Es por ello que las dimensiones y configuración del husillo determinan en gran medida su funcionalidad.

Fig. 5.7 Esquema de dimensiones del husillo



S	ancho del filete	Entre 0.08D - 0.12D
P	paso o ancho de canal	Distancia horizontal entre los centros de dos filetes consecutivos.
D	diámetro	Distancia máxima entre los topes de los filetes del tornillo
H	profundidad del canal	Distancia perpendicular desde el tope del filete hasta la superficie del canal
θ	ángulo de hélice	Cuando el paso = D, el ángulo es 17.7°

Nota: En el esquema se pueden observar los diversos componentes de un husillo común, así como las zonas que componen este elemento, son datos de referencia, por lo que, no se toman como las dimensiones utilizadas en los husillos de la extrusora utilizada, obtenido de Velázquez, 2021, p. 7.

El diseño de los husillos afecta también a los parámetros de velocidad de alimentación, velocidad de extrusión, temperatura de procesamiento del material, tiempo de residencia dentro del equipo y la eficiencia del mezclado, en la figura 5.8 se presentan los parámetros de programación de la extrusora.

Fig. 5.8 Parámetros de extrusión del compuesto



Nota: En el gráfico se observan las temperaturas en cada una de las zonas al interior del equipo de extrusión, así como las presiones y velocidades que se manejan en el proceso, elaboración propia.

En este proceso se extruyeron 2 materiales tomando como referencia los resultados de análisis de las mezclas, se determinó que la proporción de 2% de arcilla con 2% de agente de acoplamiento, son las mezclas que resultaron con mayor estabilidad en su comportamiento mecánico, por lo que se fabricó un grupo de 5 probetas para cada una de las 2 matrices B2 (resina de polietileno de alta densidad) y C2 (polietileno de alta densidad reciclado negro).

El proceso posterior a la extrusión se realizó de igual manera que el proceso experimental ⁶², al obtener los filamentos se pasan por un equipo de peletizado en donde se obtienen los gránulos que posteriormente se llevan para fabricar las probetas con la finalidad de realizar las pruebas de tracción correspondientes. La finalidad es obtener datos comparativos para poder determinar si existe una mejora entre ambos procesos y materiales obtenidos.

⁶² La descripción del proceso experimental se indica en el capítulo III del presente documento.

Fig. 5.9 Probetas de segunda fase de experimentación



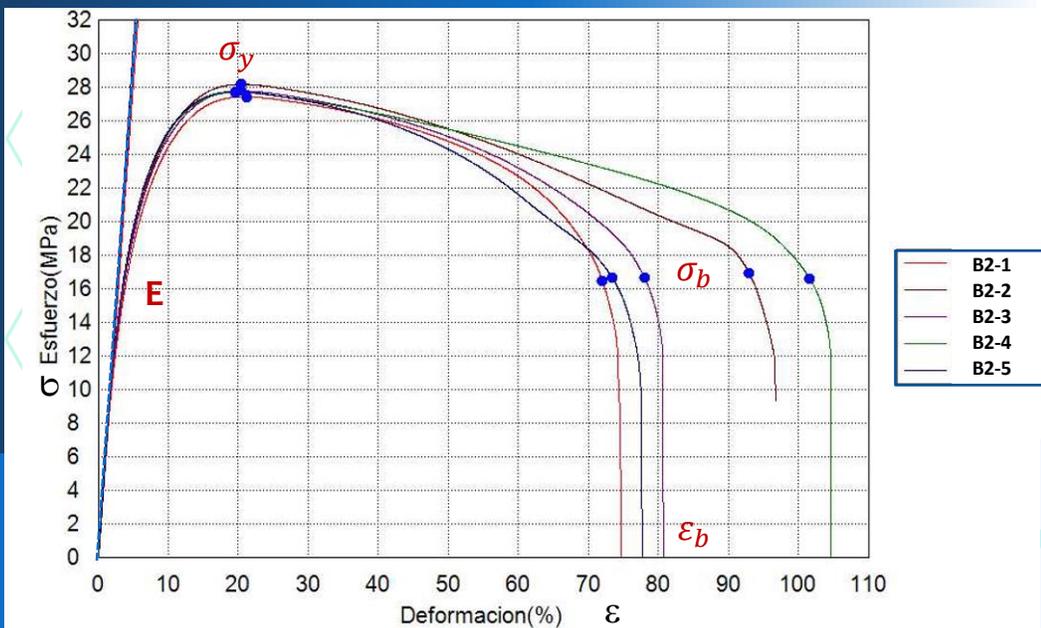
Nota: En las imágenes se observan las probetas fabricadas por un proceso de inyección y el pellet obtenido por el proceso de extrusión.

B2) Probeta matriz resina HDPE + arcilla modificada 2% + agente de acoplamiento 2%.

C2) Probeta matriz HDPEr + arcilla modificada 2% + agente de acoplamiento 2%, autoría propia.

Posteriormente, estas probetas pasan por un proceso de pruebas de tensión por medio de un equipo universal arrojando los siguientes resultados:

Fig. 5.10 Gráfica esfuerzo-deformación mezclas tipo B2



Nota: Se presenta la gráfica de esfuerzo deformación de la familia B2 en donde se puede observar el cambio de comportamiento con respecto a la prueba inicial del proceso de la Fase 1, elaboración propia.

Tabla 5.3 Propiedades mecánicas de la familia de probetas B2

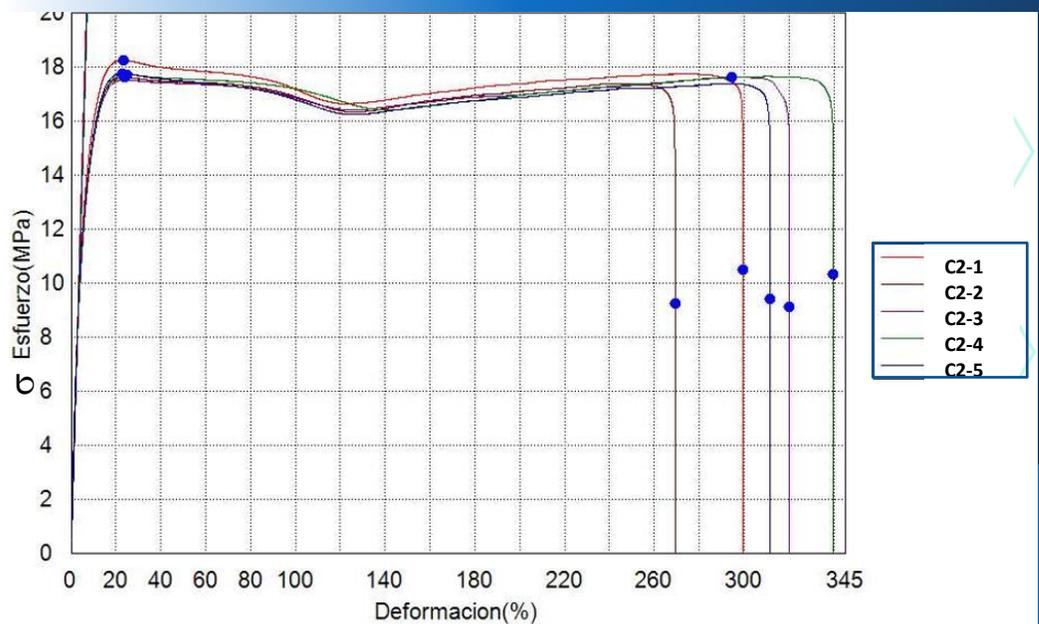
Mezcla	Matriz	Arcilla (%)	Agente (%)	M. elástico (MPa)	Esfuerzo máx. (mm)	Esfuerzo de rotura (MPa)	Rotura deformación (%)	Energía (J)
B2-1	Resina DHPE	2	2	568.882	27.39	16.43	72.02	41.31
B2-2		2	2	593.43	28.14	16.88	92.99	53.45
B2-3		2	2	591.54	27.75	16.64	77.99	44.92
B2-4		2	2	617.95	27.76	16.58	101.61	58.03
B2-5		2	2	616.79	27.70	16.62	73.42	42.45

Nota: En la tabla se presentan los datos obtenidos en las pruebas de tensión para la familia B2 conformada por la resina de polietileno de alta densidad, se muestran las proporciones de mezclas y el material de referencia blanco, elaboración propia.

Los datos obtenidos nos indican un comportamiento distinto incluso con la probeta de referencia, en las pruebas B2 se puede observar un aumento llegando a los 28 MPa y el comportamiento de la curva no disminuye de forma repentina, ni vuelve a elevarse, toma un descenso hasta llegar al punto de ruptura, además, se reduce el porcentaje de deformación en un rango de 80 a 104 %.

Así mismo, para la familia C2 se realizaron las pruebas de tracción correspondientes arrojando los siguientes resultados:

Fig. 5.11 Gráfica esfuerzo-deformación mezclas tipo C2



Nota: Se presenta la gráfica de esfuerzo deformación de la familia c2 en donde se puede observar el cambio de comportamiento con respecto a la prueba inicial del proceso de la Fase 1, autoría propia.

Tabla 5.4 Propiedades mecánicas de la familia de probetas C2

Mezcla	Matriz	Arcilla (%)	Agente (%)	M. elástico (MPa)	Esfuerzo máx. (mm)	Esfuerzo de rotura (MPa)	Rotura de deformación (%)	Energía (J)
C2-1	DHPE reciclado negro	2	2	301.23	18.23	10.46	299.37	122.18
C2-2		2	2	282.23	17.59	9.23	269.20	107.26
C2-3		2	2	281.92	17.61	9.113	320.28	128.20
C2-4		2	2	282.82	17.69	10.30	339.77	136.86
C2-5		2	2	287.41	17.74	9.38	311.66	124.12

Nota: En la tabla se presentan los datos obtenidos en las pruebas de tensión para la familia C2 conformada por la resina de polietileno de alta densidad, se muestran las proporciones de mezclas y el material de referencia blanco, elaboración propia.

En este caso se observa una disminución de inicio ante el esfuerzo que soporta el material ante los datos obtenidos de las probetas de referencia y las mezclas de la fase 1 de experimentación, aunque se reduce la curva descendiente y se regulariza el comportamiento teniendo un pequeño incremento hasta su punto de rotura. En cuanto al porcentaje de deformación, se reduce en cierta proporción en comparación a pruebas anteriores, rondando entre los 260 a 345%.

5.3 Comparativas de resultados

Con la finalidad de obtener un resumen comparativo se presenta la tabla 5.5, con los resultados obtenidos en el apartado anterior, en este sentido se integran las dos fases del proceso experimental. La Fase 1, corresponde a la etapa de laboratorio en la que se exploran las proporciones de las mezclas con los componentes que integran el compuesto. En primer lugar, el material base o Matriz que establece a que grupo de probetas corresponde; en segundo lugar, el porcentaje de arcilla modificada; y en tercer lugar, el porcentaje del agente acoplante.

La Fase 2 corresponde a las probetas fabricadas con las proporciones que dieron como resultado mejores condiciones en la Fase 1, estos resultados están en función del comportamiento deseado para este material compuesto, así como, las recomendaciones de procesos preliminares que se investigaron en el estudio del arte. Es por ello que se divide la tabla en dos secciones y por fases, aunque de igual forma es posible observar los rangos máximos y mínimos para cada propiedad.

Se presenta la siguiente tabla comparativa:

Tabla 5.5 Comparativa de resultados de pruebas mecánicas

Comparativa de resultados por Fase de pruebas mecánicas compuesto polímero - arcilla									
	No.	Probeta	Mezcla %			Modulo de elasticidad	Sedencia máxima	Deformación máxima %	Tensión a la rotura
			Matriz	Arcilla	Acoplante	E=Young (MPa)	sy= (MPa)	e (%)	sb= (MPa)
Fase 1	1	B-1	98	2	0	8.86	26.46	140.09	22.68
	2	B-2	98	0	2	8.04	24.94	308.53	25.45
	3	B-3	96	2	2	8.85	26.10	184.94	22.75
	4	B-4	95	3	2	8.47	24.94	177.80	21.49
	5	B-5	95	2	3	8.67	25.42	194.93	22.01
	6	BrefB	100	0	0	8.11	26.11	300.74	26.62
	7	C-10	98	2	0	7.01	21.53	313.01	21.26
	8	C-11	98	0	2	6.10	20.68	425.67	21.96
	9	C-12	96	2	2	6.95	21.42	410.58	24.03
	10	C-13	95	3	2	7.04	21.23	404.91	23.87
	11	C-14	95	2	3	7.39	22.18	349.36	22.96
	12	BrefN	100	0	0	7.44	22.58	397.64	24.56
Fase 2	13	B2-1	98	2	2	568.882	27.40	72.03	41.31
	14	B2-2	98	2	2	593.43	28.15	93.00	53.45
	15	B2-3	98	2	2	591.541	27.75	78.00	44.93
	16	B2-4	98	2	2	617.955	27.67	101.62	58.04
	17	B2-5	98	2	2	616.791	27.71	73.42	42.45
		Media B1				597.72	27.73	83.61	48.04
	18	C2-1	98	2	2	301.23	18.24	299.38	122.19
	19	C2-2	98	2	2	282.24	17.60	269.21	107.27
	20	C2-3	98	2	2	281.92	17.62	320.29	128.21
	21	C2-4	98	2	2	282.82	17.75	339.77	136.87
	22	C2-5	98	2	2	287.42	17.75	311.66	124.13
		Media C2				287.13	17.77	308.06	123.73

Nota: En la tabla 5.5 se indica el resumen de los resultados para la Fase 1 y Fase 2 del proceso experimental, en cuanto a las pruebas mecánicas realizadas para los materiales compuestos polímero-arcilla, se observa lo siguiente:

- En la Fase 1 se indica en color verde los datos máximos obtenidos para cada rubro, en color rojo los datos mínimos obtenidos, es importante mencionar que derivado de la poca variación entre probetas para esta fase, se optó por realizar un segundo proceso en condiciones propicias para fabricar un nano compuesto.
- En esta misma Fase (1) se indica en color naranja el segmento de probetas de referencia para el caso de la matriz de resina virgen (BrefB) y en el caso del material reciclado (BrefN) como referencia de control del material base.
- En el caso del indicativo en color Cian se eligieron como proporción adecuada para continuar en la fase 2, además de ser las proporciones recomendadas para la elaboración del nano material.
- En la fase 2 se divide en el grupo de probetas B (matriz de resina) y el grupo de probetas C (matriz de material reciclado), en los que se indica en color verde los datos máximos obtenidos para cada rubro, en color rojo los datos mínimos obtenidos.
- En color azul se indican los promedios de los datos para cada grupo de probetas.

Elaboración propia.

Como conclusión de la comparativa entre de los resultados de las pruebas mecánicas realizadas, es posible observar que para la fase 1 no existe variación considerable entre los resultados, e incluso la desviación estándar, es superior a la diferencia entre una probeta y otra, es por ello, que se determinó realizar otro grupo de probetas en las condiciones recomendadas para fabricar un nano compuesto⁶³.

La fase 1, además de servir como muestreo de las diferentes combinaciones entre los materiales⁶⁴, también sirve como referencia para considerar las propiedades de un micro compuesto, esto es, que las partículas del polímero no se logran intercalar entre las láminas de la arcilla, obteniéndose una fase separada. Para corroborar este supuesto es necesario recurrir a procesos posteriores para el análisis molecular del material.

En cuanto a la fase 2, se sustituyó el equipo de extrusión, por ende, los husillos al interior, mismos que están diseñados para fabricar un nano compuesto de matriz polimérica, se busca de tener las condiciones óptimas para dicho proceso. Como resultado, se obtuvo un material con resultados distintos a los obtenidos en la primera Fase, es decir, que el material mejoró sus propiedades de forma considerable, a comparación del material de referencia y, sobre todo, en comparación con las mezclas de la fase 1.

En este sentido, es posible observar una disminución en el porcentaje de deformación, lo que fortalece la hipótesis de que la adhesión de arcilla al compuesto polimérico reduce la deformación del material plástico. Es importante recalcar que los polímeros reducen la longitud de sus cadenas en cada proceso de transformación, es decir, que cada que pasa por un proceso de extrusión o fundición pierde cierto porcentaje de propiedades e incluso se vuelve un material más deformable.

Es por ello que, al adicionarle el material arcilloso adquiere nuevamente propiedades de rigidez, posiblemente no al punto de obtener las propiedades de una resina virgen, pero si en gran medida puede recuperar condiciones de resistencia a esfuerzos, para ser aplicable a condiciones de carga, como es en este caso un material de construcción de muro con base en un polímero reciclado como el HDPEr.

Por otro lado, se indica el módulo de elasticidad⁶⁵, el cual incrementa considerablemente de una etapa a otra, lo que indica que aumenta la rigidez del nanomaterial resultante en la etapa 2. El módulo de elasticidad en muchos de los

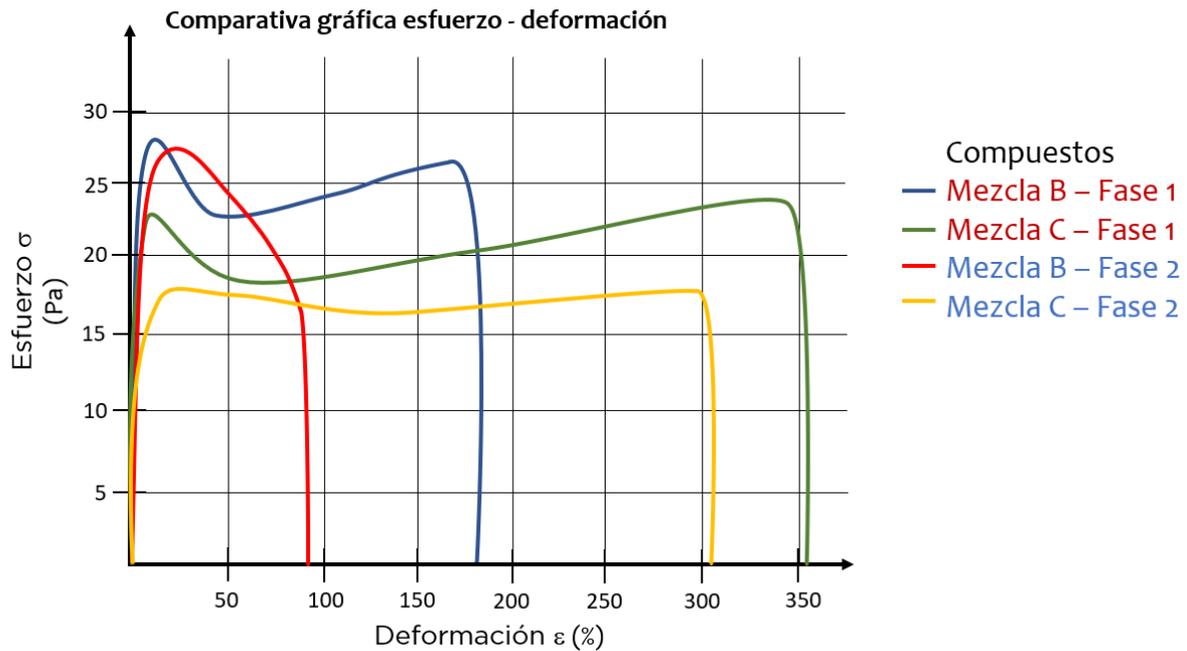
⁶³ Las recomendaciones para fabricar un nano compuesto se describen en el numeral 5.2 Producción de segunda fase de nano compuesto, del presente documento.

⁶⁴ Los materiales que integran el material compuesto son: polietileno de alta densidad (HDPE), arcilla modificada (montmorillonita) y agente de acoplamiento (Fusabond).

⁶⁵ El módulo de elasticidad, también llamado módulo de Young, es un parámetro característico de cada material que indica la relación existente entre los incrementos de tensión aplicados en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación longitudinal unitaria producidos.

casos, es una variable constante en la zona elástica del material polimérico, lo que indica cuál es su comportamiento lineal, es posible realizar una comparación clara por medio de una gráfica de esfuerzo-deformación como se muestra en la Figura 5.12.

Fig. 5.12 Gráfica comparativa de resultados de las pruebas mecánicas



Nota: Se presenta el resumen de las gráficas de esfuerzo - deformación con los promedios de los resultados obtenidos en las 2 fases de experimentación, las cuales cuentan con 2 familias por cada fase. La curva en color azul corresponde a la mezcla B de la fase 1, la curva en color verde corresponde a la mezcla C de la Fase 1 (ambos micro compuestos).

Para el caso de la curva en color rojo es el promedio de los resultados de la mezcla B obtenida en la fase 2 y, por último, se observa la curva en color naranja la cual corresponde a la mezcla C de la fase 2 (considerados nano compuestos). Elaboración propia.

Al analizar estos resultados por medio de las gráficas, es posible observar de una manera más clara el comportamiento mecánico de las diferentes mezclas, sobre todo en las dos fases que se realizaron, las cuales se diferencian por el equipo de extrusión, y por la familia a la que corresponden dependiendo de la matriz que se utilizó como base para cada compuesto.

Por una parte, se encuentra la familia o mezcla B que cuenta con una matriz con base en resina de polietileno de alta densidad virgen, en el caso del compuesto de la fase 2 presenta una reducción en el porcentaje de deformación, si lo comparamos con el compuesto de la misma familia (B), pero de la fase 1 reduce en

casi un cincuenta por ciento la deformación del material con similar esfuerzo, además de obtener una curva más uniforme en su comportamiento.

Por otro lado, se puede observar el comportamiento de la mezcla C la cual se constituye por una matriz de polietileno de alta densidad reciclado color negro, en la comparación entre fases se puede observar una disminución de la deformación para el compuesto de la fase 2 de alrededor del 14.28%, y una disminución del esfuerzo al que se estabiliza la curva, de igual forma, presenta una curva con mayor estabilidad y que se desarrolla de manera uniforme.

Estos resultados contraponen las condiciones de los procesos de transformación de polímeros y la adhesión de arcillas, mismas que modifican el comportamiento mecánico del compuesto resultante, en este caso, se observa tal diferencia entre la fase 1 en la que se obtuvo un micro compuesto y la fase 2 en la que se obtuvo un nano compuesto. Es por ello, que los resultados obtenidos en la Fase 1 y 2 se pueden cotejar con los requerimientos mínimos indicados por la Norma Mexicana NMX-C-404-ONNCCE-2012, “INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – MAMPOSTERIA – BLOQUES, TABIQUES O LADRILLOS Y TABICONES PARA USO ESTRUCTURAL – ESPECIFICACIONES Y METODOS DE ENSAYO” (Organismo Nacional de Normalización Y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C., 2012).

En este sentido se establecen los parámetros de resistencia a la compresión para materiales de mampostería conforme a su configuración y tipo de pieza, se indica una resistencia media de entre 9 a 15 Mpa y una resistencia mínima individual que van de los 7 a los 12 Mpa por pieza como se observa en la tabla 5.6.

Tabla 5.6 Parámetros de resistencia a la compresión de piezas de mampostería

Tipo de pieza	Configuración	Resistencia media \bar{f}_p MPa (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual f_{pMin} MPa (kg/cm ²)
Bloque	Macizo	15 (150)	12 (120)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)
Tabique (largo >300 mm)	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	9 (90)	7(70)
Tabique (largo <300 mm)	Macizo	11 (110)	7 (70)
	Hueco	9 (90)	7 (70)
	Multiperforado	15 (150)	12 (120)

Nota: En la tabla se presentan los parámetros mínimos estipulados por la Norma Oficial Mexicana para elementos de mampostería, indicando la resistencia media y mínima de compresión para materiales constructivos para muros. Obtenidos de Organismo Nacional de Normalización Y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C., 2012, p. 9.

Los datos que se obtuvieron en las pruebas mecánicas se encuentran por encima de los parámetros indicados por la norma, como se observa en la figura 5.12, la gráfica muestra que los 4 compuestos están por encima del rango de los 15 MPa y llegando por debajo de los 30 MPa, este rango de resistencia del material implica el cumplir con esta norma. Es importante mencionar que se toman estos parámetros, toda vez que no existe normatividad específica para materiales alternativos o compuestos poliméricos.

Este hecho enfoca al cumplimiento de la hipótesis que radica en una mejoría a las propiedades del material para cumplir con los requerimientos mínimos para utilizarlo en un elemento constructivo, cuando se integra un refuerzo arcilloso por medio de un proceso de extrusión doble. Aunque se recomienda continuar realizando pruebas y procesos experimentales en investigaciones futuras para el uso de este material y su aplicación en otros elementos constructivos.

Conclusiones y recomendaciones

No se trata nada más de resguardarse, se trata de manifestar la civilización a través de sorprendentes y prácticas construcciones.
Álvaro Ancona.

Conclusiones y recomendaciones

La fabricación de un nano compuesto y su aplicación en un panel modular tiene como objetivo dar una alternativa eficiente para la construcción de viviendas, al utilizar un residuo urbano y transformarlo en una alternativa viable para la edificación de vivienda en serie, con lo que se busca reducir la contaminación de estos residuos plásticos, así como, la contaminación generada por la fabricación de materiales y procesos tradicionales.

La hipótesis se cumple al evaluar las propiedades de un material compuesto con base en polietileno de alta densidad (color negro) de uso doméstico e industrial, producto de un proceso de reciclaje y reforzado con arcilla (montmorillonita modificada), al pasar por un proceso de intercalación en fundido (extrusión con doble husillo), lo cual mejora considerablemente las propiedades de este polímero y reduce el porcentaje de deformación en un 40%, además, de aumentar la resistencia a la tracción del material en un 8%.

Estos aspectos benefician en gran medida al uso de este material en procesos constructivos a gran escala, en donde el tiempo de fabricación, construcción, mano de obra y costo de materiales repercuten en la viabilidad de los proyectos, tanto en aspectos económicos, como técnicos que benefician a un desarrollo eficiente de viviendas y en general en la construcción. En este sentido, este material representa una alternativa viable en la arquitectura, sobre todo para su aplicación en elementos verticales como son muros, columnas o cerramientos, y en los soportes de cargas a compresión, aunque su uso puede estudiarse en futuras investigaciones para ser aplicado en elementos horizontales como vigas, viguetas o losas.

Se demostró que es posible integrar el plástico reciclado a un sistema enfocado en la economía circular, se propone una alternativa sustentable atacando problemáticas que se agudizan en las zonas urbanas de las grandes ciudades, el plástico es un material indispensable para un sinnúmero de actividades cotidianas por su bajo costo y propiedades, que lo hacen un material muy flexible ante necesidades variadas, por lo que, su fin no se considera muy próximo.

El gran problema de estos residuos radica en su deficiente manejo, por lo que su valorización presenta una alternativa muy interesante, sobre todo en áreas que hasta hace algunos años parecían muy ajenos a la industria de los plásticos, por ejemplo, en la arquitectura y la construcción.

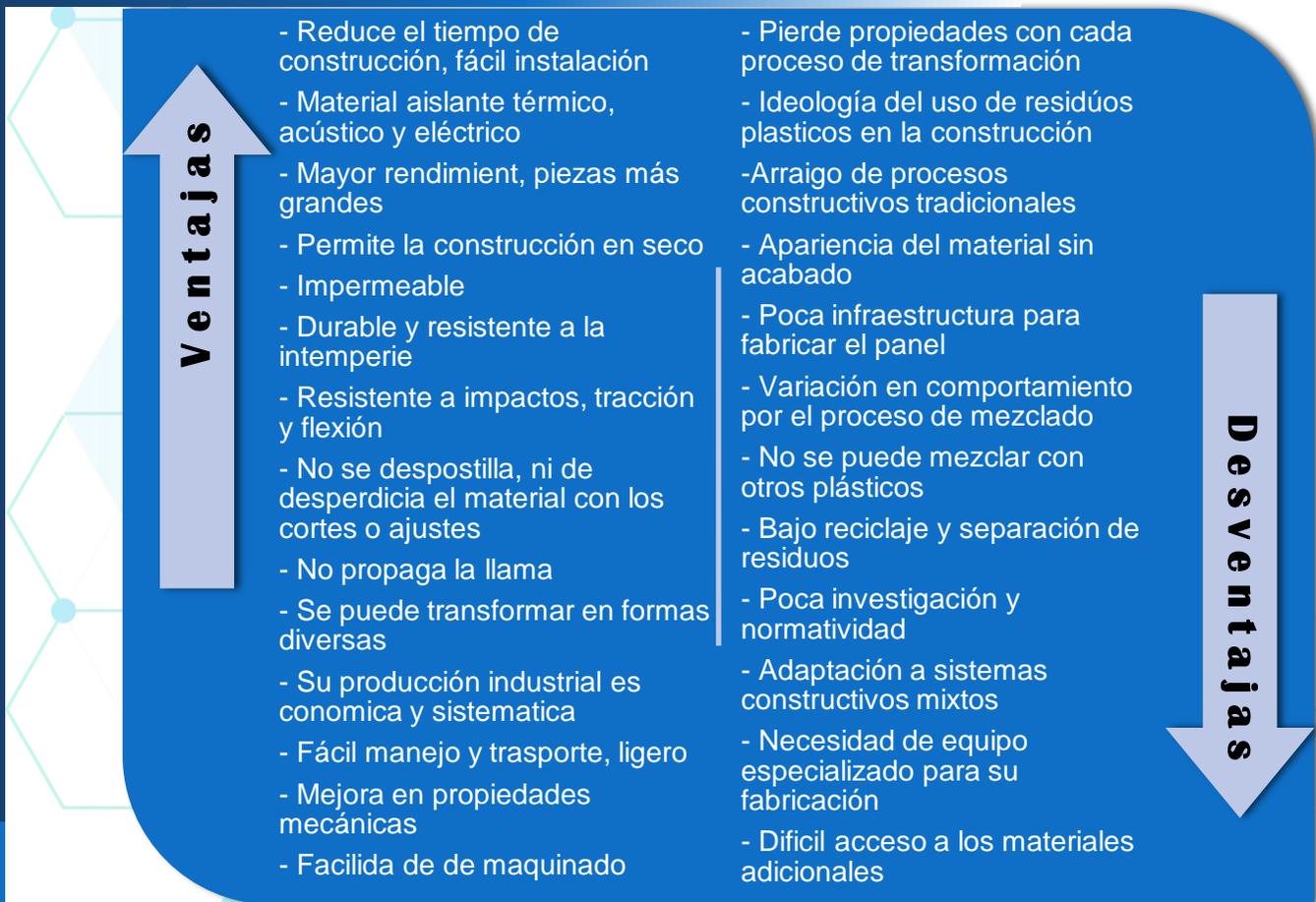
El panel modular surge como una alternativa eficiente, no solo por las propiedades del nano compuesto en sí, sino que, también se indaga una propuesta de dimensiones mayores a comparación de otros elementos constructivos, esto

derivado de la necesidad de cubrir mayor rendimiento y se ajusta a múltiplos de medidas comerciales, en este sentido, la reducción del peso comparado con materiales como el block o tabique da la posibilidad de aumentar la dimensión sin complicar el transporte y el habilitado del material.

Otras propiedades que tienen los polímeros, y que, benefician de manera importante a la integración de los plásticos en la arquitectura, es que brindan un mejor aislamiento térmico, durabilidad en los edificios, fácil mantenimiento y la posibilidad de reutilizar este material o integrarlo en proyectos emergentes, lo que abre sin duda un sinnúmero de posibilidades para mejorar las condiciones de los espacios arquitectónicos, no solo desde la perspectiva del proyecto y ejecución, sino también durante la vida útil y el periodo de uso de los espacios.

Es por ello, que se presenta una tabla comparativa con las ventajas y desventajas obtenidas para el panel modular:

Figura 6.1 Tabla comparativa de las ventajas y desventajas del panel modular



Nota: En la tabla se presentan las propiedades que destacan del panel como elemento constructivo para muro, ventajas y desventajas en los procesos de diseño, producción, habilitado y uso, aplicados en la vivienda, elaboración propia.

Este proyecto permite ampliar el panorama hacia una solución sustentable de dos grandes problemáticas que cada vez se convierten en pendientes hacia la evolución de la arquitectura como respuesta a los tiempos en que se desarrolla, el uso de nano materiales compuestos, en este caso polímero reforzado con arcilla, abre el camino a la reducción de desechos urbano plásticos que contaminan día con día nuestro planeta y, por otro lado dar una alternativa económica de vivienda para sectores que presentan rezago habitacional o para dar solución a espacios emergentes que requieren ser trasladados de un lugar a otro.

Ante lo tradicional

El arraigo de los sistemas constructivos tradicionales en nuestro país está muy relacionado con una sensación de seguridad, en dos aspectos; la seguridad estructural para habitar un espacio que les resguarde y transfiera la sensación de tranquilidad al habitar un espacio, por lo que, el integrar muros de plástico genera inseguridad para adquirir una propiedad en estas condiciones.

Sin importar que esté comprobado que no tendrá ninguna repercusión en el comportamiento estructural de la vivienda e incluso, que presenta mejores condiciones que los materiales tradicionales, la preocupación del usuario se traslada al inversionista o desarrollador que ve una oferta que no se vuelve tan atractiva, en el caso de que el consumidor no esté satisfecho con el producto ofertado.

Por otra parte, se encuentra la seguridad económica, que representa una vivienda como símbolo del patrimonio de muchas familias, sobre todo, en países latinoamericanos en los que en su mayoría compran una casa para toda su vida, por lo que, es fundamental que el periodo de vida de la construcción sea muy prolongado. En este sentido, introducir un nuevo material basado en residuos plásticos urbanos se encuentra con una gran muralla mental muy compleja de derribar, aunque, las actuales condiciones medio ambientales y de costos excesivos en los insumos de construcción, han orillado a voltear a ver estas propuestas como una alternativa que cada vez, se integra más a procesos constructivos actuales.

La falta de información y sobre todo de investigación de nuevos materiales ocasiona que también los profesionales de la construcción (ingenieros, arquitectos) se enfoquen en procesos y materiales tradicionales, ya que, tienen más experiencia en el oficio de la construcción, en la mano de obra, especificaciones de procesos, productos, normatividad, entre otros aspectos, esto se suma a la sensación de seguridad para proyectar y construir de manera más sencilla, y que, no necesariamente es mejor en comparación con los nuevos materiales.

Temas como el de la sustentabilidad y el uso de materiales reciclados suman esfuerzos para dar apertura a propuestas muy interesantes encausadas a mejorar las condiciones de procesos constructivos actuales, por lo que, es un trabajo conjunto

entre proveedores, constructores y sociedad en general para mejorar el desarrollo de ciudades sustentables tomando como base a la vivienda.

Ante lo económico

El aspecto económico es fundamental para el desarrollo y la realización de proyectos de manera eficiente, es innegable que el objetivo siempre es disminuir los costos en el proceso constructivo, en el caso del desarrollo de vivienda en serie el costo y tiempo son fundamentales para que el negocio inmobiliario pueda dar frutos y genere ganancias a los inversionistas.

Es por ello, que un sistema prefabricado es muy atractivo para la producción de vivienda en serie, el panorama de poder industrializar la construcción de vivienda da pie a optar por los sistemas más eficientes de fabricación, distribución y construcción. En este aspecto, los tradicionales requieren grandes cantidades de recursos energéticos en los procesos de fabricación, así como, recurso humano y tiempos prolongados de procesos de habilitado, fraguado y secado de cementantes, que podrían ahorrarse si se utilizaran sistemas de ensambles en seco con elementos previamente fabricados y únicamente habilitarse en el sitio.

Al integrar un residuo que se considera en algunos casos como un desecho, como son los plásticos de procedencia doméstica o industrial, se convierte en la materia prima de algunas industrias, es decir, que los materiales plásticos reciclados han tomado un posicionamiento en el mercado de la transformación de plásticos, en este sentido, el desarrollo de esta industria acorta la brecha para el uso de estos materiales en la construcción, ya que tiene muchas necesidades que pueden ser cubiertas por los polímeros reciclados. A pesar de esto, los costos del plástico han ido en aumento derivado en cierto modo por el fenómeno de la oferta y la demanda, y, por otro lado, al aumento del precio de los derivados del petróleo, aunque aún con estas problemáticas siguen siendo una alternativa viable para reducir costos en la producción de vivienda.

Durante el proceso de investigación se acudió a diversas empresas dedicadas a fabricar materiales constructivos con base en diversos plásticos reciclados, además de tomar los parámetros de precios de la materia prima para determinar montos paramétricos⁶⁶ de construcción para vivienda de interés social, lo que resultó en una reducción de un 15% en el caso de la sustitución de muros de mampostería por el panel de nanocompuesto, y hasta un 23% de reducción en costo⁶⁷ al considerar la estructura completa con este material.

⁶⁶ Los costos paramétricos son un valor preliminar que se asignan a una partida de obra en metros cuadrados, los cuales se multiplican por el área de construcción de un proyecto para determinar su costo aproximado. Estos valores se obtienen al promediar los costos de construcción de edificaciones similares.

⁶⁷ Se consideran precios en el mercado de junio de 2022.

En el caso del tiempo de construcción, se reduce aún más el tiempo de ejecución debido a la facilidad de instalación y deja de lado los procesos húmedos que requieren tiempo de fraguado, para dar paso al habilitado en seco por medio de ensambles. El tiempo en que se reduce la construcción de una vivienda de interés social al utilizar sustituir elementos de mampostería por el uso de un panel modular basado en nanocompuestos de matriz polimérica ronda entre el 33%, y si se utiliza la estructura compuesta por este material se reduce el tiempo de construcción hasta en un 86% para viviendas de un nivel.

Estos datos sin duda sobre salen en proporción a la rapidez con que se pueden construir viviendas, sobre todo en la producción en serie donde los tiempos se acortan demasiado y se procura el mayor ahorro posible de material y tiempo de ejecución, por lo que, un sistema prefabricado se plantea como una opción muy atractiva para este y otros sectores de la construcción. Aunque el desarrollo de una industria aún está en desarrollo y mejora continua para competir a la par a empresas fabricantes de materiales tradicionales.

Ante lo social

Una de las principales aplicaciones de materiales alternativos y en específico de los materiales reciclados, es su uso en edificios emergentes, es decir, en circunstancias que apoyen a las condiciones de emergencia o de bajos recursos, es por ello, que el panel es una opción viable debido a que no requiere de mano de obra especializada, ni tampoco de herramientas específicas para habilitarse, incluso puede ser construido por el propio usuario.

En este sentido, el uso de un material que reduce el porcentaje el tiempo y costo de construcción, beneficia a diversos sectores de la población para que puedan adquirir una vivienda digna o en ciertos casos puedan iniciar con un pie de casa⁶⁸ y continuar su construcción de manera progresiva. Se impulsa a la producción de vivienda de bajo costo y que refleja las necesidades de una sociedad que aspira a la adquisición de un lugar confortable para habitar.

El impacto en la reducción de materiales plásticos contaminantes repercute en la mejoría en la sociedad actual, al mejorar las condiciones del entorno se produce una mejoría también en el estilo de vida de los cinturones urbanos. Además, de estos aspectos de manera directa se enfatiza en la generación de empleos en torno a una industria de recolección de residuos sólidos la cual produce una revalorización de estos materiales y una opción viable de economía circular.

⁶⁸ Un pie de casa es una vivienda de una sola planta la cual cuenta con los espacios necesarios para su habitabilidad, aunque tiene un proyecto de ampliación en un segundo nivel de manera progresiva.

Estos aspectos desarrollan un mercado productivo que impulsa de manera positiva campañas o actividades sociales, las cuales van en aumento de forma progresiva y que ponen al reciclaje de residuos sólidos como actividades de apoyo a las condiciones actuales medio ambientales.

Ante lo ambiental

El aspecto medio ambiental al parecer es uno de los que menos peso han tenido en el proceso de extracción, fabricación, transporte, uso y desecho de materiales para la construcción. La deforestación, uso de energías de origen fósil, demoliciones, generación de residuos producto de procesos constructivos, entre otros, han repercutido de manera importante al medio ambiente.

Es por ello, que se considera a la industria de la construcción como una de las más contaminantes como lo menciona Esperanza (2018), “el sector de la construcción es responsable del 50% de las emisiones contaminantes en el mundo, desde la fabricación de materiales, transporte, procesos constructivos del inmueble y su uso” (párr. 1).

Un punto importante es que se beneficia al revertir el daño al medio ambiente, en la propuesta del panel modular se puede retirar al final de la vida útil del edificio, es decir, que sirve como un material constructivo emergente, un uso muy similar al de la madera. Además de reducir hasta un 90% los desperdicios al momento de la construcción de la vivienda, así como, al final de la vida útil de los edificios, ya que, por las características de reciclaje del material es posible reintegrarlos a un nuevo ciclo de vida de este material.

Esta característica está muy ligada al origen de la propuesta para reciclar el material plástico producto de un residuo e integrarlo en un elemento constructivo, este aspecto suma al valor intrínseco que aporta a la reducción del daño ambiental y a la reducción de gases de efecto invernadero. De la misma forma, suma a iniciativas y programas, tanto públicos como privados que enfatizan esfuerzos al uso de ecotecnias y ecotecnologías sustentables.

Entre ellas, (ecotecnias y ecotecnologías) destaca el uso de materiales reciclados o materiales emergentes que revalorizan diversos materiales de desecho, de igual forma se aporta en gran medida al confort interno de las viviendas, mejores condiciones de uso y mantenimiento de estos materiales, estos aspectos impactan de manera positiva en el comportamiento de los espacios y en posibles evaluaciones para edificios sustentables.

Recomendaciones y futuras investigaciones

Como resultado de este trabajo de investigación surgen posibles líneas de aplicación para dar seguimiento al uso del material compuesto de matriz polimérica con refuerzo de arcillas dentro de la industria de la construcción, pero no solamente para este material, es evidente que la evolución de los procesos constructivos exigen materiales que respondan a las diversas problemáticas en los aspectos económicos, culturales, socio-políticos y ambientales, para recomponer el rumbo hacia un desarrollo sostenible.

Los materiales alternativos representan una opción viable y distinta a la de los materiales tradicionales hacia una transición para la mejora de procesos y sistemas constructivos, estos materiales representan una salida hacia un desarrollo sustentable, aunque para llegar a este punto es necesario invertir en investigación y desarrollo de compuestos que den solución a problemáticas del siglo XXI.

El deterioro ambiental y las problemáticas socio económicas exigen cada vez más una arquitectura que cuente con procesos y sistemas con mayor eficiencia para el correcto funcionamiento de los espacios.

Este proyecto tuvo como objetivo indagar en disciplinas distintas a la Arquitectura que puedan aportar en la fabricación de materiales alternativos, que usen como materia prima desechos urbanos, aunque por el corto periodo de tiempo quedan aún vertientes que se pueden seguir explorando de manera específica, de entre ellas destacan las siguientes:

- Uno de los puntos cruciales para la fabricación del material es el **desarrollo del proceso de producción**, el cual, en esta propuesta encarece el producto en comparación con los procesos de materiales tradicionales como el del tabique o el block, debido a que estos materiales ya se encuentran posicionados en un mercado estable y sus procesos productivos se han ido mejorando a lo largo de décadas de uso.
- En este proyecto se eligió la **mezcla de materiales** en porcentajes que conforma el material compuesto, aunque es importante seguir explorando dosificaciones de mezclas para obtener los mejores resultados y con ello, poder determinar el comportamiento que se requiera para diversos elementos arquitectónicos.
- Otro punto importante, es el desarrollo de **parámetros normativos** en los que se puedan basar materiales alternativos, no solo los materiales compuestos con polímeros, sino también, otro tipo de materiales que se encuentran en desarrollo como respuesta a la evolución de materiales constructivos.

- Investigar alternativas de **uso del material en otros elementos** que componen los sistemas arquitectónicos y constructivos de la vivienda, como una alternativa de sustitución a elementos tradicionales, por ejemplo, vigas, firmes, viguetas, bovedillas, cimbra, entre otros.
- Buscar la aplicación del material compuesto, como una alternativa de material **aislante termo-acústico**, como placa para bastidor o celosía en sustitución de otros materiales como la madera o el metal, con el objetivo de aprovechar la facilidad de manejo y habilitado del compuesto.
- Indagar en procesos de **coextrusión con otros materiales** como el acero, en busca de obtener elementos integrales que proporcionen las facilidades de prefabricar elementos reforzados como castillos, cerramientos o viguetas.
- Realizar investigaciones referentes al **impacto en la gente (usuario) que habita** una construcción de plástico, la percepción a priori, y cuando ya se encuentran viviendo los espacios.
- El desarrollo y evolución de la **morfología y dimensiones del panel modular**, revisión y mejora en los **ensambles y sistema de anclaje**, con la finalidad de optimizar los procesos de habilitado y fabricación, ya que, el elemento que se presenta en este proyecto es una propuesta que tiene un potencial panorama de mejora.
- La aplicación de **materiales como acabados** sobre el material polimérico, como aplicación de pintura, recubrimientos, repellidos, y adhesión de mampostería, elementos pétreos, cerámicos, entre otros.
- Investigación y pruebas del material polímero-arcilla como **elemento a tensión** con posibles usos como refuerzo en sustitución del acero.
- Indagar la posibilidad de **sustituir elementos urbanos** como coladeras, bancas, mesas, ballas, entre otros, los cuales se fabrican con materiales metálicos o maderables.

Referencias

- Andreas, U. (1996). Failure criteria for masonry panels under in-plane loading. *Journal of the Structural Division*, 37-46.
- Aperador, W. B. (2015). Evaluación de las propiedades mecánicas de materiales compuestos elaborados a partir de cenizas volantes y polímeros reciclados. *Revista Ingenierías*, 75-91.
- Arias, C. &. (2017). Degradation of conventional and oxodegradable high density polyethylene in tropical aqueous and outdoor environments. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 137-147.
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación Introducción a la metodología científica*. Caracas, Venezuela: Episteme.
- Arias, j. A. (2009). Cuidando nuestros recursos a través de ecotecnias. Especies. *Revista sobre conservación y diversidad.*, 26-27.
- Art Chist. (12 de febrero de 2020). *Aislantes. Introducción*. Obtenido de <https://artchist.blogspot.com/2014/09/aislantes-introduccion.html>
- Askeland, D. R. (2004). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México: THOMSON.
- Awasthi A.K. Shivashankar M., M. S. (2017). Plastic solid waste utilization technologies: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1-13.
- Balestrini, M. (2006). *Como se elabora el proyecto de investigación: (para los Estudios Formulativos o Exploratorios, Descriptivos, Diagnósticos, Evaluativos, Formulación de Hipótesis Causales, Experimentales y los Proyectos Factibles*. Caracas: Consultores Asociados.
- Barluenga, G. (09 de Septiembre de 2015). *Entorno de publicación docente*. Obtenido de https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_profesores/prof142013/docencia
- Bloqueplas por Ecoplasso. (20 de Septiembre de 2020). *bloqueplas.com*. Obtenido de <http://bloqueplas.com/index.php/por-que-reciclar>
- Calderón, O. G. (2017). *Modificación de la resistencia de una arcilla plástica con nano-sílice*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Carrió, J. M. (2005). La evolución de los sistemas constructivos en la edificación, procedimientos para su industrialización. *Informes de la Construcción*, 37-54.
- Carrió, M. (2005). La evolución de los sistemas constructivos en la edificación procedimientos para su industrialización. *Informes de la construcción*, 38-54.
- CEMEX. (05 de abril de 2019). *¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto?* Obtenido de <https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto->
- Cicloplast. (15 de Septiembre de 2020). *La ruta del reciclado de plásticos*. Obtenido de <http://www.cicloplast.com/index.php?action=ruta-del-reciclado&subAccion=reciclado-envases>

- Conde, M. (2013). Polietileno. La fórmula 1 del Plástico. *Revista Ambiente Plástico*, 38-51.
- Connolly D., P. (2006). *La demanda habitacional, en Coulomb, René y Schteingart,*. México, D.F.: H. Cámara de Diputados, LIX Legislatura; UAM-Azcapotzalco; M.A. Porrúa.
- Corbusier, L. (1980). *El Modulor: Ensayo Sobre Una Medida Armónica a La Escala Humana Aplicable Universalmente a la Arquitectura Y a la Mecánic*. Barcelona: Poseidon.
- CORMA. (2007). *Manual de construcción de viviendas en madera*. Chile: Cormpación Chilena de la madera.
- D´Amico, F. C. (2000). *Arquitectura bioclimatica, conceptos básicos y panorama actual*. Madrid, España: Seminario de Arquitectura Integrada en su Medio Ambiente (SAIMA) de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Danhke, G. (1989). *La comunicación humana: ciencia social*. México D.F.: McGraw—Hill de México, 385—454.
- Daniel Roper Rago, A. C. (2013). *Construcción modular de viviendas y arquitectura*. Valencia, España: Dream dr.
- Deffis, A. (1994). *La casa ecológica autosuficiente para climas templado y frío*. Ciudad de México: Ed. Árbol.
- E. Flores, A. S. (2019). Compuestos poliméricos y sus aplicaciones - Polymeric compounds and their applications. *CienciAcierta*, 1-13.
- economiahoy.mx. (23 de mayo de 2019). *economiahoy.mx*. Obtenido de <https://www.economiahoy.mx/economia-eAm-mexico/noticias/9897432/05/19/Hay-rezago-en-la-oferta-de-vivienda-que-ofrece-el-Infonavit.html>
- Ecoplasso. (17 de julio de 2017). *Bloqueplas*. Obtenido de <https://bloqueplas.com/index.php/brickarp>
- El sol de Puebla. (2 de octubre de 2016). *Inventan en Puebla los Legoblock para construir casas de verdad*. Obtenido de <https://www.elsoldepuebla.com.mx/local/inventan-en-puebla-los-legoblock-para-construir-casas-de-verdad-835583.html>
- Española, R. A. (4 de diciembre de 2021). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/aislamiento>
- F. Chavarria, D. P. (2004). Comparison of nanocomposites based on nylon 6 and nylon 66. *Polymer*, 8501.
- F. Chavarria, R. S. (2004). Effect of melt processing conditions on the morphology and properties of nylon 6 nanocomposites. *Polymer Engineering and Science*, 1152.
- Fenosa. (2018). *Construcción sustentable: Subsidios y normatividad para la construcción*. México: Fenosa.
- Fernández, D. G. (2016). *Diseño de unidades de vivienda modular para ensamblar, utilizando sistemas prefabricados de construcción en seco*. Puebla: BUAP.

- Flores, L. y. (2001). Estudio analítico de estructuras de mampostería confinada. *Informe Técnico CENAPRED*.
- Flores, M. M. (2006). *Producción de nanocompuestos de polietileno de alta densidad y arcillas modificadas por extrusión utilizando un cabezal mezclador estatico*. Ciudad de México: UNAM.
- Franco Urquiza, E. M. (2009). Estructura general de las arcillas utilizadas en la preparación de nanocompuestos poliméricos. *Ingenierías*, 35-41.
- Gálvez, M. R. (2008). *VISIÓN GENERAL DE LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA EN MÉXICO*. Mexico D.F.: Asociación Nacional de Energía Solar. México,.
- Gobierno del Estado de México. (2019). *Plan Estatal de Desarrollo Urbano del Estado de México*. Toluca, Estado de México: Gobierno del Estado de México.
- Greenpeace. (2018). *Estudio sobre el impacto de la contaminación por microplásticos en peces de México*. Ciudad de México: Greenpeace.
- Hebel, D. W. (2014). *Building From Waste, recovered materials in architecture and construction*. Birkhäuser: Basel.
- Hernández, A. V. (2019). *Análisis y alternativas de los programas de vivienda sustentable en México*. Ciudad de México: UNAM.
- Herrera, J. (13 de enero de 2021). *Grupo en concreto*. Obtenido de 73.6 millones de mexicanos son excluidos del mercado formal de vivienda: <https://grupoenconcreto.com/73-6-millones-de-mexicanos-son-excluidos-del-mercado-formal-de-vivienda/>
- INEGI. (8 de Abril de 2015). *Encuesta intercensal*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/programas/intercensal/2015/default.html#Tabulados>
- INFONAVIT. (2018). *¿Qué funciona y qué no en la vivienda?, Diseño de una Metodología para la Identificación y Documentación de Buenas y Malas Prácticas*. Ciudad de México: INFONAVIT.
- INFONAVIT. (2020). *Manual de validación de atributos SISEVIVE Sistema de Evaluación de la Vivienda SISEVIVE-ECOCASA*. Ciudad de México: INFONAVIT.
- INFONAVIT. (31 de Marzo de 2021). *Proveedores externos*. Obtenido de Programa de INFONAVIT para Desarrolladores: https://portalmx.infonavit.org.mx/wps/portal/infonavit.web/proveedores-externos/para-tu-gestion/desarrolladores/programa-desarrolladores!/ut/p/z1/jZDNCoJQEEafpYXlnFHjYu00zBlpgySbTWjYTTcVqCW9fdLPishbs5vh nJnhA4llqIivGY-bTBRx3vU7Ynvmls6nI23peqjjemVvgIC3Dd_XY
- Interempresas. (03 de 01 de 2011). *Canales sectoriales*. Obtenido de Pástico: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/46508-La-arcilla-inspira-la-fabricacion-de-superplasticos.html>
- Justicia, F. R. (2019). *Estudio de nuevas tecnologías de la construcción con bloques de materiales plásticos reciclados*. Valencia: Universidad Politecnica de Valencia.

- King, B. (2000). *'Structural Properties of Alternative Buildings Materials'*, in Lynne, E. and Cassandra, A. *Alternative construction: contemporary natural building methods*. Canada: Wiley.
- Latre, A. B. (2019). *Estudio de los plásticos como material reciclado para la obtención de material de construcción*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- M. Mehrabzadeh, M. K. (2004). Melt processing of PA-66/clay, HDPE/clay and HDPE/PA-66/clay nanocomposites. *Polymer Engineering and Science*, 44.
- Martínez, M. Y. (2015). *Sistema constructivo modular con materiales alternativos que favorezca a la flexibilidad en la construcción de vivienda*. Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Meccano. (4 de diciembre de 2021). *Meccano, innovación en construcción*. Obtenido de <https://www.meccano.mx/>
- Menjívar, M. R. (2013). Arquitectura Bioclimática como parte fundamental para el ahorro de energía en edificaciones. *ING-NOVACIÓN.*, 123-133.
- miceeconew_sumario522.qxd. (2016). Ecotecnias, técnicas respetuosas del ambiente. *Sumario 552*, 70.
- miceeconew_sumario522.qxd. (16 de abril de 2016). *Ecotecnias, técnicas respetuosas del ambiente*. Obtenido de miceeconew_sumario522.qxd
- Moore, F. (2000). *Comprensión de las estructuras en la arquitectura*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- Nava, A. (22 de diciembre de 2020). *¿Sabías que cada habitante de la Ciudad de México tira 150 bolsas de plástico al año?* Obtenido de <http://www.cienciamx.com/index.php/sabias-que/16156-sabias-que-cada-habitante-de-la-ciudad-de-mexico-tira-150-bolsas-de-plastico-al-año#:~:text=Desechar%20150%20bolsas%20de%20pl%C3%A1stico,%3A%201%20350%2000%20000>).
- Organismo Nacional de Normalización Y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (2012). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – MAMPOSTERÍA – BLOQUES, TABIQUES O LADRILLOS Y TABICONES PARA USO ESTRUCTURAL –ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO*. Ciudad de México: ONNCCE.
- Organización de las Naciones Unidas. (14 de febrero de 2021). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. Obtenido de *Objetivos de desarrollo sostenible agenda 2030*: <https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/post-2015/sdg-overview/goal-12.html>
- Perdomo, G. (2002). PLÁSTICOS Y MEDIO AMBIENTE Gilberto. *Revista Iberoamericana Polímeros Perdomo*, 1-13.
- Pérez, B. D. (2017). *La participación del Arquitecto en la construcción de la vivienda sustentable*. Ciudad de México: UNAM.

- Pérez, B. D. (2017). *La participación del Arquitecto en la construcción de la vivienda sustentable*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pérez, C. E. (2020). Evolución de los sistemas de construcción industrializados con base en elementos prefabricados de hormigón. *Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras a la Ingeniería*, 1-7.
- Pérez-Pérez, A. L. (2016). El diseño de la vivienda de interés social. La satisfacción de las necesidades y expectativas del usuario. *Revista de Arquitectura*, vol. 18, núm. 1, 1-24.
- Poveda, J. A. (2011-2012). *Arquitectura Modular*. Murcia, España: IES Infante.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (06 de marzo de 2021). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de Agenda 2030:
<https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-11-sustainable-cities-and-communities.html>
- Pulido, M. E. (2009). *El papel del desarrollo sustentable en los grandes desarrollos de vivienda en México*. Ciudad de México: UNAM.
- R. Gendron, L. D. (1996). Residence time distribution in extruders determined by in-line ultrasonic measurements. *Advances in Polymer Technology*, 111.
- R.K. Shah, D. P. (2006). Organoclay degradation in melt processed polyethylene nanocomposites. *Polymer*, 8501.
- REDÓN, M. P. (2009). *Materiales Nanocompuestos Basados en Polietileno y Filosilicatos Laminares Obtenidos por Mezclado en Fundido. Estructura y Propiedades*. Castellón: Universitat Jaume.
- Rodríguez, M. V. (2015). *Materiales aislantes sostenibles*. Extremadura, España: Escuela Politécnica.
- Sagredo. (2017). *Polímeros compuestos basados en nanoestructuras de carbono para desarrollar materiales con memoria de forma*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Sampieri, R. H. (2003). *Metodología de la investigación*. México D.F.: Mc Graw Hill.
- Schteingart, M. y. (2006). *El marco legislativo, programático e institucional*. Ciudad de México: Porrúa/UAM-Azcapotzalco/Cámara de Diputados-LIX Legislatura.
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, Comisión Nacional de Vivienda. (2017). *Código de Edificación de la Vivienda*. Ciudad de México: Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano, Comisión Nacional de Vivienda.
- Secretaría de Desarrollo Agrario, T. y. (2020). *Programa Territorial Operativo de la zona Norte del Valle de México*. Ciudad de México: Gobierno de México.
- Secretaría de medio ambiente de la Ciudad de México. (2019). *cienciamx*. Obtenido de <http://www.cienciamx.com/index.php/sabias-que/16156-sabias-que-cada-habitante-de-la-ciudad-de-mexico-tira-150-bolsas-de-plastico-al-ano>

Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2019). *cienciamx*. Obtenido de <http://www.cienciamx.com/index.php/sabias-que/16156-sabias-que-cada-habitante-de-la-ciudad-de-mexico-tira-150-bolsas-de-plastico-al-ano>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo*. Ciudad de México: INECC Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

Secretario de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. (2021). *REGLAS de Operación del Programa de Vivienda Social para el ejercicio fiscal 2021*. Ciudad de México: Diario oficial de la Federación.

SEMARNAT. (2017). *Vivienda Sustentable en México*. Ciudad de México: Gobierno Federal.

Solis, A. S. (2019). Procesamiento y desempeño de materiales nanocompuestos poliméricos. *Ingeniería de polímeros, procesamientos y reología*, 28-61.

Strike, J. (1991). *De la Construcción a los proyectos, la influencia de las nuevas técnicas en el diseño arquitectónico*. Oxford: Reverté.

Suero, J. C. (2007). *Arcillas: del barro a la Nanotecnología*. Sevilla: Real Academia de Sevilla de Ciencias.

Supported NAMA for Sustainable Housing in Mexico. (2014). *Mitigation Actions and Financing Packages*. Obtenido de http://dev.another.co/giz/download/biblioteca_pronama/nama_vivienda_existente/nama_vivien_da_existente_financiamiento/GIZ%202014%20%20Mitigation%20Actions%20and%20Financing%20Packaging.pdf

T.D. Fornes, P. Y. (2001). Nylon 6 nanocomposites: the effect of matrix molecular weight. *Polymer*, 42.

Torres, R. (2006). *La producción social de vivienda en México*. México D.F.: Coalición Internacional para el Hábitat.

Torres, R. E. (2014). *Uso de pet postconsumo como agregado para la fabricación de tabicón*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Villanueva. (20 de Julio de 2020). *El sustituto del biodegradable de uniceal que creó este*. Obtenido de <https://tec.mx/es/noticias/nacional/emprendedores/el-sustituto-biodegradable-de-uniceal-que-creo-este-mexicano>

W. Lertwimolnun, B. V. (2006). Effect of processing conditions on the formation of polypropylene/organoclay nanocomposites in a twin screw extruder. *Polymer Engineering and Science*, 46.

Índice de Tablas y figuras

Fig. 1 Diagrama del proyecto de investigación	11
Capítulo I	
Fig. 1.1 Estrategias de evaluación energética en edificaciones	13
Fig. 1.2 Orientación adecuada de una edificación	16
Fig. 1.3 Sembrado general de Desarrollo de viviendas	17
Fig. 1.4 Conjunto Habitacional de interés social en Xalapa México	18
Fig. 1.5 Diagrama de ejemplos de ecotecnias	18
Fig. 1.6 Diagrama de ejemplos de ecotecnologías	19
Fig. 1.7 Categorización de la vivienda sustentable por rubro	21
Fig. 1.8 Áreas de Desarrollo Sustentable	23
Tabla 1.1 Clasificación de la vivienda por precio promedio	25
Fig. 1.9 Esquema general de mercado habitacional en México	27
Fig. 1.10 Créditos otorgados por tipo de vivienda al 31 de enero de 2021	29
Fig. 1.11 Proyección de Créditos Hipotecarios al 2030	31
Fig. 1.12 Esquema Operativo Hipoteca Verde	32
Fig. 1.13 Modelo de sustentabilidad del Programa SISEVIVE - Eco casa	34
Fig. 1.14 Modelo de indicador de Desempeño Global – IDG	35
Fig. 1.15 Calificación de indicador de Desempeño Global - IDG	36
Fig. 1.16 Esquema general de proceso de evaluación DEEVI	37
Tabla 1.2 Criterio de clasificación de componente de envolvente térmica	38
Fig. 1.17 Esquema de envolvente térmica de un edificio	39
Tabla 1.3 Variables necesarias para calcular el coeficiente global de transferencia de calor para cálculo de edificio proyectado. Superficies homogéneas	40
Fig. 1.18 Esquema de pérdida de calor por envolvente de la vivienda	42
Fig. 1.19 Principales zonas climáticas por entidad federativa	43
Fig. 1.20 La importancia de un buen aislamiento térmico	44
Fig. 1.21 Esquema de medidas del cuerpo Modulo	46
Tabla 1.4 Diferencias entre Arquitecturas eficientes	48
Fig. 1.22 Sistema constructivo modular tipo lego	49
Fig. 1.23 Vivienda construida con sistema constructivo Brickarp	50
Fig. 1.24 Vivienda construida con sistema constructivo de concreto tipo Mecano (Molde)	51
Fig. 1.25 Despiece de una construcción prefabricada	52
Fig. 1.26 Croquis de muro de mampostería confinada	53
Fig. 1.27 Croquis de muro de mampostería con castillos ahogados en alvéolos	53
Fig. 1.28 Elemento sometido a flexión	54
Fig. 1.29 Elemento sometido a compresión	54
Fig. 1.30 Configuración del ensayo de resistencia a compresión	55
Fig. 1.31 Ensayes para obtener la resistencia a compresión de la mampostería: Pilas, Murete y Valores indicativos	56
Fig. 1.32 Elemento sometido a un esfuerzo cortante	56
Fig. 1.33 Deficiencia en procesos constructivos de mampostería	57
Fig. 1.34 Construcción de viviendas modulares	58
Fig. 1.35 Ejemplo de sistema prefabricado cerrado	59
Fig. 1.36 Sistema común de marcos con sus elementos	61
Fig. 1.37 Sistema de empalme o espiga cuadrada	62

Fig. 1.38 Tipos de uniones	63
Fig. 1.39 Ciclo de vida de un material	64
Fig. 1.40 Clasificación de materiales alternativos	65

Capítulo II

Fig. 2.1 Síntesis de los monómeros y polímeros	68
Fig. 2.2 Segmentación por proceso y uso de los plásticos	69
Fig. 2.3 Clasificación de plásticos por tipo de consumo	70
Fig. 2.4 Clasificación por código de color de resinas plásticas	72
Fig. 2.5 Tipos de plásticos y cómo se reciclan	73
Fig. 2.6 Porcentaje de uso de plásticos en México	74
Fig. 2.7 Estructura de HDPE	75
Fig. 2.8 Estructura del monómero del etileno y del polietileno	76
Tabla 2.1 Variación de propiedades en función de la densidad	76
Tabla 2.2 Variación de propiedades en función del peso molecular	77
Tabla 2.3 Propiedades mecánicas y reológicas del polietileno de alta densidad	78
Fig. 2.9 Segmentación por tipo de producto de PE en México 2013	79
Tabla 2.4 Generación total y per Cápita de residuos sólidos urbanos	80
Fig. 2.10 Grafica de origen de residuos por día en la CDMX	81
Fig. 2.11 Reciclaje primario o re-extrusión y sus etapas	84
Fig. 2.12 Reciclaje secundario o mecánico	84
Fig. 2.13 Etapas generales del reciclaje	85
Fig. 2.14 Descripción de las etapas del reciclaje	87
Fig. 2.15 Esquema general del proceso de extrusión del plástico	89
Fig. 2.16 Proceso de fabricación Byfusión	90
Fig. 2.17 Proceso de habilitado Conceptos Plásticos	91
Fig. 2.18 Bloques de concreto y plástico reciclado	92
Fig. 2.19 Relación de tamaños entre nanomaterial, balón y planeta	93
Fig. 2.20 Arcilla esmectita del tipo montmorillonita	94
Fig. 2.21 Tipos de integración de compuestos de matriz polimérica	96
Fig. 2.22 Configuración de doble usillo para extrusión	98
Fig. 2.23 Representación esquemática de extrusora	99
Fig. 2.24 Mecanismo de rotura de agregados por mezclado en fundido según Fornes	99

Capítulo III

Fig. 3.1 Esquema de las estructuras de arcilla intercalada y exfoliada	103
Fig. 3.2 Esquema general de las etapas del proceso experimental	104
Fig. 3.3 Descripción e imagen del polímero A. Polietileno de densidad reciclado (HDPEr – lavado y triturado)	105
Tabla 3.1 Valores típicos de la resina Polímero A	105
Fig. 3.4 Descripción e imagen del polímero B. Polietileno de densidad reciclado (HDPEr – lavado, triturado y peletizado color negro)	106
Tabla 3.2 Valores típicos de la resina Polímero tipo B	106
Fig. 3.5 Descripción e imagen del polímero C. Polietileno de densidad (resina HDPE)	107
Tabla 3.3 Valores típicos de la resina tipo C	107
Fig. 3.6 Descripción e imagen de la probeta D. Polietileno de alta densidad reciclado (HDPEr – lavado, triturado y extruido)	108
Fig. 3.7 Descripción e imagen de arcilla modificada	109

Fig. 3.8 Compatibilización del nano compuesto de HDPEr	110
Fig. 3.9 Descripción e imagen de agente de acoplamiento	111
Tabla 3.4 Valores típicos de agente de acoplamiento	111
Fig. 3.10 Extrusora doble husillo COPERION ZSK 18 ML	112
Tabla 3.5 Ficha de datos técnicos de Extrusora/Husillo alimentador a dos árboles	112
Fig. 3.11 Peletizador de filamentos COPERION SP 50 pure	113
Tabla 3.6 Ficha de datos técnicos de Extrusora/Husillo alimentador a dos árboles	113
Fig. 3.12 Polietileno de alta densidad reciclado HDPEr	114
Fig. 3.13 Proceso de extrusión de muestras con base en HDPEr	115
Fig. 3.14 Diagrama del proceso de integración de materiales en la extrusora	116
Fig. 3.15 Imágenes del proceso de integración de materiales en la extrusora	117
Fig. 3.16 Diagrama del proceso de extrusión, enfriamiento y peletizado del material compuesto	117
Fig. 3.17 Imágenes del proceso de integración de materiales en la extrusora	118
Fig. 3.18 Imagen de la pantalla de la extrusora con los parámetros de procesamiento del material	118
Fig. 3.19 Probetas de tensión material matriz (de referencia)	119
Tabla 3.7 Porcentaje de dosificación del material compuesto	120
Fig. 3.20 Dimensiones de probetas de tensión	121
Fig. 3.21 Equipo de inyección para pruebas de tracción	122
Fig. 3.22 Equipo de inyección para pruebas de tracción	123
Fig. 3.23 Esquema de ensayo de tracción	124
Fig. 3.24 Pruebas de tensión en equipo universal	124
Fig. 3.25 Esquema de parámetros mecánicos de tracción en polímeros termoplásticos (curva esfuerzo-deformación)	125
Fig. 3.26 Esquema de comportamiento del material polimérico en el proceso de esfuerzo-deformación	126
Fig. 3.27 Imágenes del proceso de fabricación de elementos por medio de moldeo	128
Fig. 3.28 Molde para fabricar prototipo de panel	129
Fig. 3.29 Saturación de molde con material compuesto	129
Fig. 3.30 Calentamiento del molde en horno	130
Fig. 3.31 Desmoldeo de prototipo de panel	130
Fig. 3.32 Prototipo de panel modular	131

Capítulo IV

Fig. 4.1 Planteamiento general del proceso de diseño del panel modular prefabricado	133
Fig. 4.2 Parámetros de diseño en panel modular	134
Fig. 4.3 Elementos de extrusión lineal en plásticos	135
Fig. 4.4 Proceso de extrusión por moldeo	136
Fig. 4.5 Planta de panel modular, sección de perfil plástico	137
Fig. 4.6 Esquema de refuerzo horizontal en muro	137
Fig. 4.7 Alzados de panel modular	138
Fig. 4.8 Detalle de alojamiento de instalaciones	138
Fig. 4.9 Componentes del sistema constructivo del panel modular	139
Fig. 4.10 Sistema de anclaje por medio de platinas metálicas y tornillería	140
Fig. 4.11 Despiece de una recámara con los componentes del sistema de anclaje	141
Fig. 4.12 Modelo de panel modular para simulación	142
Tabla 4.1 Parámetros de resistencia a la compresión	143
Tabla 4.2 Propiedades del material polimérico	144

Fig. 4.13 Simulación y análisis estático de panel	144
Fig. 4.14 Modelo de recamara con base en panel modular para simulación	145
Fig. 4.15 Simulación y análisis estático de recamara	145
Fig. 4.16 Proceso de fabricación de probeta térmica	146
Fig. 4.17 Proceso de prueba para determinar el coeficiente de conductividad térmica del material compuesto	147
Fig. 4.18 Cámara termográfica Testo 875	147
Fig. 4.19 Gráfica de comportamiento térmico de cámara adiabática	148
Tabla 4.3 Lecturas de compuesto HDPE-arcilla	148
Tabla 4.4 Perdidas de calor de poliestireno	149
Tabla 4.5 Coeficiente térmico del compuesto de Matriz polimérica reforzado con nanoarcillas	150
Fig. 4.20 Simulación y análisis térmico de panel	150
Fig. 4.21 Simulación y análisis térmico de recamara	151
Fig. 4.22 Render de prototipo Sienna	151
Fig. 4.23 Proyecto arquitectónico prototipo – plantas	152
Fig. 4.24 Proyecto arquitectónico prototipo – fachadas	152
Fig. 4.25 Proyecto arquitectónico prototipo – cortes A y B	153
Fig. 4.26 Proyecto arquitectónico prototipo – corte C	153
Fig. 4.27 Proyecto arquitectónico prototipo – corte D	154
Tabla 4.6 Comparativa de rendimiento de materiales para muros	155
Fig. 4.28 Rendimiento del panel modular	156
Fig. 4.29 Esquema de habilitado de componentes	157
Tabla 4.7 Comparativa de tiempo y costo de construcción de vivienda en serie	158
Tabla 4.8 Tabla comparativa de propuestas de bloques con base en plástico reciclado	159
Fig. 4.30 Esquema de regulación de temperatura del panel modular	161
Fig. 4.31 Prueba contra fuego de material plástico	162
Tabla 4.9 Comparativa de las propiedades de materiales de construcción	163

Capítulo V

Fig. 5.1 Diagrama esfuerzo-deformación de materiales dúctiles	166
Fig. 5.2 Gráfica esfuerzo-deformación mezclas tipo B	167
Tabla 5.1 Propiedades mecánicas de la familia de probetas B	168
Fig. 5.3 Gráfica esfuerzo-deformación mezclas tipo C	169
Tabla 5.2 Propiedades mecánicas de la familia de probetas C	169
Fig. 5.4 Proceso de extrusión de material compuesto	170
Fig. 5.5 Ejemplos de secciones de husillos	171
Fig. 5.6 Diagrama de composición del husillo	172
Fig. 5.7 Esquema de dimensiones del husillo	173
Fig. 5.8 Parámetros de extrusión del compuesto	174
Fig. 5.9 Probetas de segunda fase de experimentación	174
Fig. 5.10 Gráfica esfuerzo-deformación mezclas tipo B2	174
Tabla 5.3 Propiedades mecánicas de la familia de probetas B2	175
Fig. 5.11 Gráfica esfuerzo-deformación mezclas tipo C2	175
Tabla 5.4 Propiedades mecánicas de la familia de probetas C2	176
Tabla 5.5 Comparativa de resultados de pruebas mecánicas	177
Fig. 5.12 Gráfica comparativa de resultados pruebas mecánicas	179
Tabla 5.6 Parámetros de resistencia a la compresión de piezas de mampostería	180
Figura 6.1 Tabla comparativa de las ventajas y desventajas del panel modular	184

Anexos

Materiales **alternativos**, aplicaciones en la **vivienda**

Los materiales alternativos forman parte importante de las acciones en mira hacia un **desarrollo sustentable**, con el uso de materiales no convencionales utilizando recursos amigables con el medio ambiente, así como, nuevas técnicas de producción y procesos constructivos más **eficientes** con el objetivo de reducir el impacto al medio ambiente y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Impermeabilizante de losas con **caucho de llantas**

El impermeabilizante se fabrica con residuo de **llantas recicladas**, las propiedades del caucho hacen que este material no se degrade con el agua ni con los rayos del sol, además de evitar que las llantas terminen saturando los tiraderos y al final de su vida se queman emitiendo gases al ambiente.

Madera transparente en ventanas

Este material podría ser un posible sustituto del **vidrio** que se usa actualmente en la construcción en casi todos los sectores. La madera se vuelve transparente, como el vidrio, pero también tiene las propiedades del plástico: se dobla al impacto y se deshace como la madera en lugar de romperse en trozos afilados como el vidrio.

Tejas de plástico y caucho reciclado

Existen investigaciones enfocadas a integrar **materiales reciclados** en tejas más livianas, flexibles, resistentes al granizo, con buen aislamiento e impermeabilidad. Además de utilizar estos materiales producto de residuos, se plantea que si el costo sea menor al de los materiales utilizados actualmente para este fin.

Muebles de jardín con botellas de plástico

El **reciclaje de plásticos** de un solo uso como el PET, PAD o el PVC, han permitido integrar a un mercado de fabricación de nuevos elementos como muebles de jardín o contenedores para animales con el objetivo de revalorizar estos residuos considerados desecho.

Deck's y vigas de **cáscara de café - plástico**

Otro material variante de los **WPC (Wood plástic composite)**, son los compuestos a base de las cáscaras de café, estos son residuos directos de la producción de café, por lo que, se recupera a partir de la molienda y se combinan con polímeros de plástico para formar este material, el cual es un sustituto directo de la madera.

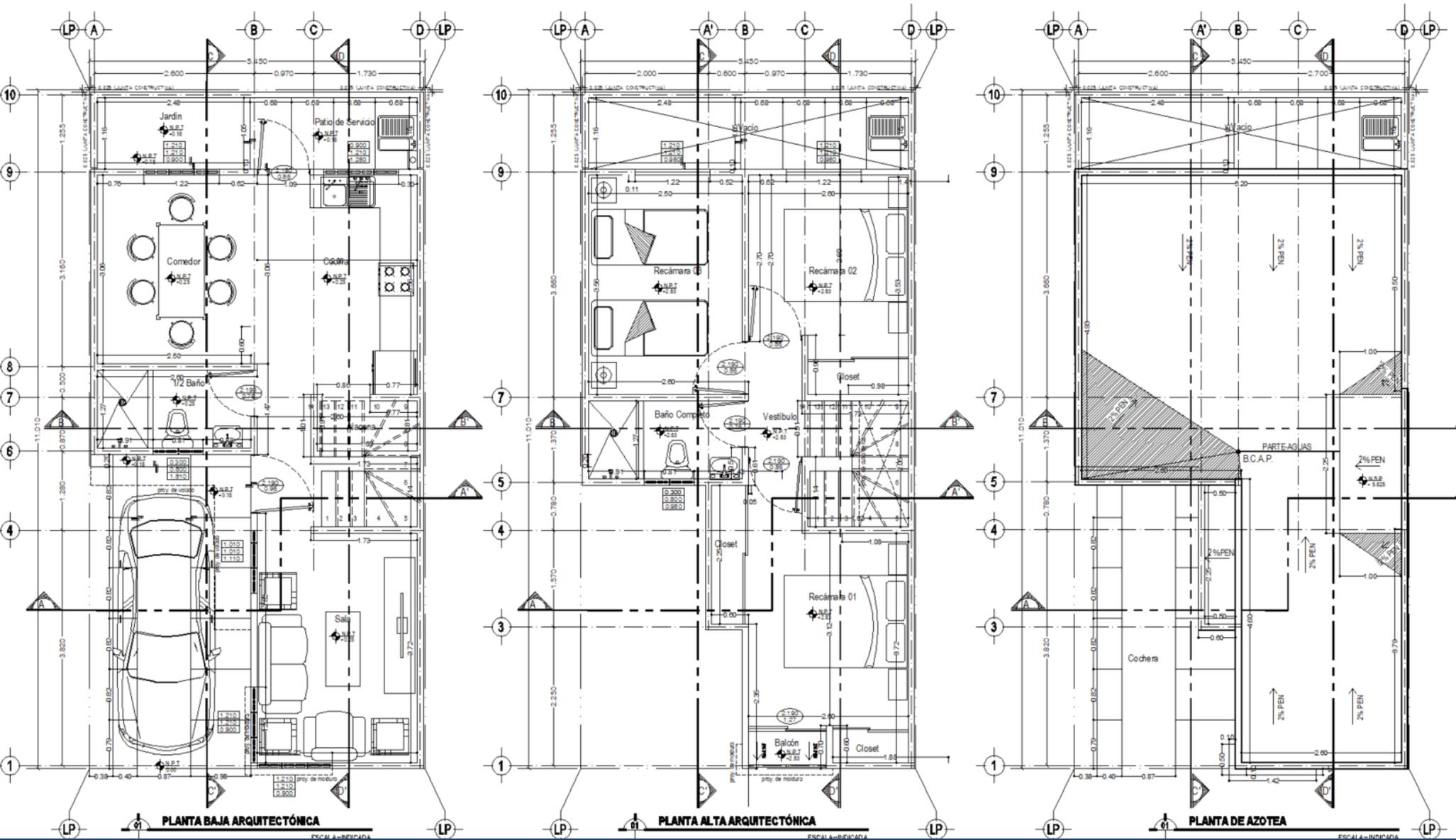
Láminas de plástico conductoras de calor

Un sistema de **calefacción integrado** en las baldosas del piso puede sustituir a los sistemas de acondicionamiento que utilizan tuberías de agua bajo el suelo. Se pueden utilizar láminas de plástico que sirven como conductores, los cuales actúan como resistencias, regulando su temperatura con el

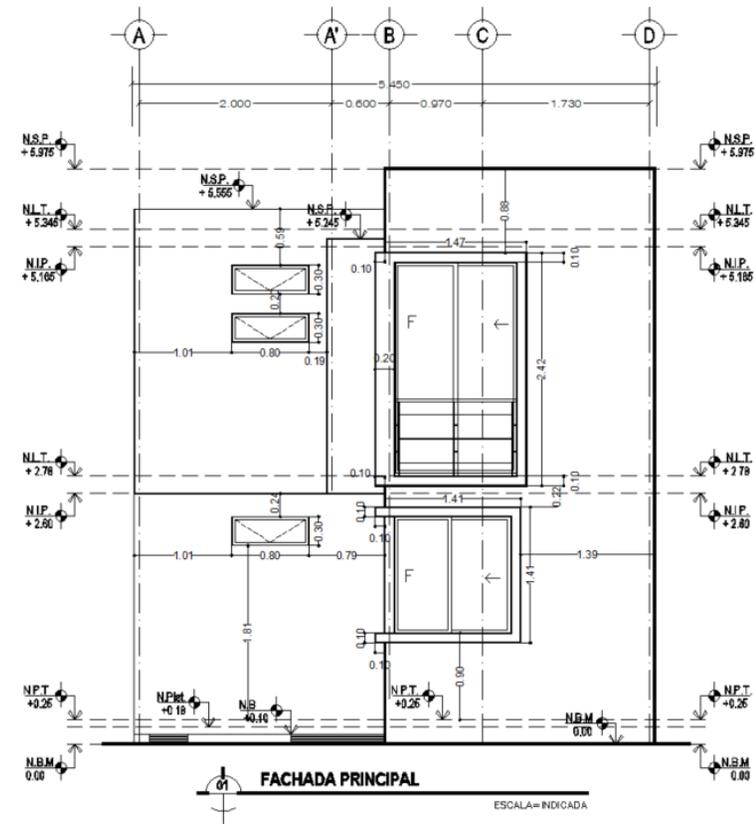
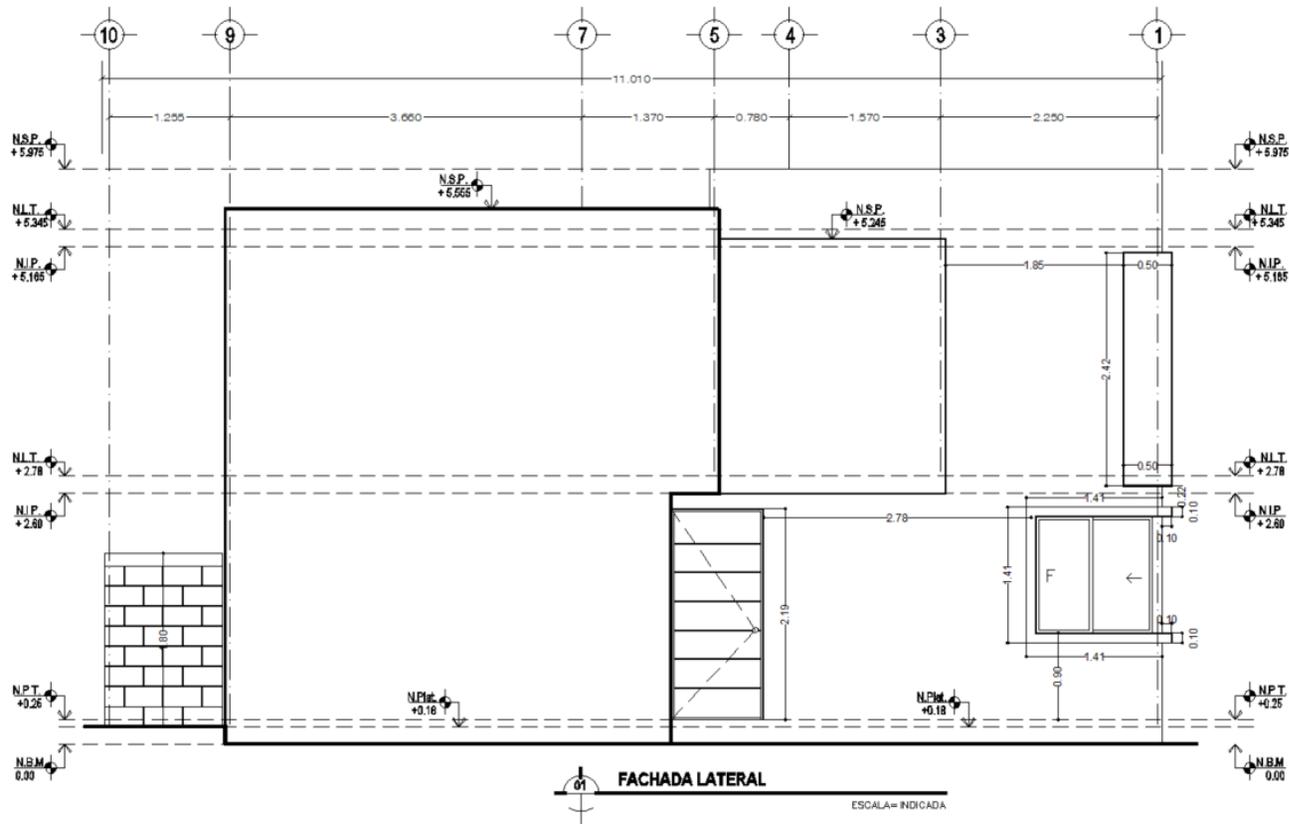
Nanomateriales para mejorar las propiedades de los materiales

Se investigan diversas soluciones en **nano materiales** con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas y térmicas de materiales como pinturas, bloques, paneles para paredes, techos y suelos, con materiales plásticos reciclados (matriz) y refuerzo de arcilla o fibras con lo que mejora el comportamiento de estos materiales en comparación con los materiales y procesos constructivos tradicionales..

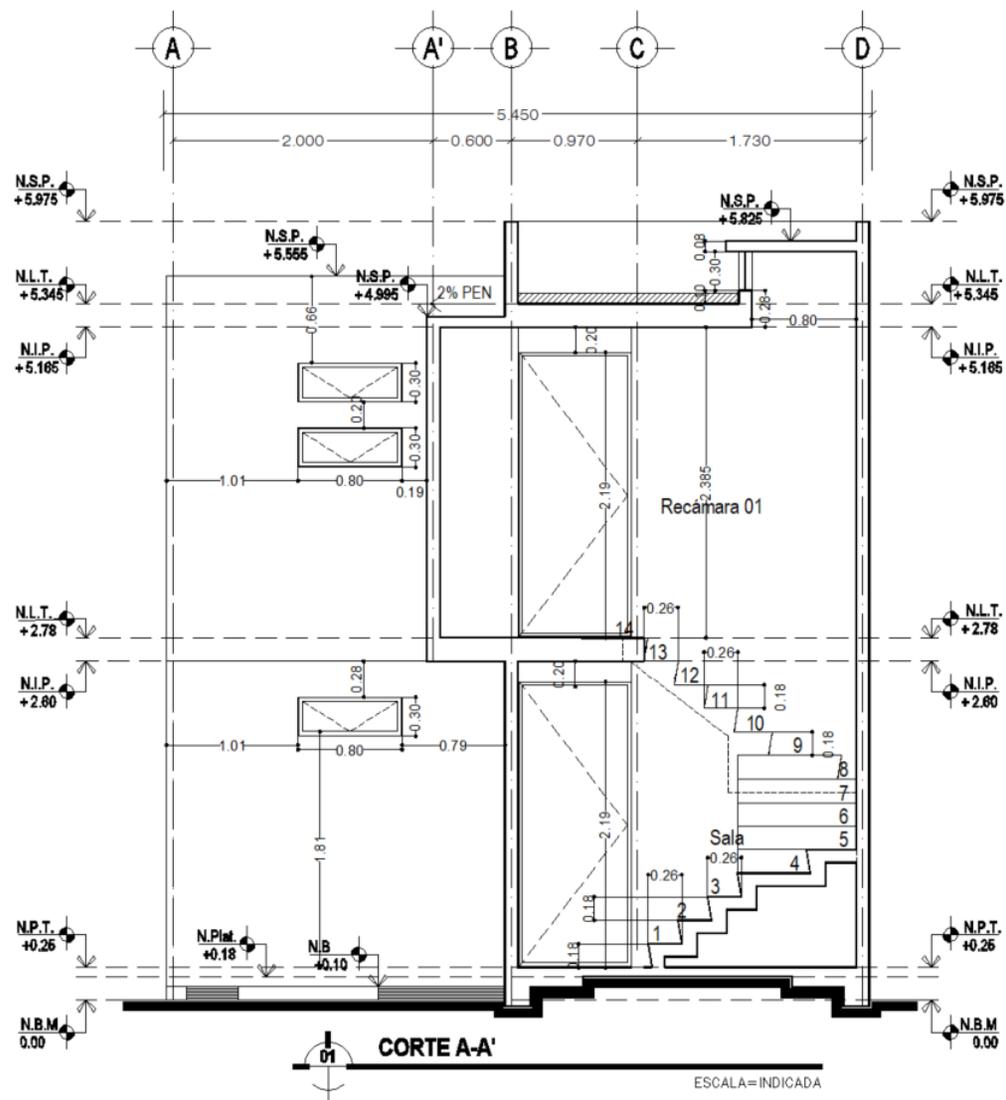
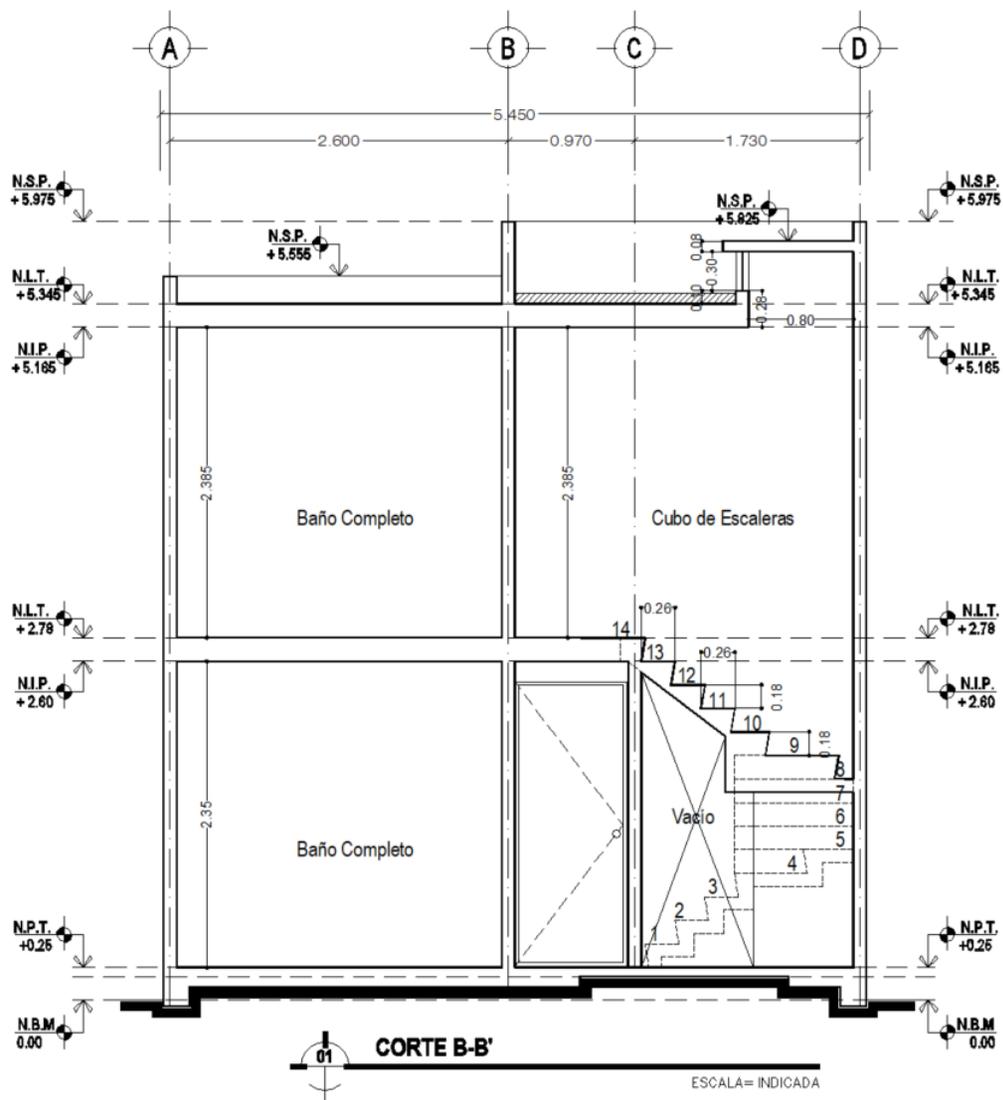
Proyecto Arquitectónico prototipo de vivienda - Plantas



Proyecto Arquitectónico prototipo de vivienda – Fachadas



Proyecto Arquitectónico prototipo de vivienda – Cortes A y B



Proyecto Arquitectónico prototipo de vivienda – Cortes C y D

