



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA CIVIL – CONSTRUCCION

DESARROLLO Y OPTIMIZACION DE MEZCLAS DE MATRIZ POLIMERICA LIGERAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
PANAMA ARMENDARIZ MAURICIO IVAN

TUTORES PRINCIPALES
AMANDO JOSÉ PADILLA RAMÍREZ, FACULTAD DE QUIMICA
JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. 10 SEPTIEMBRE 2013



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. MENDOZA ESCOBEDO CARLOS JAVIER
Secretario: DR. MEZA PUESTO JESÚS HUGO
Vocal: ING. COTTIER CAVIEDES JUAN LUIS
1^{er}. Suplente: ING. ZÁRATE ROCHA LUIS
2^{d o}. Suplente: M.C. PADILLA RAMÍREZ AMANDO JOSÉ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERIA CIUDAD UNIVERSITARIA MEXICO DF.

TUTORES DE TESIS:

M.C. PADILLA RAMÍREZ AMANDO JOSÉ

FIRMA

ING. COTTIER CAVIEDES JUAN LUIS

FIRMA

Agradecimientos:

La presente Tesis es un gran esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias instituciones y personas ya sea leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndome una gran paciencia, dando ánimo para concluirla, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de logros.

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 la gran ayuda económica que me brindaron para poder realizar mis estudios de Maestría y el desarrollo de la presente tesis.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por haberme brindado una formación integral durante mis estudios de maestría y a la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), por el apoyo de espacios y equipos, ya que sin ella no se hubieran podido realizar diferentes estudios para la elaboración de mi tesis.

Muy especialmente a mis tutores y directores de tesis el M. en M. Amando José Padilla Ramírez y al Ing. Juan Luis Cottier Caviedes, por su acertada orientación, el soporte y la discusión crítica que me permitió obtener los mejores aspectos de todo el trabajo desarrollado para la misma.

Agradecemos ampliamente a las empresas: **Termolita de México S.A de CV** Ing. Edgar Valmaña Velázquez y Quim. Gerardo Magaña del Río, **Poliformas Plásticas S.A de C.V** Lic. Jorge Gómez Chacón y a la empresa **3M de México** Ing. Luis Miguel Morelos Fernández, por los materiales y apoyo brindado para la realización de este estudio.

A mis padres Dámaso Panamá y Vera Armendáriz, les agradezco por su apoyo, su guía y su gran confianza en la realización de mis sueños, su ejemplo y su cariño, pues con todo ello me han formado y logrado hacer de mí una persona de bien, gracias a ellos eh llegado hasta este gran paso, esta tesis es suya.

Gracias también a mis queridos compañeros, que me apoyaron y me permitieron entrar en su vida durante estos casi tres años de convivir dentro y fuera del salón de clase.

Gracias a todos.



INDICE

CAPITULOS

- 1 RESUMEN
- 2 INTRODUCCION
- 3 OBJETIVOS
- 4 PARTE EXPERIMENTAL
 - a. Diseño Experimental
 - b. Metodología
 - c. Métodos de ensayos
- 5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES
- 6 RESULTADOS. PESO ESPECIFICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
 - a. Concreto polimérico Ligero con micro-esferas de vidrio
 - b. Concreto polimérico Ligero con micro-esferas de aluminio silicato (Microsil 100S Y 200S).
- 7 RESULTADOS. PROPIEDADES A FLEXIÓN
- 8 APLICACIONES
 - a. Tapas de concreto polimérico
 - b. Canales para manejo de agua negras
- 9 ANÁLISIS DE COSTOS
- 10 CONCLUSIONES
- 11 REFERENCIAS
- 12 ANEXOS



CAPITULO 1

RESUMEN

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO



“ESTUDIOS SOBRE DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE CONCRETOS POLIMÉRICOS LIGEROS”

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería
IVAN PANAMA ARMENDARIZ

RESUMEN

En este trabajo se analiza el efecto de cargas ligeras en las propiedades de los llamados concretos poliméricos; en una primera parte se presenta una breve historia, así como las propiedades típicas y limitantes de los mismos, que han generado que los concretos poliméricos (CP) hayan tenido un crecimiento importante en los últimos 45 años. Particularmente, como se mencionó, este trabajo se enfoca al desarrollo de concretos poliméricos ligeros, optimizando el consumo de resina, evaluando tipos de agregados y composición, así como el uso de dos agregados ligeros en forma de micro-esferas a base vidrio y de aluminio silicato. Inicialmente, se empleó la micro esfera de vidrio, en este estudio, debido a su alta resistencia hidrostática del orden de 10,000 psi (69 MPa) y su bajo peso específico de 0.60 g/cm³. Sin embargo, debido a su alto costo se decidió incluir en la investigación micro esferas de aluminio silicato, cuyo costo volumétrico es comparable al costo de las cargas tradicionales.

Se evalúan las diversas formulaciones mediante ensayos a compresión y flexión. Los resultados muestran que el contenido de resina se puede reducir a niveles entre el 11% al 12% en peso.

En los concretos poliméricos normales, se obtienen resistencias del orden de 540 a 700 kg/cm², con pesos volumétricos 2,265 kg/m³. Al agregar tan solo 9.3% en peso de micro esfera a este concreto, la resistencia a la compresión es del orden a 540 kg/cm², mientras que el peso volumétrico se reduce a 1,680 kg/m³, lo que representa una reducción del orden de 25% del peso del concreto polimérico normal.

En el caso del empleo de las micro-esferas de aluminio silicato, los pesos específicos solo se reducen del 6 al 8% a pesar de tener este agregado un peso específico menor que el de la micro-esfera de vidrio. Por su parte, la resistencia a la compresión se mantiene en el rango de los 509 a los 582 kg/cm². La ventaja adicional de este agregado es su bajo costo.

El análisis de costos directos por concepto de materiales, de los concretos poliméricos muestra costos por litro similares al concreto polimérico normal del orden de \$16.00 cuando se emplean formulaciones cuaternarias.

Palabras claves: concretos poliméricos, resinas poliéster, micro esferas de vidrio y micro esferas base aluminio silicato.



ABSTRACT

This work shows the effect of light fillers on polymer concrete (PC) properties. At the beginning of the work, it shows a briefly history of PC and their typical properties and limits, which PC have had significant growing over the past 35 years. Particularity this study is focused to light polymer concrete development, using two types of light fillers. Moreover the efforts were done in order to found the optimum resins content through the optimization of fillers. Employed fillers were glass bubbles microspheres and bubbles microspheres based on silicate aluminum. The first one has a specific weight of 0.6 and has a high resistance isostatic pressure (69MPa). The second one has a lower density around 0.20 g/cm^3 . Design polymer concretes shown that resin content can be reduced to values between 11 and 12 %w. These polymer concretes have a volumetric weight of $2,265 \text{ kg/m}^3$ and shown compression strength from 500 to 700 kg/cm^2 . By other hand the use of glass bubble microspheres, in 9.3 % in weight lets to reduce the polymer concrete specific weight to $1,680 \text{ kg/m}^3$, which represents a reduction of 25% respect to the normal polymer concrete and with the advantage that compression strength remains close to 540 kg/cm^2 .

Using alumina micro bubbles, specific weight is reduced only from 6 to 8%, meanwhile their specific weight is lower than to those micro bubble glass. By other hand, polymer concrete compression resistance shown values from 509 to 582 kg/cm^2 . Additional advantage of this light aggregate is his low cost.

Cost analysis shown that material costs of light polymer concretes are similar to those normal polymers concrete. Material cost is around 16 pesos per liter, when quaternaries mixtures are using.

Key words: polymeric concrete, polyester resin, micro glass bubbles and micro silicate aluminum bubbles.



CAPITULO 2

INTRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO



INTRODUCCION

Desarrollo de los concretos poliméricos

El uso de los polímeros ha tenido un importante crecimiento en los últimos 45 años, ya que se ha empleado ampliamente ya sea como resinas para impregnación de concreto (PIC polymer concrete impregnated), concreto hidráulico modificado (PMC polymer-modified concrete) y concreto polimérico (PC polymer concrete). De hecho el Instituto Americano del Concreto (ACI American Concrete Institute) considera estos tres tipos de “concretos poliméricos” en su Norma ACI-548. (ACI, 2009).

El uso de resinas para **impregnación de concreto**, se inicia como una solución para la reparación de fisuras y relleno de poros. En este caso se emplea el monómero de baja viscosidad (metil metacrilato), el cual se polimeriza por radiación catálisis o acción térmica dentro de las fisuras y/o poros, mejorando la resistencia mecánica del elemento del concreto entre 3 y cuatro veces (Fowler 1999) y reduciendo la absorción de humedad. El esquema de la Figura 2.1, muestra el procedo de impregnación de un elemento de concreto. Este tipo compuesto, por su alta resistencia mecánica y durabilidad, se emplea en durmientes para ferrocarril, pavimentación de puentes y fábricas, tubos de desagüe, tanques de almacenaje para tanques de agua de mar, albercas y otros (United Nations 2002).

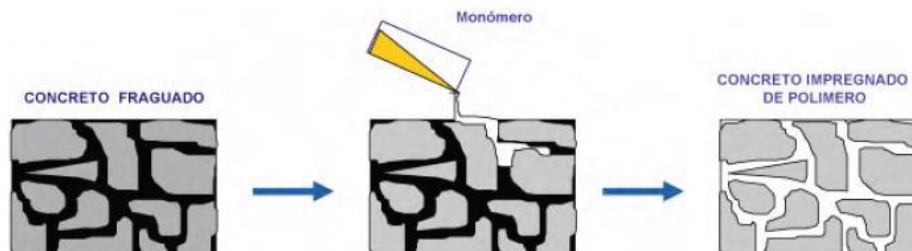


Fig. 2.1 Proceso de impregnación con un monómero.

El concreto hidráulico modificado (también conocido como “polymer modified concrete” PMC), consiste en mezclar el concreto hidráulico con algún monómero, generalmente Estireno butadieno –SBR-, acetato de polivinilo o metilmetacrilato, las cuales se dispersan en agua y se agregan a la mezcla en estado fresco. De esta forma se tienen dos aglomerantes activos que durante el proceso de hidratación del cemento y curado del monómero, ocurre la formación de una película polimérica (Gemert et al., 2005). El proceso de este tipo de aplicación es mostrado esquemáticamente en la Figura 2.2. La ventaja de este proceso es de tipo económico ya que emplea una menor cantidad de monómero y la inclusión de metil metacrilato en especial produce compuestos de fino colorido que resulta atractivo para acabados arquitectónicos (Fowler 1999).

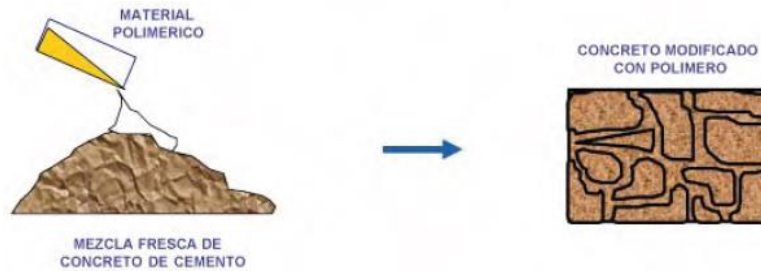


Fig. 2.2 Modificación del concreto hidráulico mediante la adición de una resina o polímero.

Los concretos poliméricos (**polymer concrete PC**), objeto de este trabajo, son materiales compuestos, entendiéndose que son aquellos materiales formados por dos o más componentes disímiles entre ellos, que por medio de diferentes procesos se convierten en un solo material no homogéneo, siendo sus propiedades distintas a las propiedades de los materiales originales. En este caso el concreto se forma básicamente de agregados minerales inertes que se encuentran dentro de una matriz cementante polimérica como se muestra en la Figura 2.3. La matriz polimérica sustituye por completo al cemento a diferencia de los otros dos tipos de concretos ya mencionados.

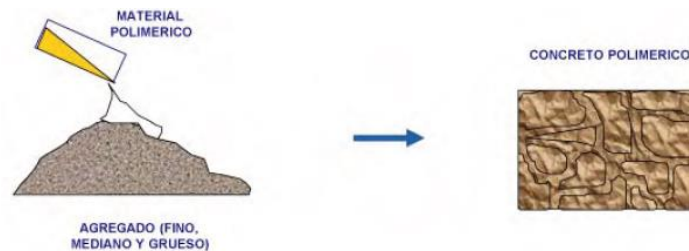


Fig.2.3 Esquema del concreto polimérico.

Características de los concretos poliméricos

Originalmente, los concretos poliméricos fueron empleados para realizar reparaciones en concretos convencionales, sin embargo en la actualidad los concretos poliméricos, debido a la gran variedad de matrices poliméricas posibles de emplear, ofrecen propiedades tales que le permiten ser usado en muchos casos como un sustituto de los concretos Portland normales y concretos de alta resistencia, con ventajas adicionales como una alta resistencia química y baja absorción de agua (Tyberg et al, 1999).

Dentro de las resinas que se emplean como matrices poliméricas están las llamadas poliéster, epóxicas, acrílicas, furánica, poliuretano entre otras. De estas resinas las más empleadas en la



industria de la construcción son las epóxicas y el poliéster, siendo estas últimas las más económicas (Czarnecki et al., 1999). Actualmente, se desarrollan resinas poliéster “verdes” (AOC, 2010) y resinas poliéster a base del reciclado de botellas de polietilentereftalato –PET- (Tawfik and Eskander, 2006; Chávez et al., 2002). Y también se hacen esfuerzos en la dirección de posibilitar el reciclado de los materiales compuestos (Painter 2011).

Entre las ventajas que presentan los concretos poliméricos están: alta resistencia mecánica (la resistencia a la flexión y tensión son superiores a la del concreto), buena resistente al impacto, estable bajo condiciones de congelación, baja absorción de humedad (menos 1%), alta resistencia química a ácidos, álcalis, compuestos orgánicos y otros elementos corrosivos, alta resistencia al rayado, alta resistencia al agua, alta resistencia química y alta resistencia a la radiación UV. La Tabla 2.1, presenta de manera comparativa las propiedades mecánicas típicas del concreto hidráulico y del concreto polimérico.

Tabla 2.1 Propiedades típicas de los concretos hidráulicos y poliméricos.

Propiedad	Concreto Hidráulico	Concreto Polimérico
Peso Volumétrico Kg/m ³	2200-2400	1500-2400
Resistencia. Compresión Kg/cm ²	51-611	509-1528
Resistencia. Tensión Kg/cm ²	11-74	153-560
Módulo elástico x10 ⁶ Kg/cm ²	0.05-0.40	0.10-0.45
Resistencia al Corte Kg/cm ²	8.4-9.1	45.6-49.2
Resistencia a Ciclos Congelamiento/descongelamiento (Ciclos / % perdida peso)	750/25	1600/0

Como se menciona anteriormente, una de las propiedades apreciadas del concreto polimérico es resistencia química y baja permeabilidad a diferentes solventes orgánicos (Orak, 2000; Bignozzi et. al., 2000) así como a diversos tipos de ácidos. Las tablas 2.2 y 2.3 muestran la resistencia a varios solventes y ácidos.

Tabla 2.2 Resistencia y permeabilidad de concreto polimérico y concreto hidráulico.

Solvente	Concreto Polimérico	Cemento Portland
Agua	Ok	Permeable
Gasolina	Ok	Permeable
Aceite Hidráulico	Ok	Permeable
Sosa cáustica)	Ok	Corroe
Ácidos	Ok	Corroe



Tabla 2.3 Resistencia química a diferentes tipos de ácidos.

Agente químico	Concentración	Resistencia residual a la compresión
Ácido acético	20%	64%
Ácido clorhídrico	5%	93%
Ácido Fórmico	20%	75%
Ácido Nítrico	6%	65%
Ácido Sulfúrico	30%	76%
Agua de mar	-----	-----
Alcohol Etílico	50%	80%
Amoniaco	5%	87%
Periodo de exposición al agente químico aprox.: 15 meses		

Además, los tiempos de curado de los concretos poliméricos son del rango de 1 a 4 horas, por lo que son apreciados en reparaciones y revestimientos de estructuras por el corto tiempo que requieren. Estudios muestra que después de un día de curado, las resinas amalgamadas con cargas adquieren más del 90% de la resistencia final (Gorninski et al., 2004).

Resinas empleadas en concretos poliméricos

Por otro lado, el desarrollo de materiales compuestos a base de polímeros sintéticos ha hecho posible producir materiales con una amplia gama de propiedades, así por ejemplo las resinas epóxicas son utilizadas en pisos industriales, restauración de estructuras deterioradas, aplicaciones donde se requiere alta resistencia química y mecánica, alta adherencia a otros materiales, esta resina ofrece también un bajo índice de encogimiento y baja absorción de agua pero su costo es alto (8 a \$10 USD/Kg).

Las resinas poliéster presentan buena resistencia química y buena adherencia a otros materiales, pero exhiben un alto encogimiento y poca resistencia a medios agresivos, son ampliamente usados en la industria de la construcción debido a su bajo costo (3 a 5 U\$D/Kg). En la Tabla 2.4 se presentan las propiedades de los concretos poliméricos elaborados con las resinas epóxicas, poliéster y acrílicas (United Nations, 2002).



Tabla 2.4 Propiedades de concretos poliméricos elaborados con diversas resinas.

Resina	Densidad (kg/dm ³)	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

Dado que los concretos poliméricos son una mezcla de: resinas poliméricas (poliéster, acrílicas, epóxicas, o furánicas); cargas minerales (arenas, cuarzos, granito, carbonatos, micro-esferas de vidrio y cargas metálicas) y refuerzos de fibras cortas de vidrio sus propiedades depende básicamente del: tipo y contenido de resina; tipo y contenido de cargas y el tipo y granulometría de las cargas (factor de empaquetamiento).

Limitantes del concreto poliméricos

Uno de los principales problemas proviene de las propiedades visco elásticas del polímero, lo que significa un módulo de elasticidad no demasiado alto, fluencia más acusada y susceptibilidad a la temperatura. En otras palabras, la temperatura de operación de los concretos está limitada por el HDT (heat deflexión temperature) de la resina empleada. Generalmente el HDT de resinas poliéster va del 80 a 95°C, las de las vinil ester de 110 a 140°C y las epóxicas de 180°C.

Otra limitante en el concreto polimérico es su relativo alto costo, ya que aun cuando las aplicaciones de los concretos poliméricos es amplia en: la construcción y vivienda, en la industria química, en el procesamiento de alimentos y en la ingeniería minera y civil, es necesario considerar que su costo es mayor al del concreto hidráulico, por lo que los concretos poliméricos deben ser usados solo en aplicaciones en los cuales los altos costos sean justificados por requerirse de: propiedades superiores, o un menor costo de mano de obra o un corto tiempo de aplicación o de un menor requerimiento de energía durante el proceso y manejo.

Concretos ligeros estructurales

Una de las tendencias en la construcción, es el desarrollo de materiales de bajo peso específico y alta resistencia mecánica. Los concretos poliméricos también son considerados dentro de estas tendencias. El objetivo es reducir la carga muerta de las estructuras de concreto, lo cual permite al diseñador reducir el tamaño de los elementos estructurales. Los concretos estructurales ligeros tienen un peso volumétrico de 1440 a 1840 kg/m³, que es menor al peso exhibido por el concreto normal hidráulico y al del concreto polimérico normal que son del orden de 2000 a 2400 kg/m³.

Particularmente en este trabajo, se pretende reducir los pesos volumétricos del concreto polimérico, mediante el uso de cargas ligeras como son las micro-esferas de vidrio y las micro



esferas a base de aluminio silicato. Las primeras ofrecen un peso volumétrico del orden de 600 kg/m³ y las segundas del orden de 220 kg/m³.

Proyección de los concretos poliméricos

En la medida que los arquitectos e ingenieros adquieran conocimientos sobre las propiedades y limitantes de los concretos poliméricos, se tendrá la capacidad de seleccionar de manera apropiada y económica un producto para una aplicación específica. Actualmente uno de los campos de aplicación relevante, es el de la reparación de estructuras de concreto, gracias a las altas resistencias específicas, la posibilidad de pequeños espesores, la fuerte adhesión a los substratos y la impermeabilidad frente a agentes agresivos y rápido curado.

Elaboración y manejo de los materiales compuestos

El manejo de estos concretos es el normal en cuanto a equipos de mezclado y compactación, pero debe estudiarse previamente el tiempo de polimerización que permita la colocación, sobre todo en grandes cantidades, que puede reducirse por efecto del calor desprendido, y prever posibles deformaciones residuales al endurecer. También resulta importante las precauciones dirigidas a la protección de los operarios y frente a incendio, debido a los gases que se producen, y a la limpieza de todos los útiles después del trabajo.

Actualmente existen equipos que permiten la producción continua de concreto polimérico, con ventajas tales como: incrementar la productividad, reducir costos, mejora de la calidad del producto, y una mayor rentabilidad. Las capacidades de producción de estos equipos varían desde 1 a 300 kg/min. Estos equipos cuentan con tolvas dosificadoras para cada componente, un tornillo de mezclado, todo ello controlado por sistemas computarizados. Los equipos tienen además un sistema para su limpieza La Figura 2.4 muestra fotografías de algunos equipos industriales disponibles.



Fig. 2.4 Lado izquierdo equipo Autocaster Polymer Concrete (Globmarble LLC);lado derecho mezclador y dispensador volumétrico (ADM Isoblock).



Impacto ambiental

Finalmente, desde el punto de vista del impacto ambiental, los concretos poliméricos podrían traer beneficios a la industria de la construcción, ya que de acuerdo a Placet y Fowler (2002) las acciones que podría tomarse para reducir los impactos ambientales son entre otras:

- Reutilización de residuos de componentes para el concreto polimérico.
- Uso de concretos de mayor durabilidad, o bien concretos que requieran un mínimo mantenimiento.
- Utilización de métodos que potencialmente reduzcan la necesidad de reparaciones, como es el caso del uso de películas protectoras a base de polímeros.
- Reutilizando plásticos para la fabricación de concretos, como es el caso de los recientes desarrollos de reciclado de PET.



CAPITULO 3

OBJETIVOS

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO



OBJETIVOS

Si bien los concretos poliméricos tienen ventajas sobre los concretos hidráulicos, su peso específico es similar al del concreto hidráulico. De aquí surge la idea de reducir el peso específico del concreto polimérico empleando agregados ligeros pero que no tengan efecto notorio en la reducción de las propiedades mecánicas como es el caso de la mayoría de los agregados ligeros comerciales como la carlita, las perlas de poliestireno expandido entre otros. Como una solución, en un principio se plantea el uso de micro-esferas de vidrio con alta resistencia hidrostática, del orden de 700 kg/cm^2 y micro-esferas de aluminio silicato de bajo peso específico (0.20 g/cm^3).

Básicamente, la investigación se enfoca no solo al conocimiento de este tipo de concretos, sino también al desarrollo de materiales que puedan ser aplicados como elementos estructurales ligeros y de alta resistencia química. Una probable aplicación práctica podría ser la sustitución de elementos de concreto en los canales de aguas negras, así como revestimiento de paredes de diversos tanques en el tratamiento de aguas negras.

El alcance planteado para esta investigación es determinar la correlación de propiedades del concreto polimérico a base de resinas poliéster y micro-esferas (de vidrio y de aluminio silicato) y algunas otras cargas minerales considerando los siguientes objetivos particulares:

1. Elaborar concretos poliméricos ligeros de alta resistencia mecánica.
2. Lograr un producto competitivo no solo técnicamente, sino también económicamente, reduciendo los costos.
3. Generar la sustentabilidad del concreto polimérico empleando desperdicios de la industria del mármol.
4. Ofrecer un nuevo tipo de material y explotar nuevos nichos de mercado en México (reparaciones rápidas, soluciones a problemas de corrosión, soportes de alta resistencia mecánica, entre otros).



CAPITULO 4

PARTE EXPERIMENTAL

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO



PARTE EXPERIMENTAL

Consideraciones

Con base en la idea de aprovechar las propiedades del concreto polimérico ya mencionadas, se plantea la reducción del peso del concreto polimérico usando el mínimo posible de resina y empleando diferentes tipos de agregados ligeros como son:

- Micro-esferas de vidrio, ya que estas tienen densidades reales del orden de 0.34 a 0.60 g/cm³. Con la inclusión de las micro-esferas de vidrio, se puede ofrecer una ventaja adicional, como es una mayor resistencia mecánica ya que tienen una alta resistencia estática (700 kg/cm²). La desventaja de esta micro esfera es su relativo alto costo de 8U\$D por kilogramo. Proveedor 3M de México S. A.
- Micro-esferas de aluminio silicato, denominadas comercialmente como Microsil, cuyas densidades son del orden de 0.20 g/cm³. Aunque estas micro esferas no presentan un alta resistencia a la compresión por sí mismas, tienen la ventaja de ofrecer un bajo costo del orden de \$8.50 por kilogramo (0.70 U\$D/kg). Proveedor Termolita S. A.

El reducir peso específico del concreto polimérico dependerá del contenido de micro-esferas, sin embargo, esto podría resultar también en un alto costo. Por esto se plantea agregar alguna otra carga mineral. La selección de la carga mineral debe hacerse con base en tener la menor absorción de resina, ya que uno de los objetivos es reducir el costo reduciendo el consumo de resina. De aquí se tengan tres variables a controlar: contenido de resina, de micro esfera y tipo de agregado mineral.

Metodología

1. Inicialmente se inicia el estudio usando la micro esfera de vidrio.
2. Se selecciona al menos una resina poliéster con base en sus propiedades mecánica, químicas y reológicas y compatibilidad con las micro-esferas de vidrio y de aluminio silicato.
3. Previamente al diseño propio de las formulaciones de concreto polimérico normal y ligero, se procedió a la caracterización de los materiales y en particular a evaluar el efecto de cada tipo de agregado ligero y de la calcita en las propiedades de la resina como son: su peso específico, la viscosidad y la resistencia mecánica a la compresión en función del contenido en términos de volumen.
4. Dada la complejidad del sistema del concreto polimérico en el que intervienen diversas variables, se plantea un diseño de experimentos (DOE) tipo Taguchi basado en 4 variables en tres niveles iniciales, lo que implica la realización de 9 formulaciones iniciales. A partir



de los resultados logrados de estas formulaciones, se hace la optimización de las formulaciones enfocado a la reducción de la resina y micro-esferas.

5. Con base en el diseño de experimentos (DOE) se elaboraran las diversas mezclas de agregados marmolíticos conjuntamente con micro-esferas de vidrio. Se seleccionan los granos de mármol por su baja absorción y ser un subproducto en la fabricación de piezas de mármol.
6. Las propiedades de las diversas formulaciones de concretos poliméricos se evaluaran mediante ensayos mecánicos a la compresión y flexión así como la determinación del peso específico. Resulta importante el conocer y evaluar la compatibilidad de los componentes así como el grado de influencia de cada uno de ellos en cada propiedad.
7. Con base en la optimización de formulaciones se evalúan las propiedades a flexión de los concreto poliméricos ligeros con micro-esferas de vidrio. En este caso las placas elaboradas se refuerzan con fibras de vidrio. Se analizan posibles aplicaciones.
8. Posteriormente, considerando que una de las aplicaciones del concreto polimérico es la fabricación de cubierta o tapas de registro, se aplica los concretos desarrollados en la fabricación de placas las cuales se evalúan mecánicamente.
9. Se evalúa comportamiento de concreto polimérico reforzado con fibras a flexión versus concreto reforzado con barras en tapas para registros.
10. Finalmente se realiza un análisis global técnico económico de ambos tipos de concretos poliméricos ligeros.

Métodos de Ensayos y Evaluaciones

Los ensayos a que son sometidas las diversas formulaciones de concretos poliméricos realizados en este estudio se detallan a continuación:

Determinación de pesos específicos

Esta determinación se realiza sobre las muestras del “composite” mediante el uso de un picnómetro de sifón, de acuerdo a la Norma NMX-C-164-ONNCCE-2002.

Determinación de propiedades reológicas

Estas determinaciones se llevan a cabo en un viscosímetro Brookfield, a temperatura ambiente (25 +/- 1°C), a velocidades de giro de 5, 10, 20, 50 y 100 rpm. Esto permite determinar el comportamiento reológico y el índice tixotrópico de las mezclas resina carga en el estado líquido.



En este caso el índice tixotrópico se define como la relación entre la viscosidad medida a 5 rpm entre la viscosidad medida a 50 rpm.

Determinación de resistencia mecánica a la compresión

El ensayo se lleva a cabo en una prensa hidráulica digitalizada, con capacidad de carga de 100 toneladas, usando probetas cúbicas de 5 cm de lado. El ensayo se realiza de acuerdo a la Norma M-MMP-2-02-004/04.

Determinación de módulo elástico

Los ensayos para determinar las propiedades elásticas a compresión de los concretos poliméricos se realizan con la ayuda de un equipo electrónico como se muestra en la Figura 4.1. Sobre los cilindros fueron montados extensómetros eléctricos para determinar la deformación longitudinal y transversal. Asimismo, también fueron colocados 4 deformímetros adheribles (straingage) en cada cilindro.



Fig. 4.1 Ensayo de cilindros.

Los ensayos a compresión se realizaron a una velocidad de deformación de 2.50 mm/min y la carga máxima aplicada en los cilindros fue de 50 ton., a fin de evaluar solo el comportamiento de ambos cilindros en la zona elástica.

Ensayo a flexión de cuatro puntos

La prueba de flexión se realizó a un velocidad controlada de 1.27 mm/min, de conformidad a lo establecido en la norma NMX-C-191-ONNCCE-2004. Las vigas son colocadas con la cara unida al refuerzo hacia abajo como se muestra en la Figura 4. De este ensayo se obtiene la capacidad máxima de carga, resistencia a la cedencia, la resistencia a la flexión (módulo de ruptura), el módulo elástico y la deformación máxima. Las dimensiones de los laminados son 60 cm. de longitud, 15 cm de ancho y el espesor o peralte varia de 1 a 3 cm.

Las vigas reforzadas con malla de fibra de vidrio de Saint Gobain y petatillo, así como los testigos se ensayan a flexión en cuatro puntos, tal y como lo muestra el esquema de la Figura 4 .2

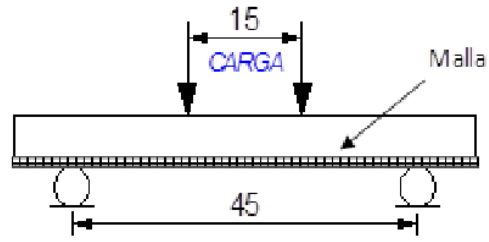


Figura 4.2 Representación esquemática del ensayo a flexión en cuatro puntos.



CAPITULO 5

CARACTERIZACION DE MATERIALES



CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Resina Poliéster

La resina, que en este caso funciona como aglutinante o matriz, debe ser capaz de mojar y adherir las cargas, proteger al concreto del medio ambiente, evitando la absorción de agua y ser capaz de transferir la carga a los agregados. Resulta importante no solo las propiedades mecánicas y químicas de la resina, sino también la viscosidad y capacidad de incorporación de cargas.

Las resinas poliéster empleadas fueron:

- RP 7000, que es una resina no tixotrópica de baja viscosidad (alrededor de 200 cp).
- MR250, que es una resina tixotrópica, con una buena capacidad de humectación de cargas.
- M30, que es una resina virgen empleada para vaciados con altas concentraciones de cargas, la cual debe prepararse previamente agregándole estireno y un promotor de octato de cobalto. En este caso se le agregó el 18% de estireno, para no afectar las propiedades mecánicas de la resina.

La capacidad de carga de cada resina se realizó agregando micro esfera de vidrio gradualmente hasta que la pasta formada ya no es manejable. Prácticamente todas ellas tienen una alta capacidad cercana al 50%. Obviamente a medida que se agrega la micro-esfera de vidrio, el peso específico se reduce a valores de 0.76, esto es una reducción del 37% con respecto al peso específico medio de las resinas de 1.2. Estos datos se reportan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Peso específico de las mezclas resina micro-esferas de vidrio y contenido máximo de agregado posible en la resina.

Tipo de resina	Contenido máximo de micro-esferas %w	Peso específico
MR250	45%	0.76
M30+20% estireno	47%	0.77
RP7000	48%	0.76

La evaluación de las propiedades reológicas de las resinas se realizó empleando un viscosímetro Brookfield, a velocidades desde 5 a 100 rpm. Las curvas obtenidas para cada una de las tres resinas se muestran en la Figura 5.1. Como puede observarse, la resina RP 7000, es no tixotrópica, al igual que la resina M30, pero con una viscosidad siete veces menor a la M30, es decir, del orden de 200 cp. Por su parte la resina MR250 tiene un comportamiento tixotrópico con un índice tixotrópico de 3.05, por lo que a rpm mayores 50 la viscosidad baja a viscosidades del orden de 500 cp.

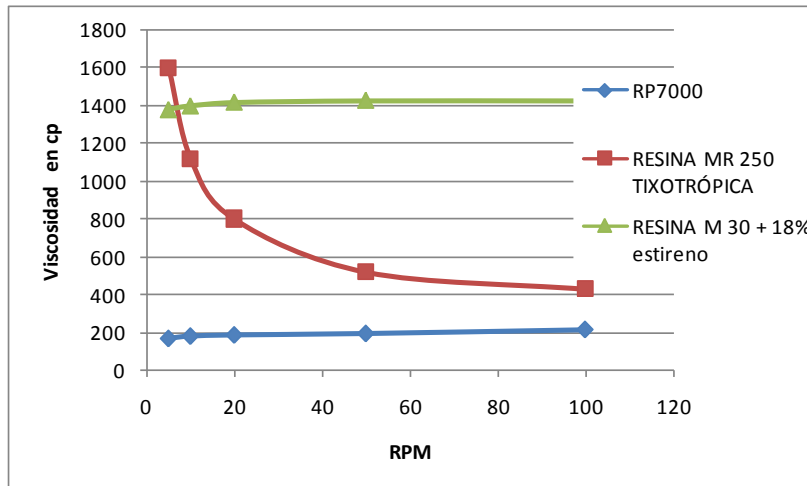


Fig. 5.1 curvas de viscosidades de las diferentes resinas a diferentes velocidades de corte.

Un ensayo adicional realizado para la caracterización de las resinas y de alguna forma para evaluar al efecto de la carga de micro-esferas de vidrio, fue determinar la variación de viscosidad con respecto al incremento de micro-esferas hasta un porcentaje del 25% en peso (equivalente 39% en volumen). Estas determinaciones se hacen a 50 rpm, de tal forma, como puede observarse en el gráfico de la Figura 5.2 la viscosidad se incrementa casi el triple en el caso de la resina M30 y aproximadamente en dos veces en el caso de las resinas RP 7000 y MR250 al agregarse el 25% de carga. De estos datos, se selecciona trabajar con la resina RP 7000 y la resina MR250.

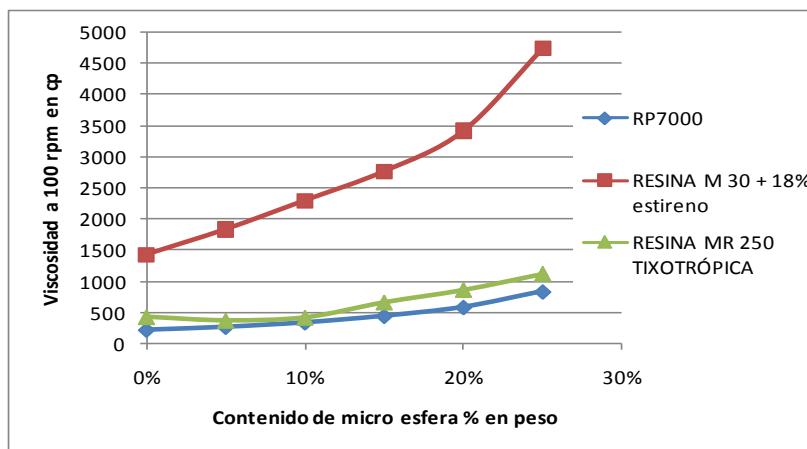


Fig. 5.2 Curvas de viscosidad a 50 rpm en función del porcentaje en peso de micro-esferas de vidrio.



Cargas empleadas

La carga tiene dos efectos importantes, uno en la resistencia mecánica y el otro en la viscosidad de la pasta. El efecto en estas propiedades fue determinado experimentalmente una vez caracterizado las cargas utilizadas.

Gránulos de mármol (cargas marmolíticas)

Las cargas empleadas fueron básicamente gránulos de mármol, que comercialmente se identifican como grano grueso, grano medio y grano fino. Las propiedades de los materiales empleados se presentan en la Tabla 5. 2.

Tabla 5.2 Propiedades de las cargas marmolíticas.

Propiedad	Grano Grueso	Grano Medio	Grano Fino
PVSS (kg/m ³)	1360	1392	1374
PVCS (kg/m ³)	1453	1519	1662
Peso específico	2.65	2.65	2.67

Un parámetro sumamente importante es la absorción de resina por parte de la carga, ya que a menor absorción menor cantidad de resina requerida en la formulación y el costo será menor. Las cargas marmolíticas (basadas en carbonato de calcio) presenta una baja absorción de aceite (del orden de 18g/100gr de aceite, comparada con otros tipos de cargas, debido a una estructura sumamente cerrada. La Tabla 5.3 muestra los datos de absorción de aceite de diversos tipos de cargas (R.T. Vanderbilt).

Tabla 5.3 Absorción de aceite de diversas cargas.

Material	Carbonato de calcio	Alumino silicato	Caolín
Absorción de aceite (g/100g de aceite)	12 a 21	24 a 26	30 a 40

El análisis granulométrico de estas cargas, es mostrado en la Figura 7.3, donde se observa que las partículas del grano grueso se concentran en las mallas 8 y 16 (1.19 a 2.3 mm), las del grano medio en las mallas 16 y 30 (0.58 a 1.19 mm) y el grano fino presenta una distribución ligeramente de forma de campana desde la malla 30 hasta la 400.

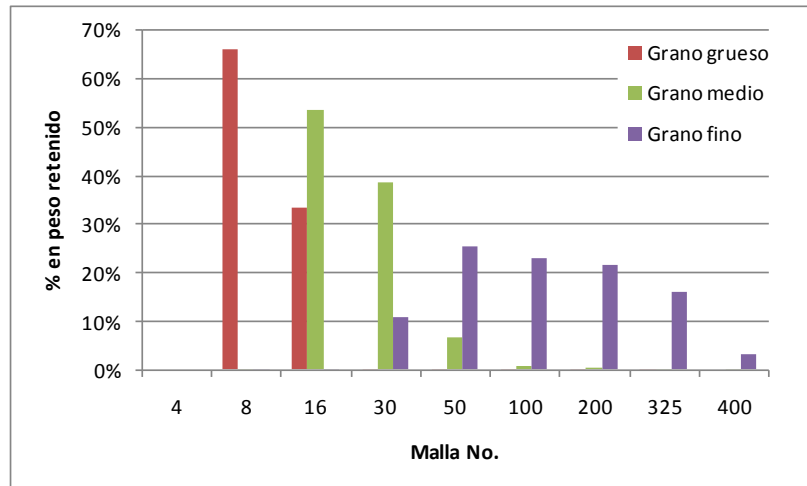


Fig. 5.3 Análisis granulométrico de las cargas marmolíticas empleadas.

Gravilla basáltica.

Se empleó este tipo carga por su baja absorción y poder reducir el costo de las cargas. La Tabla 5.4 muestra sus propiedades físicas y la Figura 5.4 la granulometría correspondiente.

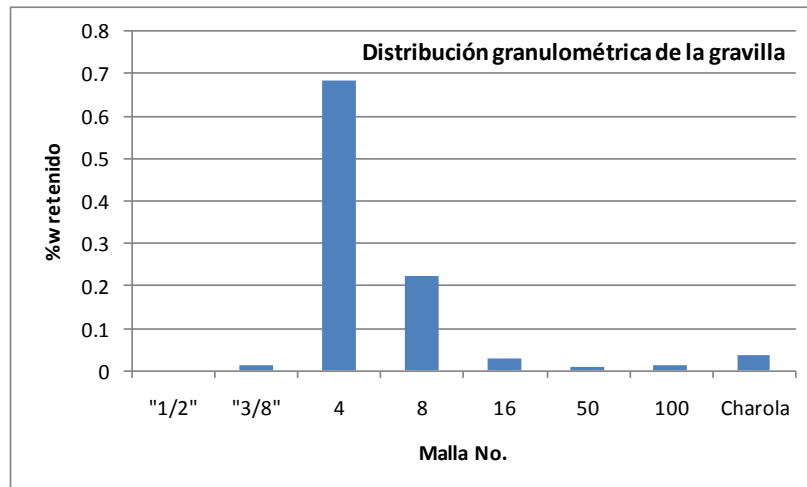


Fig. 5.4 Distribución granulométrica de la gravilla empleada.

Tabla 5.4 Propiedades físicas de la gravilla.

Peso volumétrico suelto	1121 Kg/m ³
Peso volumétrico compacto	1151 Kg/m ³
Peso específico	2.54



Micro esferas de Vidrio.

El trabajo se iniciara con micro-esferas de vidrio S60 que están elaboradas a base de vidrio tipo borosilicatos cálcicos y tienen una densidad media de 0.60 g/cm³. La Tabla 5.5, muestra algunas propiedades de este tipo de micro esferas.

Tabla 5.5 Propiedades de las micro-esferas de vidrio S60.

Propiedad	Unidad	Valor
Forma		Esferas de pared delgada
Color		Blanco
Resistencia a la presión	Psi (kg/cm ²)	10,000 (700)
Densidad	g/cm ³	0.60
Diámetro esferas promedio	Micrones	30
Absorción de aceite (ASTM D281)	g aceite/cm ³	0.2 – 0.6

Micro esferas de aluminio silicato.

Esta carga ligera denominada Microsil, está formada por micro-esferas de aluminio silicato, con un peso específico del orden de 0.20. El tamaño de partícula varía de los 200 a 34 micras. La composición de este producto de acuerdo a su fabricante se reporta en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Composición de la carga ligera Microsil. Información proporcionada por el fabricante.

COMPUESTO	% EN PESO	COMPUESTO	% EN PESO
Oxido de Silicio (SiO ₂)	79.92	Óxido de Magnesio (MgO)	0.24
Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	11.6	Óxido de Titanio (TiO ₂)	0.14
Óxido de Potasio (K ₂ O)	4.68	Óxido de Zirconio (ZrO ₂)	0.06
Óxido de Sodio (Na ₂ O)	1.51	Óxido de Estroncio (SrO)	0.01
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	1.16	Óxido de Plomo (P ₂ O ₅)	≤ 0.02
Óxido de Calcio (CaO)	0.64		

El análisis granulométrico de las micro-esferas empleadas muestra que el tamaño de partículas se concentran entre la malla 100 (152 micras) y malla 200 (76 micras), predominando la retención en malla 100. El gráfico de la Figura 5.5 y 5.6, muestra la distribución granulométrica correspondiente.

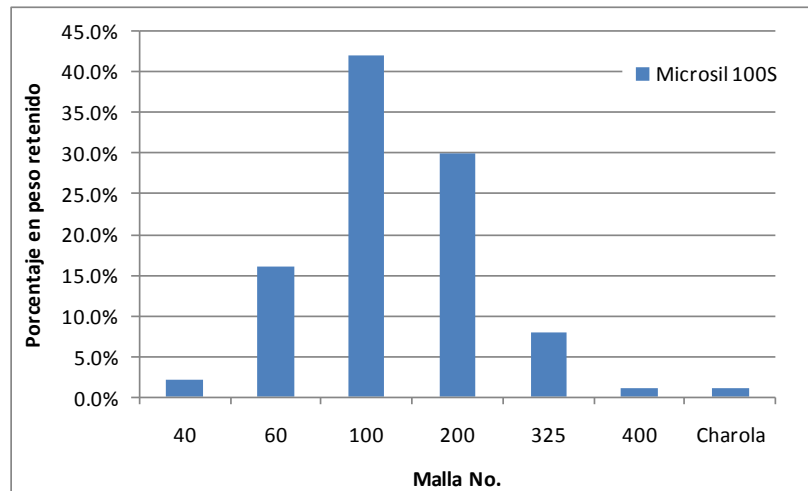


Fig. 5.5 Distribución granulométrica del agregado Microsil 100S.

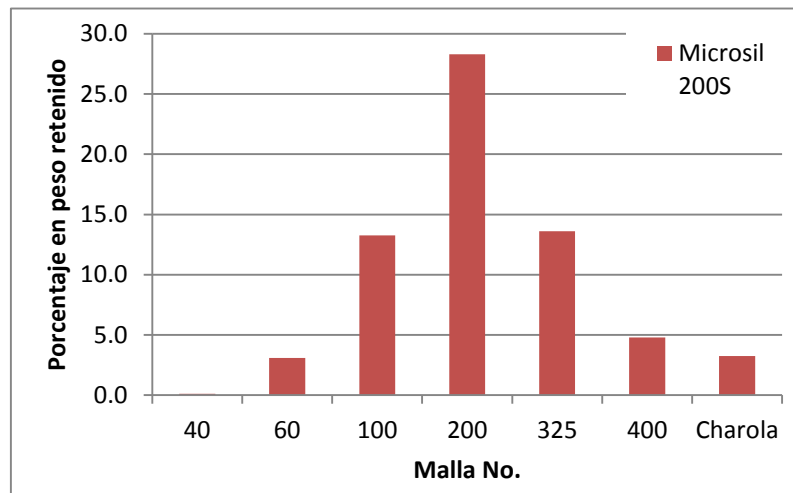


Fig. 5.6 Distribución granulométrica del agregado Microsil 200S.

Determinación del peso específico de los agregados

Como parte de la investigación se determinó de manera indirecta el peso específico de los agregados, evaluando el peso específico de mezclas de resina agregado a diferentes concentraciones y empleando la regla de las fases. De esta forma se verificó una densidad media de Microsil de 0.22, de la micro-esfera de vidrio de 0.55 y del carbonato de calcio de 2.65. Este último valor concuerda con valores reportados en la literatura, por lo que la metodología empleada se puede considerar adecuada.



Determinación del peso específico de la micro-esfera de vidrio.

La micro-esfera de vidrio, uno de los agregados ligeros empleados en este trabajo, tiene en principio un peso específico de 0.60 de acuerdo con los datos proporcionados por el proveedor. Esto reduce el peso específico del compuesto resina- micro-esfera conforme se incrementa la cantidad de esta última. Por lo cual, el peso específico se reduce de un valor de 1.2 a 0.78 al agregar hasta un 45% en peso de micro-esfera, tal y como se muestra en el gráfico de la Figura 5.7. Esta variación representa una disminución del peso específico del orden del 35%.

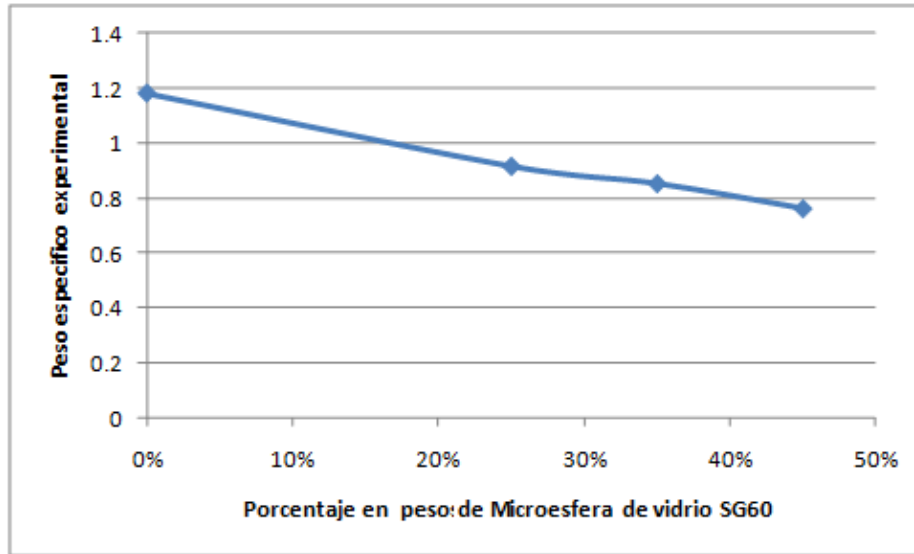


Fig. 5.7 Variación del peso específico de la resina cargada con micro-esferas de vidrio.

A partir de los datos experimentales reportados en la Figura 5.7 y empleando la ecuación 5.1., se puede determinar el peso específico de la micro-esfera.

$$\rho_a = \frac{\rho_c f_a}{1 - \frac{\rho_c f_r}{\rho_r}} \quad \dots (5.1)$$

Donde

f_a fracción en peso de la carga o agregado.

f_r fracción en peso de la resina.

ρ_a peso específico de la carga o agregado.

ρ_c peso específico del compuesto.

ρ_r peso específico de la resina.



Dentro del rango de experimentación, el valor medio del peso específico de las micro-esferas es de 0.55, valor similar al reportado por el proveedor.

Determinación del peso específico del Microsil

De igual forma a partir de los datos experimentales mostrados tanto en la Tabla 5.7 como en la Figura 5.8 y usando la ecuación 5.1, se determinó el peso específico de las micro-esferas de Microsil.

Tabla 5.7 Pesos específicos determinados experimentalmente a diversos porcentajes de carga.

% en peso de Microsil/resina	0%	5%	10%	15%	20%
% en volumen de Microsil	0.0%	23.5%	39.4%	50.8%	59.4%
Peso específico experimental	1.23	0.96	0.83	0.72	0.65

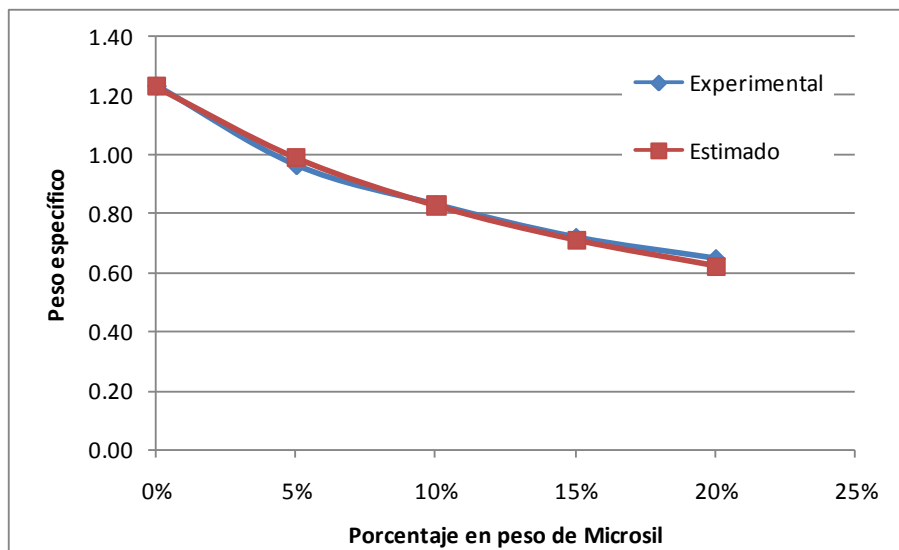


Figura 5.8 Comparativo entre el peso específico determinados experimentalmente y el estimado a partir de sus componentes.

El peso específico de la resina determinado experimentalmente corresponde a un valor medio de 1.23. Con este valor y con la ecuación 5.1, se obtiene valores que oscilan entre 0.210 y 0.22, (no se toma en cuenta el valor obtenido con el 5% de carga) por lo que el valor medio es 0.215. Estos cálculos se reportan en la Tabla 5.8.



Tabla 5.8. Estimación del peso específico del Microsil a partir de los datos experimentales y empleando la ecuación 1.

Contenido en peso de Microsil	5%	10%	15%	20%	Promedio
Densidad calculada base datos experimentales usando Ecuación 5.1	(0.186)	0.210	0.213	0.222	0.215

Finalmente, la Tabla 5.9, muestra el peso específico experimental y el estimado mediante la regla de las fases usando 0.22 y 1.23 como pesos específicos de Microsil y la resina respectivamente. Como puede observarse los datos reportados en la Tabla 5.9 los valores experimentales y estimados varían no más del 3.5%, lo que muestra que el método de estimación es bastante exacto.

Tabla 5.9 Datos experimentales y estimados de acuerdo con la regla de las mezclas. Disminución del peso en función del contenido de Microsil.

% en peso de Microsil/resina	0%	5%	10%	15%	20%
% en volumen de Microsil	0.0%	23.5%	39.4%	50.8%	59.4%
Peso específico experimental	1.23	0.96	0.83	0.72	0.65
Peso específico estimado	1.23	0.99	0.83	0.71	0.62
% de variación entre peso específico estimado y experimental	0.2%	-2.8%	0.1%	0.9%	3.5%
Disminución % peso específico respecto a la resina	0.0%	21.9%	32.8%	41.8%	47.6%

Estos datos también son mostrados gráficamente en la Figura 5.8

Determinación del peso específico de la marmolina

Con el fin de verificar el modelo representado en la ecuación 5.1 para la estimación de pesos específicos, se realizó la determinación del peso específico de mezclas resina calcita, la cual tiene un peso medio de 2.65 de acuerdo a la literatura y ensayos de laboratorio. Los datos obtenidos, mismos que se presentan gráficamente en la Figura 5.9, permiten estimar un valor medio de la calcita de 2.65.

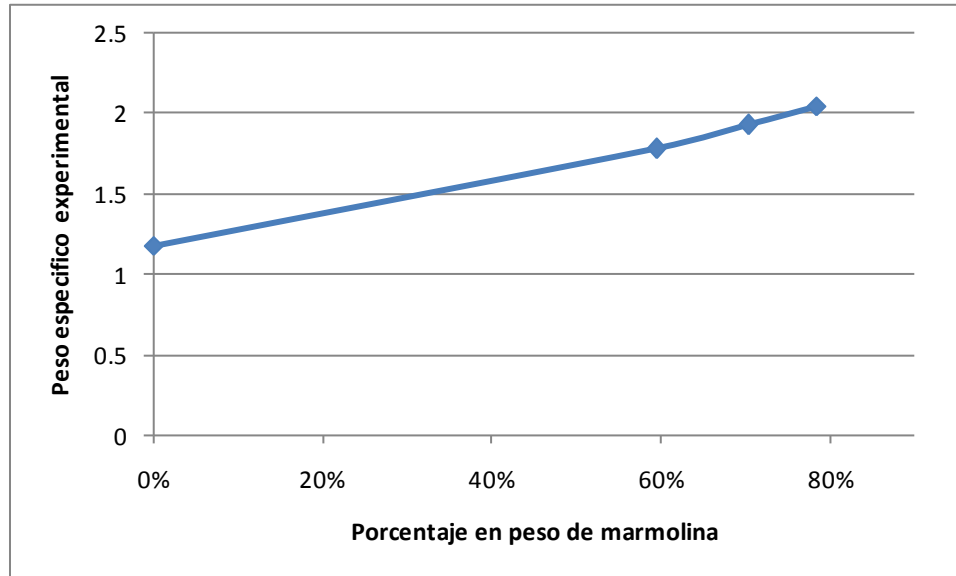


Figura 5.9 Curva de los pesos específicos con carga de marmolina determinados experimentalmente.

EFFECTO DE LAS CARGAS EN EL PESO ESPECÍFICO DE LA RESINA

Como se ha visto, tanto la micro-esfera de vidrio como el Microsil reducen el peso específico de la resina, a diferencia cuando se agregan partículas de marmolina, como el carbonato de calcio. El gráfico de la Figura 5.10 muestra el efecto de los tres tipos de agregados empleados básicamente en este trabajo experimental. En este caso se grafica contra el contenido en volumen de agregado, dada la diferencia de pesos específicos de los agregados.

En las tres relaciones, la variación del peso específico dentro del rango ensayado sigue un comportamiento lineal, las cuales se muestran a continuación. Todas las regresiones tienen un valor de su coeficiente de regresión mayor a 0.99.

Sistema	Ecuación	Coefficiente regresión
Carbonato- resina	$y = 1.415x + 1.227$	0.995
Microsil- resina	$y = -0.969x + 1.213$	0.994
Micro-esfera vidrio- resina	$y = -0.725 + 1.227$	0.996

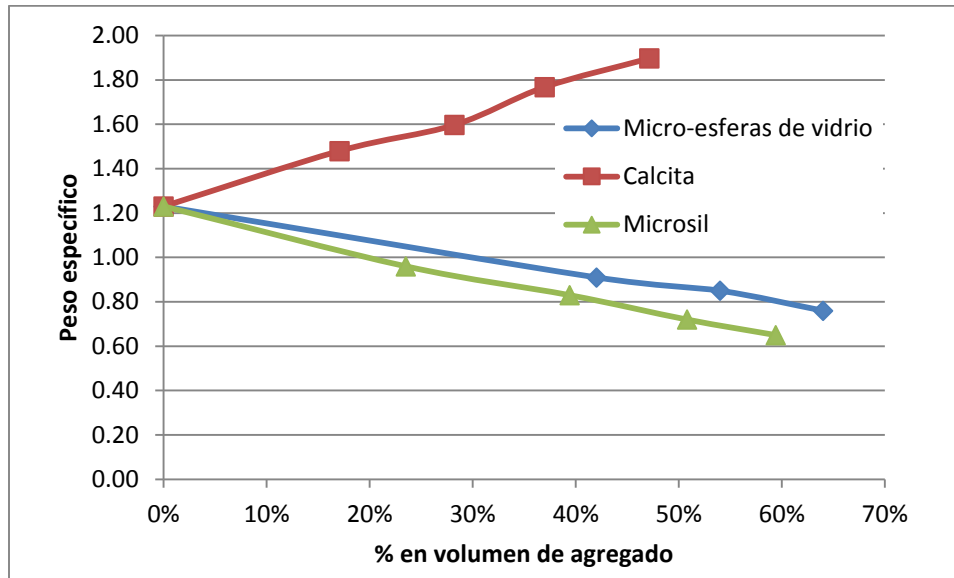


Figura 5.10 Efecto de del agregados en el peso específico de la resina.

EFFECTO DE LAS CARGAS EN LAS PROPIEDADES DE FLUJO DE LA RESINA

Efecto de las cargas en las propiedades de flujo de la resina

La viscosidad de las resinas se ve incrementada por la adición de cargas, lo que puede representar un problema en el proceso de vaciado del material compuesto en el molde, debido a una disminución del flujo lo que genera la inclusión de aire, oquedades entre otros problemas.

De aquí la necesidad de evaluar el efecto de los tres tipos de carga empleados: micro-esfera de vidrio, micro-esfera de aluminio silicato y la calcita (carbonato de calcio). El estudio se enfoca básicamente a determinar la viscosidad en función del contenido de carga y la rapidez de corte del ensayo.

El efecto de las cargas en la viscosidad de las diferentes resinas seleccionadas para la elaboración de las muestras de concreto polimérico ligero puede apreciarse en la Figura 5.11. Para el caso de la resina M 30, ésta se incrementa sustancialmente conforme se aumenta el porcentaje en volumen de agregado ligero (de los 800 a los 1600cp). Por otro lado, en resinas restantes (MR 250, PP 70x60) la viscosidad no cambia radicalmente en los rangos propuestos de porcentaje de agregado ligero en volumen a utilizar (del 15 al 25%) por lo que se consideraron adecuadas para la preparación de los especímenes ya que estuvieron entre los 400 a 600 cp. Por otra parte, la resina flexible, aunque cumple con mantener una baja viscosidad, ésta fue descartada por su baja resistencia mecánica a la compresión.

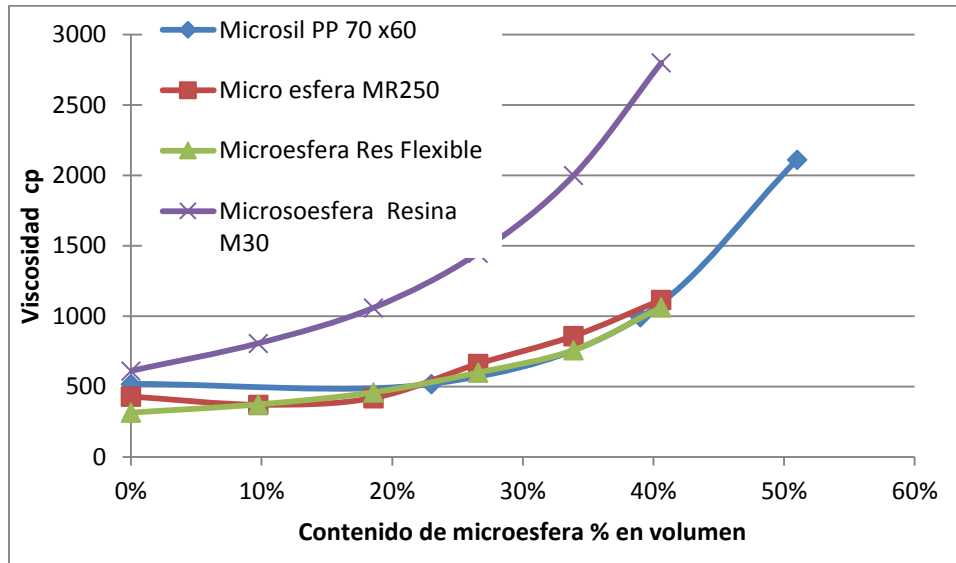


Fig. 5.11 Efecto de la viscosidad (determinada a 100rpm) en las resinas, cuando se incorporan diferentes tipos de agregados ligeros.

Con el fin de ubicar el efecto de los agregados ligeros en la viscosidad de la resina (en este caso con resina 70x60) con respecto al efecto de un agregado tradicional como lo es la calcita, los agregados ligeros (Microsil y Micro-esfera de vidrio) también incrementan la viscosidad aunque a niveles inferiores que la calcita. Como, puede observarse en la Figura 5.12 que a cargas menores de 30% en volumen, la viscosidad se mantiene prácticamente constante. A partir de este a concentración la resina cargada con calcita la viscosidad se incrementa de manera exponencial; en el caso de la resina cargada con Microsil la viscosidad empieza a incrementarse a concentraciones del 50% en volumen, observándose un incremento menos marcado. Así por ejemplo para un contenido del 40% en volumen la viscosidad con calcita es más del doble de los valores exhibidos por el agregado de Microsil y de Micro-esfera de vidrio. Esto se muestra esquemáticamente en el gráfico de la Figura 5.12.

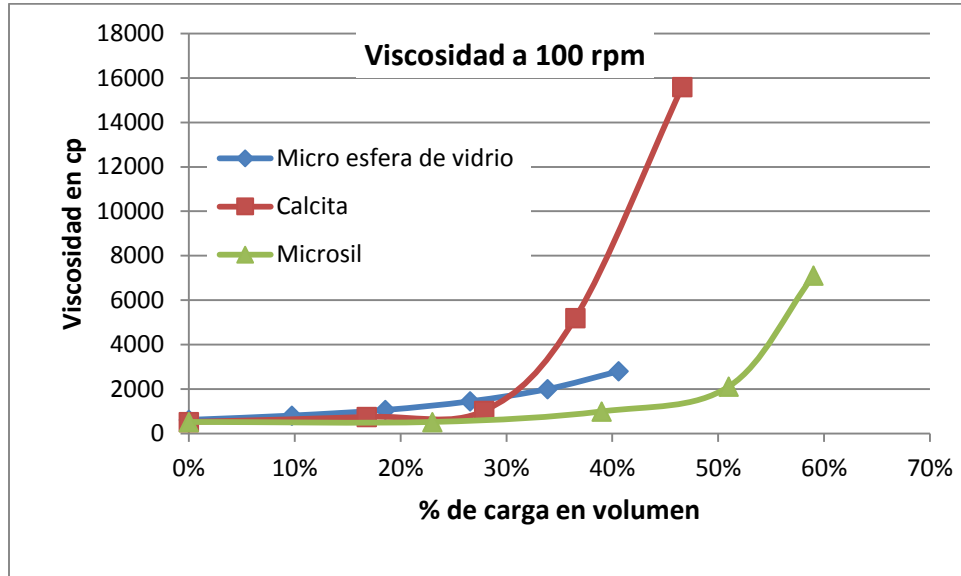


Fig. 5. 12 Efecto del tipo de agregado en la viscosidad de la resina en función de contenido de agregado.

EFFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Con el fin de prever el posible efecto de los agregados en el desarrollo de los concretos poliméricos, se evaluó por separado el efecto de cada tipo de agregado: de la micro-esfera de vidrio, del Microsil y de la calcita.

A excepción de la calcita, la resistencia mecánica de la resina disminuye de manera notoria con el incremento del agregado. En el caso de la calcita la disminución es aproximadamente de un 10% cuando se alcanza un 40% en volumen del agregado.

Para esta misma referencia (40% vol. de carga), con la micro-esfera de vidrio disminuye a un valor del orden de 850 kg/cm^2 , equivalente a una reducción de 27%.

Con el Microsil y el agregado de grano grueso (marmolina) la disminución es de casi 65%. Esto se muestra gráficamente en la Figura 5.13.

Cabe hacer notar, que de acuerdo con proveedor de micro-esferas de vidrio, estas tienen una resistencia a la compresión del orden de 700 kg/cm^2 , por lo que se esperaría un valor de 950 kg/cm^2 al 50% de composición en volumen. Con base en los resultados obtenidos el valor medio es de 830 kg/cm^2 , es decir, una variación del 12% entre ambos valores, lo cual indica que el estudio experimental y los datos del proveedor son relativamente confiables.

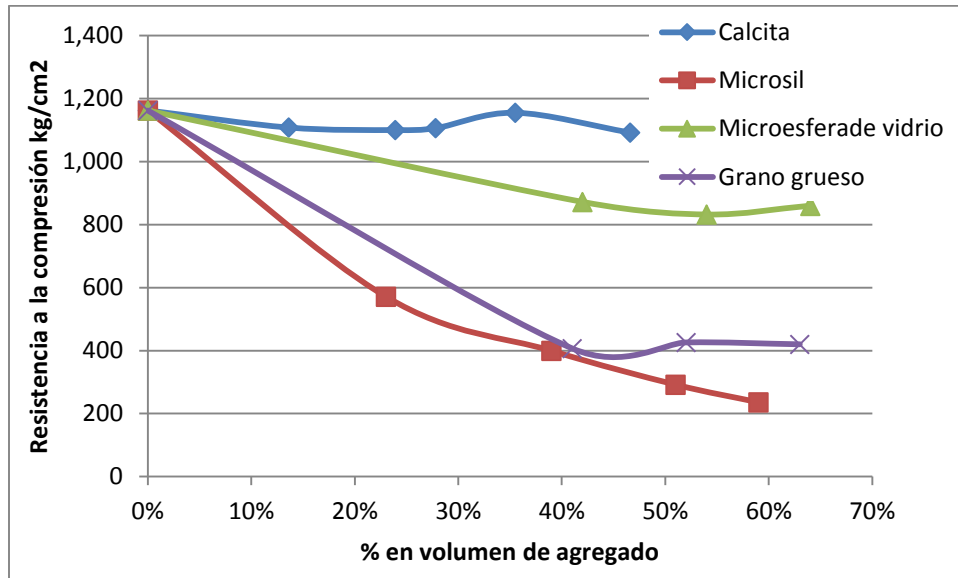


Fig. 5.13 Efecto de los diversos tipos de agregados ligeros y pesados en la resistencia a la compresión de la resina.

En conclusión, el agregado ligero de Microsil y los agregados gruesos de mármol, desde el punto de vista mecánico, presentan la mayor desventaja, sin embargo, dado su bajo costo resultan convenientes de emplear.



CAPITULO 6

RESULTADOS PESO ESPECÍFICO Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO



PESOS ESPECIFICOS Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En esta sección, se evalúan las propiedades (peso específico y resistencia a la compresión) de los concretos ligeros elaborados con los dos tipos de agregados ligeros: micro-esferas de vidrio y Microsil.

CONCRETO POLIMÉRICO LIGERO CON MICRO ESFERAS DE VIDRIO

En una primera instancia se evaluaron diferentes formulaciones diseñadas de acuerdo (DOE) y al concepto del máximo factor de empaquetamiento [McGEARY 1961], empleando gravilla basáltica, marmolina (grano grueso y grano fino) y carbonato de calcio. Las formulaciones diseñadas y evaluadas, mismas que se presentan en la Tabla 6.1, muestran que el peso volumétrico (peso específico) de las mismas se mantiene prácticamente constante y solo se observan algunos cambios con la reducción de gravilla y de la resina en la resistencia a la compresión.

Tabla 6.1 Formulaciones de concretos poliméricos ensayadas inicialmente.

Mezcla	Composición en peso de los componentes					Peso específico	Resistencia compresión kg/cm ²
	Resina MR250	Gravilla	Grano grueso	Grano fino	CaCO ₃		
5	13.5%	46.7%	16.8%	8.4%	14.5%	2.16	310.8
10	13.4%	42.6%	17.5%	11.4%	15.2%	2.17	462.2
11	15.0%	35.7%	17.0%	17.9%	14.5%	2.16	417.5
12	15.0%	32.3%	20.4%	17.9%	14.5%	2.17	423.1
13	15.1%	32.3%	23.8%	17.8%	11.0%	2.17	424.2

En una segunda etapa, se diseñaron y se evaluaron formulaciones en las que se reduce el contenido de resina y de gravilla debido a lo observado en los resultados anteriores y también con la finalidad de reducir el costo del concreto polimérico mediante la reducción del contenido de resina, que es el componente de mayor costo. Los resultados obtenidos con estas nuevas formulaciones presentadas en la Tabla 6.2, muestran un incremento en la resistencia a la compresión a valores del orden de 550 kg/cm², con niveles de resina del 10.5% en peso.

Tabla 6.2 Formulaciones optimizadas de concreto polimérico. Los porcentajes son en base peso.

Muestra	Resina MR250	Gravilla	Grano Medio	Grano Fino	Carbonato de Calcio	Peso específico	Resistencia a la compresión Kg/cm ²
1	12.0%	35.0%	30.0%	15.0%	8.0%	2.23	453.7
2	10.0%	28.0%	34.0%	18.0%	10.0%	2.30	525.6
3	10.5%	28.0%	34.0%	17.5%	10.0%	2.29	564.5
4	11.0%	28.0%	34.0%	17.0%	10.0%	2.28	561.9



Correlacionando los resultados de la primera fase y esta segunda fase de optimización, se puede observar más claramente el efecto del contenido de resina en la resistencia a compresión, la cual aumenta con la reducción del contenido de resina. Sin embargo, el peso específico se incrementa ligeramente con la disminución del contenido de resina, véase Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Variación del peso específico y resistencia a compresión de concretos poliméricos en función del contenido de resina.

Contenido de Resina %w	12%	10%	11%	11.5%	14%	15%
Peso específico	2.23	2.30	2.29	2.28	2.15	2.14
Resistencia compresión kg/cm ²	453.7	525.6	564.5	561.9	462.0	422.0

Al graficar la variación de la resistencia del concreto polimérico, con el contenido de resina no se puede establecer una relación matemática, pero se observa una cierta tendencia, tal y como se muestra el gráfico de la Figura 6.1 A. De igual forma la correlación entre el peso específico y la resistencia mecánica muestra una tendencia de incrementar la resistencia con el peso específico (Véase Figura 6.1 B).

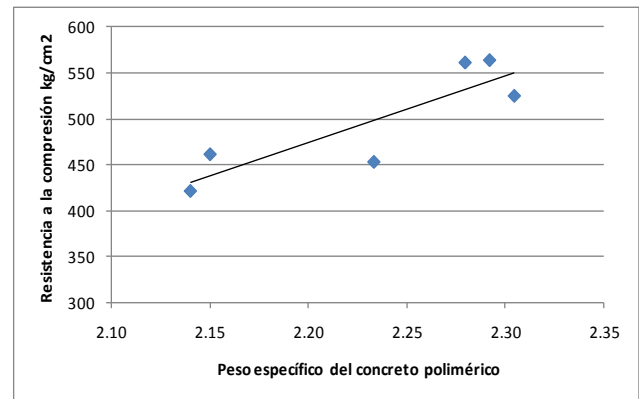
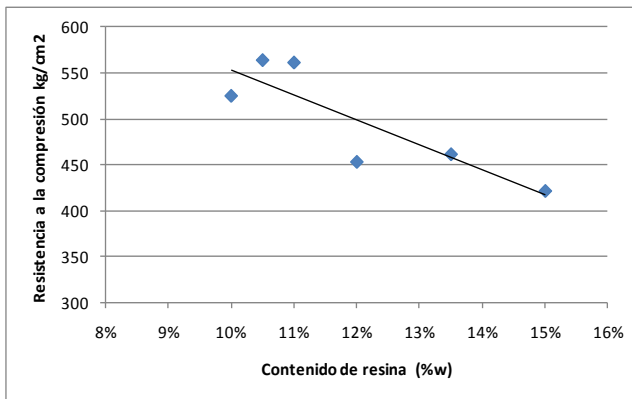


Fig. 6.1 A y 6.1 B Gráficos mostrando el efecto del contenido de resina en la resistencia a la compresión (gráfico izquierdo) y variación de la resistencia a la compresión con el peso específico del concreto polimérico.



Optimización de Concreto Polimérico Ligero con micro esferas de vidrio

En el desarrollo de concretos poliméricos con micro-esferas, se elimina el carbonato de calcio y en su lugar se agrega las micro-esferas en diversos porcentajes desde un 3% hasta un 9% en peso, tratando de mantener el nivel de resina lo más bajo posible, dado que las micro-esferas tienden a “absorber” una mayor cantidad de resina. Las formulaciones diseñadas y evaluadas se presentan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Formulaciones elaboradas con diferentes niveles de micro esferas.

Muestra	Contenido en peso de los componentes						Peso específico	Resistencia compresión kg/cm ²
	Resina poliéster	Gravilla	Grano grueso	Grano fino	Micro esferas	Carbonato de calcio		
Testigo	11.00%	28.00%	34.00%	17.00%	0%	10%	2.27	550
2	12.10%	24.20%	49.30%	11.00%	3.40%	0.00%	2.06	589
4	11.80%	23.70%	48.10%	11.70%	4.70%	0.00%	2.00	646
3	12.60%	32.00%	40.20%	10.10%	5.10%	0.00%	1.94	644
1	12.20%	32.50%	39.10%	10.50%	5.70%	0.00%	1.92	627
6	12.10%	29.90%	36.30%	14.90%	6.90%	0.00%	1.88	674
7	11.60%	34.90%	44.20%	0.00%	9.30%	0.00%	1.76	676

Como se puede observar en la Tabla 6.4, al igual que en el gráfico de la Figura 6.2 A, el incremento de las micro-esferas disminuye el peso específico del concreto. La reducción alcanzada es del orden del 15% con respecto al testigo, con un contenido de micro-esferas del 9.3% en peso. Esto conduce a alcanzar valores del orden de 1,760 kg/m³.

Por otro lado, también se incrementa la resistencia a la compresión con el contenido de micro esferas, observándose un incremento del orden del 23% con respecto al testigo, al agregarse un 9.3% en peso de micro esferas. (Véase Figura 6.2 B). De tal forma que se alcanza una resistencia a la compresión del orden de 670 kg/cm².

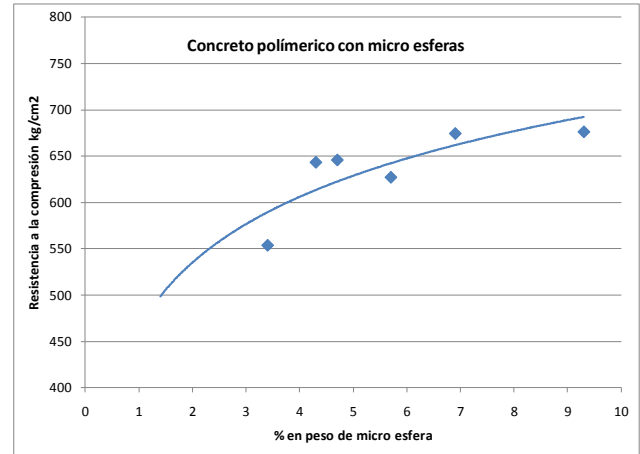
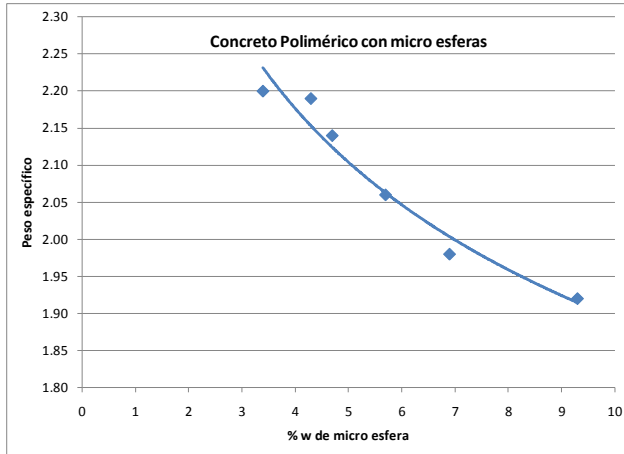


Fig. 6.2 A y 6.2 B Efecto de las micro esferas de vidrio S60 en el peso específico y en la resistencia a la compresión del concreto polimérico.

Determinación del módulo elástico

Con base en las formulaciones y los resultados anteriores, se elaboraron cilindros de 15 x 30 cm., basados en las formulaciones indicadas en la Tabla 6.5 para concreto polimérico normal y concreto polimérico ligero. Como se puede observar en la formulación de concreto polimérico ligero, no se agrega grano fino y en su lugar se agrega una carga ligera, en este caso micro-esferas de vidrio, cuya densidad es del orden de 0.6 g/cm³. Debido a esta baja densidad, el peso agregado de micro esferas es aproximadamente 4 veces menor que cuando se agrega el grano fino.

Tabla 6.5 Formulación de concretos poliméricos.

Concreto Polimérico	Resina %w	Gravilla %w	Grano Grueso %w	Grano Fino %w	Micro esfera de vidrio %w
Normal	9.06	27.32	34.58	29.04	
Ligero	11.6	34.9	44.2		9.3

De los resultados experimentales, el concreto polimérico ligero es aproximadamente un 25.8% más ligero que el concreto polimérico ordinario o normal. En la Tabla 6.6, se reporta el peso medio de los cilindros, así como el peso volumétrico correspondiente a cada tipo de concreto polimérico.



Tabla 6.6 Peso medio de cilindros de concreto polimérico y su correspondiente peso volumétrico.

Concreto Polimérico	Peso cilindro (kg) de 15 x 30 cm	Peso t/m ³ Volumétrico	Variación %
Normal	12,007	2.265	
Ligero	8,909	1.680	25.8%

Del seguimiento del ensayo a compresión en los cilindros de concreto polimérico normal y ligero, se obtuvieron las curvas presentadas en la Figura 6.3.

Como puede observarse, existe una diferencia marcada en la pendiente de ambas curvas, mostrándose una mayor pendiente en la curva correspondiente al concreto polimérico normal. Esto significa una diferencia en el módulo elástico a compresión del orden del 48%, como lo señalan los valores de módulo reportados en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Valores de módulo elástico de concreto polimérico normal y ligero.

Tipo de concreto	Módulo elástico	
	Kg/cm ²	MPa
Normal	287,300	28,184
Ligero	144,410	14,167

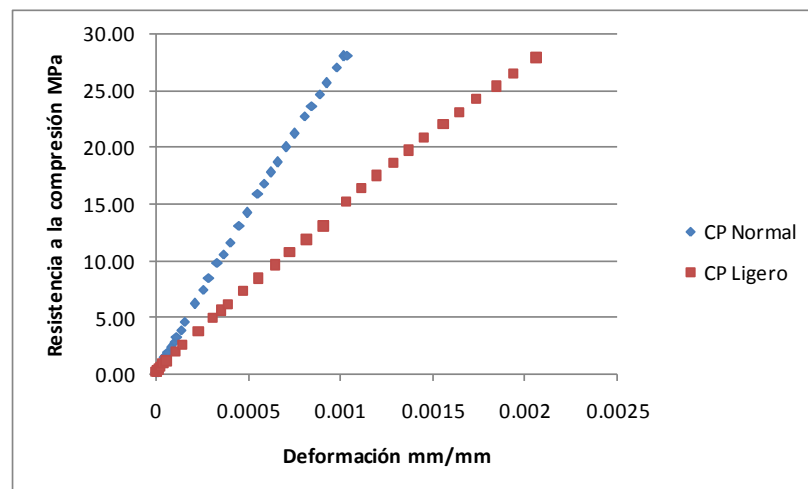


Fig. 6.3 Curvas esfuerzo deformación de concreto polimérico normal y ligero.



Por otro lado, se determinó el coeficiente de Poisson, a partir del análisis de las curvas deformación longitudinal contra coeficiente de Poisson; mismas que se presentan en la Figura 6.4. De estas curvas se considera que el coeficiente de Poisson para el concreto polimérico normal es de 0.418 y para el del concreto polimérico ligero de 0.573.

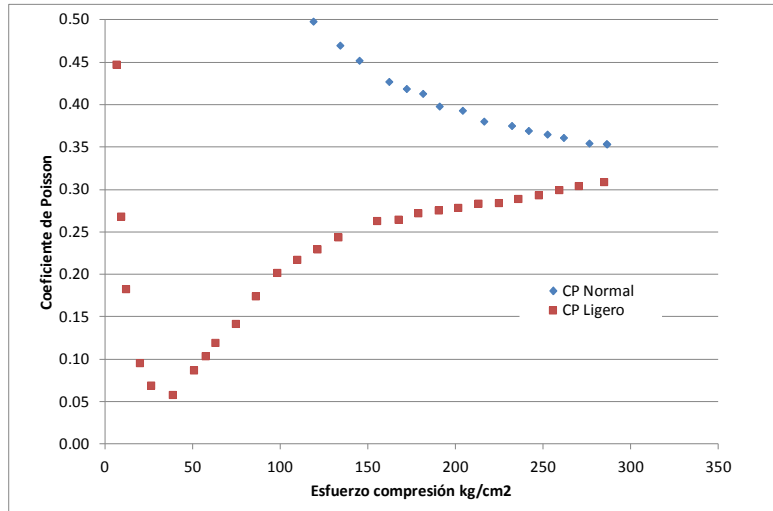


Fig.6.4 Determinación del Coeficiente de Poisson con la deformación longitudinal. El valor del coeficiente se considera cuando la curva se hace asintótica.

Estos datos en principio son concordantes con los módulos elásticos observados, en el sentido de que si se considera que el coeficiente de Poisson está dado por la relación: $\nu = \epsilon_{trans} / \epsilon_{long}$, esto indica que el concreto polimérico se deforma más transversalmente por lo que su rigidez disminuye.

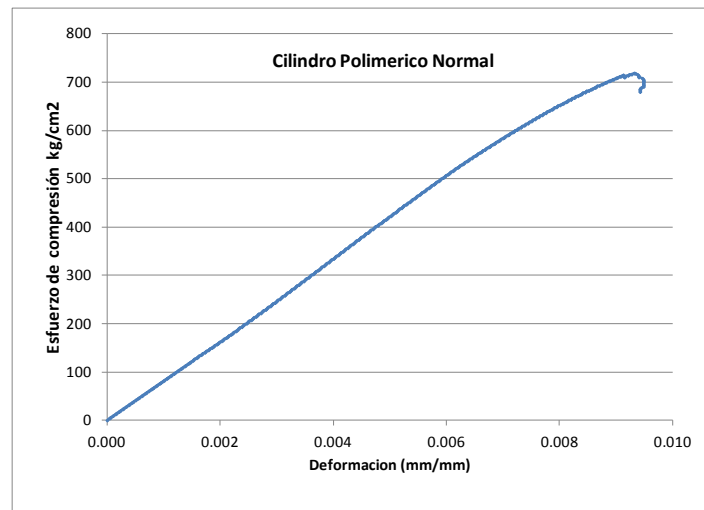


Fig. 6.5 Curva típica esfuerzo - deformación del concreto polimérico normal.

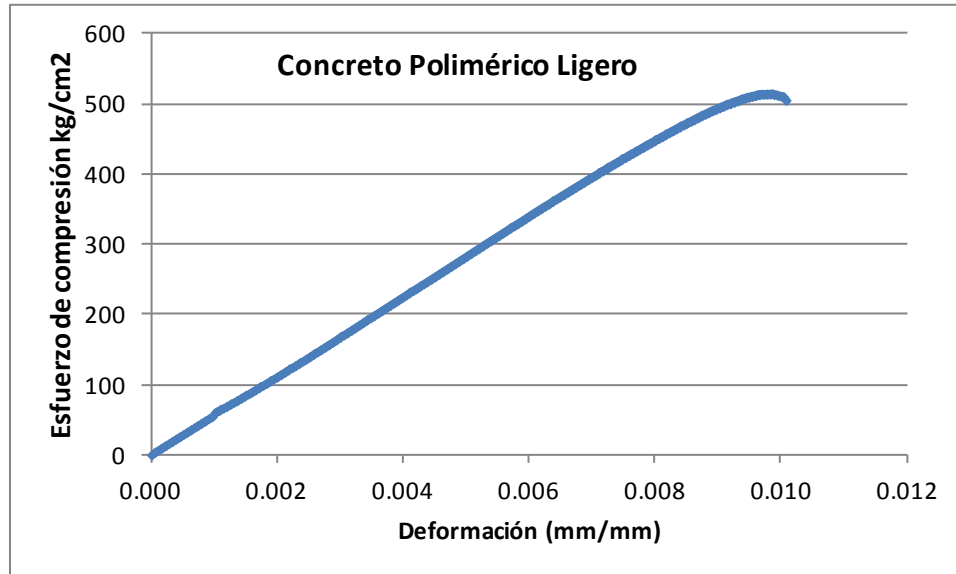


Fig. 6.6 Curva típica esfuerzo- deformación del concreto polimérico ligero.

CONCRETOS LIGEROS CON MICROSIL.

En este apartado, se presentan el efecto de las micro-esferas de Microsil en los pesos específicos y resistencias a la compresión en la concretos poliméricos. De igual forma se compara el efecto en concretos con micro-esferas de vidrio. En este caso los concretos poliméricos ligeros se elaboran usando mezclas de cargas ternarias a base de arena basáltica, grano de mármol medio y calcita, la cual es parcialmente o totalmente sustituida por los agregados ligeros.

Efecto en el peso específico

Este análisis se realiza en formulaciones llamadas terciarias, dado que se emplean tres tamaños de granos básicamente, siendo el tamaño más pequeño el que es sustituido parcialmente por los agregados ligeros que presentan tamaños medios de 100 micras, 200 micras y 40 micras que corresponden al Microsil 100, Microsil 200 y micro-esfera de vidrio S60 respectivamente.

La Tabla 6.8 muestra los resultados experimentales de pesos específicos y resistencia a la compresión de los diversos v concretos poliméricos ensayados. Se reportan también los contenidos en volumen de resina y agregado ligero.



Tabla 6.8 Resultados experimentales de concretos ligeros a base de micro-esferas de vidrio, Microsil 100S y Microsil 200S

Formulación	Tipo de Agregado Ligero	% Agregado en Volumen	% Resina en Volumen	Peso Especifico	Resistencia a la Compresión kg/cm ²
Mezcla 2	Micro Esfera S60	27%	17%	1.85	416
Mezcla 8	Micro Esfera S60	26%	23%	1.76	553
Mezcla 7	Micro Esfera S60	26%	22%	1.83	489
Mezcla 6	Micro Esfera S60	27%	20%	1.77	501
Mezcla 4	Micro Esfera S60	28%	17%	1.85	526
Mezcla 4	Micro Esfera S60	49%	17%	1.88	725
Mezcla 5	Micro Esfera S60	27%	19%	1.83	540
Mezcla 11	Micro Sil 100S	24%	22%	2.10	525
Mezcla 12	Micro Sil 100S	24%	24%	2.08	565
Mezcla 1	Micro Sil 100S	25%	25%	2.13	745
Mezcla 10	Micro Sil 100S	25%	21%	2.16	509
Mezcla 9	Micro Sil 100S	26%	19%	2.17	518
Mezcla 4	Micro Sil 200S	52%	11%	1.77	509
Mezcla 15	Micro Sil 200S	24%	22%	2.11	537
Mezcla 1	Micro Sil 200S	25%	18%	2.08	587
Mezcla 2	Micro Sil 200S	25%	25%	2.05	510
Mezcla 2	Micro Sil 200S	25%	25%	2.11	498
Mezcla 14	Micro Sil 200S	25%	21%	2.09	548
Mezcla 16	Micro Sil 200S	25%	24%	2.08	582
Mezcla 13	Micro Sil 200S	26%	19%	2.08	550

Resulta difícil hacer una correlación de los diversos valores obtenidos en las múltiples muestras que se elaboraron y se ensayaron, debido a una dispersión de datos atribuidos a diversos factores de procesamiento, compactación y forma de los granos empleados. El gráfico de la Figura 6.7, muestra los valores de pesos específicos de cada lote ensayado de concreto polimérico ligero con cada uno de los tres tipos de agregados ligeros: Micro-esfera de vidrio S60, Microsil 100S y Microsil 200S. En todos los casos, los pesos específicos determinados son menores al peso específico promedio de concreto polimérico normal desde un 5% hasta un 30%, dependiendo del tipo de agregado fundamentalmente. Como referencia el peso promedio del concreto polimérico normal es de 2,300 kg/m³.

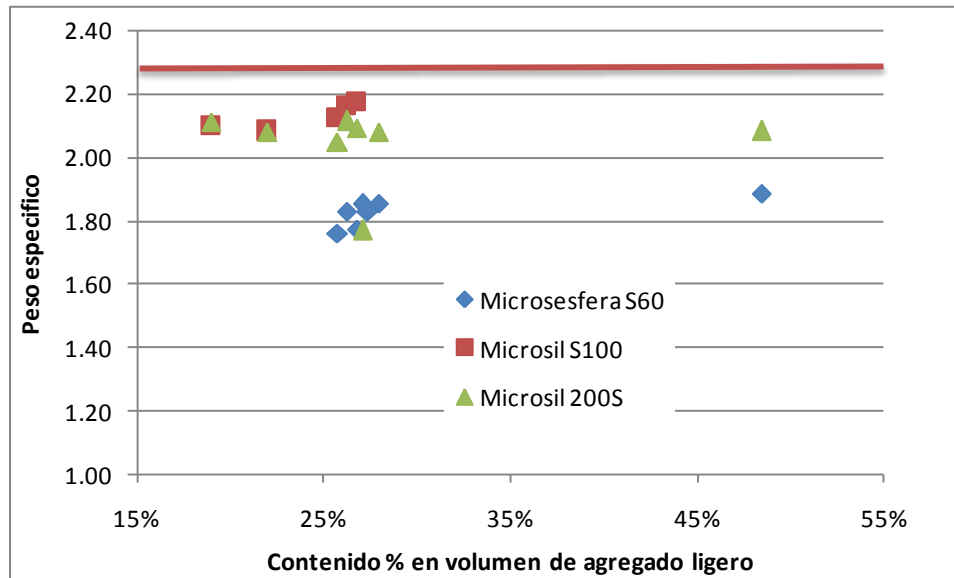


Fig.6.7 Efecto de los agregados ligeros en el peso específico del concreto polimérico. La línea continua corresponde al valor medio del concreto polimérico normal.

De los resultados observados, el agregado a base de micro-esfera de vidrio disminuye el peso hasta en un 20%, lo cual es concordante con los datos reportados en los ensayos de cilindros de concreto ligero y normal a base de formulaciones cuaternarias cuyos valores fueron del orden del 25%, de acuerdo a los datos presentados en el Capítulo 6.

Por otro lado, tanto el Microsil 100S como 200S tienen un menor efecto en el peso específico, logrando tan solo reducciones del orden de 10% y eventualmente de un 18%. Este resultado **no** era esperado, ya que el peso específico de estas micro-esferas de Microsil es del orden de 0.22 contra un peso específico de 0.6 de las micro-esferas de vidrio. La causa de esta baja disminución se debió a que una buena parte de las micro-esferas de Microsil no estaban completamente recubiertas por el agente de acoplamiento y al parecer, con base en información del proveedor, el lote no había sido fabricado de acuerdo a las especificaciones habituales por lo que se sospechaba que el cambio térmico pudiese haber roto parte de las micro esferas y el recubrimiento se sinterizaba fuera del contacto con la superficie de las micro-esferas.

Esta información fue parcialmente corroborada al realizar ensayos de absorción de agua y alcohol en las micro-esferas de Microsil, observándose una rápida absorción del alcohol por parte de las micro-esferas, lo que provoca la precipitación de ellas.

En este ensayo se colocó las micro-esferas de Microsil y posteriormente se vació el alcohol. La relación alcohol micro esfera fue de 10:1 en peso. La fotografía de la Figura 6.8 se muestran ambas muestras de Microsil en alcohol.

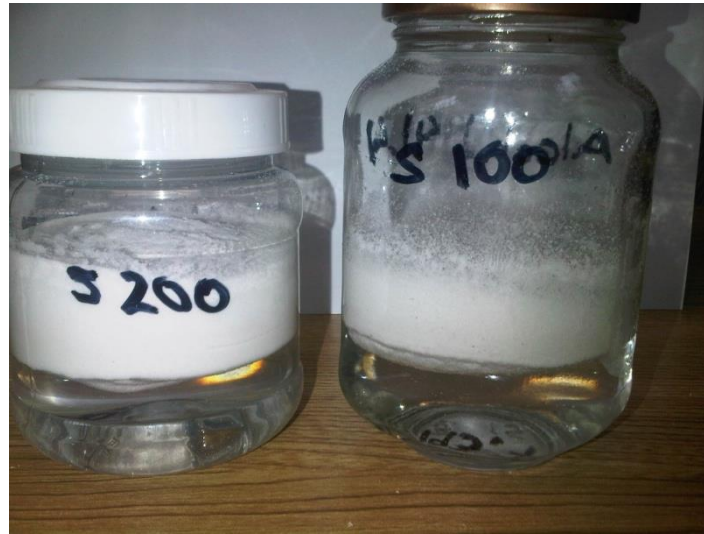


Fig.6.8 Colocación de micro esferas sobre el alcohol. Obsérvese la transparencia del alcohol lo que indica que no hay difusión de la micro-esferas hacia este medio al inicio del ensayo.

Al inicio se observa la ascensión del alcohol entre la pared de vidrio y las micro-esferas además de pequeñas porciones de micro-esferas que empiezan a precipitar y la solución se empieza a perder su transparencia. Esto ocurre en un lapso no mayor a 5 minutos. Después de agitar levemente la solución, se observa un mojado y precipitación de las micro-esferas. Lo que hace pensar que el recubrimiento de silano es incompleto o las micro esferas se encuentran rotas y de esta forma el alcohol que tiene una tensión superficial del orden de 22.8 dinas/cm, mucho menor que el agua (72.4 dinas/cm) humecta rápidamente la micro-esfera, produciéndose una absorción que provoca la precipitación de las micro esferas. Véase Figura 6.9.



Fig. 6.9 Mojado de micro-esferas y precipitación. En este caso el efecto fue mayor en las micro esferas M200S de tal forma que al final se observa la formación de una pasta en este tipo de Microsil.



En el caso del ensayo de absorción en agua, la absorción es más lenta debido a la alta tensión superficial del agua (72 dinas/cm), comparada con la tensión superficial del alcohol etílico de 22.8 dinas/cm. En este caso las condiciones de ensayo fueron colocar 50 gramos de Microsil 100S y 200S, y vaciar posteriormente 200 gramos de agua, tal y como lo muestran las fotografías de la Figura 6.10. Al cabo de tres días, se observa una gran precipitación de las micro-esferas de Microsil 100S y a la semana se presenta la absorción total del agua por parte de ambos tipos de micro-esferas (Véase Figura 6.11). En este punto, ambas muestras de Microsil absorben toda el agua formándose una pasta.



Fig. 6.10 Fotos correspondientes al inicio de la prueba la izquierda Micro sil 100s y a la derecha Micro sil 200s.



Fig.6.11 Foto correspondientes al término de 3 días lado izquierdo Microsil 100S, lado derecho Microsli 200S.



Fig. 6.12 A finalizar la prueba 7 días Se absorbe el agua y se forma una pasta.

Análisis de comportamiento mecánico a compresión

En términos generales, la presencia de las cargas ligeras en el concreto polimérico, reduce la resistencia a la compresión del mismo. Sin embargo, esta reducción no es mayor a un 10 %, e inclusive en un par de muestras el efecto es contrario, incrementando de manera importante la resistencia a la compresión hasta en un 40%. Una de las muestras corresponde a un concreto ligero con un 50% en volumen de micro-esfera de vidrio y el otro corresponde a una muestra con agregado de Microsil 100S en un 25% en volumen.

Los datos experimentales obtenidos de resistencia a la compresión se mantiene dentro de un rango de 500 a los 550 kg/cm², tal y como se puede observar en los datos graficados en la Figura 6.13.

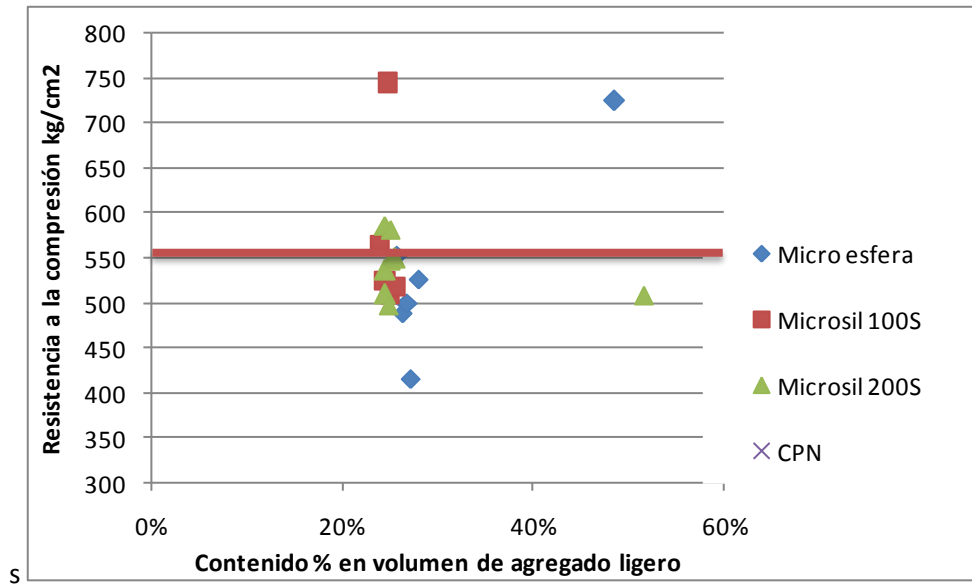


Fig. 6.13 Efecto del contenido de agregado ligero en la resistencia a la compresión de los concretos poliméricos ligeros. La línea continua corresponde al valor medio del concreto polimérico normal.

Finalmente al correlacionar el peso específico contra la resistencia a la compresión no se observa dependencia alguna de la resistencia contra el peso específico al menos dentro de los rangos experimentales, tal y como lo muestran los datos en el gráfico de la Figura 6.14.

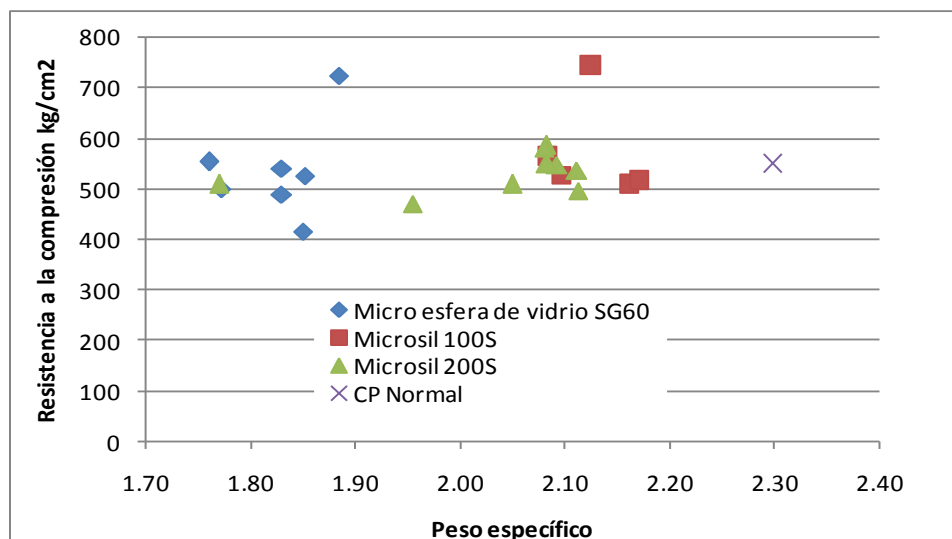


Fig. 6.14 Grafico peso específico vs resistencia a la compresión de los diversos concretos poliméricos ligeros a base de micro esferas de vidrio y Microsil.

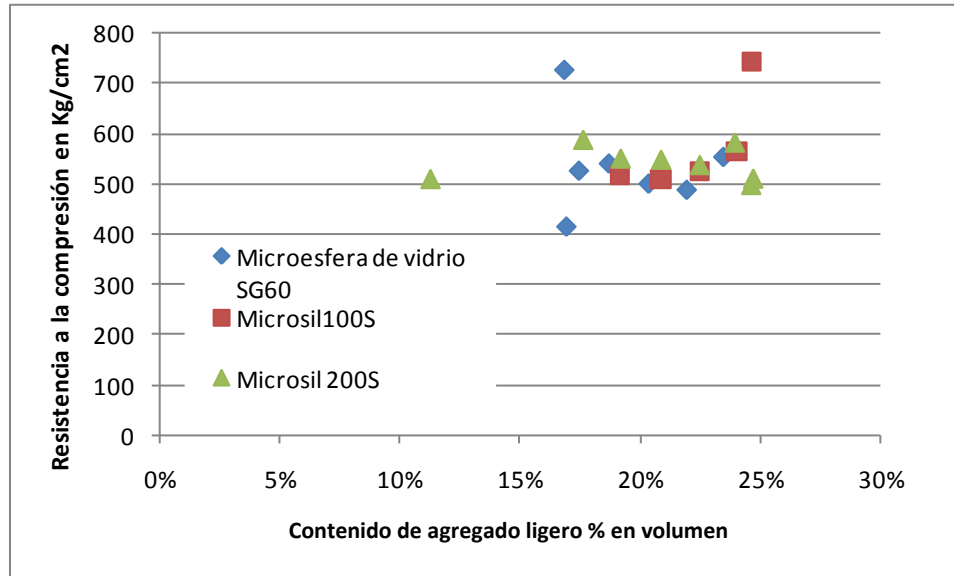


Fig.6.15 Resistencia a la compresión en relación al contenido de agregado ligero en volumen.

Mezclas cuaternarias

En los concretos poliméricos a base de mezclas cuaternarias, la calcita fue sustituida parcialmente por los diferentes tipos de agregados ligeros (micro-esfera S60, Microsil 100S y Microsil 200S). De tal forma, que el contenido máximo de agregado ligero en volumen fue del 11%. Las muestras experimentales se pueden agrupar en dos niveles, el primero contiene muestras con un contenido medio del 1% en volumen de agregado ligero y el segundo con un contenido medio del 11%.

Como puede observarse, los pesos específicos tienden a disminuir con el incremento del agregado ligero, a excepción de las muestras con el agregado de Microsil 200S, tal y como lo muestra el gráfico de la Figura 6.16. Esta anomalía puede deberse a los problemas de fabricación de las micro-esferas del Microsil 200S.

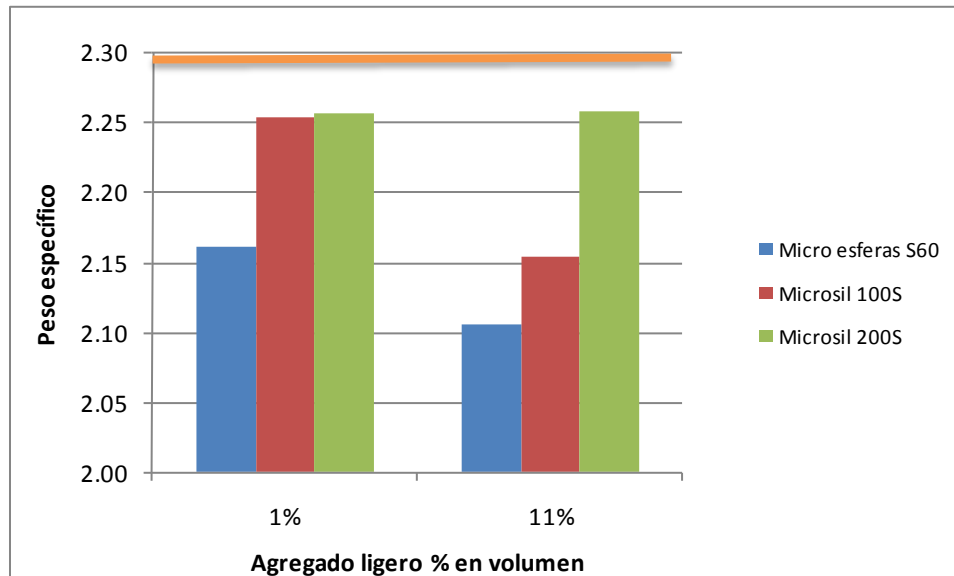


Fig. 6.16 Efecto del tipo y contenido en volumen de agregado ligero en las mezclas cuaternarias de concreto polimérico ligero.

Análisis de mezclas ternarias.

Los concreto poliméricos a base de mezclas ternarias se elaboran sustituyendo la calcita totalmente por los diferentes agregados ligeros micro-esfera S60, Microsil 100S y Microsil 200S, quedando entonces tan solo tres agregados en el concreto polimérico.

En estos concretos también se hizo una estimación previa del peso específico esperado en función del contenido de los diversos agregados, empleando la regla de las mezclas.

Para el caso de las mezclas testigo, el peso específico estimado y experimental, presentaron una variación de tan solo el 2%, lo cual nos muestra que el método de estimación de pesos específicos basados en la regla de las mezclas es bastante aceptable.

Sin embargo, se puede observar que para todos los concretos con agregados ligeros, los pesos experimentales determinados por medio de la técnica de picnometría (Norma NMX-C-164-ONNCC-2002), fueron mayores respecto al peso estimado a partir de los componentes de cada mezcla elaborada.

En el caso de las muestras elaboradas con micro-esfera S60 se tuvo una variación entre el peso estimado y experimental del 6%. En las muestras formuladas con el Microsil 100S la diferencia entre el peso experimental y el teórico fue del orden del 23%. Finalmente para los especímenes elaborados con el Microsil 200S, estos presentaron una variación entre ellos del 27% entre ambos pesos como se muestra en la Figura 6.17.

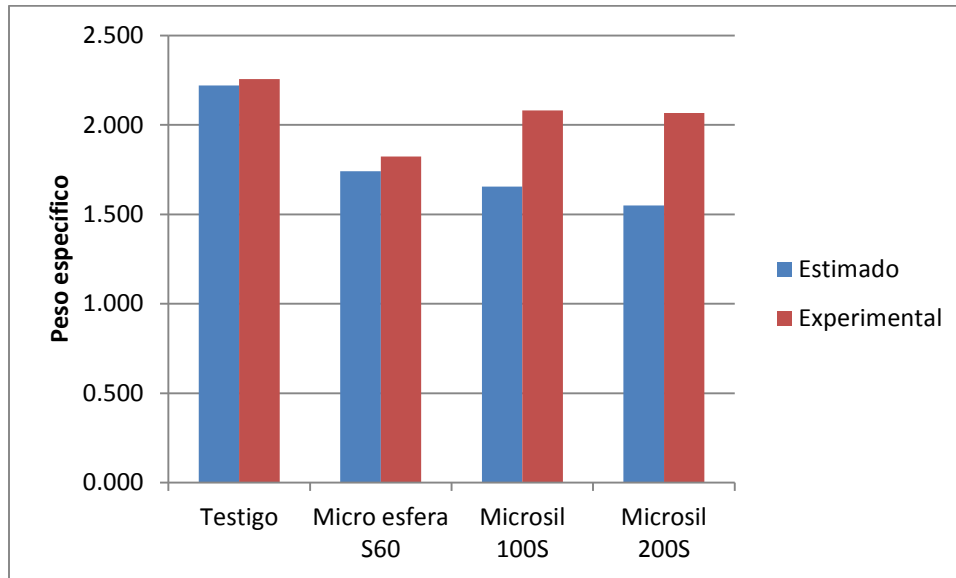


Fig. 6.17 Pesos específicos medios experimentales y estimados con base en la regla de las mezclas de concretos ternarios ligeros.

Si bien, los especímenes elaborados con Microsil 200S y 100S presentan una disminución en su peso específico experimental de 8% con respecto a la muestra testigo, este resultado no era esperado como ya se ha mencionado anteriormente. Dicha anomalía, se atribuye principalmente a que las micro-esferas de Microsil no estaban completamente recubiertas por el agente de acoplamiento y al parecer, de acuerdo a información del proveedor, el lote no había sido fabricado según las especificaciones habituales por lo que se sospechaba que el cambio térmico pudiese haber roto parte de las micro-esferas y el recubrimiento se sinterizaba fuera del contacto con la superficie de las micro-esferas.

De esta forma, las muestras elaboradas con micro-esfera S60 mostraron la mayor disminución del peso específico experimental, alcanzando valores del orden de 1823 kg/m^3 , lo cual representa una disminución del 20% respecto al peso experimental de la muestra testigo. En el caso de los concretos con Microsil 100 y 200 la reducción fue apenas del 9% y del 12% respectivamente. Esto lo podemos apreciar de manera gráfica en la Figura 6.18. Donde se muestran los valores medios del concreto polimérico testigo (concreto normal) y de los concretos poliméricos con agregados ligeros.

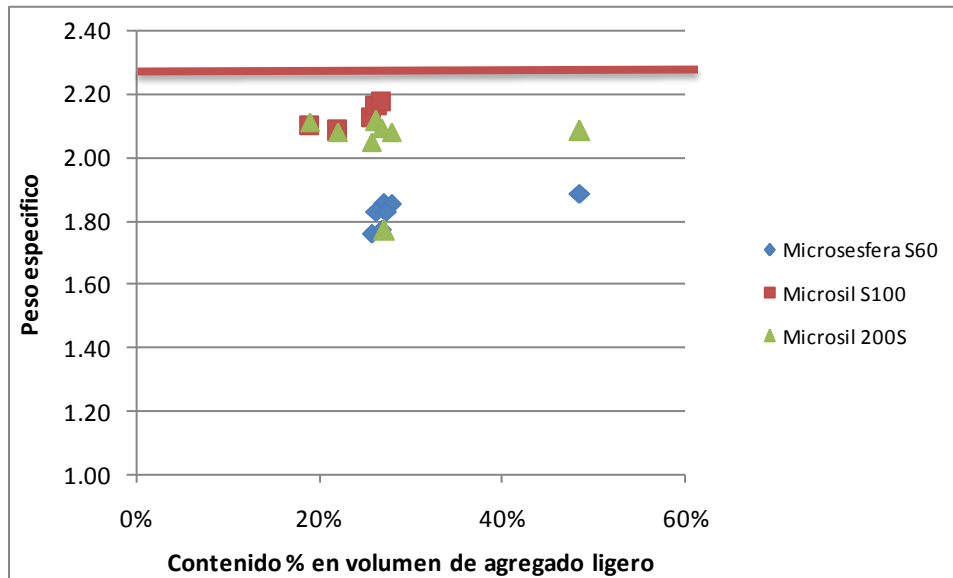


Fig.6.18 Efecto del tipo y contenido de agregado ligero en el peso específico de concretos poliméricos ternarios ligeros.

Finalmente el gráfico de la Figura 6.19 muestra los valores medios de los diferentes tipos de concretos ligeros.

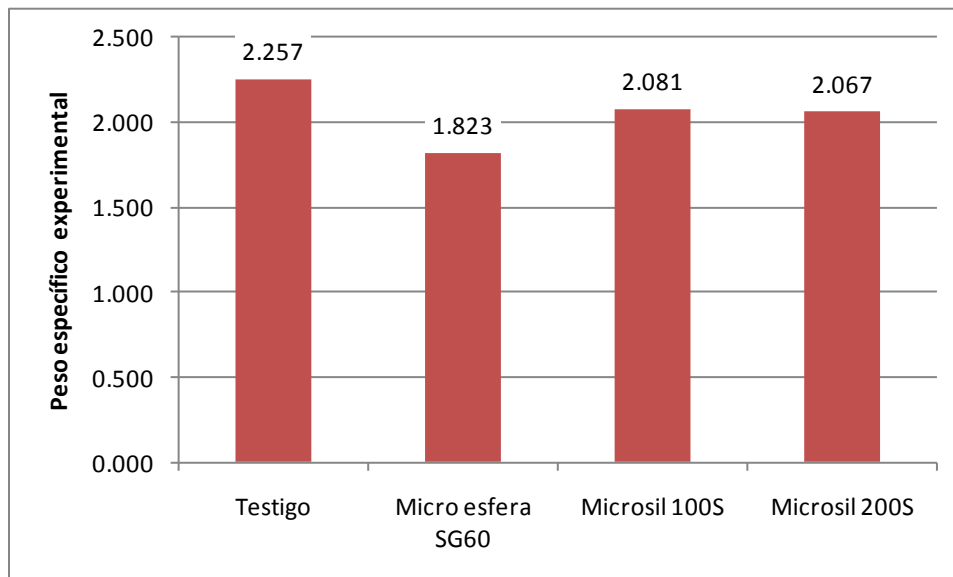


Fig. 6.19 Valores medios de los pesos específicos obtenidos en función del tipo de agregado ligero.



EFFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION

Mezclas cuaternarias

El valor medio de resistencia a la compresión del concreto polimérico cuaternario testigo es del orden de 590 kg/cm². Este valor es alcanzado y superado por diversas formulaciones de concreto poliméricos ligeros, lo que se puede apreciar en la figura 6.20.

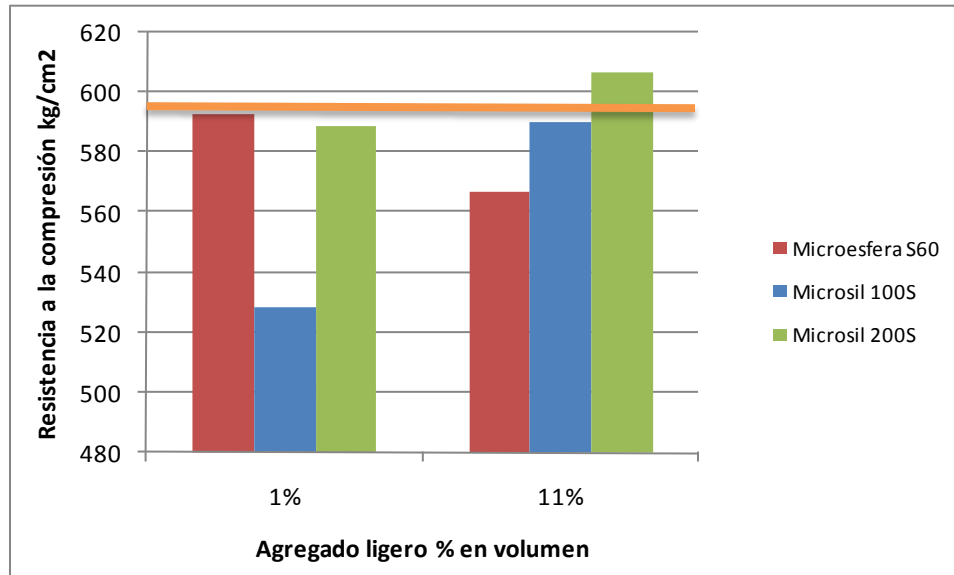


Fig. 6.20 Efecto del tipo y contenido de agregado ligero en la resistencia a la compresión en los concretos poliméricos cuaternarios ligeros. La línea horizontal corresponde al valor medio del testigo.

Mezclas ternarias

Este tipo de mezclas presenta una resistencia a la compresión ligeramente menor a la de las mezclas cuaternarias lo que se puede observar en la Figura 6.21, de tal forma que también varias formulaciones con agregados ligeros supera este valor.

Al igual que en las mezclas cuaternarias, en términos generales, no es posible determinar una relación de las propiedades con respecto a la composición por el momento. Es necesario realizar un mayor número de ensayos y tener un control más estricto el en proceso y compactación de los especímenes a fin de eliminar las variables del proceso.

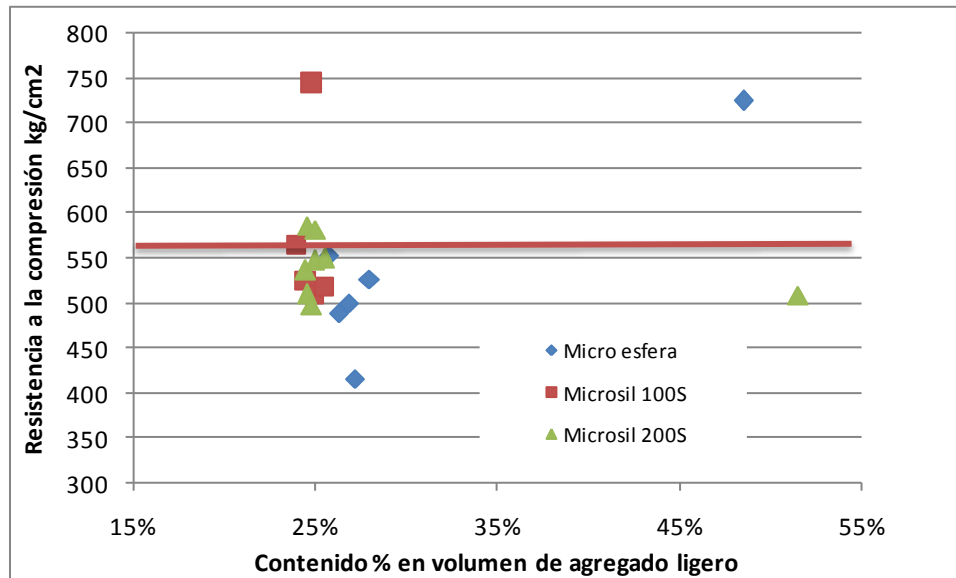


Fig. 6.21 Efecto del tipo y contenido de agregado ligero en la resistencia a la compresión de concretos poliméricos ternarios ligeros.

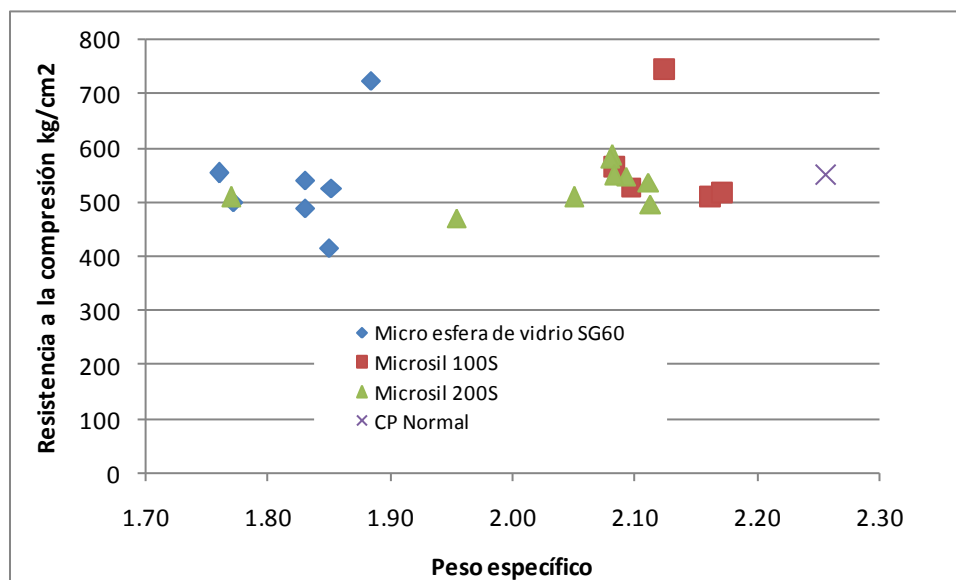


Fig.6.22 Resistencia la compresión en función de los pesos específicos de cada uno de los tipos de agregados ligeros.

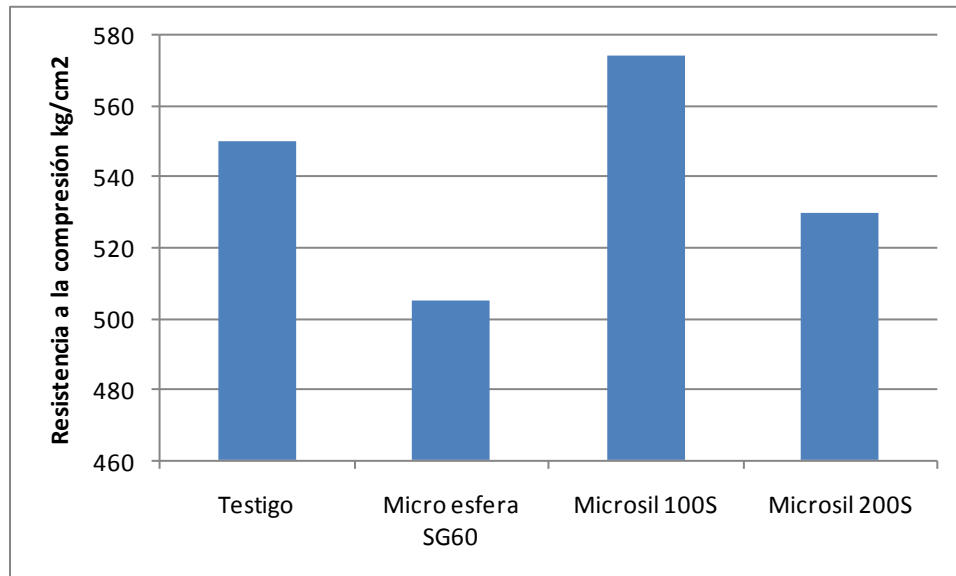


Fig. 6.23 Valores medios de resistencia a la compresión de los diferentes tipos de concretos poliméricos ternarios ligeros.

Comparación entre mezclas ternarias y cuaternarias.

Finalmente se compara los valores medios de todas las formulaciones elaboradas con los agregados ligeros tanto en mezclas ternarias como cuaternarias. Esta comparación es indicativa y muestra ciertas tendencias que se explican en función del contenido de agregado ligero en cada tipo de mezcla.

Peso específico

El gráfico de la figura 6.24, muestra que si bien los testigos prácticamente tienen el mismo peso específico, existe una pequeña reducción del peso específico de los concretos a base de mezclas ternarias con respecto a las mezclas cuaternarias. Esto se debe en parte a que el contenido en volumen de los agregados ligeros en las mezclas cuaternarias es del orden del 7 al 10% en volumen, mientras que en los concretos ternarios el contenido de agregado ligero varía entre 24 al 30% en volumen.

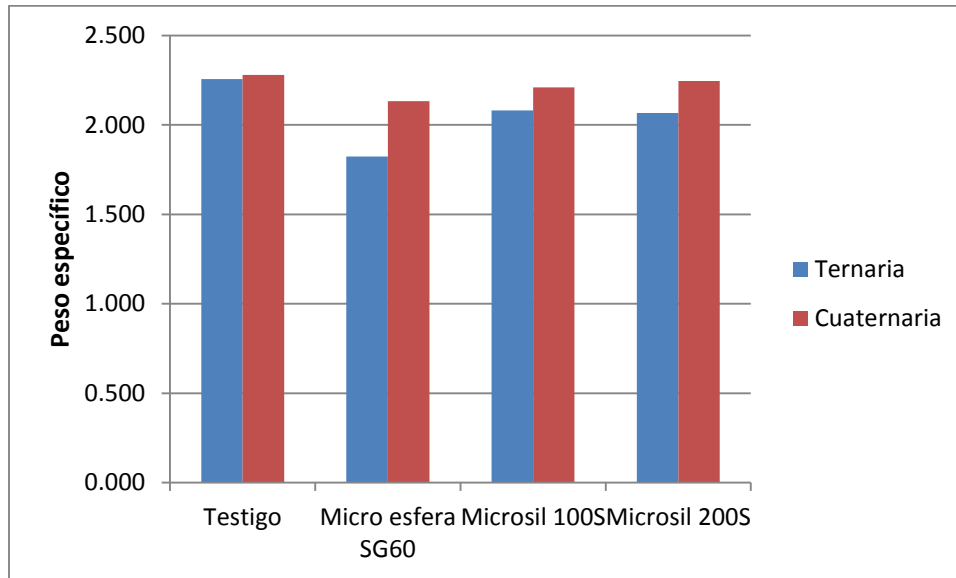


Fig.6.24 Efecto del tipo de mezcla en el peso específico de los concretos ligeros

Resistencia a la compresión

Respecto al efecto del tipo de mezcla en la resistencia a la compresión de los concretos ligeros, hay una tendencia a ser ligeramente superior esta propiedad en los concretos a base de mezclas cuaternarias, dado que la cantidad de agregado ligero se reduce. Esto se muestra gráficamente en la Figura 6.25. También es importante notar que la resistencia mecánica media de diferentes concretos ligeros está dentro del rango de los concretos normales.

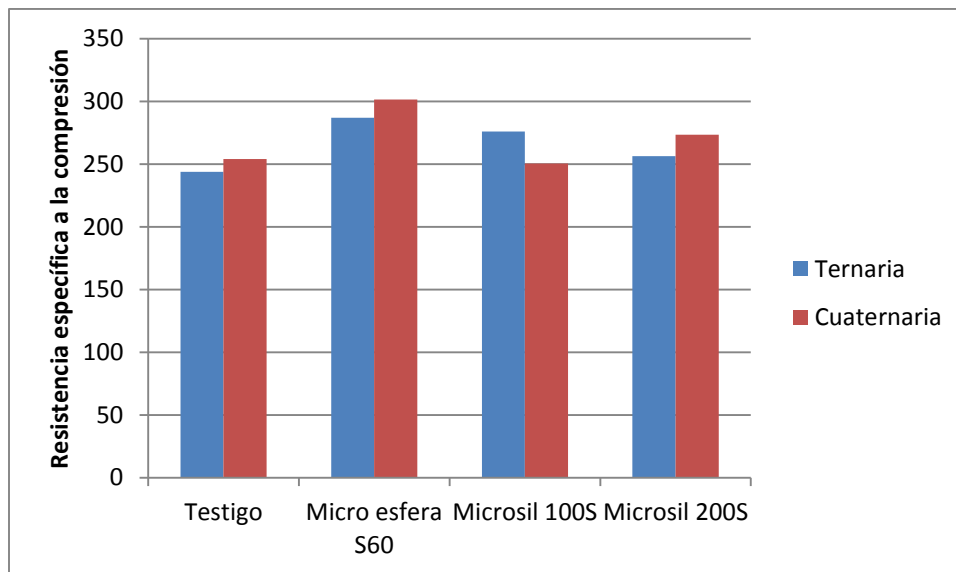


Fig.6.25 Efecto del tipo de mezcla en la resistencia a la compresión de los concretos ligeros,



CAPITULO 7

RESULTADOS PROPIEDADES A FLEXION

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO



PROPIEDADES A FLEXION

Ensayos a flexión de placas testigo de concreto polimérico. Efecto del espesor

Las placas de concreto polimérico muestran un comportamiento totalmente frágil a la flexión. La ruptura se presenta en el tercio medio de la placa siendo ésta una falla a tensión, tal y como se observa en la fotografía de la Figura 7.1.

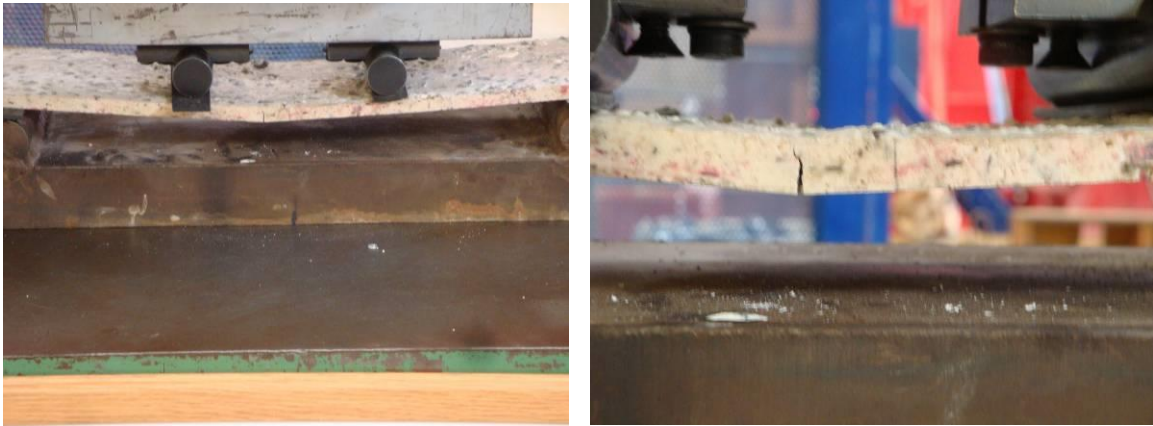


Fig.7.1 Fotografías que muestran el tipo de falla frágil en las placas testigo de concreto polimérico.

Las curvas típicas de los testigos generados durante el ensayo de flexión se muestran en los gráficos de la Figura 7.2. La capacidad de carga y la rigidez son proporcionales al peralte de la placa, como lo muestran las curvas en dicho gráfico. Por otro lado, las flechas a las que ocurre la falla son inversamente proporcionales al peralte de la misma. La transformación de las curvas carga flecha a curvas resistencia a la flexión flecha se presenta en la misma Figura 7.2.

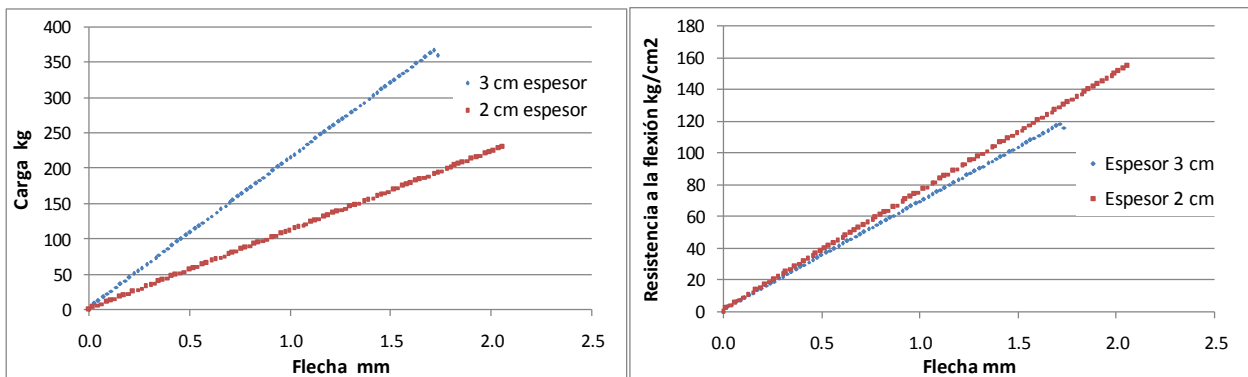


Fig. 7.2 Curvas típicas de concretos poliméricos Lado izquierdo curva carga- flecha. Lado Derecho curva resistencia a la flexión flecha.



Como puede observarse las pendientes tienden a ser similares ya que se trata del mismo material, sin embargo, hay una más marcada diferencia en la resistencia máxima a la flexión. Una de las posibles explicaciones a esto, es que podría deberse a la dificultad de elaborar la placa a medida que se incrementa el espesor, ya que el proceso requiere de una mayor rapidez al incrementar la masa de concreto polimérico colocada, debido a la exotermia de la reacción. Esto reduce el tiempo disponible para su compactación, lo que puede generar porosidad en el interior del material reduciendo la compactación real y reduciendo las propiedades mecánicas de la placa. La Tabla 7.1, muestra las propiedades medias de las placas de concreto polimérico sin reforzar.

Tabla 7.1 Valores medios de los Testigos a flexión (CP indica concreto polimérico).

Laminados	Espesor cm	Carga Máxima Kg	Flecha máxima mm	Módulo de ruptura kg/cm ²	Módulo elástico Kg/cm ²
Testigo CP 2 cm	2	230.0	2.06	154	154,422
Testigo CP 3 cm	3	359.9	1.73	115	82,657

Efecto del reforzamiento en las propiedades a flexión del concreto polimérico

Al reforzar las placas de concreto polimérico con la malla de petatillo, se presentan un comportamiento plástico debido a una mayor aportación mecánica de la fibra. En las placas reforzadas con la malla de petatillo, como podemos observarla esta comienza a trabajar prácticamente al salir de la zona elástica, observándose un comportamiento similar al de elementos de concreto reforzados con varillas metálicas. En el caso de las placas con 2 cm de peralte, el esfuerzo a la cedencia se da a valores del orden de 175 kg/cm². Este punto corresponde al límite de la región elástica. A partir de este punto se inicia una deformación plástica de la placa reforzada, llegando a valores promedio de ruptura del orden de 315 kg/cm². Este comportamiento se representa gráficamente en la Figura 7.3.

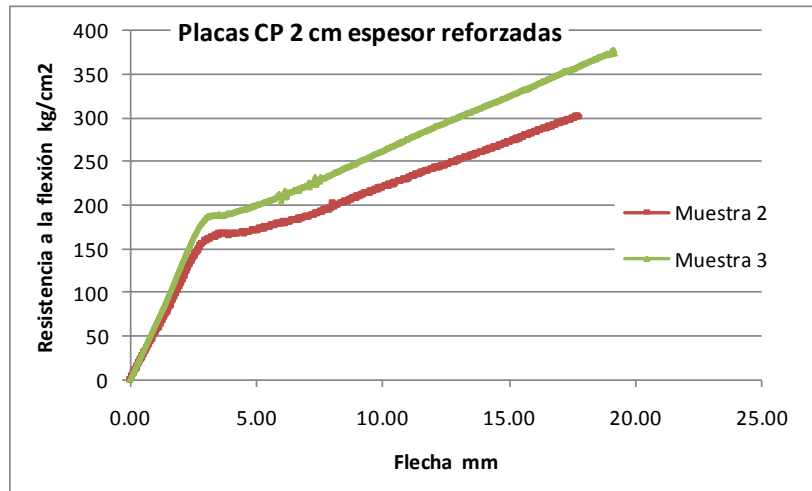


Fig. 7.3 Curvas representativas del ensayo a flexión de placas de concreto polimérico de 2 cm de peralte reforzadas con petatillo.

En el caso de las placas con peralte de 3 cm reforzadas con petatillo, muestran la mayor capacidad de carga (cercana a 800 kg), sin embargo el esfuerzo a la cedencia es menor que el observado en las placas con 2 cm de peralte. Dicho esfuerzo alcanza un valor medio 145 kg/cm². La resistencia a la fractura alcanza un valor medio de 260 kg/cm², lo que representa un incremento del 100% con respecto al testigo, sin embargo, la rigidez (módulo elástico) se incrementa ligeramente con respecto al testigo en un 12%. La flecha máxima se incrementa hasta valores de 20 mm. Los gráficos representativos de estas placas se presentan en la Figura 7.4.

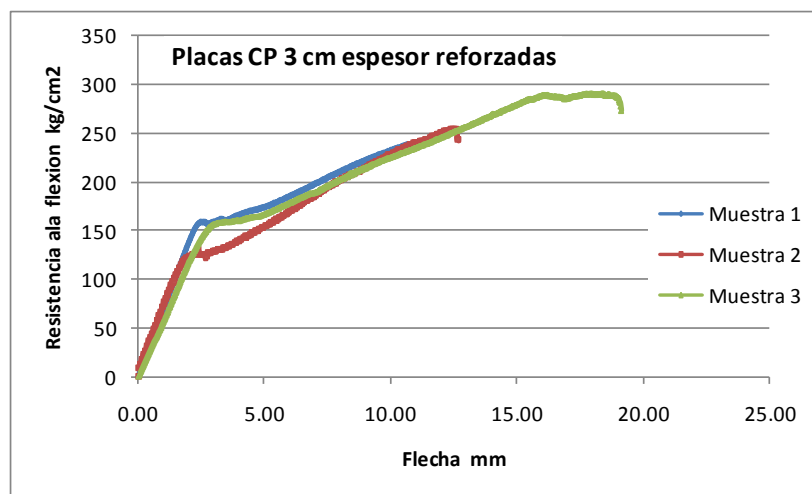


Fig. 7.4 Curvas representativas del ensayo a flexión de placas de concreto polimérico de 3 cm de peralte reforzadas con petatillo.



Como se puede observar, la capacidad de carga se incrementa en un 104 y 120% en las placas de peralte de 2 y 3 cm respectivamente. Así mismo también se incrementa de manera importante la capacidad de deformación del elemento a la fractura. Este incremento es 8 a 10 veces mayor con respecto a los testigos. Los valores promedio de las propiedades a flexión de las placas de concreto polimérico, se reportan en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Propiedades mecánicas de las placas de concreto polimérico reforzadas con tejidos bidireccionales de fibra de vidrio.

Laminados	Espesor cm	Esfuerzo a cedencia kg/cm ²	Carga Máxima Kg	Deformación a carga máx. mm	Módulo de ruptura kg/cm ²	Módulo elástico Kg/cm ²
CP reforzado Petatillo	2	177.7	499.7	16.3	315.7	124,418
CP reforzado Petatillo	3	144.4	771.3	14.0	260.9	92,026

Respecto a éste último punto, las fotografías de la Figura 7.5, permiten observar la gran deflexión que tiene la placa reforzada de 3 cm de peralte. La falla ocurre en uno de los puntos de carga, siendo la fractura ligeramente inclinada observándose que solo existe un pequeño desprendimiento del refuerzo.



Figura 7.5 Ensayo a flexión de placa de concreto polimérico reforzado con petatillo. Obsérvese la gran deflexión que sufre antes de producirse la fractura prácticamente en el punto de aplicación de carga.



CAPITULO 8

APLICACIONES

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO



APLICACIONES Y EVALUACIONES

Tapas de concreto polimérico

Una de las aplicaciones de estos concretos es como tapas de registros, las cuales están formadas por el concreto polimérico y una capa de fibra de vidrio como refuerzo a la flexión. En este apartado, se presenta un estudio mecánico de este tipo de tapas, evaluando el efecto del espesor de la placa así como el efecto de la orientación de la fibra y realizando una comparación contra placas de mortero hidráulico reforzados con malla de acero 4 x 4.

ESTUDIO COMPARATIVO CONTRA LAMINADOS COMERCIALES

Este análisis se hizo con dos tapas de registro a base de concreto polimérico, de las cuales se obtuvieron placas de 60 x 15 cm. Tres placas fueron cortadas de tal forma que las fibras del petatillo quedasen en dirección paralela a las aristas de la placa, es decir el ángulo entre las fibras y las aristas es 0° . Otras tres placas fueron cortadas de tal forma que las fibras del petatillo quedasen en un ángulo de 45° con respecto a las aristas de las placas (véase Figura 8.1).

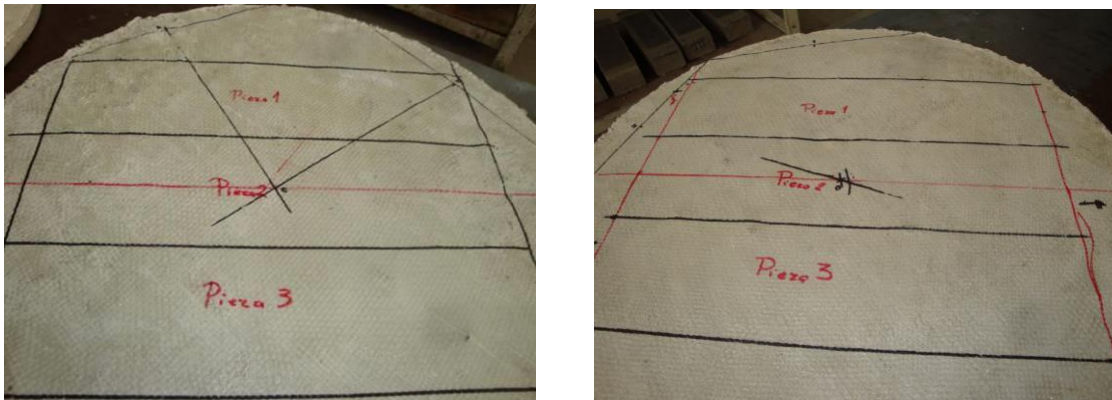


Figura 8.1. Corte de las tapas de concreto polimérico con respecto a la dirección de las fibras. Lado izquierdo el corte se realiza a 45° . Lado derecho a 0° .



Caracterización de las placas. Con el fin de verificar la homogeneidad entre las placas cortadas, estas fueron medidas y pesadas. Los datos obtenidos se reportan en la Tabla 8.1, en los que se observa que la variación en cuanto al peso entre los lotes de las placas es menor al 2%. La notación 45° y 0° se refiere al ángulo de las fibras con las aristas de las placas.

Tabla 8.1 Peso de las placas obtenidas de las dos tapas de concreto polimérico

Orientación fibra	Peso muestras en gramos			Promedio gramos	Desviación estándar	% variación
	1	2	3			
Tapa comercial 45°	5648	5523	5600	5590	63.1	1.1%
Tapa comercial 90°	5290	5464	5285	5346	101.9	1.9%

Los resultados obtenidos muestran que existe una gran dependencia de la capacidad de carga y resistencia a la flexión del elemento de concreto polimérico con la orientación de las fibras de refuerzo. Las propiedades mecánicas promedio obtenidas se presentan en la Tabla 8.2. Básicamente son importantes de considerar el módulo de ruptura y el módulo elástico. El efecto de la orientación de las fibras no es tan marcado en el módulo elástico como en el módulo de ruptura. El primer término –módulo elástico- depende básicamente de la mezcla de concreto polimérico y en menor medida de la fibra de refuerzo. El segundo término –el módulo de ruptura- representa la resistencia máxima a la fractura y es fuertemente dependiente de la orientación de las fibras del refuerzo. De hecho la forma de falla es diferente dependiendo de la orientación de las fibras con respecto a las aristas de la placa.

Tabla 8.2 Datos obtenidos de los ensayos a flexión.

Laminados	Punto de cedencia Kg	Deformación a la cedencia mm	Carga Máxima Kg	Deformación a carga máx. mm	Módulo de ruptura kg/cm2	Módulo elástico Kg/cm2
Tapa comercial 45°	317.2	2.5	389.1	13.3	152.4	75,865
Tapa comercial 90°	344.3	2.7	723.9	16.1	264.0	70,342

En el caso de las fibras a 45°, la ruptura se inicia con fallas a flexión, las cuales al crecer generan una falla paralela a la cara inferior de la placa, produciéndose una falla interna por capas, a manera similar de una de-laminación del concreto y generándose el desprendimiento de la malla. Esto se muestra en las fotografías de la Figura 8.2.



Figura 8.2 Muestra las fallas por flexión en fibras de 45°.

En la Figura 8.3 A y B, las fotografías muestran el tipo de falla en placas de concreto polimérico con las fibras de vidrio orientadas a 45°. La primera fotografía muestra la aparición de fallas a flexión, la segunda, la formación de una grieta paralela a la cara inferior que se produce en la falla. Esta es acompañada de fallas internas y desprendimiento del refuerzo Figura 8.3 B.



Figura 8.3 A y 8.3 B En las siguientes fotografías el desprendimiento del material se ve el desprendimiento del material en capas.

En el caso de las fibras orientadas a 0°, la falla también se inicia con fallas a flexión, pero la falla final ocurre por la formación de grietas en los puntos de la carga. Esto da una mayor capacidad de absorción de carga y deformación a la ruptura. Las fotografías de la Figura 8.4, muestran este tipo de falla.



Figura 8.4 Muestra fallas paralelas.



En la Figura 8.5, la fotografía muestran el tipo de grietas generada en las placas de concreto polimérico reforzadas con fibras (petatillo) orientadas en dirección de las aristas de la placa.



Figura 8.5 Muestra fallas orientadas a 0°, que se inician con fallas por flexión.

Estudio comparativo contra concreto hidráulico

A fin de establecer un parámetro de referencia, las propiedades mecánicas de módulo de ruptura y modulo elástico del concreto polimérico con refuerzo de petatillo, se comparan con las mismas propiedades obtenidas en ensayos de placas (vigas) similares a base de concreto hidráulico reforzados con malla electro soldada y con varillas de acero de 3/8". En el caso de las vigas con malla electro soldada, las dimensiones son similares, a excepción del peralte que en este caso es de 10cm. En el caso de la viga con refuerzo de varillas, las dimensiones son también similares pero el peralte es de 15 cm y están embebidas dos varillas de 3/8" de diámetro.

La Tabla 8.3, muestra los valores obtenidos en el mismo tipo de ensayo y como podrá observarse, la capacidad de carga mayor es exhibida por la viga con refuerzo de varillas, esto debido a las varillas y al peralte de 15 cm. Sin embargo, cuando se transforman la capacidad de carga en esfuerzo máximo de carga (módulo de ruptura) las propiedades de las placas de concreto polimérico son casi 10 veces superiores a las del concreto hidráulico reforzado con malla electro soldada 10-10 y al reforzado con varillas de acero.



Tabla 8.3 Comparación de propiedades a la flexión en 4 puntos entre elementos de concreto polimérico y concreto hidráulico.

Tipo de viga	Peralte cm	Carga Máxima kg	Flecha a carga máxima mm	Modulo de ruptura kg/cm ²	Modulo elástico Kg/cm ²
Concreto con dos varillas 3/8" (viga de 15X15x60 cm.)	15	6,325	3.5	84.3	6,301
Concreto con malla electrosoldada de (viga de 10x15x60 cm).	10	775	4.0	23.3	9,530
Concreto polimérico con petatillo 0° (viga de 2.8x15x60 cm)	2.8	724	16.1	264.0	70,342
Concreto polimérico con petatillo 45° (viga de 2.7x15x60 cm)	2.7	389	13.3	152.4	75,865

Lo anterior significa que bajo el mismo espesor, el concreto polimérico tiene una mayor capacidad de carga y una mayor rigidez (módulo elástico). Esto se aprecia mejor en el gráfico de la Figura 8.6, en el cual se trazan las curvas esfuerzo deformación de dichos tipos de vigas.

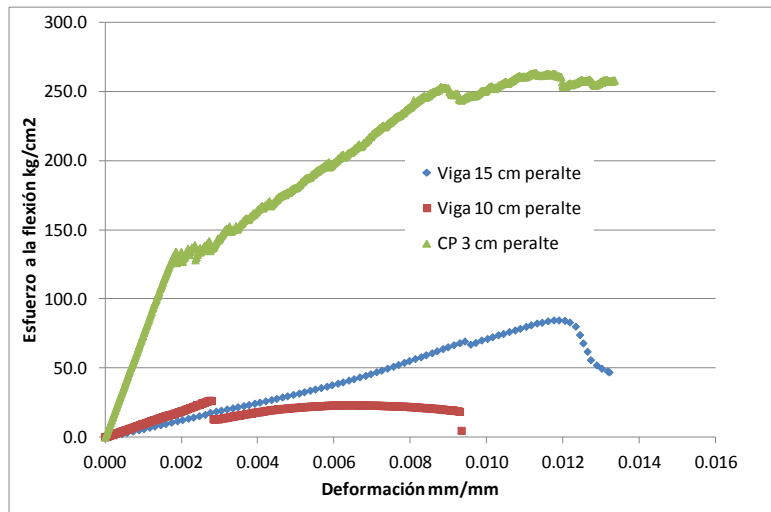


Fig. 8.6 Gráfico de las vigas de concreto hidráulico reforzadas con varillas, con malla electro soldada y de concreto polimérico (CP) reforzado con petatillo con las fibras orientadas a 0°.

Finalmente, en la Figura 8.7, se muestra una fotografía del ensayo de una viga reforzada con malla electro soldada 10-10. Como podrá observarse la viga se fractura por completo al alcanzar la carga máxima.



Fig. 8.7 Fotografía que muestra el ensayo del elemento de concreto hidráulico reforzado con malla electro soldada 10-10.

APLICACIÓN EN CANALES DE MANEJO DE AGUAS NEGRAS

Siendo también el interés de éste estudio el conocer la vulnerabilidad del material a un ataque químico al que pudiera estar sometido, se fabricó un canal para el manejo de aguas residuales. El canal estuvo trabajando por un periodo de 45 días, tiempo durante el cual se evaluó la eficiencia de un proceso para la clarificación y purificación de las aguas residuales. Se emplearon aguas residuales provenientes del canal de Cartagena en el Estado de México.

El concreto polimérico se diseñó para una resistencia a la compresión no menor a 500 kg/cm², empleándose una resina poliéster isoftálica MI 21BG de alta resistencia química. Las cargas empleadas en el concreto polimérico fueron grano de mármol de diversas granulometrías, gravilla y micro-esferas de vidrio.

Debido a cuestiones prácticas para la construcción del canal, se optó por un diseño de tipo rasante corto, con una variante. La variante consiste en que las paredes son prácticamente verticales, como se muestra en la siguiente imagen virtual de la Figura 8.8.

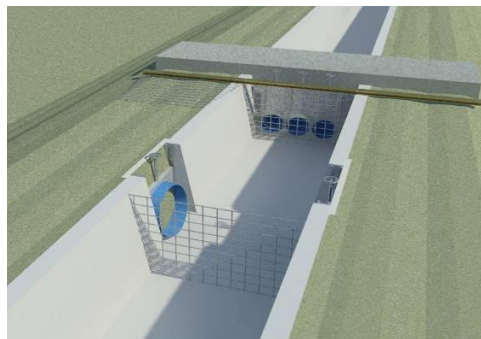


Fig. 8.8 Imagen virtual del prototipo de canal de concreto polimérico.



En la fotografías de la Figura 8.9 A se muestra el desmolde de la cimbra del canal de concreto polimérico con la geometría de paredes totalmente verticales y es de tipo rectangular. En la misma Figura 8.9 B se muestra el desmolde lateral y de la base del canal, en donde se observa la no adherencia por parte de la madera con el concreto polimérico y también se puede apreciar la gravilla que es uno de los materiales que conforman al concreto polimérico.

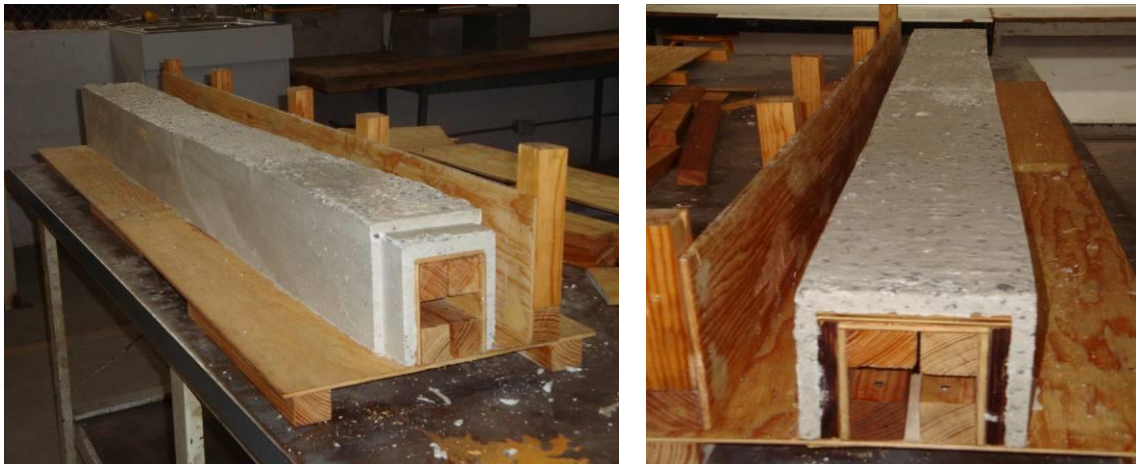


Fig. 8.9 A y 8.9 B Desmolde del canal de concreto polimérico.

La Figura 8.10, se muestra el proceso de interacción de las aguas negras industriales provenientes del canal de Cartagena en el Estado de México, con las bacterias Bio-3R dentro del canal de concreto polimérico, nótese que la espuma que se observa, es un indicador de la reacción fisicoquímica que se está llevando a cabo con el agua y el producto bacteriano.



Fig. 8.10 A la derecha se muestra la operación del canal con aguas negras y a la izquierda los sedimentos que se adhieren a las paredes una vez desalojada el agua.



Se evaluó tanto visualmente como mecánicamente el efecto de las aguas residuales el concreto polimérico. Con el fin de evaluar el comportamiento del concreto polimérico, se elaboraron cinco cubos de 5 cm de lado de concreto polimérico, los cuales fueron ensayados a compresión, para determinar su resistencia a la compresión.

Otros tres cubos fueron sumergidos en la corriente de agua negra en el canal por un lapso de 28 días (prueba rápida), para posteriormente realizar el ensayo a compresión. Estos resultados fueron obtenidos bajo la exposición de las muestras bajo la primera carga de agua negra industrial, con una concentración bacteriana del “BIO-3R” a un 30% en peso del ingrediente activo.

La Tabla 8.4, muestra la resistencia mecánica de los especímenes testigos y de los especímenes después de estar sumergidos durante 28 días. Como puede observarse, existe un decaimiento de la resistencia a la compresión del orden del 11%.

Tabla 8.4 Valores de las resistencias mecánicas de los cubos testigos y los sumergidos en aguas residuales después de 28 días de inmersión.

Propiedad	Cubos originales	Cubos sumergidos durante 28 días	Reducción de la resistencia %
Resistencia a la compresión kg/cm ²	719	640	11%

Sin embargo, al romper los cubos, no se observó penetración de líquido alguno, por lo que se sospecha que la variación se deba a la compactación de los especímenes. Sin embargo los cubos cumplen con una resistencia superior a los 500 kg/cm².

Se ha demostrado que el concreto polimérico no sufre corrosión por el pH de los diferentes tipos de agua y que el mismo es totalmente impermeable por lo que se puede aplicar en este tipo de obras civiles las cuales presentan problemas por poco tiempo de vida útil, derivado de la corrosión del acero. Además el bajo coeficiente de fricción del concreto polimérico permite un mejor flujo de agua, así como de un posible gasto mayor.



CAPITULO 9

ANALISIS DE COSTOS

UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO



ANÁLISIS DE COSTOS

Uno de los parámetros que determina la viabilidad comercial de los productos es su costo directo así como el costo beneficio que puede representar su empleo.

En primer lugar, se analiza el costo de todas las formulaciones elaboradas y ensayadas. Las formulaciones son agrupadas dependiendo del tipo de mezcla empleada, es decir, ternaria o cuaternaria, así como del tipo de agregado ligero empleado: Microsil 100S, Microsil 200S o micro-esfera de vidrio S60.

Los datos que se presentan son los valores promedio de cada grupo y en algunos casos los rangos de valores observados. De esta forma, las Tablas 9.1 y 9.2 muestran los valores medios correspondientes a los concretos a base de mezclas ternarias y cuaternarias respectivamente

Tabla 9.1 Costo y propiedades promedio de concretos a base de mezclas ternarias y agregados ligeros.

Agregado	% w agregado	% vol. agregado ligero	Costo promedio \$/kg	Peso específico promedio	Costo promedio \$/litros	Resistencia a la compresión Kg/cm ²	Resistencia específica
Testigo	0%	0%	7.076	2.257	15.970	550	243.8
Micro esfera S60	9.1%	26%	12.985	1.823	23.648	523	287.0
Microsil 100S	4.4%	24%	10.818	2.081	22.512	574	276.0
Microsil 200S	4.7%	31%	8.515	2.067	17.600	530	256.3

Tabla 9.2 Costo y propiedades promedio de concretos a base de mezclas cuaternarias y agregados ligeros.

Agregado	% w agregado	% vol. agregado ligero	Costo promedio \$/kg	Peso específico promedio	Costo promedio \$/litros	Resistencia a la compresión Kg/cm ²	Resistencia específica
Testigo	0%	0%	7.301	2.280	16.646	579	254.1
Micro esfera S60	2%	7%	8.219	2.133	17.531	643	301.5
Microsil 100S	1%	9%	7.273	2.210	16.073	553	250.4
Microsil 200S	1%	10%	7.054	2.247	15.848	614	273.3



A partir de los datos anteriores, se puede graficar (Véase Figura 9.1) y comparar los valores medios de las formulaciones ternarias versus las formulaciones cuaternarias. En términos generales, se puede observar un menor costo para las formulaciones cuaternarias, debido a una menor cantidad de agregado ligero en ellas. Efecto que es más notorio en el caso del empleo de micro-esfera de vidrio.

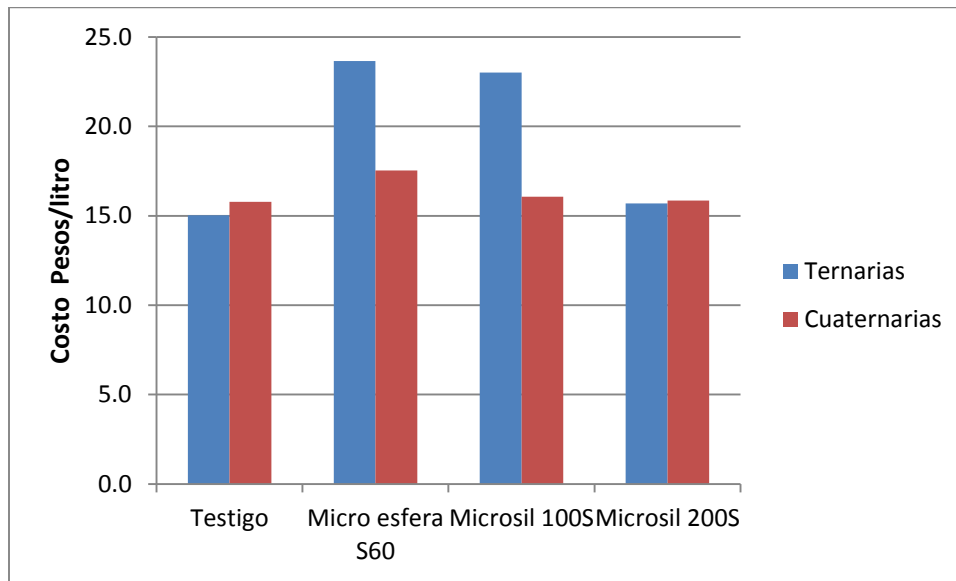


Fig. 9.1 Costo promedio de formulaciones testigo y con agregado ligero a base de mezclas ternarias y cuaternarias.

Sin embargo, el costo por litro de la mayoría de las formulaciones de concreto ligero ronda el valor medio del concreto normal del orden de \$16.00 por litro.

Por otro lado, al determinar la resistencia a la compresión específica (resistencia a la compresión dividida por el peso específico), indicada en las Tablas 9.1 y 9.2 así como en la Figura 9.2, se puede observar que kilo a kilo los concretos ligeros ofrecen un resistencia similar o mayor que los concretos normales.

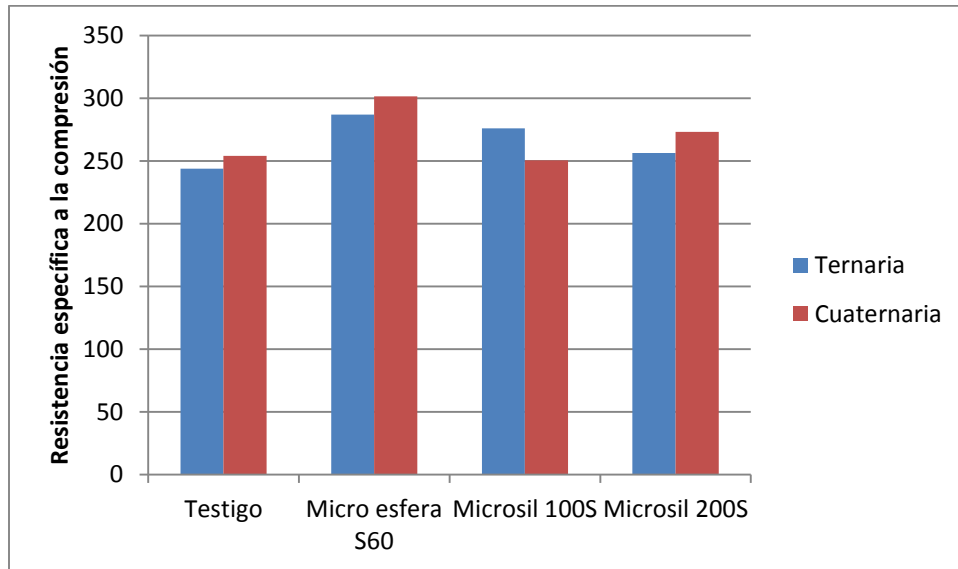


Fig. 9.2 Resistencia específica de concretos testigo y ligeros a base de mezclas ternarias y cuaternarias.



CAPITULO 10

CONCLUSIONES

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO



CONCLUSIONES

Concreto polimérico ligero. Efecto de los agregados

El efecto de los agregados ligeros tanto de micro-esfera de vidrio como de Microsil, en la disminución de peso específico es apreciable, particularmente con el uso de la micro-esfera de vidrio S60 con la que se alcanza un valor medio de 1.85, que representa una reducción del 19%. En el caso de las micro-esferas de aluminio silicato, las reducciones son solo del 6 y 8% para el Microsil 100S y Microsil 200S respectivamente.

Los gráficos de las Figura 10.1 y 10.2 muestran los rangos de pesos específicos obtenidos en las diversas formulaciones ensayadas y la variación con respecto al peso específico promedio del concreto polimérico normal (2,300 kg/m³).

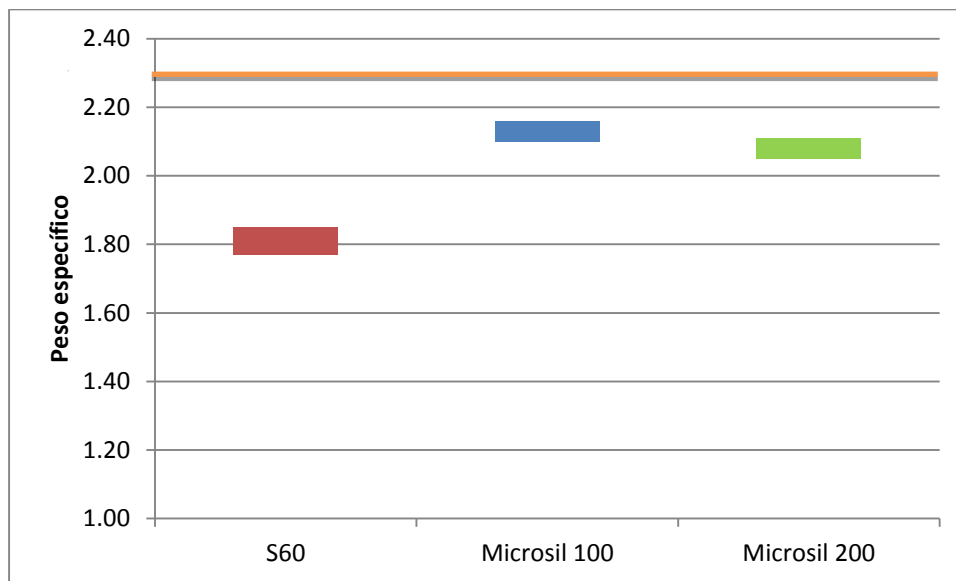


Fig. 10.1 Rango de valores exhibidos por los concretos poliméricos ligeros a base de Micro-esfera de vidrio S60 y micro-esfera de aluminio silicato Microsil 100S y Microsil 200S.

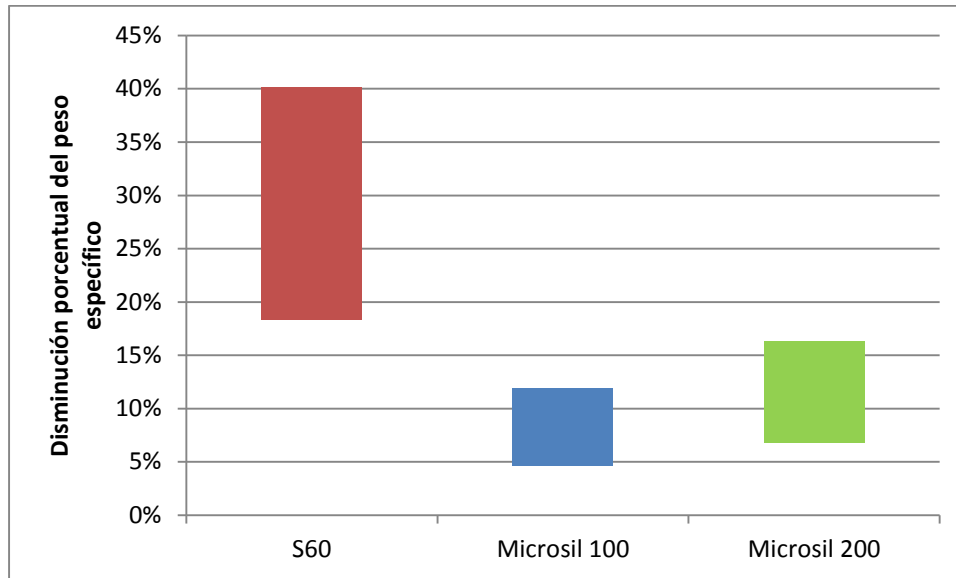


Fig. 10.2 Rangos de disminución del peso específico de los concretos poliméricos ligeros a base de Micro-esfera de vidrio S60 y micro-esfera de aluminio silicato Microsil 100S y Microsil 200S.

En referencia a la resistencia mecánica a la compresión, es importante hacer notar que aunque se reduce el peso específico, la resistencia se mantiene dentro de los rangos observados en los concretos poliméricos normales (540 a 700 kg/cm²). El gráfico de la Figura 10.3 muestra que los valores con micro-esferas de vidrio, inclusive son mayores a los del concreto normal, aunque el valor medio es de 569 kg/cm². En el caso del Microsil 100S el valor medio es de 536 kg/cm² y para el Microsil 200S el valor promedio es de 539 kg/cm².

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.

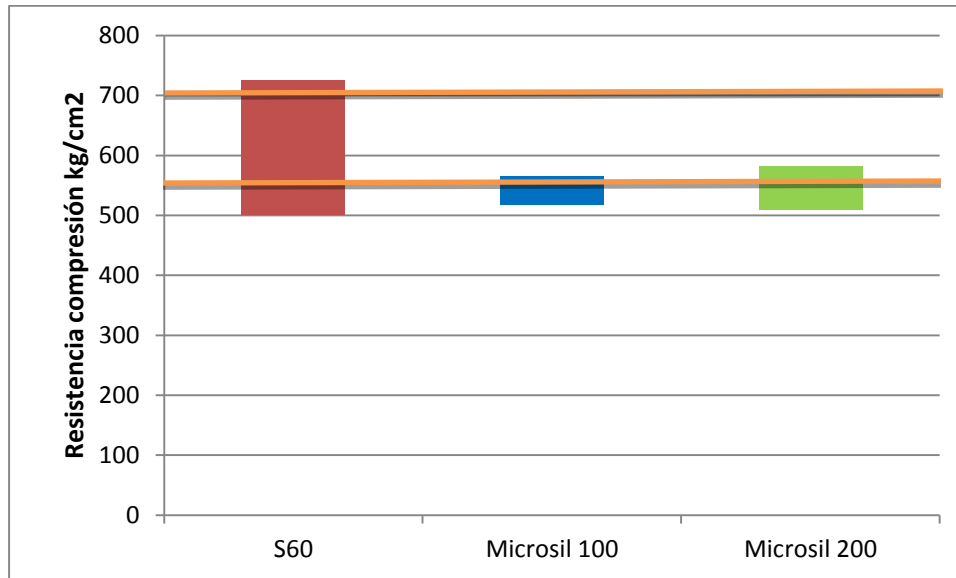


Fig. 10.3 Valores de la resistencia a la compresión de concretos poliméricos ligeros según su tipo de agregado en referencia a los valores estándar del concreto polimérico normal.

Comportamiento a flexión. Placas de Concreto Polimérico

Por otro lado, una de las aplicaciones del concreto polimérico ha sido la fabricación de tapas de registros, por lo que el empleo de estas cargas ligeras es también competitivo mecánicamente, habiendo de puntualizar:

1. Las placas de concreto polimérico muestran un comportamiento totalmente frágil a la flexión, su ruptura se presenta en el tercio medio de la placa siendo ésta una falla a tensión pura.
2. A medida que se incrementa el espesor, el proceso requiere de una mayor rapidez, debido a la exotermia de la reacción. Una mala compactación trae como consecuencia el aumento de espacios vacíos dentro del mismo material, propiciando concentraciones de esfuerzos internos en el material y con ello reduciendo las propiedades mecánicas de la placa. Por lo anterior se recomienda que para elementos de espesores de 3 cm en adelante se cuenten con métodos de dosificación y mezclado más apropiados de ser posible de forma automatizada y vibración de las placas para así garantizar su correcta homogeneidad.
3. En los elementos reforzados con malla de petatillo se pudo observar, que esta comienza a trabajar prácticamente al salir de la zona elástica, marcándose con ello, un comportamiento similar al de elementos de concreto reforzados con varillas metálicas.



4. La capacidad de carga de los laminados reforzados con petatillo se incrementa con el espesor, en un 104% y 120% en las placas de peralte de 2 y 3 cm respectivamente. Así mismo también se incrementa de manera importante la capacidad de deformación del elemento a la fractura. Este incremento es 8 a 10 veces mayor con respecto a los testigos.
5. La orientación de la fibra tiene un gran efecto pues como se menciona proporciona una mayor capacidad de absorción de carga y deformación a la ruptura, siendo la condición más desfavorable cuando el refuerzo queda orientado a 45°, con respecto a los soportes del ensayo a flexión.

Concretos ligeros. Efecto en el costo

Respecto al aspecto económico, solo se realizó el estudio de costos directos de los concretos ligeros y se comparó con los costos de los concretos normales, observándose costos similares (del orden de 16 pesos por litro).

En el caso del empleo de la micro-esfera de vidrio aunque reduce la densidad del composite su alto costo no permite reflejarse en el costo final.

Con el empleo del Microsil, aunque tiene un bajo costo (similar al de los agregados normales en términos de volumen) y baja densidad, desafortunadamente las muestras empleadas no cumplieron con las expectativas debido a deficiencias de fabricación de las micro-esferas de Microsil. De tal forma que los costos no pudieron abatirse.

Recomendaciones

Finalmente, convendría realizar nuevamente las formulaciones usando los nuevos lotes de Microsil que nos han llegado y que han mostrado en la fabricación de mármol sintético una importante disminución de la densidad del compuesto, que puede atribuirse a la mejora del proceso de fabricación de las micro-esferas.



CAPITULO 11

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO



REFERENCIAS

ACI. (2009), ACI 548.1R-09 "Guide for the Use of Polymers in Concrete"

ADM ISOBLOCK. (2007), "Casting and Polymer concrete machine",
<http://www.directindustry.com/prod/adm-isobloc/mixer-dispensers-polymers-concretes-volumetric-dispensers-54447-357384.html>

CHÁVEZ, J., LAOS, R., ROSPIGLIOSI, C., NAKAMATSU, J. (2002)," Concreto Polimérico a partir de Botellas Descartables". Conciencia.

CZARNECKI I, L. (1985), "The status of polymer concrete", Concrete International, July, p 25.

CZARNECKI, L., GARBACZ, A., LUKOWSKI, P., CLIFTON, J.(1999)," Optimization of polymer concrete composites: final report". National Institute of Standards and Technology, p. 64.

FOWLER, D. (1999)," Current status of polymer concrete in the United States", In 9° International Congress on Polymer in Concrete, Universidad de Estudios de Bolonia, Italia, pp.37-44.

GEMERT, D. V. CZARNECKI, L. MAULTZSCH, M. SCHORN, H. BEELDENS, A. LUKOWSKI, P. KNAPEN, E. (2005)," Cement concrete and concrete-polymer composites: Two merging worlds. In: 11° ICPC Congress in Berlin", 2004. Cement & Concrete Composites, N° 27, pp. 926-933.

GLOBMARBLE LLC. (2009), "Polymer concrete machine",
<http://globmarble.com/casting-machine-for-polymer-concrete>

GORNINSKI, J. DAL MOLIN, D. KAZMIERCZAK, C. (2004)," Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete". Cement and Concrete Research, N°34, pp.2091 – 2095.

MARCIANO LAREDO DOS REIS JOÃO, (2005), "Mechanical Characterization of Fiber Reinforced Polymer Concrete"; Materials Research, Vol. 8, N°.3, pp. 357-360.

ARZALUZ JOSÉ LUIS, (2002), "Concreto polimérico", 28 al 29 de Noviembre, publicación del Primer Curso de Tecnología Avanzada, Universidad Iberoamericana, México D.F.

MAHDI F., KHAN A. A., ABBAS, H., (2007)," Physiochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles". Cement and concrete composites, Vol. 29, pp. 241-248.



MC. GEARYRK. (1961), "Mechanical Packing of Spherical Particles" Journal of the American Ceramic, Vol. 44, N° 10, October, pp 513 to 522.

NIELSEN L.E., (1974), "Mechanical Properties of Polymer and Composites ", Vol.2, New York, Marcek Dekker Inc.

ORAK, S. (2000), "Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin". Cement and Concrete Research, N° 30, pp. 171-174.

PAINTER D. (1998), "Green is the New Normal", Composite Manufacturing; May/June 2011, pp.14-18.

PLACET M., FOWLER, K. (2002), "Substudy 7: How Innovation Can Help the Cement Industry Move Toward More Sustainable Practices". Toward a SustainableCementIndustry. Março.

RAMÍREZ ORTIZ JOSÉ LUIS. (1999), "La múltiple identidad del concreto", Informes de la Construcción, Vol. 49, N°454.

R.T. VANDERBILT COMPANY INC. (2006), "An Introduction to Mineral Fillers for Paints & Coatings", http://www.rtvanderbilt.com/Mineral_Fillers_Paints_Coatings.pdf

TYBERG, C. S., SANKARAPANDIAN, M., BEARS, K., SHIH, P., LOOS, A. C., DILLARD, D., McGRATH, J. E., RIFFLE, J. S., SORATHIA, U.(1999), "Tough, void-free, flame retardant phenolic matrix materials", Construction and Building Materials, Vol. 13, pp. 343-353.

UNITED NATIONS. (2002), " Review of science and technology in ESCWA member countries", Economic and Social Commission for Western Asia, pp. 152, 2002. <http://books.google.com.br/books?id=0uH92LlOsIkC>acessadoem abr>.



BIBLIOGRAFIA GENERAL

Manuales

3M SCOTCHLITE®(2010) Glass Bubbles S60/1800, “Less weight. More muscle.”

Basf(2008) .DEGADUR® R17™“Polymer concrete, Fast-curing, solvent free, methacrylate-based polymer concrete for patching and overlays”, SRS Flooring.

SAVEREISEN®(2006)“Concretos Poliméricos Resistentes a los Químicos”, Materiales para vaciado, resistentes a los ambientes corrosivos, para la industria pesada.

AOC, EcoTek Resins, www.green-resins.com

Tesis.

KARINA GUERRA TONET, (2009). “Concreto polimérico con resina reciclada del PET, influencia en la combustibilidad frente a la adición de residuos industriales”, Universidad do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Libros Básicos

DAVID W. FOWLER. (1989), “Future Trends in Polymer Concrete”; Special Publication ACI, Vol 116.

Y. OHAMA, M. KAWAKAMI AND K. FUKUSAWA. (1997),”Polymers in Concrete”, College of Engineering Nihon University , Koriyama Japan.

Base de Datos

Memorias de Conferencias

Amando Padilla Ramírez et al, “CONCRETO POLIMERICO, OPCION PARA LA CONSTRUCCION” 3er Congreso Nacional sobre Práctica Profesional, Docencia y Capacitación en Ingeniería Civil; Cholula, Puebla, 2005.



Polymers in concrete 2000: proceedings of the International Workshop on Concrete Repair and the 4th Southern African Conference on Polymers in Concrete, 21-23 June, 2000.

Direcciones de internet

<http://www.chemicalonline.com/article.mvc/Polymer-Concrete-Foundational-Protection-For-0001?VNETCOOKIE=NO>, "Polymer Concrete: Foundational Protection For Re Mining Industry", November 11, 2000.

<http://www.netcomposites.com/news.asp?2831>; Demand for Water, Wastewater Equipment in Europe, Middle East Projected to Increase; London, 11 March 2005.