



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de un material compuesto a base
de agregados pétreos y resina polimérica**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Morales Hernández Esteban

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dra. Magdalena Trujillo Barragán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



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.

AGRADECIMIENTOS:

La presente Tesis es un gran esfuerzo, en la cual, participaron varias personas e instituciones de diferentes maneras, ya sea apoyando, corrigiendo, alentando o proveyendo recursos o instalaciones.

Quiero agradecer en primer lugar a las instituciones que han hecho posible la realización del presente trabajo de tesis, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) por el proyecto CONACYT 230045 “Desarrollo de una planta piloto para la manufactura de prefabricados de policoncreto reforzados con fibra de vidrio de alta resistencia”.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (**UNAM**), por haberme brindado una formación integral durante mis estudios de licenciatura, así como también al proyecto **PAPIME** PE112916 “Desarrollo de los apuntes de procesamiento de plásticos para el campo del conocimiento en manufactura de la Facultad de Ingeniería” por el apoyo financiero para realizar este trabajo.

Agradezco especialmente a mi tutora y directora de tesis la Dra. Magdalena Trujillo Barragán, por su orientación, motivación, dedicación y compromiso que permitieron terminar este trabajo.

A mis padres Ma. De los Ángeles Hernández Pacheco y Javier Morales Zamorano, les agradezco su guía, su confianza, su apoyo, su ejemplo y su cariño.

A mis abuelos Ofelia Pacheco Bautista y Andrés Hernández García, les agradezco por su amor incondicional, su cuidado, su apoyo y su presencia en toda mi vida.

A mi hermano Daniel Morales Hernández, le agradezco sus palabras de aliento, sus regaños y enseñanzas, su conocimiento compartido y su respaldo en todo momento, a toda mi familia, tíos, primos y todas aquellas personas que me acompañaron y alentaron en mi estancia universitaria, pues gracias a todo eso soy la persona de hoy, esta tesis es suya.

Índice

1.-ESTADO DEL ARTE.	4
2.-TIPOS DE CONCRETO POLIMÉRICO.	14
3.-EVALUACIÓN DE MUESTRAS SOBRE MATERIALES DISPONIBLES.....	19
3.1.-PRUEBA DE COMPRESIÓN.....	19
3.2.-PRUEBA DE FLEXIÓN.	20
3.3.-GELIFICACIÓN Y PROPORCIÓN DE CATALIZADOR.....	21
3.4.- ELABORACIÓN DE PASTA CEMENTANTE.....	21
3.5.-ELIMINACIÓN DE ESPACIOS VACÍOS.	22
4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.	24
5.-PROPUESTA DE DISEÑO PARA UN NUEVO CONCRETO POLIMÉRICO.	34
6.-ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES MECÁNICAS.....	36
7.-ANÁLISIS DE COSTO DE LA MATERIA PRIMA.....	37
8.-ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40
9.-CONCLUSIONES.....	41
10.-BIBLIOGRAFÍA.....	42

DISEÑO DE UN MATERIAL COMPUESTO A BASE DE AGREGADOS PÉTREOS Y RESINA POLIMÉRICA.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde hace muchos años la industria de la construcción ha usado el concreto con el llamado cemento Portland en todos los ámbitos posibles, este material compuesto de cemento, agua, arenas, gravas y varillas puede presentar deficiencias en varias aplicaciones novedosas ya que sus propiedades mecánicas y físicas no son las suficientes para satisfacer el avance industrial y las nuevas aplicaciones que se le dan a este tipo de materiales [1]. Es por eso que como respuesta a dichas necesidades se comenzó a utilizar el concreto polimérico que consta básicamente de una resina polimérica, arenas y gravas que juntas forman un sólido que presenta características mecánicas y físicas superiores a las del concreto Portland convencional.

El concreto Portland sigue siendo el más usado para la construcción de puentes y edificios dado que su costo es mucho menor que el del concreto polimérico, sin embargo, este último es utilizado mayormente en prefabricados como son: ductos y tuberías, cisternas, pozos de visita, coladeras, soportes de maquinaria pesada, pisos y cocinas, etc.

Si bien las aplicaciones del concreto polimérico son muchas, las propiedades y materiales usados cambian dependiendo del uso que se requiera pues la industria demanda mejoras en sus materiales día con día.

Por ello en este trabajo se propone rediseñar un material que satisfaga las necesidades de ciertos sectores de la industria de la construcción.

INTRODUCCIÓN.

La evolución de los materiales a través de los años ha permitido tener mejoras en uso de distintos ámbitos o áreas, la industria de la construcción no es la excepción. El concreto en particular es un material que se ha empleado para la construcción desde que se tuvo el concepto de modernización, con él se han construido grandes edificaciones, monumentos, casas, puentes caminos, etc. Sin embargo, en las últimas décadas y con el fin de cambiar las propiedades de este material, los componentes para formar al concreto han sido estudiados.

Por ello, en este trabajo se analiza el efecto de los agregados pétreos en las propiedades del concreto polimérico (CP), en la primera parte se presenta una breve historia del concreto hasta llegar al concreto polimérico, así como las propiedades mecánicas típicas de ambos.

En la segunda parte, se realizó una caracterización de propiedades mecánicas del concreto polimérico en diferentes proporciones de resina-agregados. Los resultados mostraron que ni la compactación ni el tratamiento térmico para el curado del CP cambiaron su resistencia a la compresión, por lo cual las pruebas a flexión solo se realizaron al concreto polimérico original.

La tercera parte de este trabajo se propuso evaluar el efecto que tiene el catalizador sobre la resina para mejorar los tiempos de producción manteniendo las propiedades requeridas, se optimiza el contenido de resina mediante el diseño de la pasta cementante propuesto por Lachemi M. [2] ya que los concretos poliméricos tienen entre un 10% y un 15% de contenido en peso. Se disminuyó el contenido de vacíos que se genera entre los agregados pétreos mediante el método de “espacios vacíos” que establece la norma ASTM C29 para garantizar la menor cantidad de aire dentro de la mezcla y mejorar las propiedades mecánicas.

Finalmente se realizaron pruebas de compresión y flexión al diseño propuesto y se observó un aumento del 20% en la resistencia a la compresión usando una menor cantidad de resina.

OBJETIVOS.

- 1.- Diseñar un material compuesto a base resina polimérica y agregados pétreos que mejore las propiedades mecánicas comparadas con algunas aplicaciones de concreto ya conocidas
- 2.-Determinar la mejor relación resina-catalizador para la formación del concreto polimérico.
- 3.-Evaluar las propiedades mecánicas de flexión y compresión para el material compuesto elaborado.

1.-ESTADO DEL ARTE.

CEMENTO PORTLAND Y LA INTRODUCCIÓN DEL CONCRETO POLIMÉRICO.

Desde la antigüedad se ha visto la necesidad de construir estructuras y edificaciones que son necesarias para la vida del ser humano, éstas son cada vez más grandes y pesadas lo cual se ha requerido que el ser humano este en la constante innovación y perfeccionamiento de sus técnicas y materiales para la construcción, si bien los antiguos lograban edificar con morteros que obtenían de diferentes mezclas de arcilla, barro, cal, etc. Éstas resultaban muy inconsistentes y débiles.

En el año 1756 un ingeniero inglés John Smeaton (1724-1792) encuentra las proporciones para los primeros cementos, fue pionero en el uso de la cal hidráulica que es una forma de cemento que se pone bajo el agua. Es importante en la historia, redescubrimiento y desarrollo del cemento moderno, porque identificó los requisitos de composición necesarios para obtener la "hidraulicidad" en la cal, trabajo que condujo en última instancia a la invención del cemento Portland. El cemento Portland llevó al resurgimiento del hormigón como un material de construcción moderno, en gran parte debido a la influencia de Smeaton.

El cemento Portland fue inventado en 1824 en Inglaterra por el constructor Joseph Aspdin (1778-1855) es un cemento hidráulico que cuando se mezcla con áridos, agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada hormigón. El cemento Portland el más usual en la construcción y es utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón, también es llamado concreto en varias partes Hispanoamérica. Como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes [3].

Para la fabricación del cemento Portland se usan minerales ricos en óxido de calcio (CaO), sílice, alúmina y oxido de hierro como materia prima, estos minerales son sometidos a calcinación a una temperatura aproximada de 1400°C lo que provoca que se formen óxidos más complejos, a este material resultante se le conoce como Clinker que junto con el CaO que no reaccionó alcanzan un equilibrio. En términos químicos los componentes principales del cemento Portland son:

Tabla 1. Principales componentes del cemento Portland [5].

Nombre del componente	Composición del oxido	Porcentaje aproximado
Silicato tricálcico	3CaO SiO_2	51%
Silicato bicálcico	2CaO SiO_2	26%
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$	11%
Otros	-	12%

Los otros componentes del cemento Portland son en menor proporción el MgO, TiO₂, Mn₂O₃, K₂O y Na₂O, aunque ocupan un porcentaje mínimo del cemento el MgO y K₂O conocidos como álcalis, suelen reaccionar con algunos agregados pétreos provocando su desintegración trayendo como consecuencia una pérdida de propiedades mecánicas del concreto.

En la figura 1 se esquematiza un endurecimiento progresivo en el cemento: (a) partículas de agregados (C) dispersas en agua (W); (b) la reacción de hidratación comienza después de pocos minutos, formando un gel de sílice (G) alrededor de las partículas de clinker; (c) después de algunas horas los productos de la reacción (R) comienzan a agolparse, con lo que la mezcla se rigidiza; (d) después de que ha transcurrido el tiempo suficiente, los productos de la reacción (R) son continuos y el endurecimiento está en proceso (Thornton,1987) [5].

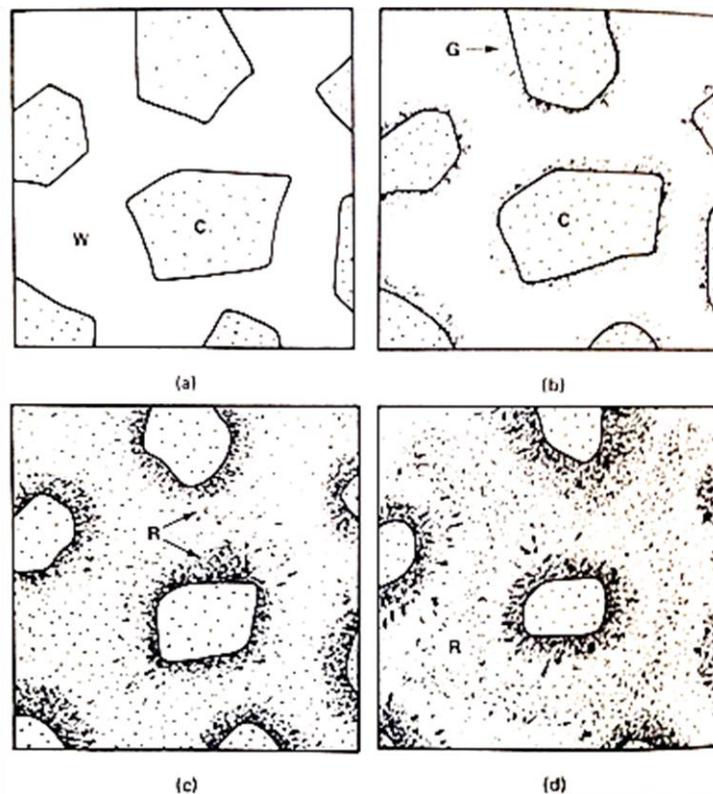


Fig. 1 Esquema de la reacción de endurecimiento del concreto [5].

Hasta este punto se conoce la base y componentes del cemento Portland, pero es necesaria la hidratación del cemento para obtener las propiedades enlazantes que nos permitan adherir los agregados pétreos, los cuales ocupan hasta tres cuartas partes del volumen del concreto, la mezcla de estos tres elementos nos darán la masa sólida y dura que se necesita, cuando el

cemento entra en contacto con el agua los silicatos y aluminatos presentes forman productos de hidratación los cuales con el tiempo presentan dureza y firmeza en el producto final[1].

En la siguiente tabla se muestran valores de resistencia a la compresión para diferentes tipos de cemento Portland, cabe resaltar que la resistencia del material aumenta conforme pasa el tiempo, es decir después de 28 de días la mezcla llega a sus valores máximos durante el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad.

Tabla 2. Resistencia a la compresión de varios tipos de cemento Portland [5].

Tipo de cemento Portland	Resistencia mecánica 3 días N/mm²	Resistencia mecánica 28 días N/mm²
Compuesto resistente a los sulfatos	22	34
Compuesto alto desempeño	20	30
Cemento Portland blanco	20	50
Cemento Portland mortero	4.4	7.8

En el acontecer diario, se usan diferentes tipos del cemento Portland dependiendo del uso que se requiera en la construcción, sin embargo, la morfología del concreto es la misma, es decir, el material no deja de presentar alta porosidad, altos contenidos de humedad debido a la absorción de los agregados.

Debido a que algunas aplicaciones de la industria necesitan de mayores propiedades mecánicas, se recurrió al desarrollo de un material compuesto muy parecido al cemento Portland el cual fue denominado concreto polimérico, al igual que el cemento Portland éste también cuenta con sus variaciones dependiendo de su aplicación, pero en términos generales presenta principalmente una mejora en las propiedades mecánicas y físicas ante el cemento Portland.

El desarrollo de los concretos poliméricos comenzó a finales de los años 50's como reemplazo del concreto en ciertas aplicaciones, debido a que se observa un rápido endurecimiento y excelente adherencia al cemento y los refuerzos de acero, por esta época se utilizó ampliamente como material para la reparación [1].

El concreto polimérico paso de ser utilizado como material de reparación en las construcciones a ser un material de uso común para diferentes áreas como en los sistemas eléctricos de aislamiento [6, 7] también a finales de los años 70's se comenzó a utilizar para reemplazar los materiales tradicionales como el hierro fundido para amortiguar esfuerzos y vibraciones en las bases de las máquinas herramienta [8]–[16].

A partir de este punto se comenzaron a realizar investigaciones sobre las propiedades mecánicas y físicas del nuevo material, esto permitió entre ver el potencial y las posibles nuevas aplicaciones que tendría, pero era necesario tener una metodología para la evaluación de las propiedades.

Debido a esta necesidad se creó en 1971 Comité ACI 548-Polymers in concrete. El cual se encargó de desarrollar una gran base de datos de propiedades del PC.

Las instituciones que han sido responsables en la preparación de diversos métodos de ensayo para estos materiales son :RILEM (Unión Internacional de Pruebas e Investigación Laboratorios de Materiales y Estructuras) con la creación del Comité Técnico TC-105-CPC (Compuestos del concreto polimérico) y TC-113-CPT (Métodos de prueba para compuestos del CP) La sociedad de ciencia de materiales de Japón (JSMS) también ha contribuido a la elaboración de materiales de CP con la ayuda del Comité de Resinas Sintéticas para Concreto (Synthetic-Resins-for-Concrete Committee).

En la tabla 3 se presenta una comparación de las propiedades mecánicas entre el concreto de cemento y el concreto polimérico.

Tabla 3. Comparación concreto polimérico con concreto Portland [17].

Propiedad	Concreto de cemento	Concreto polimérico	Unidades
Peso volumétrico	2200-2400	1500-2400	kg/m³
Resistencia a la compresión	51-611	509-1528	kg/m²
Resistencia a la tensión	11-74	153-560	kg/m²
Resistencia al corte	8.4-9.1	45.6-49.2	kg/m²
Resistencia a ciclos congelamiento/descongelamiento	750/25	1600/0	Ciclos/%pérdida de peso
Módulo de elasticidad	0.05-0.4	0.1-0.45	X10⁶ Kg/m²

En la actualidad, las aplicaciones del concreto polimérico son variadas, principalmente en la industria de la construcción, en la industria química, en la industria del procesamiento de

alimentos, etc. En la figura 2 podemos observar algunos de los productos y aplicaciones que se tienen para el concreto polimérico.



Fig. 2 Productos y aplicaciones de concreto polimérico [17].

CONCRETO POLIMÉRICO (CP).

El concreto polimérico es un material compuesto que resulta de una mezcla de resina polimérica y agregados minerales, los que tienen diferentes tipos de granulometrías, el polímero se polimeriza in situ, ya que los agregados se mezclan con el monómero y el catalizador al mismo tiempo, al terminar el proceso de polimerización, el compuesto formado se convierte en un material rígido y más resistente que el concreto convencional.

Las propiedades del CP van a depender de las necesidades que se quieran obtener, siendo esto dependiente de las condiciones de preparación, por ejemplo, para un tipo dado de concreto

polimérico, las propiedades van a depender del contenido de aglutinante, la distribución de tamaño de los agregados, la naturaleza y el contenido del relleno microscópico, las condiciones de curado. [18]

En México no existe un organismo o institución que regule o recolecte datos sobre el concreto polimérico, no obstante, todas las empresas que fabrican productos con concreto polimérico obedecen las normas mexicanas y especificaciones de la industria de la construcción que debe cumplir dicho elemento para poder ser utilizados en el país.

RESINAS POLIMÉRICAS.

El componente que es responsable de la unión de los elementos del CP es la resina polimérica, las resinas poliméricas son compuestos químicos derivados de la destilación del petróleo que en su temperatura ambiente son líquidas y pueden ser llevadas a estado sólido después de ser curadas. Las resinas más comúnmente usadas para la fabricación del CP son: resina insaturada de poliéster (isoftálica y ortoftálica), metacrilato de metilo, resinas epoxi, resinas de furano, resinas de poliuretano y resina de urea formaldehído [19].

En la figura 3 se muestra un comparativo de las resistencias a la compresión de algunas resinas.

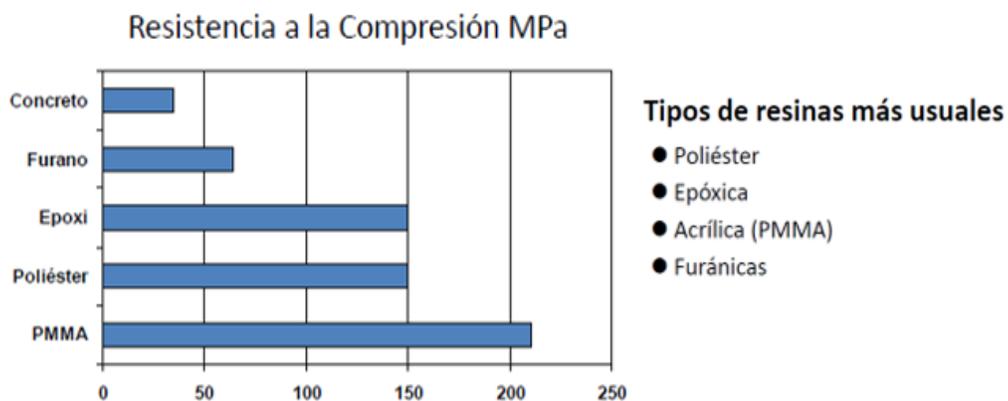


Fig. 3 Tipos de resina en los concretos POLIMÉRICOS [80].

La figura anterior muestra los valores promedio de la resistencia a la compresión, se puede observar que todas las resinas presentan mayor resistencia que el concreto normal, las resinas más usadas para la manufactura de prefabricados de CP son la resina poliéster y la resina epoxi.

Las resinas de poliéster insaturadas son las más comúnmente usadas para PC además por su bajo costo, fácil disponibilidad, y buenas propiedades mecánicas [20]. Aunque las resinas de furano también se utilizan en gran medida en los países europeos. La resina de Polimetilmetacrilato mejor conocida como PMMA tiene una aplicación limitada debido a su mayor inflamabilidad y olor desagradable; sin embargo, se utiliza debido a su buena trabajabilidad y curabilidad a baja temperatura para ciertas aplicaciones [19].

La elección de determinado tipo de resina depende de factores como el costo, propiedades deseadas, y resistencia química / tiempo requerido. Las resinas epoxi son preferidas sobre las resinas poliéster debido a sus mejores propiedades mecánicas, así como una mejor durabilidad cuando se somete a factores ambientales severos, pero su mayor costo es un impedimento en su aceptación generalizada. Un estudio comparativo de las propiedades de concreto polimérico con poliéster y con epoxi demuestra que normalmente el concreto epoxi tiene mejores propiedades que el concreto de poliéster, pero las propiedades del concreto de poliéster pueden ser mejoradas hasta el mismo nivel mediante la adición de micro rellenos y agentes acoplantes de silano. [21]

Las investigaciones encontradas en la literatura indican que para tener un concreto polimérico con las propiedades mecánicas óptimas el contenido de resina no debe rebasar el 20% en peso del total de la mezcla, no obstante, se recomienda utilizar el menor contenido de resina polimérica por cuestiones de costo y obtener las máximas propiedades mecánicas. Se observa que tanto la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión alcanzan el valor máximo entre 14 y 16 % de contenido de resina en peso. Otros estudios en esta área también han proporcionado resultados similares, es decir que la variación en el contenido de resina afecta directamente la resistencia a la compresión. [22]

En la literatura se ha observado que en dos tipos de resinas epoxi, la resistencia a la compresión disminuye al aumentar el contenido de resina más de 15 %, mientras que, para la resina de poliéster, los valores se mantuvieron casi constantes. El contenido de resina para un sistema de CP en particular también depende de la naturaleza del agregado utilizado en el sistema. Se recomienda una dosis de resina superior cuando se utiliza agregado fino, debido a la gran área de superficie de estos materiales. [23]–[25]

La tabla 4 muestra que la resina de PMMA presenta una resistencia a la compresión de hasta un 40% mayor a la de la resina epoxi y la resina poliéster, en cambio la resina poliéster y la resina epoxi reportan valores iguales en la resistencia a la compresión, pero no para la resistencia a la flexión donde la resina epoxi rebasa ligeramente a la resina poliéster.

Tabla 4. Propiedades de concretos poliméricos elaborados con diversas resinas [26].

Resina	Densidad (Kg/dm³)	Absorción de agua (%)	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la flexión (MPa)
Poli metil metacrilato	2.0 – 2.4	0.05-0.60	70-210	3.0-4.0	30-35
Epóxica	2.0-2.4	0.02-1.0	50-150	2.0-9.0	15-50
Poliéster	2.0-2.4	0.30-1.0	50-150	2.0-4.0	15-45

Cabe mencionar que las resinas poliéster son polímeros termo-estables que se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente y se pueden llevar al estado sólido mediante la adición de un catalizador, al adicionar este elemento a la resina ocurre un proceso de polimerización en el cuál los monómeros se unen entre sí para formar un polímero, este proceso también es llamado curado o endurecimiento, de la unión química de los monómeros resulta una liberación de calor (reacción exotérmica) y este proceso ocurre a medida que pasa el tiempo. Ya que es un proceso gradual se puede decir que en cierto intervalo de tiempo la resina tomará un estado gelatinoso, pero no totalmente sólido, cuando esto ocurre se denomina tiempo de gel y es muy importante saber cuándo esto ocurre en el proceso, ya que, una vez empezado el estado gelatinoso el producto no podrá ser moldeado y tomará la forma que tenga el recipiente que lo contenga.

AGREGADOS.

Generalmente los volúmenes de los concretos poliméricos están constituidos por el 75-80% por los agregados y materiales de carga. Los agregados se toman normalmente como materiales inertes que se encuentran sobre toda la matriz polimérica.

Normalmente los agregados se dividen en dos grupos, los que son agregados gruesos los cuales son mayores a 5mm y los agregados finos que tienen un tamaño inferior a 5mm. Además de los agregados gruesos y finos, también se añaden micro rellenos con el propósito de sustituir a los micro poros que se forman en la matriz durante su polimerización.

Los agregados deben mezclarse de tal manera que la mezcla total tenga menos contenido de vacíos y máxima densidad aparente. Esto minimiza la cantidad de aglutinante necesario para asegurar la correcta adherencia de todas las partículas del agregado. Las investigaciones que se han realizado en este sentido han informado de que el CP hecho con granulometría de los

agregados de acuerdo a la curva de Fuller tuvo mayor resistencia en las pruebas mecánicas que se le realiza comúnmente a estos materiales [27, 28]. Además otros reportes señalan que la adición de agregados usando mallas graduadas y métodos de brechas resulta en el mínimo contenido de espacios vacíos en la mezcla [29]. Una relación empírica también se ha sugerido en los experimentos, que se puede utilizar para determinar las proporciones de los agregados gruesos y finos de menor- nulo contenido [30]. La composición de la mezcla sugerida se basa de nuevo en el uso de la brecha graduada agregados.

Varios tipos de materiales agregados han sido utilizados por los investigadores, la mayoría de ellos en base a la elección de los materiales disponibles localmente para reducir el costo. Arena de río [27,31], arena de fundición [32, 33,34], piedra triturada [35,36], cuarzo, granito [37, 38,39], y grava son algunos de los materiales reportados por varios autores, estos materiales suman sus propiedades a las de la resina para fortalecer el concreto polimérico, dichas propiedades van a variar dependiendo del uso que se necesite y también van a cambiar dependiendo de la calidad y sus diferentes características.

MICRO RELLENOS.

La micro carga o micro relleno como se le conoce comúnmente es un polvo fino con un tamaño de partícula inferior a 80 micras. Algunos materiales como el carbonato de calcio, cenizas volantes y humo de sílice se han reportado en la literatura. La ceniza volante es un producto de la quema de carbón en centrales eléctricas y se utiliza como un material de carga debido a su fácil disponibilidad y porque se usa en el concreto polimérico para reducir la absorción de agua [38]. La adición de ceniza volante también mejora la trabajabilidad de la mezcla fresca de CP que resulta en productos con un excelente acabado superficial [40]. Los estudios han demostrado que el tamaño pequeño de partículas esféricas también contribuye a un mejor empaquetamiento de los materiales agregados, lo que reduce la porosidad y dificulta la penetración de agentes agresivos, mejorando así considerablemente la resistencia química del CP [20]. La adición de cenizas volantes también tiene un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas, mejora la resistencia a compresión hasta un 30% por la adición de 15% de cenizas volantes en el CP [41]. También se informó adición de cenizas volantes para tener un mejor rendimiento en comparación con la adición de humo de sílice como relleno [42].

AGENTES ACOPLANTES.

Debido a que el contenido de aglutinante usado en materiales de concreto polimérico es bastante bajo, la adherencia de los agregados se lleva a cabo a través de una fina capa de resina alrededor de ellos. El uso de un agente de acoplamiento de silano (que refuerza la adhesión entre la resina y los agregados) mejora la adhesión en las interfaces y por lo tanto mejora las propiedades mecánicas de estos materiales.

Un agente acoplante es un compuesto inorgánico que se usa para mejorar la adhesión entre los agregados pétreos y la matriz polimérica, este agente normalmente se incorpora al concreto polimérico antes de que se inicie el proceso de polimerización en la resina, esto para asegurar que todos los agregados estén cubiertos por el agente y la resina y facilitar la adherencia entre ambos.

Existen diversas maneras de aplicar los agentes acoplantes, tal como el método de mezcla integral y el método de tratamiento de la superficie [21, 43, 44]. En la literatura se ha informado que cuando se utiliza el método de mezcla integral con 1% de acoplante por el peso de la resina da resultados confiables [45, 46].

La resistencia a la compresión y resistencia a la flexión del concreto polimérico que contienen agentes de acoplamiento son 15 a 20% más altos que los de concreto polimérico normal [45].

CURADO DEL CONCRETO POLIMERICICO.

Los agregados que se usan para el concreto polimérico presentan considerables cantidades de agua en su interior debido a su alta porosidad, por lo cual es recomendado realizar un secado de los mismos y así reducir su influencia en las propiedades. Según la literatura el contenido de agua se limitará entre 0,1% a 0,5% para obtener mejores propiedades mecánicas [27, 41, 47–49].

El concreto convencional es sometido a un tratamiento térmico (curado) posterior al endurecimiento normal que ocurre con el Clinker, este proceso permite terminar la reacción química entre el agua y el cemento y permite al concreto obtener una dureza mayor en lapsos de tiempo establecidos, así mismo el CP puede ser sometido a este tratamiento térmico, la literatura habla de tres tipos de curado como son; curado temperatura ambiente, curado a alta temperatura y curado con agua.

Se ha analizado el tiempo de curado del concreto polimérico y se ha establecido que después de un día de curado a temperatura ambiente éste alcanza alrededor de 70 a 75 % de su resistencia

total [31, 49, 50], mientras que el concreto Portland por lo general alcanza alrededor del 20 % de su resistencia en un día. La ganancia de resistencia rápida es importante en aplicaciones de formas prefabricadas, ya que permite que las estructuras puedan resistir tensiones mayores antes de tiempo debido a la forma - extracción, la manipulación, el transporte y las operaciones de levantamiento. Se sabe que la resistencia a compresión del concreto polimérico casi se convierte en constante después de un curado en seco durante un período de 7 días [51].

2.-TIPOS DE CONCRETO POLIMÉRICO.

Hasta ahora solo se ha hablado de las propiedades generales que tiene el concreto polimérico y sus componentes, pero para el Instituto Americano del Concreto (ACI American Concrete Institute) se consideran estos tres tipos de concretos poliméricos en su Norma ACI-548. (ACI, 2009) que son resinas para impregnación de concreto (PIC polymer concrete impregnated), concreto hidráulico modificado (PMC polymer-modified concrete) y concreto polimérico (PC polymer concrete).

Concreto polimérico impregnado PIC (polymer concrete impregnated).

El PIC es un concreto de cemento hidráulico endurecido que se impregna con un monómero que se polimeriza posteriormente en el lugar. El concreto normal se caracteriza por tener canales y espacios vacíos que debido a su fraguado éstos están parcialmente llenos de agua, el concepto básico de PIC es que, si los vacíos son responsables de la poca durabilidad y resistencia del concreto éstos se deben llenar con un polímero lo cual debe mejorar las características del concreto [52].

La manera más simple y barata para la impregnación del concreto es sumergir el concreto en un monómero de baja viscosidad (metil metacrilato); esta técnica es aplicable a elementos prefabricados de concreto y se basa en la facilidad de penetración de un monómero de baja viscosidad.

La impregnación completa se obtiene haciendo primero la eliminación del agua libre y el aire que queda en el concreto con el fin de proporcionar la cantidad máxima de espacio en los poros para el llenado con el monómero.

Después de la saturación completa de monómero, por lo general bajo presión, se tiene la polimerización. La polimerización puede llevarse a cabo de tres maneras diferentes:

- (i) Polimerización catalizada por diversos catalizadores a temperatura ambiente; este proceso es lento y apenas controlable;
- (ii) Polimerización a temperatura ambiente inducida por radiación gamma;
- (iii) Polimerización en presencia de un catalizador a temperatura moderada (alrededor de 70 ° C), calentando el concreto con vapor, agua caliente o calentadores infrarrojos (IR). Las reacciones de polimerización consisten en moléculas de monómero que se enlazan químicamente entre sí para formar una larga y repetida estructura como una cadena, de alto peso molecular, en los huecos del concreto.

La siguiente imagen muestra un proceso simplificado del proceso de impregnación del concreto con un polímero.

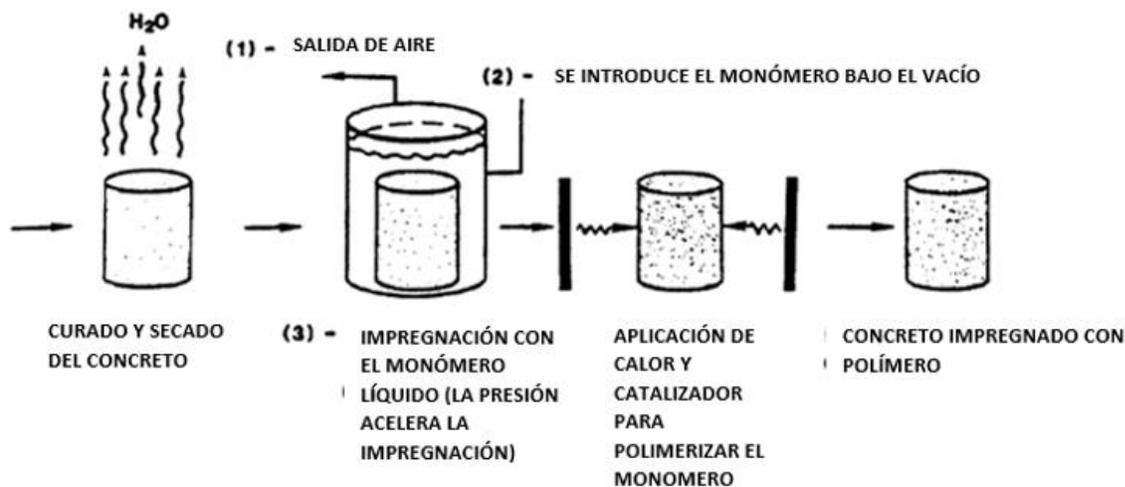


Fig. 4 Esquema del método de impregnación [52].

La figura 4 describe a grandes rasgos cómo, después de que el concreto es curado y secado, una bomba de vacío se utiliza para eliminar el agua y el aire incorporado dentro de los poros de la muestra. Después de la evacuación, el monómero se le permite pasar a la unidad de impregnación. Posteriormente de la penetración, el monómero se polimeriza in situ y finalmente se obtiene el concreto impregnado con polímero.

Características y durabilidad del PIC.

Los aumentos en la resistencia de las propiedades mecánicas son función de la profundidad de la impregnación del concreto. Totalmente impregnado el PIC normalmente desarrolla resistencias a la compresión de tres a cuatro veces mayores que el concreto con el que fue hecho; aumento de la tracción y resistencia a la flexión; excelente durabilidad, particularmente para ciclos de congelamiento y descongelamiento, y resistencia a los ácidos, debido a su extremadamente baja permeabilidad. Inexplicablemente, el módulo de elasticidad es de 50-100% más alto que el concreto tradicional, incluso aunque el módulo del polímero no es más del 10% mayor que la de el concreto [53]. El PIC exhibe casi cero resistencia a la fluencia.

En la tabla 5 se muestran algunas propiedades de estos materiales.

Tabla 5. Principales propiedades de un pic-polimerizado por radiación con metacrilato de metilo [54].

Propiedad	Unidad	Concreto sin polímero	Concreto impregnado con polímero
carga polimérica	% PESO	0	5-7
Resistencia a la compresión	N/mm ²	36	140
Resistencia a la tensión	N/mm ²	2.8	11.2
Módulo de elasticidad	N/mm ²	24000	43000
Módulo de ruptura	N/mm ²	5.1	18.1
Módulo de elasticidad a la flexión	N/mm ²	30000	43000
Permeabilidad al agua	m/yr	1.9 x10 ⁻⁴	0
Absorción de agua	%	5.3	0.29
Resistencia a ciclos de congelamiento	No. ciclos	590	2420
Dureza al impacto (L"martillo)		32	55.3
Resistencia a la corrosión con 15% de hci (expuesto por 84 días)	% pérdida de peso	10.4	3.6
Resistencia a la corrosión por sulfatos (expuesto por 300 días)	% de expansión	.144	0
Resistencia a la corrosión por agua destilada		Ataque severo	Sin ataque

Como puede apreciarse, en la tabla 5 se muestra un comparativo de las principales propiedades mecánicas que presenta el concreto y el concreto impregnado respectivamente, se observa una diferencia evidente en tanto a la resistencia a la compresión, el concreto impregnado es 3.8 veces más resistente que el concreto normal, y a su vez presenta una resistencia a la flexión 4 veces mayor. Estas diferencias tan marcadas entre las propiedades mecánicas se deben a la integración del polímero.

CONCRETO HIDRÁULICO MODIFICADO TAMBIÉN CONOCIDO COMO PMC (POLYMER-MODIFIED CONCRETE).

El PMC, también conocido como látex de concreto modificado (LCM), se desarrolla mezclando una dispersión de polímero (látex) con el cemento Portland con el objetivo de mejorar algunas características del concreto.

El concreto de cemento estándar es un material frágil y con la adición de polímero en la mezcla mejora en cierta medida su flexibilidad [55].

El látex polimérico se compone de partículas de polímero muy pequeñas (0.05-5 mm) dispersas en agua y generalmente se forman por polimerización en emulsión.

Diferentes polímeros termoplásticos (es decir, termoestables y elastómeros) pueden ser incorporados también en otras formas como el látex: re-dispersables en polvo, polímeros y resinas solubles en agua [56-57]. El contenido de polímero (base sólida) que se utiliza en formulaciones típicas PMC es de 10-25% en peso de cemento.

La figura 5 muestra cómo se agrega la mezcla de cemento con las partículas de polímero para crear una pasta cementante más viscosa que el cemento normal, esta mezcla se vierte sobre los agregados para tener así el material totalmente impregnado y posteriormente se cura para tener este tipo de concreto polimérico.

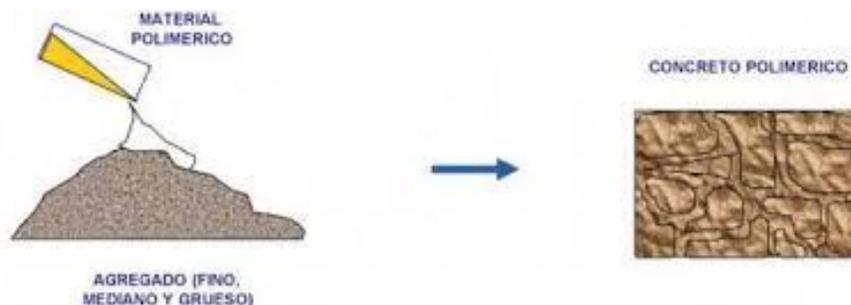


Fig. 5 Modificación del concreto hidráulico mediante la adición de una resina o polímero [17].

En la siguiente tabla se muestran algunas propiedades de los concretos poliméricos modificados cuando se varía la relación de la mezcla cemento-polímero y con diferentes sistemas de curado.

El aumento gradual de las resistencias se debe a que la reacción entre el agua y el cemento no se ve interrumpida y no se tiene un secado prematuro por efecto del sol o del viento. Este proceso controlado permite obtener la máxima resistencia que el material puede proporcionar. Las relaciones de cemento-polímero van a disminuir las resistencias, esto se puede atribuir a un reblandecimiento del polímero.

Tabla 6. Propiedades mecánicas de concreto polimérico modificado (diferentes relaciones/sistema de curado) [5].

Relación Cemento-polímero %	Sistema de curado	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Relación de la resistencia a la flexión a la resistencia a la compresión 1/x
0	Curado intemperie 28 días	14	2.4	5.8
5	Curado intemperie 28 días	16.5	3.8	4.34
10	Curado intemperie 28 días	17	4.5	3.78
15	Curado intemperie 28 días	15.2	4.6	3.3
20	Curado intemperie 28 días	12.2	3.9	3.13
0	Curado con agua 28 días	16.8	2.9	5.79
5	Curado con agua 28 días	16.3	3.4	4.79
10	Curado con agua 28 días	15.5	3.6	4.3
15	Curado con agua 28 días	13.6	3.5	3.88
20	Curado con agua 28 días	11.2	3.3	3.39
0	Curado con humedad 28 días	22.6	3.6	6.28
5	Curado con humedad 28 días	20.7	4	5.17
10	Curado con humedad 28 días	19.2	3.9	4.92
15	Curado con humedad 28 días	17	3.9	4.36
20	Curado con humedad 28 días	14.7	3.3	4.45

La tabla 6 muestra la relación cemento-polímero en distintas proporciones y sus propiedades.

3.-EVALUACIÓN DE MUESTRAS SOBRE MATERIALES DISPONIBLES

Se realizaron pruebas mecánicas a probetas de CP con el fin de determinar las propiedades con que contaba el material, se sometieron a dos tratamientos posteriores a su manufactura, uno fue de postcurado y el otro fue de compactación, esto se hizo con base a recomendaciones del fabricante y con el fin de observar el efecto de la temperatura sobre las probetas ensayadas, así como también el efecto de la presión sobre el CP durante su fabricación.

Posteriormente se realizaron pruebas de gelificación y proporción de catalizador para determinar la cantidad necesaria de catalizador que debe tener la resina para poder satisfacer las necesidades del fabricante. Una vez determinada esta proporción, se llevó a cabo un estudio de pasta cementante que es la relación entre la resina y el polvo cerámico que formara la base del concreto polimérico, por último, se realizó el estudio de eliminación de espacios vacíos, este método permite reducir la separación que existe entre los agregados que contiene el concreto polimérico para eliminar la mayor cantidad de aire en la mezcla.

Al no tener normas estandarizadas específicas para un material compuesto con polímero y cerámico en combinación, se tomaron las normas que se utilizan para concreto, el material que servirá como punto de comparación.

3.1.-PRUEBA DE COMPRESIÓN.

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión sobre cilindros bajo la norma ASTM C39/39M, con un tiempo de curado de 7 días. La resistencia se calculó dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir la fractura entre el área promedio de la sección transversal, se usó una máquina universal de pruebas INSTRON.

Se usaron 5 probetas cilíndricas de 45mm de diámetro por 85mm de alto, la carga se aplicó a una velocidad de 1 mm/min. La figura 6 muestra una máquina universal de pruebas INSTRON 4206, cuenta con una celda de carga reversible con capacidad de 150 KN y un torque de 40.67N-m.

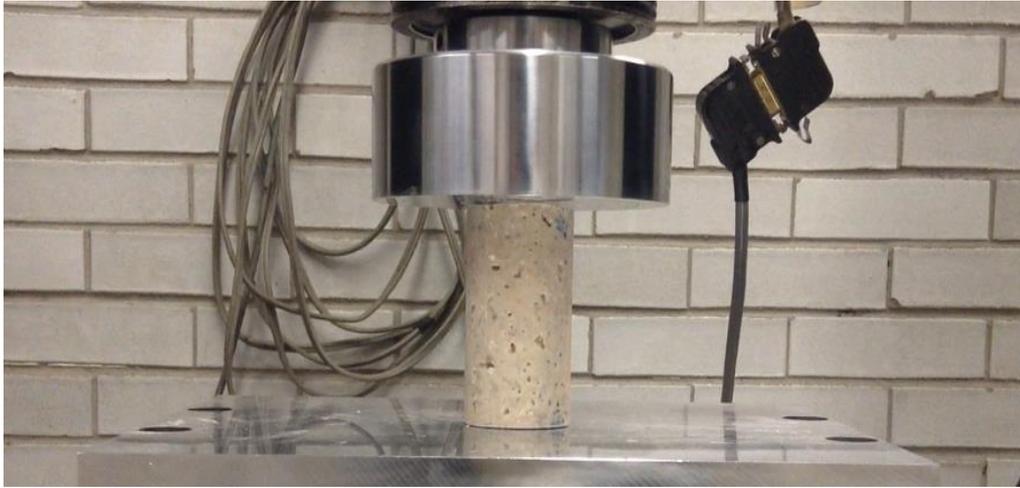


Fig. 6 Máquina universal de pruebas de compresión marca Instron, modelo 4206.

3.2.-PRUEBA DE FLEXIÓN.

También se realizaron pruebas de resistencia a la flexión a probetas rectangulares bajo la norma ASTM C78.

La determinación de la resistencia a la flexión fue realizada usando una viga simple con carga en los tercios del claro conforme a la norma, la resistencia a la flexión se determina a partir del módulo de ruptura, se usó una máquina universal de pruebas INSTRON.

Para esta prueba se usaron 5 probetas rectangulares de 250mm por una sección cuadrada de 50x50mm, la carga se aplicó a una velocidad de 1mm/min.



Fig.7 Máquina universal de pruebas Instron prueba de flexión.

3.3.-GELIFICACIÓN Y PROPORCIÓN DE CATALIZADOR.

Para determinar la relación de proporciones entre el catalizador y la resina, se procedió a realizar una caracterización de la resina mediante la norma ASTM D2471, esta norma permite conocer tiempo en el que tarda la resina en reaccionar con el catalizador y/o acelerador, así también, se puede conocer la temperatura y tiempo que alcanza cuando empieza la gelificación. Con la metodología utilizada por la norma, también se puede conocer la temperatura máxima alcanzada durante todo el proceso de solidificación, el cual también se conoce como pico exotérmico. Por experiencia de la empresa, el tiempo de curado lo determinan en 12 min; sin embargo, en este trabajo se realizó un esquema de variación de tiempos y proporciones resina-catalizador, para determinar una optimización en los tiempos de curado. Esto permite conocer el porcentaje en peso del catalizador que se necesita para llevar a cabo el endurecimiento del compuesto polimérico a un tiempo determinado por el experimento. De esta manera, el estudio de gelificación permitió mejorar las características del nuevo diseño de PC.

3.4.- ELABORACIÓN DE PASTA CEMENTANTE.

Se denomina pasta cementante a la mezcla de la resina con el micro relleno, la combinación de estos dos elementos el concreto polimérico permiten crear una matriz en la cual se van a depositar los agregados pétreos, de ahí la importancia que tiene el diseño de la misma, puesto que si esta llega a fallar los agregados simplemente no tendrían como seguir unidos.

La pasta cementante debe cumplir con dos características principales que son; bajo contenido de resina ya que éste es el material de mayor costo en el concreto polimérico y debe permitir una buena trabajabilidad es decir, debe tener una baja viscosidad lo que le permite contener menos aire y a su vez aligerar el producto, sin dejar de lado las propiedades mecánicas que entrega al producto final.

Para este estudio se recurrió a los documentos de Lachemi M. [2], en estos trabajos se hace énfasis a controlar el contenido de micro relleno en la pasta cementante, Lachemi M. dice que se puede variar el contenido de la mezcla conforme a los resultados que sean deseados, se propone aumentar el contenido de micro relleno en incrementos graduales de 0.2% en peso hasta llegar a 1.4% es decir partir de la resina pura hasta llegar a la saturación de la resina y observar el efecto de este sobre la pasta. Estas combinaciones permiten observar el comportamiento que tiene la resina conforme se va aumentando el porcentaje, claramente esto se ve reflejado en las propiedades mecánicas de la pasta cementante, si bien las resinas poliméricas van a cambiar

dependiendo el uso el comportamiento que se tiene reportado en sus experimentos marcan la tendencia en el comportamiento sin importar el tipo de resina que se esté usando.

Partiendo de la relación masa-relleno/ masa-resina (MR/Mr) que se puede considerar como la relación de agua/ cemento para el concreto Portland, se fueron variando las propiedades del concreto polimérico, estos parámetros se toman debido a que la resina es el componente más costoso del concreto polimérico, teniendo en cuenta esto se procede a tomar la relación propuesta por Lachemi M. [2] donde se plantea variar la cantidad de resina y polvo cerámico de 0 a 15 % en incrementos de 0.2 en la relación MR/Mr conservando la relación del catalizador que es de 1.5% , es decir:

Las temperaturas en estudio fueron de 23°C y 32°C buscando tiempos de gelificación de 12 a 15 min; tiempo permitido por el fabricante del PC.

La tabla 7 muestra los porcentajes con cada incremento.

Tabla 7. Relación MR/Mr.

Lachemi m. aumenta la relación MR/Mr de 0 a 1.4 en incrementos de 0.2			
Incremento	% Resina	% Polvo cerámico	%Agregados
0.2	15	3	82
0.4	13.6	5.4	81
0.6	13	7.8	79.2
0.8	12.4	9.92	77.68
1	11.4	11.4	77.2
1.2	10.6	12.72	76.68
1.4	10.2	14.28	75.52

3.5.-ELIMINACIÓN DE ESPACIOS VACÍOS.

Los concretos poliméricos deben en gran parte su resistencia a los agregados que se usan en su fabricación, dado que no existen métodos para encontrar la mejor combinación de agregados para un material como este, se recurre a los métodos que se usan para el diseño de concretos normales, estos métodos son muy variados y en general hacen referencia a agregados de mayor tamaño a los que se usan en los prefabricados de concreto polímero, esto es porque los concretos normales en su mayoría se utilizan en la edificación lo cual permite usar tamaños de

grano mayores a una pulgada sin afectar el diseño y las propiedades de los mismos; sin embargo, en la industria de los prefabricados, la mayoría de los productos tiene tamaños más pequeños que un edificio o un puente y por lo tanto los tamaños de agregados se ven restringidos por las geometrías de los productos.

Es por eso que se decidió usar el método de “espacios vacíos” según la norma ASTM C29 pues permite usar granulometrías menores a 12mm, esta norma usa un método estándar el cual permite saber la cantidad de espacios vacíos que tiene un volumen dado al ser llenado con un agregado, es decir que a partir de un volumen de control que es llenado y compactado con uno o varios agregados se puede determinar qué tan juntos o separados están los granos unos de otros, esto permite saber cuál es la mejor combinación de agregados ya que al tener menor aire contenido en el recipiente se puede considerar que al ser llenado con la pasta cementante el producto final tendrá un mejor comportamiento en las pruebas mecánicas.

Para realizar esta prueba fue necesario realizar un análisis granulométrico a los agregados según la norma ASTM C136 bajo la utilización de cribas con distintos tipos de mallas tal como se verá en la siguiente sección, la determinación del tamaño de agregados permite mejorar las propiedades del producto final.

Una vez terminadas las pruebas al material original de PC, se determina mejorar la resistencia mecánica, debido a los probables usos que se le dan a este material en un futuro, es decir si se mejoran las propiedades mecánicas se tendrá un material que se pueda utilizar en diversas aplicaciones como se explicó anteriormente. Teniendo como base los puntos del capítulo 3, se pretende mejorar y optimizar el uso de los recursos en la fabricación del PC, en el capítulo 4 se muestra el desarrollo experimental para determinar que variables son las que se pueden modificar para cambiar las propiedades de dicho material y así proceder en el diseño de un material con propiedades mejoradas.

Cabe mencionar que no se harán cambios en la selección de los materiales, se seguirán usando los mismos agregados y la misma resina, esto con el fin de demostrar que las proporciones de todos los elementos son los factores más determinantes cuando se pretende mejorar o diseñar un material compuesto con ciertas propiedades mecánicas.

4.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.

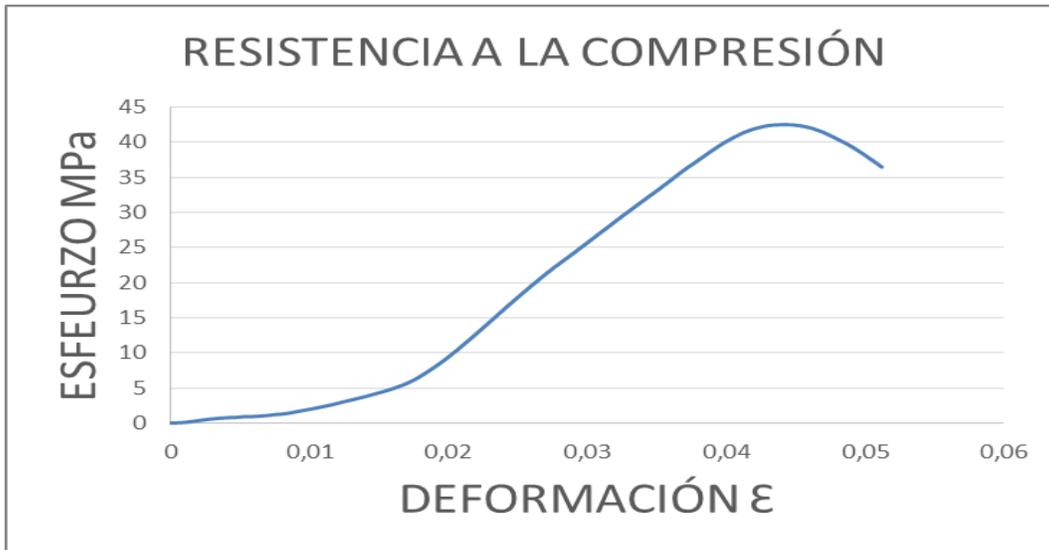
Para el estudio de este trabajo, una empresa dedicada a la elaboración de concreto polimérico proporcionó probetas para la evaluación de sus propiedades, las probetas fueron obtenidas de piezas de producción de una empresa mexicana, también se elaboraron probetas con un tratamiento térmico de curado y otras mas con un proceso de compactación, los ensayos aplicados a estas probetas fueron de flexión y compresión las probetas usadas para el ensayo de compresión fueron realizadas bajo la norma ASTM C39/C39M, las probetas que se usaron para los ensayos de flexión cumplen la norma ASTM C78, ambas bajo el control de calidad de la empresa.

Para conocer las características de un CP se procedió a aplicar los ensayos de compresión y de flexión antes mencionados a las muestras proporcionadas por la empresa. A solicitud de ésta, no se muestran las fotografías de los ensayos.

Posteriormente, y de acuerdo a lo encontrado por la literatura, y a petición de la empresa se elaboraron probetas con tratamientos térmicos, por un lado, y por otro, se elaboraron probetas con un proceso de compactado como se describe más adelante. Una vez obtenidos los resultados se procedió a conocer los efectos que cada componente influía en las propiedades del CP, basados en la literatura encontrada.

Al final, se evaluaron las propiedades de nuevas probetas de acuerdo a los estudios obtenidos. Se realizaron pruebas de compresión a 5 probetas conforme a la norma norma ASTM C39/C39M las probetas no tenían compactación ni post curado., en una máquina universal de pruebas INSTRON 4206 con capacidad máxima de 150 KN.

En la gráfica 1 se muestra el valor promedio de 5 probetas ensayadas cuya máxima resistencia a la compresión es de 48.03 MPa ($4,897,695.95 \text{ kg/m}^2$), los valores mínimos de esfuerzo para esta prueba fueron 37.23 MPa ($3,796,402.67 \text{ kg/m}^2$), con una media de 42.63 MPa ($4,347,049.31 \text{ kg/m}^2$).



Gráfica 1. Resistencia a la compresión.

También se sometieron a prueba de flexión 5 probetas en forma de viga de sección cuadrada bajo la norma ASTM C78, obtenidas de un producto de concreto polimérico que manufactura la empresa mexicana, las probetas no tenían compactación ni post curado. La gráfica 2 muestra el valor promedio que presentaron las probetas, tuvieron un valor máximo de 4.81 MPa.



Gráfica 2. Resistencia a la flexión.

Como puede observarse la resistencia a la flexión promedio es poco menor a 5 MPa con una deformación máxima de 0.045.

La tabla 8 muestra que la mayor diferencia en cuanto a propiedades mecánicas es la dureza, la cual es mucho mayor en la sílice, pero debido a su alto costo se decide usar un agregado derivado del mármol.

Tabla 8. Propiedades mecánicas de los agregados.

Propiedades de los agregados	Arenas y gravas sílices	Derivados de la molienda de piedra de mármol	Definición
Tipo	cuarzosa	mármol	
Gravedad esp.	2.87	2.71	densidad del material / densidad del agua
Densidad aparente	1.618 gr/cm³	1.58 gr/cm³	relación entre el volumen y el peso seco, incluyendo huecos y poros que contenga
Densidad real	2.879 gr/cm³	2.71/gr/cm³	masa/volumen
Humedad	0.30%	0.25%	contenido de humedad
Composición química	SiO₂ 99.21%	CaCo₃ 98.5%	
Dureza Mohs	7	3	

El porcentaje de agregados que se utilizan depende de la relación agregado grueso y agregado fino que se desea tener, es decir la cantidad va a depender de las propiedades que se necesiten, para nuestro CP que fue proporcionado se tenía originalmente un grano grueso A (2.36mm-1.18mm) y un grano pequeño B (1.18mm-1 mm) según el proveedor, estos dos tamaños de grano

tienen entre si una diferencia en tamaño de grano de 1.18mm lo cual por definición no puede tratarse de un grano grueso y un grano fino como lo dice la norma ASTM C136, se le considera grano fino aquel que tiene un tamaño máximo nominal menor a 4.75mm y si es de mayor tamaño se le considera como un grano grueso, por consiguiente se propusieron granos derivados de mármol de tamaño #8 (4.75mm-1.18 mm) y tamaño #16 (1.18-.36 mm) lo cual deja un espacio entre granos de 4.36 mm cumpliendo la definición de grano grueso y fino además de usar también el grano fino que dio el proveedor.

A estos granos y al polvo cerámico se les hizo un análisis granulométrico según la norma ASTM C33 en un tamiz vibratorio con periodos de tiempo y mallas establecidas en la norma.

La figura 8 muestra el tamiz utilizado. El tamiz vibratorio tiene una capacidad de 4kg del bloque de tamices, una amplitud digital de 1 - 100% (0 - 3 mm) y un rango de medida de 20 μ m - 25 mm.



Fig. 8. Tamiz vibratorio Retsch as200.

La tabla 9 muestra que el porcentaje de grano grueso que se está teniendo está por debajo del 50% en masa, es decir la mayor parte de este grano no pertenece al tamaño que debería tener.

Tabla 9. Muestra de grano "A".

Apertura del tamiz mm	Grueso	Masa retenida	%Retenido	% Ret. acumulado	% Que pasa
9.5	3/8	0	0	0.00	100.00
4.75	4	0.31	0.1057	0.11	99.89
2.36	8	138.72	46.24	46.35	53.65
1.18	16	159.98	53.32	99.67	0.33
0.6	30	0.0276	0.0092	99.68	0.32
0.3	50	0	0	99.68	0.32
0.15	100	0	0	99.68	0.32
0.075	200	0	0	99.68	0.32
	fondo	0	0	99.68	0.32

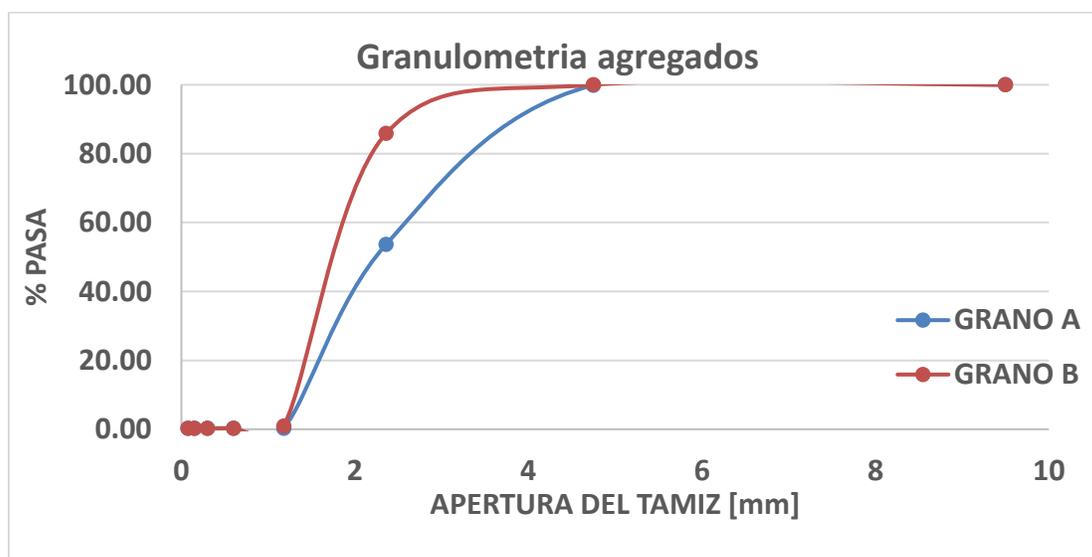
La tabla 10 muestra que lo que se manejó como grano fino que según el proveedor presenta el mismo problema que el grano anterior, la mayor parte de la muestra no pertenece al tamaño que debería de tener.

Tabla 10. Muestra de grano “B”.

Apertura del tamiz mm	Fino	Masa retenida	%Retenido	% Ret. acumulado	% Que pasa
9.5	3/8	0	0	0.00	100.00
4.75	4	0	0	0.00	100.00
2.36	8	42.41	14.13	14.14	85.86
1.18	16	254.76	84.92	99.06	0.94
0.6	30	2.02	0.67	99.73	0.27
0.3	50	0	0	99.73	0.27
0.15	100	0	0	99.73	0.27
0.075	200	0	0	99.73	0.27
	fondo	0	0	99.73	0.27

De los análisis granulométricos realizados a las muestras dadas por el proveedor, se obtuvieron las siguientes curvas que muestran el porcentaje de material que pasa a través de los diferentes tamaños de tamiz:

En la gráfica 3 se puede observar la granulometría de las marmolinas gruesas y finas, la diferencia máxima entre los granos según la apertura del tamiz es de 2.36mm en su mayoría.



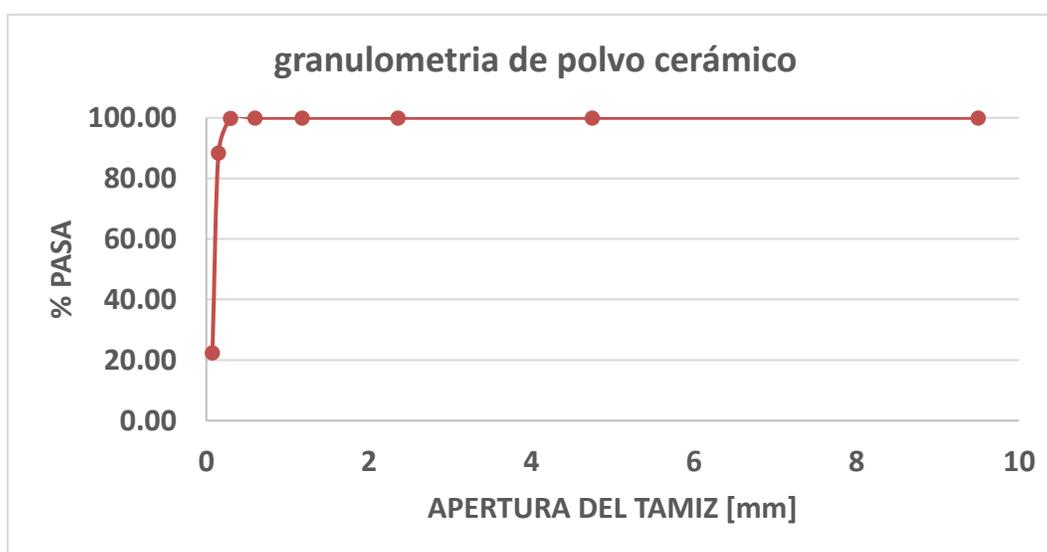
Gráfica 3. Granulometría de las marmolinas.

La tabla 11 contiene los valores para el polvo cerámico que se obtuvieron tras el mismo análisis granulométrico realizado a las marmolinas.

Tabla 11. Muestra de polvo cerámico.

Apertura del tamiz mm	Polvo	Masa retenida	%Retenido	% Ret. acumulado	% Que pasa
9.5	3/8	0	0	0.00	100.00
4.75	4	0	0	0.00	100.00
2.36	8	0	0	0.00	100.00
1.18	16	0	0	0.00	100.00
0.6	30	0	0	0.00	100.00
0.3	50	0.5447	0.18	0.18	99.82
0.15	100	34.42	11.47	11.66	88.34
0.075	200	197.88	65.96	77.62	22.38
	Fondo	67.14	22.38	100.00	0.00

En la gráfica 4 se observa que el polvo cerámico cumple con las especificaciones de tamaño del proveedor, por lo cual cumple con su trabajo de micro relleno y por lo tanto no será modificado para los siguientes puntos. El tamaño máximo que alcanza el polvo cerámico es de 0.3 mm.



Gráfica 4. Granulometría del carbonato de calcio.

La tabla 12 muestra el análisis granulométrico que se le realiza al agregado grueso que se propuso que es de tamaño #8. El análisis del agregado grueso propuesto, muestra que más del 70% del material cumple con el tamaño deseado.

Tabla 12. Grano propuesto #8.

Apertura del tamiz mm	Grueso	Masa retenida	%Retenido	% Ret. acumulado	% Que pasa
9.5	3/8	0	0	0.00	100.00
4.75	4	215.3	71.76	71.77	28.23
2.36	8	73.2	24.4	96.17	3.83
1.18	16	10.5	3.5	99.67	0.33
0.6	30	0	0	99.67	0.33
0.3	50	0	0	99.67	0.33
0.15	100	0	0	99.67	0.33
0.075	200	1	0.33	100.00	0.00
	fondo	0	0	100.00	0.00

En la tabla 13 se muestra la granulometría realizada al agregado fino propuesto que es de tamaño #16, El análisis muestra que más del 90% del agregado cumple con el tamaño propuesto.

Tabla 13. Grano propuesto #16

Apertura del tamiz mm	Grueso	Masa retenida	%Retenido	% Ret. acumulado	% Que pasa
9.5	3/8	0	0	0.00	100.00
4.75	4	0	0	0.00	100.00
2.36	8	0	0	0.00	100.00
1.18	16	14.76	4.92	4.92	95.08
0.6	30	283.7	94.56	99.49	0.51
0.3	50	1.43	0.47	99.96	0.04
0.15	100	0	0	99.96	0.04
0.075	200	0	0	99.96	0.04
	fondo	0.1	0.033	100.00	0.00

De los análisis granulométricos realizados a las marmolinas propuestas se obtuvieron las siguientes curvas.

La gráfica 5 de las granulometrías propuestas confirman que la diferencia máxima entre los dos granos es de 4.36 mm.



Gráfica 5. Granulometría de las marmolinas propuestas.

Teniendo estos resultados de las granulometrías a las marmolinas y al polvo cerámico se decidió usar el método de espacios vacíos para determinar la mejor combinación de tamaños de agregado para que se usaran para la fabricación del CP.

ANÁLISIS DE PESO UNITARIO CON COMPACTADO Y SIN COMPACTAR.

Se procedió a realizar la prueba de peso unitario bajo la norma ASTM C29, la cual consiste en llenar un volumen de control con el agregado, en este caso se usó un bote metálico al que se le determinó su volumen máximo previamente, se llenó con el agregado y se procedió a enrasar el bote para retirar el exceso de material con una varilla, posteriormente ese volumen es pesado y se calcula el porcentaje de vacío que existe en el recipiente.



Fig. 9 Espacios vacíos sin compactar.

Después se procede a realizar el mismo procedimiento de llenado, pero esta vez se va compactando con la varilla en cada tercio de volumen que se va llenando, se pesa de nuevo:



Fig. 10 Espacios vacíos compactando.

Primero se realizan las pruebas con los granos sin combinar, para posteriormente realizar combinaciones y ver la diferencia en los porcentajes que muestran, de este cálculo se hacen las combinaciones con los diferentes tamaños de grano de lo cual se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 14. Espacios vacíos a Marmolina

Muestra	Peso del molde (kg)	Vol. del molde (m^3)	Peso del molde con arena suelta (kg)	Peso del molde con arena compactada (kg)	Peso unitario suelto (kg/m^3)	Peso unitario compactado (kg/m^3)	% De vacíos libre	% De vacíos compactado
Grano #8	1.134	0.0028	5.1	5.4	1392.56	1497.89	18.08	11.89
Grano a	1.134	0.0028	5.1	5.4	1392.56	1497.89	18.08	11.89
Grano #16	1.134	0.0028	5.1	5.4	1392.56	1497.89	18.08	11.89

Con los datos de la tabla 14 se procedió a calcular el porcentaje de espacios vacíos que se tiene en el volumen de control, como puede observarse, los tres agregados de tres tamaños diferentes (A, 8 Y 16)por separado tiene el mismo porcentaje de vacíos, a partir de esta información, se realizaron combinaciones con los agregados de tamaño grueso A (2.36mm-1.18mm), #8 (4.75mm-1.18 mm) y tamaño #16 (1.18-0.36 mm) como se muestra en la tabla 15, de esta manera se determinó la mejor combinación de agregados con el menor porcentaje de espacios vacíos.

Tabla 15. Espacios vacíos a combinaciones de Marmolinas.

Combinación	Granos # 16 y # 8		Granos a y #8		Granos #16 y a	
	Porcentaje de vacíos libre	Porcentaje de vacíos compactado	Porcentaje de vacíos libre	Porcentaje de vacíos compactado	Porcentaje de vacíos libre	Porcentaje de vacíos compactado
35-65	16.02	7.76	18.08	9.82	19.12	10.86
40-60	14.99	8.79	16.02	9.82	18.08	10.86
45-55	14.99	6.73	17.05	9.82	19.12	10.86
50-50	14.99	7.76	17.05	9.82	19.12	10.86
55-45	14.99	9.82	19.12	10.86	19.12	10.86
60-40	17.05	8.79	19.12	10.86	19.12	11.89

Para los agregados de mármol se determina que la combinación que tiene la menor cantidad de espacios vacíos es la de 45-55 es decir 45% en peso de tamaño #16 (1.18-.36 mm) y 55% en peso de tamaño#8(4.75mm-1.18 mm).

5.-PROPUESTA DE DISEÑO PARA UN NUEVO CONCRETO POLIMÉRICO.

Actualmente en la industria del concreto polimérico no se tienen parámetros ni medidas estándar para la fabricación de los productos, la gran mayoría de las empresas realizan su CP con base a la prueba y error que van teniendo sus productos en el campo. Este trabajo pretende diseñar un concreto polimérico tomando como base la literatura y tomando algunas técnicas usadas en la preparación del concreto convencional y de alto desempeño.

Se propone mejorar la resistencia a la compresión del concreto polimérico sin aumentar la cantidad de material ya que la resina es el componente más costoso de la mezcla. Como se mencionó, el trabajo también incluye las técnicas para la elaboración del CP y esto no sólo se verá reflejado en las propiedades mecánicas sino también en los costos.

De los resultados obtenidos con las diferentes pruebas realizadas se propone realizar el concreto polimérico con dos combinaciones, es decir se proponen dos diseños de CP, a estos diseños se les realizarán pruebas de resistencia a la compresión y a la flexión y posteriormente estos nuevos resultados serán comparados con los resultados del concreto polimérico original.

La tabla 20 muestra los porcentajes que se proponen para las dos composiciones, así como también la composición original:

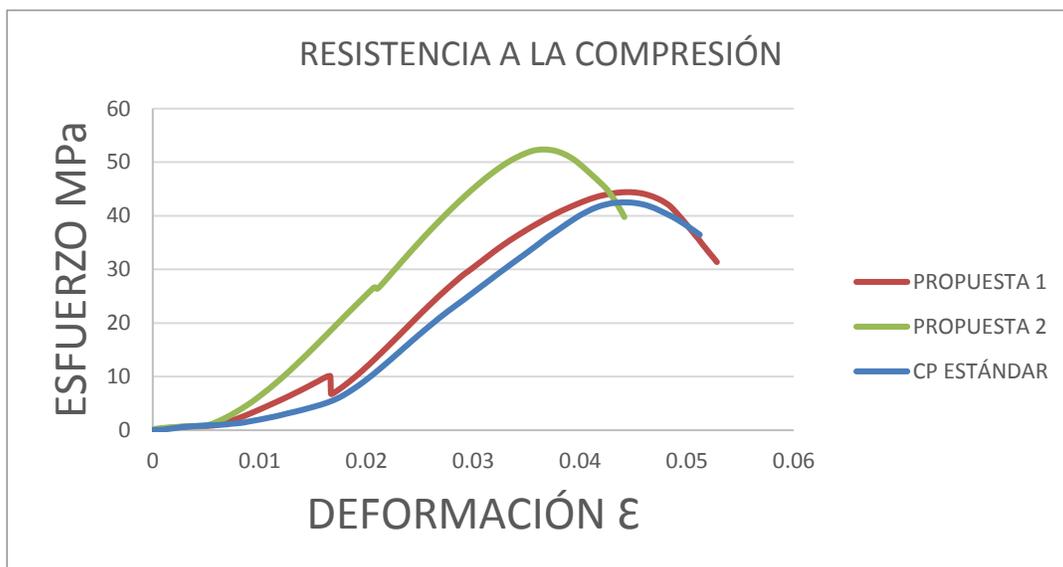
Tabla 16. Contenido de propuestas de diseño.

Policoncreto	Relación mf/mr	%Resina	% Agregados	% Agregado fino	% Agregado grueso
Original	1	15	77.2	30	40
Propuesta 2	0.8	12.4	77.68	45	55
Propuesta 1	1	11.4	77.2	45	55

PRUBAS DE COMPRESIÓN A CP DISEÑADO.

Se realizaron pruebas de compresión a los diseños con 10 probetas cilíndricas bajo la norma ASTM C39/C39M y se compararon con las pruebas hechas al CP original.

La gráfica 15 muestra los valores promedio de la resistencia a la compresión que se realizaron a los diseños, para el primer diseño el valor de resistencia a la compresión es de 44.36 MPa, para el segundo diseño esta resistencia alcanza los 52.36 MPa y para la probeta original de CP se tiene un valor de 42.63 MPa.



Gráfica 6. Ensayo de compresión.

Estos resultados nos permiten observar que se obtuvo un incremento de 4.05% en el diseño 1 con respecto al CP original, es decir se obtuvo prácticamente la misma resistencia a la compresión, pero se tiene una disminución de materia prima en la relación de M_f/M_r , y para el diseño 2 se tuvo un aumento del 22.82 % en la resistencia a la compresión con respecto al CP original con la una relación de M_f/M_r más baja.

PRUEBAS DE FLEXIÓN A CP DISEÑADO.

Se realizaron pruebas de resistencia a la flexión a los CP diseñados, se usaron 10 probetas de sección cuadrada bajo la norma ASTM C78, para compararlas con la probeta de CP original.

La gráfica 16 muestra un valor promedio de 1.77 MPa para el diseño 1 y el promedio del diseño 2 es de 1.81 MPa, esta disminución en la resistencia a la flexión se debe al contenido de resina que fue menor en ambos diseños.



Grafica 7. Resistencia a la flexión.

6.-ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES MECÁNICAS.

Después de haber realizado las pruebas de compresión y de flexión a los dos diseños de concreto polimérico propuestos, se realizó una tabla para comparar los valores obtenidos y así poder determinar si los diseños presentan mejoría en alguna de las dos pruebas. Si bien los dos diseños lograron tener un aumento en la resistencia a la compresión con respecto a los demás concretos poliméricos, la deformación máxima se vio disminuida en un 20% con respecto al CP original para el diseño 2, al igual que la resistencia a la flexión que disminuyó en un 60 % para ambos diseños, lo que se debe a la disminución del contenido de resina la cual permitía a las probetas tener una mayor deformación.

Tabla comparativa final			
Prueba	Resistencia máxima a la compresión MPa.	Resistencia máxima a la flexión MPa.	Deformación máxima
Sin compactar/sin tratamiento	42.63	4.81	0.045
Compactadas	37.76	n/a	0.03
Tratamiento térmico	43.06	n/a	0.041
Diseño 1	44.36	1.77	0.045
Diseño 2	52.36	1.81	0.036

Tabla 17. Resistencia a la compresión y a la flexión.

7.-ANÁLISIS DE COSTO DE LA MATERIA PRIMA.

El concreto polimérico original tiene una relación de Mf/Mr de 1, su contenido de resina es de 15% al igual que el relleno, para el primer diseño se tiene una relación de Mf/Mr de 1 al igual que en el CP original, con la diferencia de que el contenido de resina y de relleno es de 11.4%, por último, el segundo diseño tiene una relación de 0.8 de Mf/Mr con un contenido de 12.4% de resina y un 9.92% de relleno.

La tabla 22 muestra el porcentaje de material que usa el proveedor y en los dos diseños para realizar CP en una corrida de producción.

Tabla 18. Contenido de materia prima del CP.

Combinación	Contenido de resina %	Contenido de relleno %	Contenido de agregados %
Cp. original	15	15	70
Diseño 1	11.4	11.4	77.2
Diseño 2	12.4	9.92	77.68

Teniendo presentes estos valores en la tabla 23 se muestra la cantidad de material que usa el proveedor, el costo por kilo de cada material y su costo total. Mientras que en las tablas 24 y 25 se muestran los costos de la materia prima tanto para el diseño 1 como para el diseño 2.

Tabla 19. Costo de CP original.

Material	Contenido (kg)	Costo por kilo (\$)	Costo total (\$)
Relleno	75.25	0.53	39.88
Grano a	150.00	0.53	79.50
Grano b	213.00	0.53	112.89
Resina	72.00	8.00	576.00
Contenido total	510.25	costo de Cp. (\$)	808.27

La tabla 24 y 25 muestran los contenidos y costos con los diseños 1 y 2 respectivamente.

Tabla 20. Costo de CP diseño 1.

Material	Contenido original (kg)	Contenido en diseño 1 (kg)	Costo por kilo (\$)	Costo total (\$)
Relleno	75.25	58.4	0.53	30.95
Grano fino	150.00	177.17	0.53	93.90
Grano grueso	213.00	216.55	0.53	114.77
Resina	72.00	58.4	8.00	467.20
Contenido total	510.25	510.52	costo de Cp. (\$)	706.82

Tabla 21. Costo de CP diseño 2.

Material	Contenido original (kg)	Contenido en diseño 2 (kg)	Costo por kilo (\$)	Costo total (\$)
Relleno	75.25	50.62	0.53	26.83
Grano fino	150.00	178.36	0.53	94.53
Grano grueso	213.00	218.00	0.53	115.54
Resina	72.00	63.27	8.00	506.17
Contenido total	510.25	510.25	Costo de Cp. (\$)	743.07

Con los costos obtenidos del CP original y los diseños se realizó un comparativo para observar el ahorro que se tendría si se manufactura con dichas combinaciones.

Tabla 22. Comparativo de ahorro.

Combinación	Costo total	Ahorro (%)
Original	808.27	0
Diseño 1	706.82	12.55
Diseño 2	743.07	8.07

La tabla 26 muestra que el ahorro en el costo total de producción usando el diseño 1 es del 12.55%, con éste diseño se está manteniendo la resistencia a la compresión que tiene el CP original de la empresa. El diseño 2 presenta un aumento en la resistencia a la compresión del 21.65 % y un ahorro del 8.07% en el costo total de la materia prima. Por lo que el diseño 2 tiene características de costo mejor establecidas.

8.-ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Después de analizar los resultados de las pruebas realizadas a los elementos que conforman el concreto polimérico se puede concluir que se obtuvo la proporción más adecuada para los tiempos de fabricación que la empresa usa en su producción diaria, esto ajusta un tiempo de manufactura para las piezas que se realizan en serie logrando aumentar la productividad de la empresa.

El análisis de la pasta cementante mostró la relación necesaria entre la resina y el relleno para poder tener una adecuada trabajabilidad y adherencia con los agregados, de esta manera aseguramos que en la mezcla se disminuya la cantidad de aire atrapado en la pasta cementante, así como también logramos que el proceso de mezclado sea más fácil para el trabajador.

Por otra parte, el estudio de peso unitario suelto y compactado permitió aumentar la cantidad de agregados que son necesarios para ocupar un volumen determinado, con esto se logra disminuir el costo total de fabricación en un 8% aproximadamente para el diseño 2 y un 12.55% para el diseño 1 con respecto al concreto polimérico original.

9.-CONCLUSIONES.

Con respecto a la resistencia mecánica a la compresión, es importante resaltar que la resistencia se mantiene dentro de los rangos observados en los concretos poliméricos normales inclusive son mayores a los del concreto normal. De hecho, los valores de resistencia a la compresión promedio de los concretos ligeros quedan por arriba del valor mínimo de los concretos poliméricos normales.

Por consiguiente, se considera que las propuestas de diseño cumplen perfectamente con el desempeño requerido en la industria del policoncreto. Es pertinente recordar que no se está usando ningún tipo de refuerzo como fibra de vidrio o fibra de carbono. Por otro lado, las aplicaciones del concreto polimérico son tan diferentes que dependen de la manufactura del mismo, es decir, las placas de concreto polimérico muestran un comportamiento frágil a la flexión y su ruptura se presenta en el tercio de las barra, siendo ésta una falla a tensión pura. Si bien se requiere incrementar el espesor para cualquier aplicación se deberá de lograr una mayor velocidad de polimerización lo que se demostró trae como consecuencia una mayor cantidad de espacios vacíos proporcionando mayores concentradores de esfuerzo internos y esto llevaría a una reducción en las propiedades mecánicas.

De lo anterior se recomienda que si se van a elaborar elementos con un espesor considerable se tenga un método de dosificación e integración de los materiales automatizado para reducir la cantidad de aire en la mezcla, así como también se recomienda que las muestras o productos sean sometidos a un vibrado para garantizar una correcta homogeneidad y eliminar la mayor cantidad de burbujas.

Efecto en el costo

Con respecto al costo, se redujo y se mejoró la resistencia a la compresión, si bien se necesita usar fibra u otro refuerzo en dado caso que se quiera aumentar la resistencia a la flexión, se debe tomar en cuenta que el costo aumentará notablemente ya que la fibra de vidrio y la fibra de carbono tienen precios elevados dependiendo de la presentación y capacidad que se requiera.

Recomendaciones

Finalmente, convendría realizar nuevas formulaciones con otro tipo de agregado y/o refuerzo ya sea natural o sintético como las micro-esferas de vidrio para mejorar las propiedades mecánicas del concreto polimérico lo que llevaría a un panorama aún más amplio en las aplicaciones del mismo.

10.-BIBLIOGRAFÍA.

1. D. W. Fowler, "Polymers in concrete: a vision for the 21st century," *Cement and Concrete Composites*, vol. 21, no. 5-6, pp. 449–452, 1999.
2. LACHEMI, M. (2004). "Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste". *Cement and Concrete Research*, 185-193.
3. Historia del cemento en el mundo. cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020148241/1020148241_02.pdf
4. "Determinación de las propiedades mecánicas del concreto endurecido usadas en el diseño estructural para los concretos elaborados en la ciudad de cali con materiales de la región" H. Duván-L. Alberto Montejo. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Santiago de Cali 2001.
5. Ciencia de materiales para ingeniería, Peter A. Thornton, Vito J. Colangelo
6. M. Gunasekaran, "Polymer concrete: a versatile, low-cost material for Asian electrical infrastructure systems," in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 356–361, April 2000.
7. Pratap, "Vinyl ester and acrylic based polymer concrete for electrical applications," *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, vol. 45, no. 1-2, pp. 117–125, 2002.
8. P. Koblischek, "Synthetic resin bound concrete," in *Proceedings of the 1st International Congress on Polymer Concretes—Polymers in Concrete*, pp. 409–419, London, UK, 1975.
9. P. J. Koblischek, "MOTEMA-acrylic concrete for machine tool frames," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 7, no. 1, pp. 55–57, 1985.
10. P. A. McKeown and G. H. Morgan, "Epoxy granite: a structural material for precision machines," *Precision Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 227–229, 1979.
11. K. Paderewski, "Use of polymer concretes in machine tool construction," *Przegląd Mechaniczny*, vol. 43, no. 13, pp. 12–15, 1984.
12. E. Saljé, H. Gerloff, and J. Meyer, "Comparison of machine tool elements made of polymer concrete and cast iron," *CIRP Annals*, vol. 37, no. 1, pp. 381–384, 1988.
13. H. Schulz and R. G. Nicklau, "Machine tool bases made of polymer concrete," *Werkstatt und Betrieb*, vol. 114, no. 10, pp. 747–752, 1981.
14. H. Schulz and R.-G. Nicklau, "Design of machine tool frames using polymer concrete," *Werkstatt und Betrieb*, vol. 115, no. 5, pp. 311–317, 1982.
15. H. Schulz and R.-G. Nicklau, "Designing machine tool structures in polymer concrete," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 5, no. 3, pp. 203–207, 1983.
16. Weck and R. Hartel, "Design, manufacture and testing of precision machines with essential polymer concrete components," *Precision Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 165–170, 1985.
17. 2do CONGRESO INTERNACIONAL POLIFORMAS PLASTICAS 2010
18. E. Kirlikovali, "Polymer/concrete composites—a review," *Polymer Engineering & Science*, vol. 21, no. 8, pp. 507–509, 1981.
19. Y. Ohama, "Recent progress in concrete-polymer composites," *Advanced Cement Based Materials*, vol. 5, no. 2, pp. 31–40, 1997.
20. P. Gorninski, D. C. Dal Molin, and C. S. Kazmierczak, "Strength degradation of polymer concrete in acidic environments," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, no. 8, pp. 637–645, 2007.
21. P. Mani, A. K. Gupta, and S. Krishnamoorthy, "Comparative study of epoxy and polyester resin-based polymer concretes," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 7, no. 3, pp. 157–163, 1987.
22. H. Abdel-Fattah and M. M. El-Hawary, "Flexural behavior of polymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 13, no. 5, pp. 253–262, 1999.

23. J. M. Ferreira, "Flexural properties of polyester resin concretes," *Journal of Polymer Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 459–468, 2000.
24. M. Ribeiro, C. M. L. Tavares, M. Figueiredo, A. J. M. Ferreira, and A. A. Fernandes, "Bending characteristics of resin concretes," *Materials Research*, vol. 6, no. 2, pp. 247–254, 2003.
25. M. C. S. Ribeiro, P. R. Nóvoa, A. J. M. Ferreira, and A. T. Marques, "Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 7, pp. 803–809, 2004.
26. PANAMA ARMENDARIZ MAURICIO IVAN (2013) tesis
"DESARROLLO Y OPTIMIZACION DE MEZCLAS DE MATRIZ POLIMERICA LIGERAS"
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
27. Y. Ohama, "Mix proportions and properties of Polyester Resin Concretes," *American Concrete Institute*, pp. 283–294, 1973.
28. Kapasny, "Design of the optimum grading of aggregates for resin mortars," in *Proceedings of the International Symposium on Plastics in Material and Structural Engineering*, pp. 306–310, 1982.
29. V. V. L. K. Rao and S. Krishnamoorthy, "Aggregate mixtures for least-void content for use in polymer concrete," *Cement, Concrete and Aggregates*, vol. 15, no. 2, pp. 97–107, 1993.
30. Muthukumar, D. Mohan, and M. Rajendran, "Optimization of mix proportions of mineral aggregates using Box Behnken design of experiments," *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 7, pp. 751–758, 2003.
31. S. Rebeiz, "Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste," *Construction and Building Materials*, vol. 10, no. 3, pp. 215–220, 1996.
32. J. M. Ferreira, "Flexural properties of polyester resin concretes," *Journal of Polymer Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 459–468, 2000.
33. M. Laredo Dos Reis, "Mechanical characterization of fiber reinforced Polymer Concrete," *Materials Research*, vol. 8, no. 3, pp. 357–360, 2005.
34. M. L. Reis, "Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 20, no. 9, pp. 673–678, 2006.
35. Kobayashi and T. Ito, "Several physical properties of resin concrete," in *Proceedings of the 1st International Congress on Polymer Concretes—Polymers in Concrete*, pp. 236–240, London, UK, 1975.
36. Okada, W. Koyanagi, and T. Yonezawa, "Thermo dependent properties of polyester resin concrete," in *Proceedings of 1st International Congress on Polymer Concretes—Polymers in Concrete*, pp. 210–215, London, UK, 1975.
37. R. D. Maksimov, L. Jirgens, J. Jansons, and E. Plume, "Mechanical properties of polyester polymer-concrete," *Mechanics of Composite Materials*, vol. 35, no. 2, pp. 99–110, 1999.
38. K. T. Varughese and B. K. Chaturvedi, "Fly ash as fine aggregate in polyester based polymer concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 18, no. 2, pp. 105–108, 1996.
39. W. Bai, J. Zhang, P. Yan, and X. Wang, "Study on vibration alleviating properties of glass fiber reinforced polymer concrete through orthogonal tests," *Materials & Design*, vol. 30, no. 4, pp. 1417–1421, 2009.
40. J. P. Gorninski, D. C. Dal Molin, and C. S. Kazmierczak, "Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and Portland cement concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 11, pp. 2091–2095, 2004.
41. K. S. Rebeiz, S. P. Serhal, and A. P. Craft, "Properties of polymer concrete using fly ash," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 15–19, 2004.

42. Bărbuță, M. Harja, and I. Baran, "Comparison of mechanical properties for polymer concrete with different types of filler," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 22, no. 7, pp. 696–701, 2010.
43. Mani, A. K. Gupta, and S. Krishnamoorthy, "Some structural studies on polyester resin-concrete containing silane coupling agents," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 1, no. 11, pp. 467–470, 1982.
44. Mani, A. K. Gupta, and S. Krishnamoorthy, "Efficiency of some silane coupling agents and of the method of their application in polyester resin concrete," *Journal of Materials Science*, vol. 18, no. 12, pp. 3599–3605, 1983.
45. B. Chmielewska, L. Czarnecki, J. Sustersic, and A. Zajc, "The influence of silane coupling agents on the polymer mortar," *Cement and Concrete Composites*, vol. 28, no. 9, pp. 803–810, 2006.
46. K. Gupta, P. Mani, and S. Krishnamoorthy, "Interfacial adhesion in polyester resin concrete," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 3, no. 3, pp. 149–154, 1983.
47. B.-W. Jo, S.-K. Park, and D.-K. Kim, "Mechanical properties of nano-MMT reinforced polymer composite and polymer concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 1, pp. 14–20, 2008.
48. K. S. Rebeiz and A. P. Craft, "Polymer concrete using coal fly ash," *Journal of Energy Engineering*, vol. 128, no. 3, pp. 62–73, 2002.
49. K. S. Rebeiz, "Time-temperature properties of polymer concrete using recycled PET," *Cement and Concrete Composites*, vol. 17, no. 2, pp. 119–124, 1995.
50. E. Tawfik and S. B. Eskander, "Polymer concrete from marble wastes and recycled poly(ethylene terephthalate)," *Journal of Elastomers and Plastics*, vol. 38, no. 1, pp. 65–79, 2006.
51. Y. Ohama and K. Demura, "Relation between curing conditions and compressive strength of polyester resin concrete," *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, vol. 4, no. 4, pp. 241–244, 1982.
52. Guide for the Use of Polymers in Concrete Reported by ACI Committee 548 ACI 548.1R-97 Naidu Y C, (1992), 'Properties and applications of polymer concretes'
53. Angle P M, Antonio A, Alejandro J, (1999), 'Fatigue behavior of polymer modified porous concretes', *Cem Concr Res*, **29**, 1077–1083.
54. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. Bing Chen, Jaunyu Liu 2005
55. Naidu Y C, (1992), 'Properties and applications of polymer concretes', In: *Cement and concrete science & technology*, Vol 1, Part II , Ed Ghosh S N, ABI Books Ltd, New Delhi, India, 267–287.
56. Wang R, Wang P-M, Yao L-J, (2012), 'Effect of redispersible vinyl acetate and versatate copolymer powder on flexibility of cement mortar', *Constr Build Mater*, **27**, 259–262. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.050>
57. Chung D L, (2004), 'Use of polymers for cement-based structural materials', *J MaterSci*, **39**, 2973–2978.