

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

Desarrollo de morteros ligeros base cemento portland con propiedades térmicas optimizadas mediante la incorporación de un micro co-polímero.

Por

Joana Ketterine Campos Dimas

Como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Especialidad en Materiales de Construcción.

Agosto 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

Desarrollo de morteros ligeros base cemento portland con propiedades térmicas optimizadas mediante la incorporación de un micro co-polímero.

Por

Joana Ketterine Campos Dimas

DIRECTORES DE TESIS

Dr. Alejandro Durán Herrera

Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez

Dale Patrick Bentz

Como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Materiales de Construcción.

Agosto 2014

☞ Agradecimientos ☜

Quisiera agradecer antes que nada a Dios que me ha permitido terminar esta importante etapa, quien fue la fuente de mi fortaleza, un refugio en la tormenta cuando las cosas parecían ir mal, que dio sustento a mi alma y cuerpo en esas situaciones difíciles cuando pensé que no podía continuar.

A mi madre, a quien nunca podría darle las gracias suficientes por todo lo que ha hecho por mí, ya que ella ha sido y será una muy importante parte de mi vida, gracias mama por confiar en mí.

A mi padre, mis hermanos y familiares que yo se siempre jugaron un papel esencial en mi formación, he aprendido mucho de ustedes.

A mi asesor el Dr. Alejandro Durán gracias por todo el apoyo recibido durante la elaboración de este proyecto, por su apoyo incondicional como persona, por sus consejos y su paciencia, créame usted ha sido un ejemplo a seguir.

A mi director externo Dale Bentz que en el ámbito profesional y personal es un patrón de lo que quisiera llegar a ser, gracias también por recibirme durante la estancia de investigación que realice en el NIST.

Al Dr. Pedro Valdez por el apoyo para llevar a cabo esta investigación, así como su apreciable dirección y valiosos comentarios realizados.

A mi amiga incondicional Yohana Elizabeth López Alejandro gracias por confiar en mí por darme ánimos cuando lo necesite y siempre hacerme ver el lado positivo de la vida.

A todas las personas que laboran en el departamento de tecnología del concreto Iliana, Catarino, Erick, Sra. Martha, Jony y Beto gracias a todos aprendí mucho de ustedes.

Al Laboratorio de Materiales de Construcción, en especial al Sr. Gumaro Tovar por brindarme una mano con mis pruebas, gracias por brindarme su mano amiga.

A mis compañeros de posgrado que me dieron la mano cuando lo necesite, gracias por hacerme reír en momentos difíciles y por darme importantes lecciones de vida, en especial Daniel, Juan, Anguiano, Ing. Pompermayer y al Ing. Jorge Rivera.



A los muchachos de servicio social, prácticas y voluntarios que me ayudaron a realizar algunas de mis pruebas, Daniel, Emilio y Narro gracias.

A Ing. José Sacramento Villafaña Torres Asesor Técnico de CEMEX y al Sr. José Juan Escobedo que nos a ejecutar las pruebas de conductividad térmica.

A Produquímicos industriales al M.C.Q. Luis Manuel Álvarez Cerda y Lic. Francisco Ramón Rubín Zacarías por el donativo de material que nos brindaron para realizar la investigación.

Al Lic. Enrique Álvarez Ortiz Administrador Zona Norte de Cementos Moctezuma por el donativo de cemento portland.

Al Ing. Daniel Canizalez por su apreciada donación de aditivo super-fluidificante.

Al consejo Nacional de Ciencia y tecnología por la ayuda económica brindada para realizar mis estudios de maestría.

A las autoridades de la Facultad de Ingeniería Civil y de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Al National Institute Of Standards and Technology por prestarnos sus instalaciones para realizar nuestra investigación.

Ya todos y cada uno de los que me apoyaron en esta etapa, Gracias.



☞ Dedicatoria ☞

A mi Dios

Que me enseña cada día como caminar.

Mi madre Ma. Lucila Dimas Flores

*Porque esto es resultado de tu esfuerzo y trabajo duro,
gracias por enseñarme tanto, especialmente a no rendirme, te amo.*

A mi abuela María Flores (†)

*Gracias abuelita la semilla que sembraste no volverá vacía,
gracias por confiar en mí.*



Índice

Sección	Página
1. Introducción	
1.1. Cambio climático	1
1.2. Concreto ligero	3
1.3. Aislamiento térmico	5
2. Marco Teórico	
2.1. Transferencia de calor	7
2.2. Modos de transferencia de calor	8
2.2.1. Convección	8
2.2.2. Radiación	9
2.2.3. Conducción	10
2.3. Propiedades térmicas por conducción	10
2.3.1. Calor específico	10
2.3.2. Conductividad térmica	11
2.3.3. Difusividad térmica	13
2.4. Factores que afectan la transferencia de calor en el concreto	13
2.4.1. Densidad aparente	14
2.4.2. Humedad	14
2.4.3. Temperatura	14
2.4.4. Micro-estructura	15
2.5. Antecedentes	16
2.6. Justificación	17
2.7. Objetivos	20
2.8. Hipótesis	21
3. Materiales y caracterización	22
3.1. Cemento portland CPO	22
3.2. Ceniza volante CV	23
3.3. Agregado (co-polímero, COP)	24
3.4. Aditivo	25
4. Metodología experimental	
4.1. Diseño de mezcla	26
4.2. 1era etapa de optimización del co-polímero	26
4.3. Optimización del empaquetamiento de los materiales granulares	26
4.4. Optimización del contenido de ceniza volante	26
4.5. 2da etapa de optimización del contenido de co-polímero	27
4.6. Confinamiento	27
4.7. Efecto del curado	27

4.8.	Propiedades en estado fresco	28
4.8.1.	Método de mezclado	28
4.8.2.	Fluidez	29
4.8.3.	Contenido de aire	29
4.8.4.	Peso volumétrico de morteros	29
4.9.	Estado endurecido	
4.9.1.	Curado	30
4.9.2.	Resistencia a la compresión	30
4.9.3.	Conductividad térmica	30
4.9.4.	Calor específico en polvos	32
4.9.5.	Microscopia óptica	33
4.9.6.	Cambios volumétricos	33

5. Resultados y discusión

5.1.	Caracterización de materiales	34
5.1.1.	Densidad	34
5.1.2.	Distribución de tamaño de partícula	34
5.1.3.	Fluorescencia de rayos X, FRX	35
5.1.4.	Índice de actividad a la resistencia, IAR	36
5.1.5.	Difracción de rayos X, DRX	36
5.1.6.	Microscopia óptica, MO	37
5.1.7.	Microscopia electrónica de barrido, MEB	38
5.1.8.	Espectroscopia por dispersión de energía de rayos X	39
5.1.9.	Conductividad térmica, k.	41
5.2.	Evaluación de mezclas de mortero	42
5.2.1.	Proporciones de las mezclas	42
5.2.2.	Distribución granulométrica para las diferentes combinaciones de los materiales granulares.	43
5.2.3.	Propiedades en estado fresco	43
5.2.3.1.	Fluidez	43
5.2.3.2.	Contenido de aire	45
5.2.3.3.	Estabilidad volumétrica	46
5.2.3.4.	Tiempos de fraguado	51
5.2.3.5.	Calorimetría	52
5.2.4.	Resistencia a la compresión	53
5.2.4.1.	Resistencia de especímenes sin confinamiento	54
5.2.4.2.	Resistencia de especímenes confinados	56
5.2.4.3.	Efecto del curado en la resistencia a la compresión	58
5.2.5.	Microscopia óptica	59
5.2.6.	Propiedades térmicas	61
5.2.6.1.	Calor específico	61
5.2.6.2.	Difusividad térmica	62

5.2.6.3.	Conductividad térmica	63
5.2.6.3.1.	Conductividad térmica LAB1	63
5.2.6.3.2.	Conductividad térmica LAB2	65
5.2.7.	Resistencia térmica	67
6.	Conclusiones	69
7.	Recomendaciones	72
Anexo A		73
Anexo B		74
Anexo C		79
Anexo D		80
Bibliografía		81

Lista de tablas

Tabla	Descripción	Página
1	Valores típicos de coeficiente de convección	9
2	Conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente	11
3	Resistencia térmica mínima, según NMX-C-460-ONNCCE-2009	13
4	Programa de curado	28
5	Densidad de los materiales, gr/cm ³	34
6	Fluorescencia por rayos X, ceniza volante	35
7	Fluorescencia por rayos X, cemento portland	36
8	Fluorescencia por rayos X, co-polímero.	36
9	Índice de actividad puzolánica de la ceniza volante	37
10	Espectroscopia de dispersión de energía de rayos para el CPO40	41
11	Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X para la ceniza volante.	41
12	Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X para el co-polímero	42
13	Conductividad térmica de polvos.	43
14	Identificación de mezclas.	44
15	Calor específico	62
16	Espesor mínimo requerido para satisfacer los requisitos de la NMX-C-460-ONNCCE-2009.	68

Lista de Imágenes

Imagen	Descripción	Página
1	Conceptualización de la segunda ley de la termodinámica.	7
2	Cemento Portland, PCA	22
3	Ceniza Volante (Izq.), Termoeléctrica “José López Portillo”, CFE	23
4	Microscopia óptica del Co-polímero	24
5	Reductor de agua de alto rango PLASTOL PRECAST	25
6	Confinamiento de los especímenes.	27
7	Batidora planetaria marca UNIVEX, modelo SRM 12	28
8	Meza de fluidez, ASTM C230.	29
9	Contenido de aire en morteros, ASTM C 185	29
10	Maquina universal Instron.	30
11	Especímenes para la medición de la conductividad térmica	31
12	Analizador de constantes térmicas, Marca Hot Disk y sensor 5501	31
13	Esquematzación de prueba de conductividad térmica	32
14	Equipo de conductividad térmica CT Mètre (izq.), especímenes (Sup. Der.) y sonda de alambre plano (Inf. Der.)	32
15	Esquematzación de prueba de Calor específico	33
16	Imágenes por microscopio óptico del co-polímero	39
17	Microfotografías obtenidas por MEB para el CPO 40.	40
18	Microfotografías obtenidas por MEB para la Ceniza volante	40
19	Microfotografías obtenidas por MEB para el Co-polímero.	40
20	Expansión de los especímenes	48
21	Mezcla de mortero con co-polímero y ceniza volante, 1A-CV2.	60
22	Mezcla de mortero con co-polímero y ceniza volante, 1A-CV2.	61
23	Mortero aislante comercial, H.	61

Lista de gráficos

Grafico	Descripción	Página
1	Consumos eléctricos por usuario (mwh/año) para diversas ciudades, proyectados para las climatologías 2020's, 2050's y 2080's.	2
2	Clasificación de los concretos ligeros agregado	4
3	Propiedades térmicas del concreto ligero	5
4	Determinación del tamaño de partículas para los materiales granulares utilizados en la producción de mezclas	35
5	Difracción de rayos X del CPO 40.	37
6	Difracción de rayos X de la ceniza volante.	38
7	Difracción de rayos para los diferentes materiales granulares utilizados	38
8	Difracción de rayos para los diferentes materiales granulares utilizados.	39
9	Granulometrías combinadas.	44
10	Efecto de la adición de ceniza volante en la fluidez, a/cm 0.6.	46
11	Efecto sobre la fluidez de la adición del co-polímero, a/cm 0.5.	46
12	Efecto sobre la fluidez de la adición del co-polímero, a/cm 0.4.	46
13	Efecto de la ceniza volante en el contenido de aire.	47
14	Efecto de la adición de co-polímero en el contenido de aire, a/cm 0.5	47
15	Efecto de la adición de co-polímero en el contenido de aire, a/cm 0.4	48
16	Desarrollo típico de la expansión para las mezclas con co-polímero.	49
17	Expansión en mezclas relación a/cm 0.6.	50
18	Expansión de mezclas relación a/cm 0.5.	50
19	Expansión de mezclas relación a/cm 0.4.	51
20	Expansión de mezclas de mortero para las diferentes relaciones a/cm	52
21	Tiempos de fraguado de mezclas con co-polímero.	53
22	Flujo de calor en el proceso de hidratación.	53
23	Calor liberado en el proceso de hidratación.	54
24	Resistencia a la compresión de compuestos con relación a/c 0.6.	55
25	Resistencia a la compresión de compuestos con ceniza volante.	55
26	Resistencia a la compresión de morteros con relación a/cm 0.5.	56

27	Resistencia a la compresión de morteros con relación a/cm 0.4 para diferentes porcentajes de co-polímero	57
28	Efecto del confinamiento en morteros con diferentes a/cm	58
29	Efecto del confinamiento en morteros con diferentes porcentajes de co-polímero.	58
30	Resistencia a la compresión de especímenes sometidos a diferentes tipos de curado	59
31	Difusividad térmica de diferentes compuestos.	63
32	Conductividad térmica en estado saturado y seco	64
33	Comparativa de la conductividad térmica entre compuesto comercial aislante y morteros desarrollados.	65
34	Efecto de la adición de Ceniza Volante en la conductividad térmica.	66
35	Efecto de la adición de co-polímero en la conductividad térmica.	67
36	Efecto de la adición de co-polímero en la conductividad térmica.	68

Resumen

A nivel mundial el cambio climático ha sido uno de los temas de mayor interés, debido a la severidad del fenómeno, la principal afectación provocada por este es el incremento del número de días con temperaturas máximas, que obligará a aumentar la demanda por climatización, debido a la presencia de años anormalmente calurosos, es decir que los cambios del clima se están presentando a un ritmo más acelerado que el que se pensaba hasta hace algunos años y sus manifestaciones a través de eventos extremos requieren una respuesta en el corto plazo.

Diferentes iniciativas orientadas a la adaptación al cambio climático producido del ser humano. La adaptación en nuestro ramo se refiere al ajuste de los sistemas constructivos actuales con el fin de reducir la vulnerabilidad de la sociedad a los cambios climáticos, especialmente dirigirnos a la búsqueda de materiales aislantes eficientes con los cuales se reduzca la tasa de transferencia de calor hacia los inmuebles conduciendo a reducir el uso de sistemas de climatización y por consiguiente la reducción del gasto energético.

En resumen esta investigación está orientada a la busque de nuevos materiales base cemento portland con propiedades térmicas óptimas, que pueda ser utilizado para brindar un adecuado aislamiento térmico.

Los materiales utilizados en esta investigación fueron cemento portland ordinario, ceniza volante tipo F usada como suplemento del cemento portland en diferentes porcentajes y un micro co-polímero como único agregado en nuestras mezclas de mortero ligero.

Con esta investigación se logró:

- Caracterización térmica, mecánica y física de los morteros producidos.
- Evaluación del efecto de distintos tipos de curado sobre la resistencia a la compresión.
- Evaluación del efecto de la humedad sobre la conductividad térmica.
- Desarrollo de morteros con conductividad térmica competitiva con materiales aislantes comerciales base cemento portland.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Cambio climático

A nivel mundial, el cambio climático ha sido uno de los temas de mayor interés. Este es un problema actual y progresivo que afecta de manera directa al cambio climático superficial, especialmente el aumento y la severidad de las olas de calor, a los cambios en la frecuencia de la precipitación lo cual se traduce en periodos de sequía más prolongados, al incremento de los eventos climatológicos extremos como huracanes o ciclones, entre otros.

Según indica el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1) la mayoría de los escenarios climáticos futuros predicen un planeta cada vez más caliente, en el que la frecuencia y la intensidad de los eventos meteorológicos y climáticos extremos se incrementara, produciendo desastres que afectaran las poblaciones humanas y los ecosistemas.

El cambio climático además afecta indirectamente al consumo energético, volviéndose así un círculo vicioso, ya que con el aumento en las temperaturas la demanda energética se incrementa.

Según la INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) (2,3), se estima que a mediados del presente siglo la demanda del consumo eléctrico doméstico en la república Mexicana se incrementara por el efecto del cambio climático, y que tal consumo se aumentará en al menos un 40%. Lo anterior se presenta en el gráfico 1.

Esto se le atribuye al incremento en el número de días con temperaturas máximas, que obligará a aumentar la demanda por climatización, inclusive en regiones que actualmente no la utilizan y al aumento del consumo doméstico en zonas urbanas, donde se presentan años anormalmente calurosos.

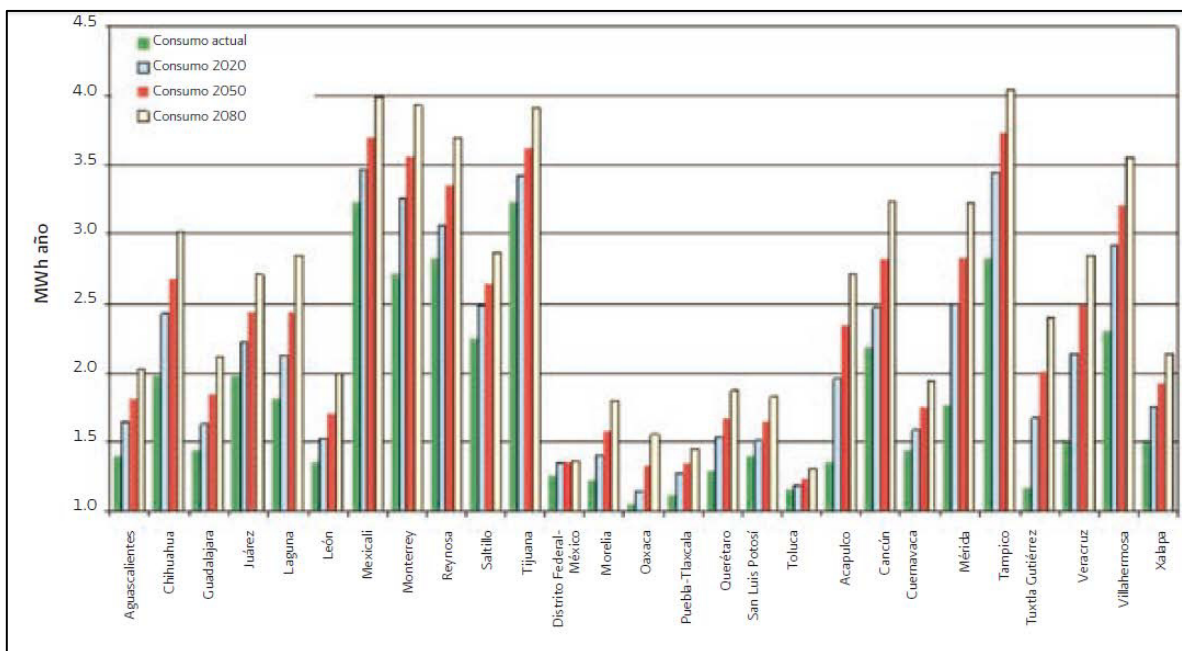


Gráfico 1. Consumos eléctricos por usuario (mwh/año) para diversas ciudades, proyectados para las climatologías 2020's, 2050's y 2080's. (4)

En resumen, los cambios del clima se están presentando a un ritmo más acelerado al estimado hace algunos años y sus manifestaciones a través de eventos extremos, requieren una respuesta en el corto plazo. Relacionado con esto existen diferentes iniciativas cuyo objetivo es reducir la velocidad del proceso de deterioro del planeta y la adaptación del ser humano al cambio climático producido.

La adaptación se refiere al ajuste de los sistemas humanos con el fin de reducir la vulnerabilidad de la sociedad hacia los cambios en las condiciones climáticas, dentro de este tema se pueden involucrar: las transformaciones en la tecnología, la educación y la infraestructura (5).

Como se sabe las propiedades de la infraestructura dependen de los materiales de construcción con los cuales se fabrican, según el Instituto Nacional de estadística y geografía, INEGI (6) en toda la república Mexicana 86% de las viviendas tienen paredes conformadas principalmente de elementos concreto o mortero, cuyas propiedades térmicas resultan ser insuficientes para evitar la entrada de calor a los interiores de las viviendas, lo cual trae como consecuencia el excesivo uso de sistemas de climatización que a su vez aumenta el consumo energético en gran manera.

De esta manera uno de los primeros pasos para ajustar los sistemas humanos al cambio climático es implementar una estrategia de cambio en los materiales

utilizados, especialmente dirigidos a la búsqueda de materiales aislantes que puedan controlar el ingreso de calor con el fin de minimizar el uso de sistemas de climatización y el gasto energético.

1.2. Concreto ligero

Como se mencionó antes una de las iniciativas para adaptarse al cambio climático es por medio de la transformación de la infraestructura. Es bien sabido que en el ramo de la construcción en material de mayor utilización en el mundo por su versatilidad y sus propiedades mecánicas es el concreto. El concreto es un material compuesto por diferentes materiales los cuales definen su comportamiento y propiedades.

Los llamados concretos ligeros son aquellos que poseen una densidad significativamente menor a la de un concreto convencional (2200 a 2400kg/m^3) (7), aunque el término es confuso este tipo de concretos tienen una aplicación específica como aislante especialmente aquellos que poseen densidades muy bajas como es reportado en numerosas investigaciones.

Para diferenciar los concretos ligeros, el ACI 213R-87 (8) ha establecido la siguiente clasificación:

- **Concreto ligero de uso estructural**, es aquel con densidad entre 1120 y 1920 kg/m^3 , generalmente está compuesto de una mezcla de agregado ligero con agregado de peso normal, para cumplir requisitos estructurales deberá poseer una resistencia mínima a la compresión de 17 MPa .
- **Concreto de moderada resistencia**, este tipo de concretos deberá tener una resistencia a la compresión entre 7 y 17 MPa , su principal objetivo es el de brindar aislamiento térmico y presenta una densidad menor que la del concreto ligero para uso estructural.
- **Concreto de baja densidad**, en estos materiales la densidad varía entre 300 y 800 kg/m^3 , se utilizan con fines no estructurales, principalmente como aislamiento térmico.

Por otro lado según el tipo de agregado que se utiliza en su fabricación, Mindess sugiere otra clasificación que considera dos tipos de concreto ligero (9):

- **Concreto aireado en autoclave** o también llamado **concreto celular**.

Es aquel concreto producido especialmente para proveer aislamiento térmico o como aligerante, este se produce con materiales comunes agua, arena, cemento y aire, de los cuales el último es el de mayor importancia en este tipo de concretos,

ya que la matriz porosa será la encargada de brindar el aislamiento debido a la baja conductividad del aire que fue antes mencionada.

La mayoría de estos concretos necesitan de un aditivo que origina la formación de gases para generar burbujas de aire que posteriormente serán inyectadas a la matriz. Debido a esto, este tipo de material recibe el nombre de concreto espumante.

Por otro lado está el concreto celular con autoclave que mediante la inmersión de calor al espécimen evita que la matriz de poros colapse formando una red muy resistente y además ordenada.

- **Concreto con agregados ligeros.**

Este tipo de concreto posee agregados especiales diferentes al calizo que se usa normalmente para la fabricación de concreto convencional. Generalmente este tipo de agregados posee una elevada porosidad que es la responsable de su baja densidad.

Los agregados más utilizados para la fabricación de estos concretos están los tipo expandidos que son de carácter natural los cuales han sido sometidos a un proceso térmico para adquirir su carácter poroso. Por otro lado están los agregados de origen artificial los cuales oponen buena resistencia al paso del calor debido a su microestructura, ya que la mayoría de ellos son de origen polimérico los cuales poseen coeficientes de conductividad muy bajos.

En el gráfico 2 se puede observar la clasificación de los concretos ligeros según su resistencia y el tipo de agregado utilizado, así como el rango de densidades en los cuales se encuentran.

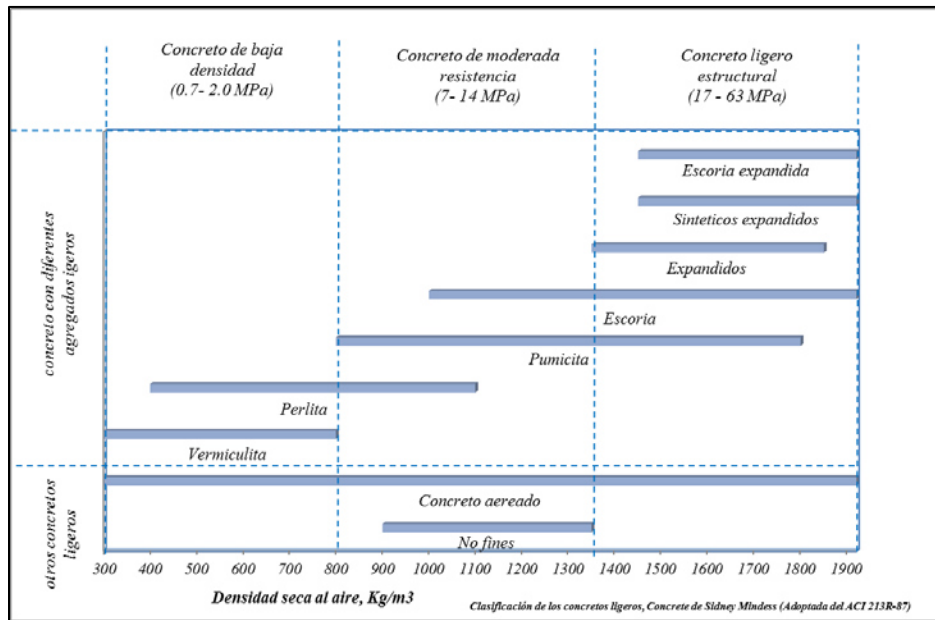


Gráfico 2. Clasificación de los concretos ligeros agregado (9).

El concreto ligero no solo se caracteriza por su densidad, como se mencionó antes este concreto posee una aplicación especial como aislante térmico, debido a la baja cantidad de calor que puede conducir a través de él.

En el gráfico 3 se muestran la conductividad térmica alcanzada por los distintos tipos de concretos ligeros mencionados según su densidad y tipo de agregado ligero.

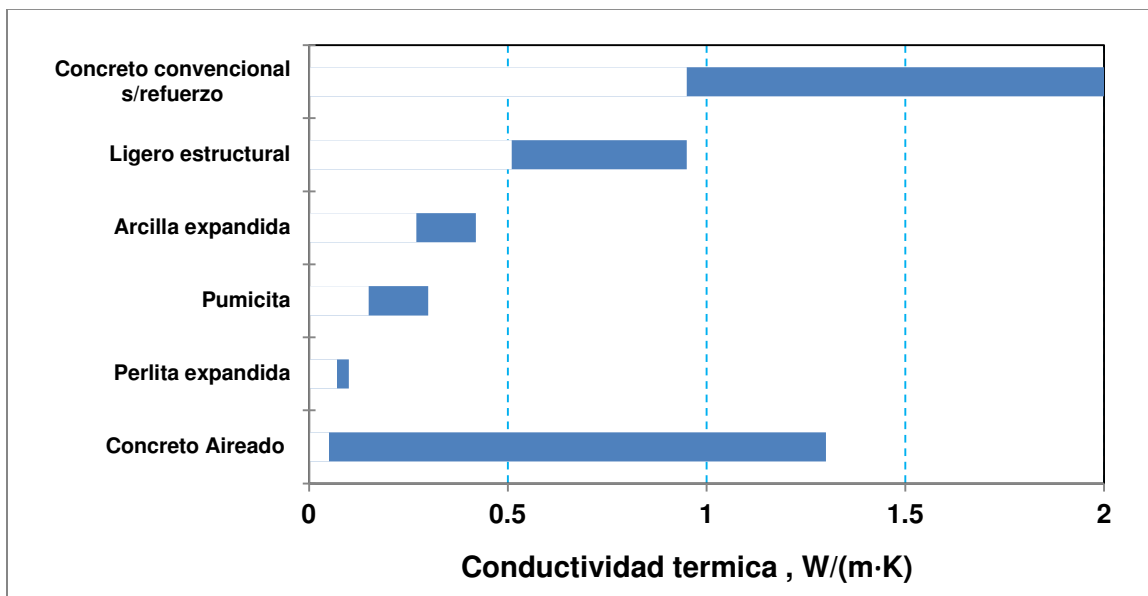


Gráfico 3. Propiedades térmicas del concreto ligero (9).

1.3. Aislamiento térmico

Se entiende por aislamiento térmico a la capacidad de los materiales a oponerse al paso del calor por conducción.

En realidad no existen aislantes perfectos, sino malos conductores de calor que son capaces de frenar la intensidad de un flujo térmico. Están caracterizados por tener un coeficiente de conductividad térmica (k) muy bajo alrededor de los $0.1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (10).

La capacidad aislante de un material se define por conductividad térmica y su resistividad. Entre las ventajas de tener un buen aislamiento térmico están:

- En clima caliente al brindar una buena impermeabilidad térmica se reduce al mínimo la ganancia de calor del exterior.
- Reducción del uso de sistemas de climatización y el consumo de energía utilizada.
- La temperatura del lugar se mantiene dentro de un rango confortable para los usuarios.

Aunque el aislamiento de un sistema esté en gran manera asociado con las propiedades térmicas del material se deben tener en cuenta otros factores que intervienen en el fenómeno de la transferencia de calor los cuales se presentan más adelante en el capítulo 2 del presente documento.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se abordarán temas específicos sobre la conducción de calor para entender el fenómeno de transferencia. Estos principios básicos ayudarán al lector a entender el análisis de los resultados obtenidos con mayor facilidad sin necesidad de ser un especialista en el tema de la transferencia de calor.

2.1. Transferencia de calor

La ciencia de la transferencia de calor es aquel fenómeno relacionado con la razón de intercambio de energía en forma de calor entre dos cuerpos, en el cual uno constituye la fuente y el otro el receptor (12), esta ciencia a diferencia de la termodinámica, no abarca el estudio del estado final del proceso de transferencia, sin embargo proporciona información acerca de naturaleza y rapidez con la cual se produce el fenómeno (13).

El intercambio de calor ocurre cuando existe un diferencial de energético y continúa así hasta llegar a un estado de equilibrio en ambos cuerpos. La dirección del flujo de calor Q se rige por la segunda ley de la termodinámica, de esta manera el flujo está direccionado hacia el gradiente energético menor, es decir hacia la zona más fría o con menor temperatura como se muestra en la imagen 1. Cabe mencionar que los términos caliente o frío son relativos, que se deben al efecto de intercambio de energía.

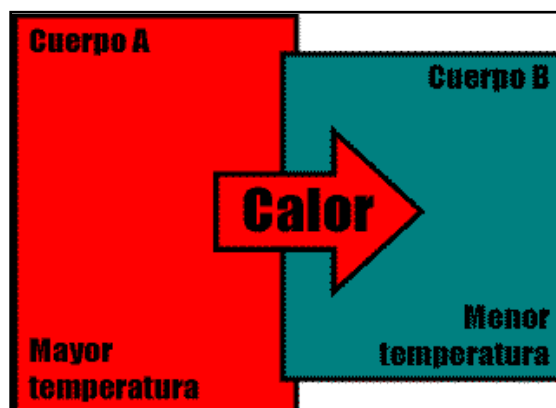


Imagen 1. Conceptualización de la segunda ley de la termodinámica.

2.2. Modos de transferencia de calor

Existen diferentes modos de la transmisión de calor, en la mayoría de los casos estos podrían acontecer al mismo tiempo, sin embargo la contribución en el fenómeno de transferencia puede ser en menor o mayor manera dependiendo del medio y condiciones en las que se dé el fenómeno.

Los modos de transferencia de calor son convección, radiación y conducción, cada uno de ellos se ve afectado por diferentes parámetros, y el mecanismo de transferencia es distinto para cada uno.

La convección se refiere a la transferencia de calor que ocurre en la interface la superficie-fluido o entre fluidos en movimiento cuando están a diferentes temperaturas. La radiación por otro lado se basa en el principio de transmisión de calor por medio de ondas electromagnéticas, por lo tanto la transferencia de energía se presenta aun en la ausencia de un medio, en otras palabras la transmisión de calor por radiación sería más efectiva al vacío. Por último la conducción se usa para referirnos a la transferencia de calor que ocurre en un medio sólido.

2.2.1. Convección

La transferencia de calor por convección se debe a la interacción de una superficie solida con un fluido en movimiento, o mediante la interacción entre 2 fluidos en movimiento con diferentes temperaturas. (14)

En el proceso de transferencia de calor, la convección se rige por el siguiente modelo:

$$q^n = h(T_s - T_\infty)$$

Donde q^n , el flujo de calor por convección (W/m^2), es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido, T_s y T_∞ , respectivamente. Esta expresión se conoce como la ley de enfriamiento de Newton, y la constante de proporcionalidad h ($W/(m^2 \cdot K)$) se denomina coeficiente de convección, el cual depende de la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido y una variedad de propiedades termodinámicas del mismo y su transporte, por lo tanto cualquier estudio de la convección se reduce finalmente a un estudio de los medios para determinar h .

Muchos autores han intentado formular ecuaciones para obtener un valor de h con el menor porcentaje de variación posible, utilizando diferentes correlaciones como lo son Nusselt, Prandtl, Reynolds y Grashof, sin embargo este cálculo se ve

limitado para una condición específica particular, ya que depende de muchos factores como se mencionó anteriormente.

Los valores de h dependiendo del tipo de fluido en cuestión se encuentran en la tabla 1. De la misma manera se observa que la convección se ve afectada por los cambios de estado del líquido en cuestión que hacen todavía más difícil obtener el valor de h.

Tabla1. Valores típicos de coeficiente de convección (15)

Tipo de convección	h, W/(m ² · K)
Convección libre para gases	2-25
Convección libre en líquidos	10-1,000
Convección forzada en gases	25-250
Convección forzada en líquidos	50-20,000
Condensación y ebullición	2500-100,000

2.2.2. Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Aunque la radiación puede provenir de líquidos o gases se enfoca más la atención hacia las superficies sólidas. Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas, es decir que mientras la transferencia de calor por conducción o convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no precisa del tal para llevar a cabo, por el contrario la transferencia de calor por radiación es más eficaz en el vacío.(16)

Para calcular el calor transferido por efectos de la radiación se utiliza la ley de Stefan-Boltzman (17), que se representa por el siguiente modelo matemático:

$$E_b = \sigma T^4$$

de donde se deriva

$$Q = \varepsilon \cdot A (\sigma T_1^4 - \sigma T_2^4)$$

Donde E_b es la energía radiada por unidad de tiempo por unidad de área, σ la constante de Stefan-Boltzman ($5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), ε la emisividad que se refiere a la relación que existe entre la radiación emitida por una superficie y la emitida por un cuerpo negro, A es el área superficial del objeto, mientras que T_1 y T_2

representan la temperatura superficial del objeto y la ambiente correspondientemente.

2.2.3. Conducción

El proceso de transferencia de calor por conducción se define como la transferencia de calor debido a un gradiente de temperatura y a la interacción de las partículas en el material, es decir la transferencia de calor se debe a la colisión de los electrones y la vibración de las redes (fonones) que conforman el cuerpo ocasionada por la exposición a una fuente de calor. (18)

En términos cuantitativos la conducción de calor puede medirse por medio de la ley de Fourier. Para un plano unidimensional la distribución de la temperatura se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

Donde el flujo de calor Q_x es la velocidad de calor transferida hacia “x” dirección por unidad de área perpendicular a la dirección de la transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura dT/dx , en esta dirección, A es el área perpendicular el flujo de calor. El coeficiente k es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica ($W/(m \cdot K)$) y es característica para cada material.

Con lo visto anteriormente los modos de transferencia de calor son muy variados y pueden generarse de manera subsecuente e incluso simultánea, sin embargo la cantidad de calor transmitida es mayor por efectos de la conducción.

2.3. Propiedades térmicas por conducción

Como se mencionó antes la transferencia de calor por conducción suele ser más representativa, por eso el estudio de las propiedades intrínsecas del material que intervienen en este proceso es de gran relevancia. A estas propiedades les otorgaremos el nombre de propiedades térmicas, las cuales son dependientes de las características del material.

2.3.1. Calor específico

La relación entre la transferencia de calor Q y el cambio en la temperatura de una sustancia depende del calor específico (c_p), el cual está definido como la medida de calor necesario para elevar la temperatura de un gramo de sustancia un grado Celsius. Es un parámetro macroscópico que está ligado con la estructura molecular y su vibración.(19)

La relación entre el calor, calor específico y el cambio de temperatura de la masa, m , de una sustancia están dados por la siguiente ecuación:

$$Q = mc_p\Delta T$$

En otras palabras entre mayor sea su c_p mayor será la cantidad de calor necesaria para cambiar su temperatura, tomando como referencia al agua la cual tiene un c_p de $4.18 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ a una temperatura ambiente de 23°C , el cual es un material con un alto valor de c_p comparado con el oro es de $0.12 \text{ J/g}^\circ\text{C}$.

2.3.2. Conductividad y resistencia térmica.

Una de las propiedades más importantes para evaluar el desempeño térmico de un material es el coeficiente de conductividad térmica. Esta propiedad es referida como una propiedad de transporte, que provee una idea de la velocidad con la que la energía es transferida por el proceso de difusión, la cual depende de la estructura física, atómica y molecular de la materia, así mismo el estado en el cual se encuentre.

La conductividad térmica cuantifica las propiedades de transmisión de calor de sólidos. Considerando el flujo de calor a través del área transversal y del gradiente de temperatura y está determinada por el contenido de humedad, composición, presión, estructura celular y temperatura, sin embargo este tema se abordara en la sección 2.4.; aquellos materiales que tienen baja conductividad térmica pueden ser utilizados como aislantes.

La conductividad térmica se mide en $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, y entre menor sea el valor de la conductividad térmica se dice que la transferencia de calor será menor. En la tabla 2 se enlistan una serie de materiales con diferente conductividad térmica.

Tabla 2. Conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente

Material	$k, \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
Diamante	2300
Oro	317
Agua	0.604
Madera	0.17
Caucho suave	0.13
Aire	0.026

Por lo general los gases poseen conductividades térmicas menores que los sólidos y los líquidos, esto se debe a que hay mayor dificultad para que se generen las colisiones a nivel microscópico de los electrones, de este manera los materiales metálicos son los que tienen mayor conductividad térmica, por otro lado el diamante aunque no posea un enlace metálico ni sus propiedades el nivel de ordenamiento de sus átomos permite que la conductividad térmica sea aún mayor.

Cabe mencionar que la conductividad térmica es una propiedad compuesta que a nivel micro estructural es propiciada por la colisión de sus electrones y por las ondas vibraciones entre los mismos o los también llamados fonones.

Para los metales la conductividad térmica está directamente relacionada con la colisión de los electrones, sin embargo para los materiales aislantes como lo son muchos cerámicos y polímero los fonones definen esta propiedad, estos a su vez dependen del grado de cristalinidad del material, sin embargo este tema se abordara con mayor grado de profundidad en la sección 2.4.

Por otro lado la resistencia térmica R del material se define como la capacidad aislante que un material posee.

La resistencia térmica según la NMX-C-460-ONNCCE-2009 define el valor R como:

Como la suma de las resistencias superficiales, interna y externa, y de las resistencias térmicas de las varias capas de los diversos materiales que componen al elemento de la envolvente, esta suma también es conocida como valor "R". Calculada por:

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{L_n}{k_n} + \frac{L_{n+1}}{k_{n+1}} + \dots + \frac{1}{h_e}$$

Dónde:

h_i y h_e , conductancia térmica interior y exterior, los valores de ambos según esta norma son 8.1 y 13 W/(m²·K) correspondientemente.

L_n , espesor de cada estrato de material, m.

k_n , Conductividad térmica de cada estrato, W/(m·K).

Los valores para considerar un ahorro de energía y el aislamiento según la NMX-C-460-ONNCCE-2009 para las distintas zonas térmicas son:

Tabla 3. Resistencia térmica mínima, según NMX-C-460-ONNCCE-2009

Zona térmica	Resistencia Térmica (Valor R, (m ² K) / W)		
	Mínima	Habitabilidad	Ahorro de energía
1	1.00	1.10	1.40
2	1.00	1.10	1.40
3	1.00	1.23	1.80
4	1.00	1.80	2.10

2.3.3. Difusividad térmica

El valor de la difusividad térmica de un material controla la tasa de tiempo de los cambios de temperatura a medida que el calor pasa a través de un material. Es una medida de la tasa en la que el cuerpo con una temperatura no uniforme alcanza un estado de equilibrio térmico.

La difusividad térmica es directamente proporcional a la capacidad térmica de aislamiento. La fórmula matemática que relaciona la difusividad térmica (h) con la conductividad térmica (k) es:

$$h = \frac{k}{c_p \rho}$$

Donde k es la conductividad térmica, c_p es el calor específico dependiente de la temperatura a presión constante y ρ es la densidad dependiente de la temperatura. Las unidades típicas de la difusividad en el SI son en m²/s, sin embargo es habitual que se use cm²/s. (20)

2.4. Factores que afectan la transferencia de calor en el concreto.

El concreto es un material compuesto cuyas propiedades dependen de las características de los constituyentes del mismo. De manera simple el concreto está constituido por cemento y adiciones minerales (7 al 15%), aire (1 al 5%), agua (15-20%) y agregados (60 a 75%), las propiedades del compuesto resultante (concreto) como la densidad, porosidad, resistencia mecánica, propiedades térmicas, entre otras dependen en gran manera del tipo y proporción de estos componentes.

En este apartado se enlistan una serie de propiedades del concreto que afectan directamente la transferencia de calor. El estudio de estas propiedades nos

conducirá al entendimiento de su relación con el fenómeno de transferencia de calor.

2.4.1. Densidad aparente

La densidad aparente del concreto está directamente relacionado, varios autores han mencionado en sus investigaciones que entre menor es la conductividad térmica, menor es la densidad del concreto o mortero en cuestión, debido a esto los concretos de peso ligero como el airado y espumante tienen gran aplicación como aislantes térmicos.

La densidad del concreto se ve principalmente afectado por el tipo de agregado y la porosidad. Entre los agregados más usados en el concreto está la caliza cuya conductividad térmica es de $3.1 \text{ W/ (m}\cdot\text{K)}$ (9), por lo tanto un concreto con caliza como agregado dependiendo de su relación agua-cemento tenderá a ser superior que un concreto con pumicita con conductividad térmica de $0.42 \text{ W/ (m}\cdot\text{K)}$.

Por otro lado los concretos espumantes o airados tienen mejor desempeño térmico, ya que poseen una alta porosidad, la conductividad térmica de este concreto está en el rango de 0.05 y $1.30 \text{ W/ (m}\cdot\text{K)}$ (9), en estado seco. Sin embargo su conductividad térmica se ve afectada en gran manera por la humedad presente en el concreto.

2.4.2. Humedad

Cuando la humedad de un compuesto cambia sus propiedades térmicas se ven afectadas, por ejemplo en la sección anterior observamos que el concreto airado tiene una conductividad térmica muy baja cuando se encuentra en estado seco, la explicación es sencilla, cuando existe una mayor cantidad de poros en el concreto estos en estado seco están llenos de aire, el cual por ser un gas posee una conductividad térmica muy baja alrededor de los $0.02 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (17), sin embargo cuando existe humedad presente en estos poros la conductividad térmica tiende a aumentar, debido a que esta propiedad en líquidos es mayor que cualquier gas, si hablamos del ejemplo específico del agua esta propiedad está en el orden de los $0.604 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ dependiendo de la temperatura a la que se encuentre.

2.4.3. Temperatura

El efecto de la temperatura en la transferencia es notorio ya que afecta directamente a las propiedades térmicas del material. El aumento de la temperatura puede influenciar sobre la pérdida de humedad del compuesto que a su vez genera una disminución en la conductividad térmica por el secado de la muestra.

Por otro lado la temperatura tiene una influencia sobre la dispersión de las vibraciones de la red cristalina de los materiales, este efecto se verá a detalle en la sección 2.4.4.

2.4.4. Micro-estructura

Como se ha mencionado con anterioridad la conductividad térmica es la principal propiedad cuando se trata de evaluar el desempeño aislante de un material. La conductividad térmica a nivel micro-estructural está definida por la combinación de 2 mecanismos, anunciado a continuación (21):

- k_f , conductividad térmica producida por las vibraciones de la red cristalinas (fonones).
- k_e , conductividad térmica por la colisión de los electrones libres.

De esta manera la conductividad térmica global k es igual a la suma de k_f y k_e .

El mecanismo de transferencia de calor por electrones es más eficiente que la fonónica, debido a esto los materiales metálicos son excelentes conductores de calor, mientras que los no metálicos como los cerámicos tienden a ser aislantes térmicos.

Los aislantes térmicos por otra parte dependen esencialmente de la conducción fonónica, por lo tanto el valor de la conductividad térmica se determina por las imperfecciones de la red o por el desorden estructural del material. Este desorden hace que la dispersión mayor por lo tanto la conductividad térmica disminuirá, por ejemplo el vidrio y otros materiales cerámicos con alto grado de amorfismo e irregularidades en la red poseen un valor de k menor comparados con cerámicos más estructurados y regulares.

Por otra parte la dispersión de las vibraciones de la red se hace más pronunciada al aumentar la temperatura, produciendo una disminución en el valor de la conductividad térmica (21,22).

La transferencia de calor en los polímeros se realiza por la vibración, translación y rotación de las moléculas, de la misma manera que los cerámicos depende en gran manera del ordenamiento, es decir el grado de cristalinidad definirá su k , debido a la vibración más coordinada de las cadenas y moléculas en estado cristalino.

2.5. Antecedentes

Se sabe que los materiales aislantes se caracterizan por tener densidad baja, debido a esto la mayoría de las investigaciones relacionadas con la optimización de las propiedades térmicas se enfocan en disminuir este valor, en la rama de la ciencia de los materiales de construcción especialmente en concreto, esto se logra a través del uso de cementantes como suplementarios, agregados ligeros y aditivos espumantes.

Investigaciones recientes han relacionado la de manera directa la reducción de la densidad aparente con un descenso importante de la conductividad térmica, propiedad principal a evaluar cuando se pretende mejorar el desempeño térmico de un compuesto, de la misma manera diversos investigadores dedicados al estudio de las nuevas tecnologías del concreto han encontrado que esta propiedad depende de la humedad, contenido de vacíos, amorfismo del agregado, entre otras.

A continuación se enlistan una serie de trabajos encaminados a la evaluación del desempeño térmico-mecánico de distintas mezclas de concreto y mortero ligero, que establecerán las bases para el entendimiento de la transferencia de calor en este tipo de compuestos.

Kim et al. (2012), estudió el efecto del uso de agregado ligero y agentes espumantes a mezclas de concreto base cemento portland, con el objetivo de mejorar su desempeño térmico y acústico, la relación a/c estudiada fue 0.47 y el consumo de cemento de 365 kg/m^3 . La conductividad térmica disminuyó conforme se aumentó el remplazo de agregado convencional por ligero, por otro lado la conductividad térmica disminuyó de manera lineal con el aumento de la porosidad (23).

Ozan Segul et al. (2011), estudió el uso de perlita expandida con tamaño máximo de 4 mm en sustituciones de 40, 60, 80 y 100 % con relación a/c 0.55, los resultados obtenidos demostraron que la densidad aparente está directamente relacionado con la conductividad térmica del mismo. La conductividad térmica mínima fue de 0.13 W/m K , sin embargo la resistencia a la compresión disminuyó considerablemente llegando a 0.1 MPa (24).

A. Benazzouk et al (2008), encontró que utilizando partículas de caucho como remplazo de agregado convencional en mezclas de mortero base cemento portland con aire incluido entre 2 a 17%, se reduce el valor de la conductividad térmica en un 60% con respecto a la referencia con 0% de caucho y registrando una resistencia a la compresión de 10 MPa . De la misma manera encontró una

relación entre densidad aparente y conductividad térmica relacionada de manera lineal (25).

D.K. Panesar et al. (2012), haciendo uso de corcho con diferentes tamaños como agregado en mezclas de mortero y concreto con consumos de cemento de 400 kg/m³ para relaciones a/c 0.4, la mayor disminución en la conductividad térmica registrada fue de 0.79 W/(m·K) con un densidad aparente de 1800 kg/m³ aproximadamente. Por otro lado no se identificó alguna relación directa entre el tamaño del agregado (26).

Ramazan Demirboga et al. (2002), encontró una relación lineal entre el densidad aparente del concreto y la conductividad térmica, en mezclas de concreto aligerado mediante arcilla expandida y adicionadas con materiales cementantes suplementarios como ceniza volante y humo de sílice. Se demostró que con el uso de suplementos cementantes se disminuye el valor de conductividad térmica especialmente cuando se usan proporciones del 30% de remplazo del cemento portland, de la misma manera la conductividad térmica disminuyó de manera proporcional al contenido de agregado ligero en la mezcla (27).

Osman Ünal et al. (2005), investigo acerca del efecto del uso de diferentes tamaños de agregado y consumos de cemento (250, 300, 350 y 400 kg/m³) para relaciones a/c 0.15. Un total de 4 combinaciones de agregados fueron estudiadas. El mejor comportamiento térmico se obtuvo con la combinación de agregado que arrojó la mayor porosidad, por otro lado el consumo de cemento tuvo una gran influencia sobre la conductividad térmica, entre mayor consumo de cemento portland mayor fue el valor de la conductividad térmica, esta tendencia se mostró para mezclas con agregado fino (28).

Bentz et al. (2011), estudió las propiedades térmicas de mezclas con altos contenidos de ceniza volante, contemplando substituciones entre el 0 y 75% de ceniza volante por cemento portland para relaciones a/c entre 0.50 y 0.60 con agregado de peso normal, se encontró que la incorporación de altos volúmenes de ceniza volante disminuye significativamente la conductividad térmica del compuesto (29).

Yunsheng Xu et al. (1999), estudió el efecto de la adicción de suplementos cementantes como el humo de sílice y el efecto de la incorporación de arena silica en pastas y morteros sobre la conductividad térmica. Los resultados de esta investigación mostraron que la adicción de humo de sílice en pastas y morteros disminuye su conductividad térmica, mientras que la adicción de la arena silica aumento este valor (30).

Kook-Han Kim et al. (2000), realizó estudios acerca los efectos de diferentes variables típicas en el concreto como relación a/c, humedad, volumen de agregado, suplementos cementantes y temperatura sobre la conductividad térmica, las conclusiones de mayor importancia en este trabajo fueron que los parámetros como relación a/c, temperatura, humedad y volumen de agregado tienen efectos significativos en el aumento o reducción de la conductividad, por otro lado que la edad del concreto no es un factor determinante en el valor de la conductividad.

Para las diferentes relaciones a/c se observó que al aumentar al reducir la relación la conductividad térmica aumento de manera significativa, esto es atribuible al aumento en el consumo de cemento y a la densificación de la matriz. Por otro lado al aumentar la temperatura ambiente de la prueba la conductividad térmica disminuye.

Los suplementos cementantes usados en este estudio (ceniza volante y escoria) mejoraron el comportamiento térmico de las mezclas, especialmente para porcentajes de sustitución altos, por otro la adición de agregado condujo al aumento de la conductividad (31).

Bentz (2005), usando la técnica Fuente de plano transitorio (TPS) midió las propiedades térmicas de pasta de cemento a diferentes grados de hidratación, encontró que el grado de hidratación de las pastas no influye significativamente en el valor de la conductividad térmica (32).

2.6. Justificación

La problemática de clima caliente ha ido en aumento en los últimos años, según registros de la Comisión nacional del agua, CONAGUA (33) y estudios del Instituto Nacional de estadística y geografía, INEGI (34) una gran extensión de nuestro país se está calentando, especialmente la zona noreste de México. Esta problemática es notoria en nuestra región, tan solo para el estado de Nuevo León en el periodo del 2004-2013 el aumento en la temperatura promedio anual fue de 4.4°C, aunado a esto la temperatura dentro de las viviendas puede incrementarse dependiendo del sistema constructivo utilizado.

Según el INEGI (7) en toda la república Mexicana 86% de las viviendas tienen paredes conformadas principalmente de elementos concreto o mortero, cuyas propiedades térmicas resultan ser insuficientes para evitar la propagación de calor a los interiores de las viviendas.

Como solución a este problema, en los últimos años se han desarrollado sistemas de aislamiento con el fin de mejorar la capacidad aislante de las viviendas, desafortunadamente estos materiales utilizan procedimientos de fabricación que consumen altos niveles de energía y a su vez contaminan el ambiente en mayor manera que los convencionales.

El estudio de nuevas combinaciones de materiales de construcción con propiedades aislantes es de suma importancia, así como la importancia del estudio y entendimiento del transporte de calor estos materiales de construcción, conducirá al desarrollo de nuevos materiales aislantes.

2.7. Objetivos

2.7.1. Objetivo Principal

Desarrollar un mortero base cemento portland con capacidad aislante, que conjugue un buen desempeño térmico, mecánico y económico para su posterior aplicación como mampostería no estructural.

2.7.2. Objetivos generales

- Caracterización térmica del co-polímero.
- Reducción del contenido de material cementante utilizando mediante el uso de ceniza volante.
- Establecer un método estandarizado para el mezclado de los morteros con co-polímero.
- Obtención de las proporciones maximizada de co-polímero para la producción de morteros base cemento portland con resistencia objetivo de 35 kg/cm^2 .
- Estimación de las conductividades térmicas teóricas de cada mezcla a través de los límites de Hashin-Shtrikman.
- Identificar las proporciones adecuadas que con llevaran a una conductividad térmica (k) reducida.
- Evaluar el efecto del confinamiento en diferentes mezclas.
- Evaluar el efecto de curado en mezclas de mortero definitivas.

2.8. Hipótesis

La incorporación de materiales ligeros como ceniza volante y un micro- copolímero a mezclas de mortero base cemento portland, conducirán a la reducción de la conductividad térmica, a niveles competitivos con materiales aislantes comerciales como concreto airado y autoclave.

Capítulo 3

Materiales y caracterización

En este capítulo se definen los materiales utilizados para este proyecto, así como la descripción de los procedimientos utilizados para obtener sus características físicas y químicas.

3.1. Cemento Portland

Según ASTM C 150 puede definirse como cemento portland aquel cemento hidráulico producido por la pulverización del Clinker que compuesto esencialmente de silicatos de calcio, conteniendo uno o más formas de sulfatos de calcio en pequeñas cantidades (35).

El cemento portland utilizado fue un cemento portland ordinario CPO 40. Las propiedades estudiadas fueron densidad por frasco de Le-chatelier según la ASTM C 188, resistencia a la compresión en cubos por ASTM C109, así como distribución de tamaño de partícula por medio de difracción laser. Los análisis químicos realizados fueron análisis por difracción de rayos X (DRX), Fluorescencia de rayos X (FRX), Espectroscopia electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia por dispersión de energía de rayos X (EDS).



Imagen 2. Cemento Portland, PCA (36)

3.2. Ceniza volante

La ceniza volante es un subproducto de la quema de carbón molido o pulverizado, este material generalmente se extrae como residuo de plantas generadoras de electricidad. La ceniza volante es comúnmente utilizada como material cementante suplementario al portland, esto por su general potencial puzolánico y su bajo costo.

La ASTM C 618 clasifica a la ceniza volante en tres grupos:

Clase N, puzolanas naturales crudas o calcinadas como las dolomitas, cenizas volcánicas o pumicita calcinada.

Clase F, ceniza proveniente de la calcinación de carbón bituminoso, se distinguen por sus características puzolánicas.

Clase C, ceniza proveniente de la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito, se caracteriza por tener propiedades tanto puzolánicas como cementantes.

La ceniza volante utilizada procede de la planta Termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E) “José López Portillo” ubicada en el municipio de Nava, Coahuila, México.

Los análisis realizados para la correcta caracterización de este material fueron densidad por frasco Le-Chatelier según ASTM C 188, índice de reactividad por ASTM C 311 y ASTM C 618, así como distribución de tamaño de partícula por medio de difracción laser. Los análisis químicos realizados fueron análisis por difracción de rayos X (DRX), espectroscopia electrónica de barrido (SEM), espectroscopia por dispersión de energía de rayos (EDS) y fluorescencia de rayos X (FRX).



Imagen 3. Ceniza Volante (Izq.), Termoeléctrica “José López Portillo”, CFE (Der.)

3.3. Agregado (co-polímero)

El material ligero usado como agregado denominado co-polímero por especificaciones del fabricante, el cual describe el material como una mezcla de co-polímero encapsulando un agente de expansión y carbonato de calcio, su aspecto es similar a un polvo blanco muy fino, ver imagen 3.

Un co-polímero es una macromolécula compuesta por dos o más monómeros o unidades repetitivas distintas, que se pueden unir de diferentes formas por medio de enlaces químicos.

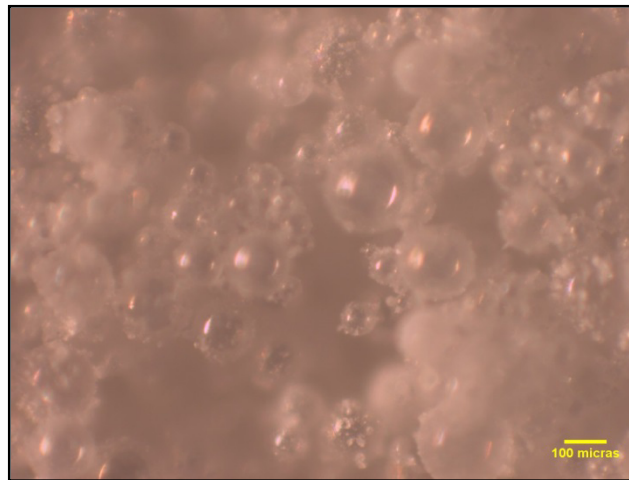


Imagen 4. Microscopia óptica del Co-polímero

Entre las características físicas del material se encuentra el bajo valor de densidad que posee de $120 \pm 30 \text{ kg/m}^3$, así mismo que es insoluble en agua y absorción de agua nula.

Las pruebas realizadas a este material fueron distribución del tamaño de partícula por medio de difracción laser, espectroscopia electrónica de barrido (SEM), imágenes por microscopia óptica, análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y difracción de rayos X (DRX).

Además se realizaron pruebas de conductividad térmica para este producto utilizando un fluido viscoso con conductividad conocida, para obtener la conductividad térmica combinada de este compuesto y calcular el estimado de conductividad térmica del material ligero co-polímero en base a las formulas establecidas por Hashin-Shtrikman (37). El procedimiento y cálculo de esta propiedad se presentan en el anexo B.

3.4. Aditivo

El aditivo denominado comercialmente PLASTOL PRECAST fue utilizado en esta investigación, este es un aditivo reductor de agua de alto rango súper fluidificante base poli carboxilato diseñado especialmente para dar alta fluidez, cumple con la normativa ASTM 494 tipo A y F, además no contiene iones cloro.

Este aditivo posee una densidad de $1090 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ y un pH de 6.50 ± 1.00 , el contenido de sólidos en suspensión es de 48%, la apariencia de este aditivo es similar a la de un líquido viscoso color café.



Imagen 5. Reductor de agua de alto rango PLASTOL PRECAST.

Capítulo 4

Metodología Experimental

En el presente apartado se describe el procedimiento ejecutado para dar cumplimiento a los objetivos planteados en la presente investigación.

4.1. Diseño de mezcla.

El diseño de mezcla estuvo basado en estudios previos realizados por el laboratorio de Tecnología de Concreto (43).

Un total de 15 morteros fueron desarrollados y evaluados en esta investigación. Para el establecimiento de las proporciones se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Estudio de diferentes relaciones agua/cementante.
- Evaluación del efecto de la adición de co-polímero.
- Evaluación del efecto de la adición de ceniza volante.

4.2. 1era etapa de optimización del contenido de co-polímero.

Diferentes contenidos de co-polímero fueron estudiados, con el fin de obtener el porcentaje óptimo para alcanzar una resistencia a la compresión adecuada, para que los morteros puedan ser utilizados como mampostería no estructural según la NMX-C-441-ONNCCE-2005.

4.3. Optimización del empaquetamiento de materiales granulares.

Para la optimización del empaquetamiento se tomó como referencia la curva de Fuller (6). Utilizando la distribución del tamaño de partículas de los materiales individuales de manera teórica, haciendo combinaciones en base a las diferentes proporciones de las mezclas desarrolladas.

4.4. Optimización del contenido de Ceniza volante.

Para esta etapa se fijó el contenido de co-polímero para una misma relación agua-cementante 0.6, los porcentajes de ceniza volante estudiados variaron en el rango del 25 al 55 en sustitución de la masa del cemento portland.

La optimización se basó en la obtención de la resistencia a compresión para cumplir con los requisitos mínimos según la NMX-C-441-ONNCCE-2005. Para cada una de estas mezclas se determinaron las propiedades enlistadas en 4.8.1-4 y 4.9.1-2.

4.5. 2da etapa de optimización del contenido de co-polímero.

Una vez que se tuvo el contenido de Ceniza Volante óptimo para la relación agua-cementante 0.6, se procedió a incrementar el contenido de co-polímero de acuerdo al volumen de la mezcla, estableciendo 4 porcentajes de co-polímero, para las relaciones a/cm 0.5 y 0.4. El diagrama de flujo de las muestras se muestra en el anexo D. Para cada una de estas mezclas se determinaron las propiedades enlistadas en 4.8.1-4 y 4.9.1-2.

4.6. Confinamiento

Se evaluó la repercusión del confinamiento en la resistencia a compresión de las mezclas con mayor porcentaje de expansión aparente, además se incluyó una mezcla de cada relación agua-cementante evaluada en este proyecto. Se evaluaron en total 6 mezclas a una edad de 7 d, debido a que es la más representativa para la aplicación que se pretende abarcar.



Imagen 6. Confinamiento de los especímenes.

Para esta prueba se utilizaron placas metálicas las cuales brindaron el confinamiento a los especímenes cúbicos (5 x5 cms). Cabe mencionar que de manera paralela se evaluaron especímenes sin confinamiento, para comparar los resultados.

Para cada una de estas mezclas se determinaron las propiedades enlistadas en 4.9.1-2.

4.7. Efecto del curado

Para esta etapa se utilizó solo la mezcla de mortero definitivo para evaluar el efecto de curado en la resistencia a la compresión. El objetivo de esta etapa es

asemejar lo efectuado en la práctica con elementos de mampostería. El plan de curado se muestra en la tabla 1. Para los cuales se determinaron las propiedades enlistadas en 4.9.2.

Tabla 4. Programa de curado

<i>Tipo de curado</i>	<i>Edad de ensaye</i>		
	<i>3 días</i>	<i>7 días</i>	<i>28 días</i>
<i>Al aire</i>	X	X	X
<i>Mixto 1</i>	✓	X	X
<i>Mixto 2</i>		✓	X

X Curado al aire bajo condiciones de laboratorio.

✓ Condiciones de curado estándar

4.8. Propiedades en estado fresco

4.8.1. Método de mezclado

El equipo utilizado consistió de una batidora planetaria marca UNIMEX modelo SRM 12, debido a la naturaleza ligera del material el método de mezclado fue establecido en base a pruebas exploratorias, evaluando mezclas con aditivo y sin aditivo, en las cuales se encontró que el método de mezclado más favorable, el cual se describe en el anexo A.



Imagen 7. Batidora planetaria marca UNIVEX, modelo SRM 12.

4.8.2. Fluidez

Esta propiedad se determinó por medio de la mesa de fluidez según ASTM C 1437-07. (44)



Imagen 8. Meza de fluidez, ASTM C230.

4.8.3. Contenido de aire en morteros ASTM C 185

El contenido de aire fue determinado según la norma ASTM C 185-01 (45).



Imagen 9. Contenido de aire en morteros, ASTM C 185.

4.8.4. Peso volumétrico de morteros

El valor peso volumétrico de las mezclas de mortero se calculó a partir de los datos obtenidos para la prueba de contenido de aire por el método ASTM C 185-01.

4.9. Estado endurecido

4.9.1. Curado

El método de curado utilizado fue según la ASTM C511-98 (46).

4.9.2. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se tomó a diferentes edades para observar el desarrollo de la misma debido a la naturaleza de los diferentes componentes de cada mezcla. Las edades establecidas fueron 3, 7 y 28 días, siendo sumamente representativa la medida de resistencia a la compresión de 7 días debido a que la principal aplicación contemplada para este micro-mortero es en elementos que requieren adquirir gran parte de su resistencia durante las edades tempranas, sin embargo el monitoreo extendió hasta los 28 días debido a la presencia de ceniza volante.

La máquina universal Instron fue utilizada para realizar todos los ensayos de compresión.



Imagen 10. Máquina universal Instron.

4.9.3. Conductividad térmica

Para realizar las medidas de conductividad térmica se utilizaron especímenes cilíndricos y prismáticos los cuales se ilustran en la imagen 11, para las diferentes mezclas analizadas se utilizó el método de fuente de calor transitoria (TPS, por sus siglas en inglés) por medio de un analizador de constantes térmicas marca Hot Disk ilustrada en la Imagen 7, los parámetros establecidos fueron, poder 0.8 W, tiempo de medición 80 s y la profundidad de medición de los 7 a los 10 mm. El sensor utilizado para la prueba fue de kapton 5501 con diámetro de 6.4 mm (Imagen 12).

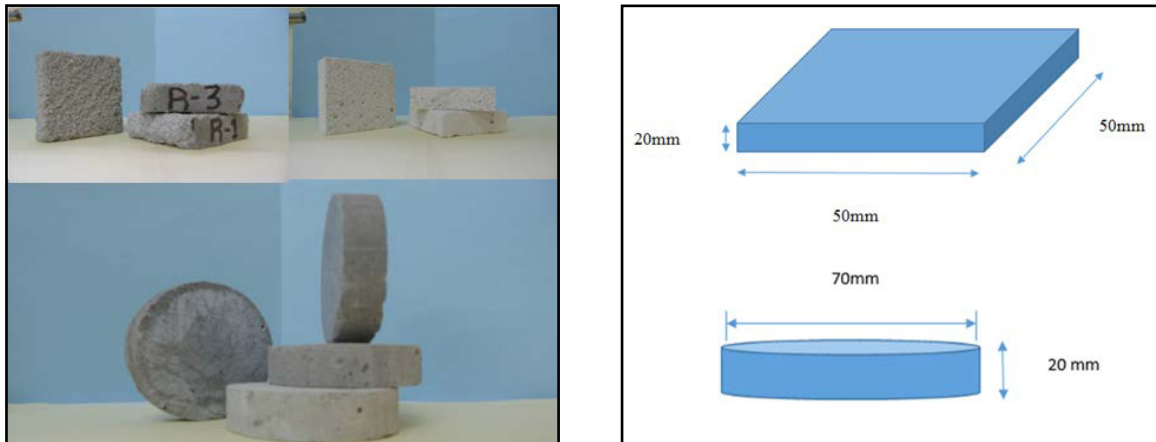


Imagen 11. Especímenes para la medición de la conductividad térmica



Imagen 12. Analizador de constantes térmicas, Marca Hot Disk y sensor 5501.

La esquematización de la prueba se presenta en la imagen 13, como es reportado por Dale Bentz (32), esta prueba se realiza por colocando el sensor entre 2 especímenes de la misma mezcla y se emite el calor por la misma.

Cabe mencionar que todas las lecturas se tomaron a temperatura constante de $23\pm 1^{\circ}\text{C}$, para estado seco y saturado. Previamente al ensaye la muestras fueron secadas a 100°C hasta llegar a una masa constante, mientras que los especímenes saturados fueron sumergidos por 24 h en agua destilada.

De la misma manera para evitar lecturas erróneas debido a los efectos de la evaporación de agua en el caso de los especímenes saturados, se colocó una bolsa plástica previamente humedecida con agua destilada, para evitar la pérdida por evaporación de agua.

Esta propiedad solo se midió en mezclas que cumplieron mecánicamente en las etapas 4.2., 4.4. y 4.5

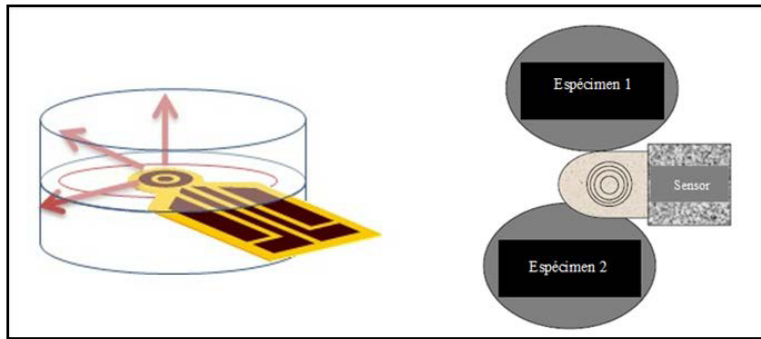


Imagen 13. Esquematación de prueba de conductividad térmica

De la misma manera se realizaron mediciones de conductividad térmica para las diferentes morteros obtenidos a lo largo de la investigación, con el fin de observar los efectos de la adición de ceniza volante y co-polímero en distintos porcentajes.

La prueba se realizó sobre especímenes prismáticos de 15 x 15 x 2 cm que fueron secos al horno a 100°C por 24 hrs, las lecturas se tomaron a $25 \pm 1^\circ\text{C}$, mientras que los parámetros establecidos en la prueba fueron poder 0.58 W, tiempo de medición 180 s. El equipo utilizado para esta prueba fue CT Mètre con sonda de alambre plano de longitud 50 mm (Imagen 14), equipo que utiliza el mismo principio que la técnica TPS.



Imagen 14. Equipo de conductividad térmica CT Mètre (izq.), especímenes (Sup. Der.) y sonda de alambre plano (Inf. Der.)

4.9.4. Calor específico en polvos

Para la medición del calor específico se utilizaron los polvos de cada una de las muestras, los cuales fueron molidos con la ayuda de un mortero de porcelana. El analizador de constantes térmicas también fue utilizado para obtener el valor de calor específico, para lo cual se utilizó un accesorio especial que consiste de un pequeño recipiente de oro con tapa, el cual se aisló con poli estireno para evitar la

pérdida de energía. La temperatura de prueba fue de 23°C. El esquema de prueba se presenta en la imagen 15.

Esta propiedad solo se midió en mezclas que cumplieron mecánicamente en las etapas 4.2., 4.4. y 4.5.

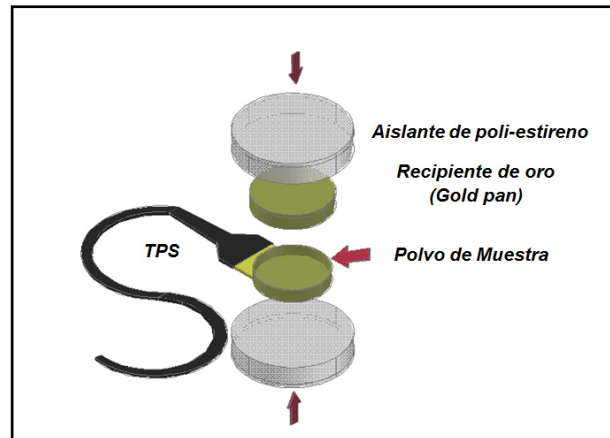


Imagen 15. Esquemización de prueba de Calor específico.

4.9.5. Microscopia óptica

Imágenes con microscopio óptico a diferentes aumentos fueron tomadas para las diferentes mezclas en especímenes en fractura, esto con el fin de analizar la distribución de los materiales. Esta propiedad solo se midió en mezclas que cumplieron mecánicamente en las etapas 4.2., 4.4. y 4.5.

4.9.6. Cambios volumétricos

Los cambios volumétricos de mezclas fueron medidos por ASTM 1698-09 (48), para lo cual se utilizaron las mezclas que presentaban los niveles más altos de expansión y una referencia para cada relación agua-cemento con igual cantidad de co-polímero en volumen.

Algunas adaptaciones al equipo se realizaron debido a la naturaleza de las mezclas lo cual se presenta en el anexo C del presente documento.

4.9.7. Calorimetría

Pruebas de calorimetría para una pasta de mortero con relación a/c 0.6 sin co-polímero y otra con 43% co-polímero, para determinar la cantidad de calor liberado en su proceso de hidratación. La prueba se llevó a cabo a una temperatura de 25°C, mientras que el tamaño de la muestra fue de 1.575 y 2.571 g para la pasta y la muestra con co-polímero respectivamente.

Capítulo 5

Resultados y discusión

5.1. Caracterización de materiales

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización efectuadas a los distintos materiales utilizados en la fabricación de las diferentes mezclas consideradas en esta investigación.

5.1.1. Densidad

Las densidades de los diferentes materiales utilizados en esta investigación se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Densidad de los materiales, kg/m³

<i>Material</i>	<i>ASTM C 188</i>	<i>Picnómetro de helio</i>	<i>Ficha técnica</i>
<i>CPO 40</i>	3030	3120	---
<i>CV</i>	2020	2110	---
<i>COP</i>	---	---	120
<i>Aditivo</i>	---	---	1090

5.1.2. Distribución del tamaño de partículas.

Para los diferentes polvos con los que se produjeron las mezclas evaluadas en el grafico 4 se muestra su distribución de tamaño partícula, el tamaño promedio de la partícula (d_{50}) resulto de 20, 70 y 90 μm para el cemento, ceniza volante y el co-polímero respectivamente.

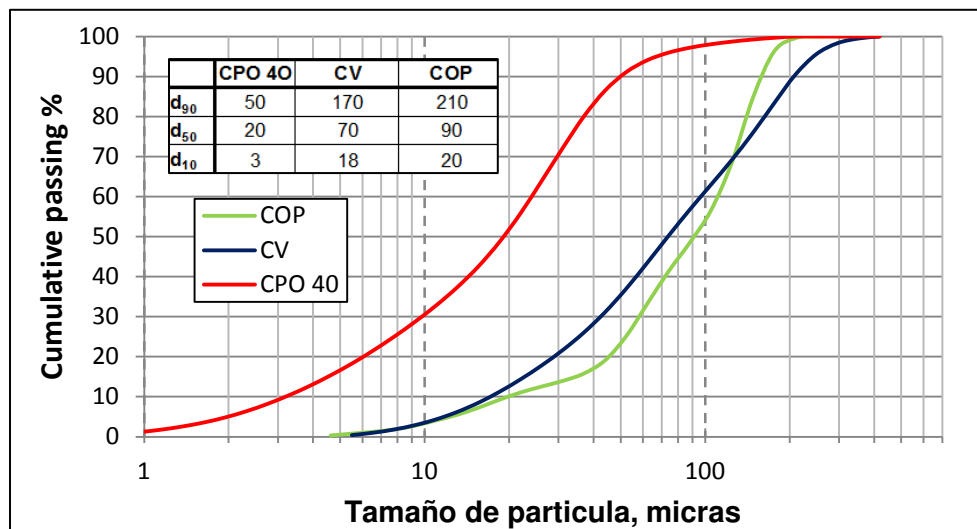


Gráfico 4. Determinación del tamaño de partículas para los materiales granulares utilizados en la producción de mezclas

5.1.3. Fluorescencia por rayos X, FRX.

En la tabla 6 se muestra el porcentaje de óxidos para la ceniza volante. Esta ceniza volante se puede clasificar como tipo F ya que la suma de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ es igual al 96.05% que es mayor al 70% mínimo especificado según la ASTM-C-618-2008.

Tabla 6. Fluorescencia por rayos X, ceniza volante

Compuesto	%
SiO ₂	67.48
Al ₂ O ₃	23.94
Fe ₂ O ₃	4.63
Suma (SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	96.05
CaO	1.76
MgO	1.16
K ₂ O	0.99
Na ₂ O	1.14
Mn ₂ O ₅	0.04
TiO ₂	0.94

Por otro lado en la tabla 7 se muestra la composición del cemento portland utilizado en esta investigación.

Tabla 7. Fluorescencia por rayos X, cemento Portland

<i>Compuesto</i>	%
SiO ₂	17.665
Al ₂ O ₃	4.718
Fe ₂ O ₃	2.263
CaO	63.678
MgO	1.202
SO ₃	5.1164
Na ₂ O	0.6585
K ₂ O	0.743
TiO ₂	0.235
P ₂ O ₅	0.092
MnO	0.078

En la tabla 8 se muestran los análisis de FRX realizados a muestras de co-polímero con y sin tratamiento térmico a 950°C, en este análisis podemos observar que existen óxidos que son potencialmente expansivos al contacto con los productos del cemento portland como el Al₂O₃ y el MgO, los cuales se presentan en altos porcentajes en este material. Por otro lado la pérdida por ignición nos indica que el material orgánico presente en el compuesto es alrededor del 20%.

Tabla 8. Fluorescencia por rayos X, Co-polímero.

Compuesto	COP a 950°C	COP S/Tratamiento
MgO	2.364	5.088
Al2O3	5.368	8.842
SiO2	20.463	29.856
K2O	0.551	0.512
CaO	70.853	53.443
Fe2O3	0.401	0.258
Pérdida por ignición%		20.19

5.1.4. Índice de actividad a la resistencia (IAR).

En la tabla 9 se indica el índice de actividad a la resistencia (IAR) que se obtuvo para la ceniza volante en relación a la resistencia a compresión del cemento utilizado en esta investigación. Los resultados evidencian que la misma ceniza volante utilizada para esta prueba es potencialmente reactiva al presentar un IAR > 75% según ASTM-C-618-2008 esta ceniza puede ser utilizada como suplemento cementante.

Tabla 9. Índice de actividad puzolánica de la ceniza volante

<i>Edad</i>	<i>7 d</i>	<i>28 d</i>
<i>IAP, %</i>	84.5	78

5.1.5. Difracción de rayos X, DRX.

En los gráficos 5, 6 y 7 se muestran los difractogramas de los materiales granulares utilizados en la producción de estas mezclas, el cemento portland, la ceniza volante y co-polímero presentan una composición mineralógica típica que coincide con esta técnica (48,49,50).

En el gráfico 8 podemos observar que el co-polímero posee una estructura altamente desorganizada en comparación con los otros materiales, por lo tanto se puede decir que este polvo tendrá menor conductividad térmica debido a que la vibración de las redes cristalinas será menos efectiva (21,22).

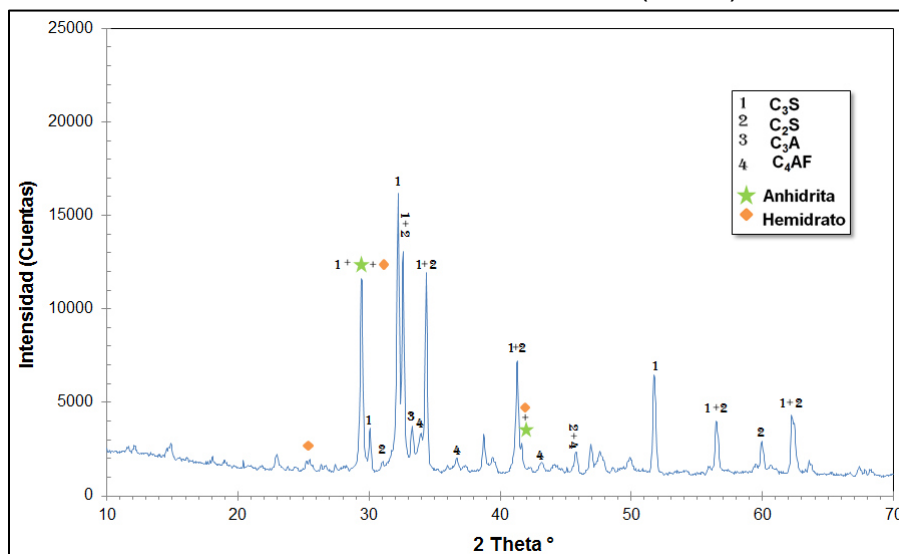


Gráfico 5. Difracción de rayos X del CPO 40.

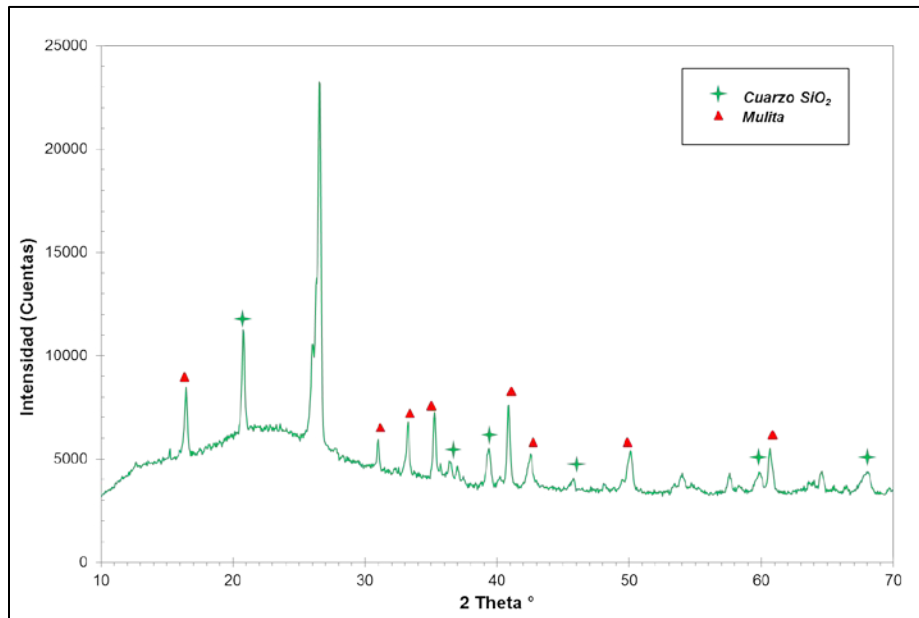


Gráfico 6. Difracción de rayos X de la ceniza volante.

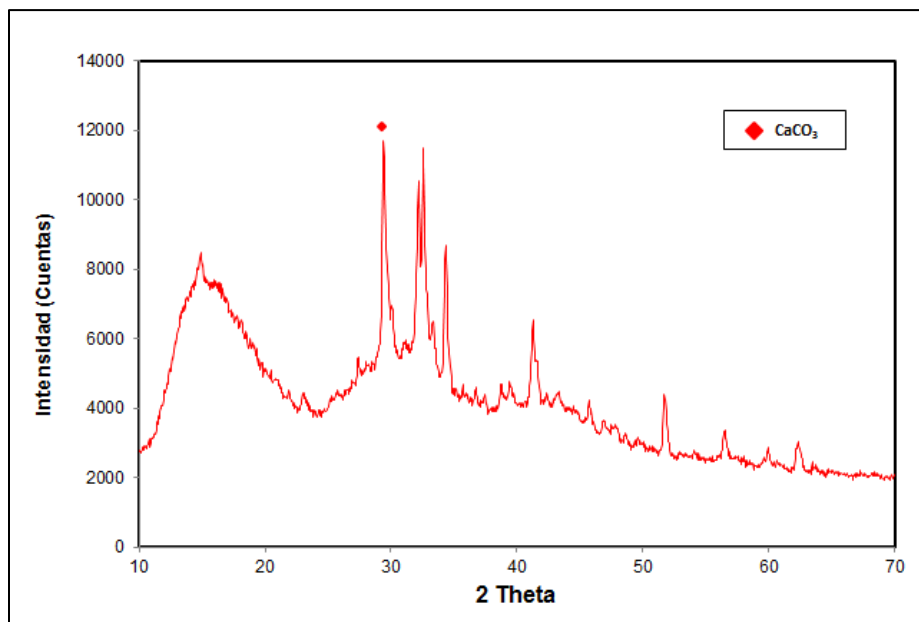


Gráfico 7. Difracción de rayos X para el Co-polímero.

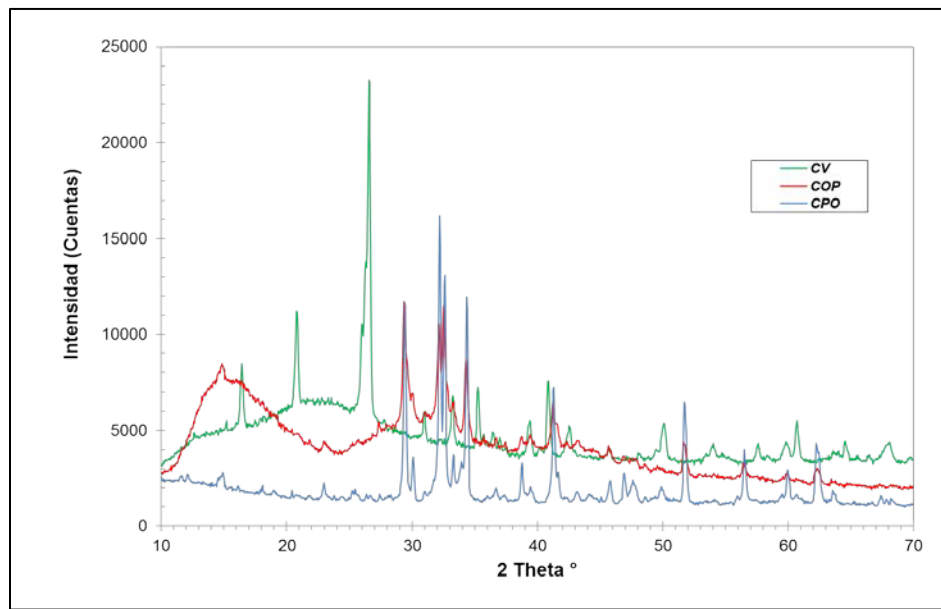


Gráfico 8. Difracción de rayos para los diferentes materiales granulares utilizados.

5.1.6. Microscopia óptica (MO).

Esta técnica se utiliza para caracterizar la morfología del co-polímero y para confirmar los resultados de tamaño de partícula reportados en la sección 5.1.2. En la imagen 16 se presentan imágenes del co-polímero a escalas milimétricas (a) y micrométricas (b). Este material está conformado por esferas huecas con aire en su interior, esto sugiere, que las pruebas de conductividad térmica a 23°C para este material arrojaran valores similares a las del aire 0.02 W/(m·K) (17).

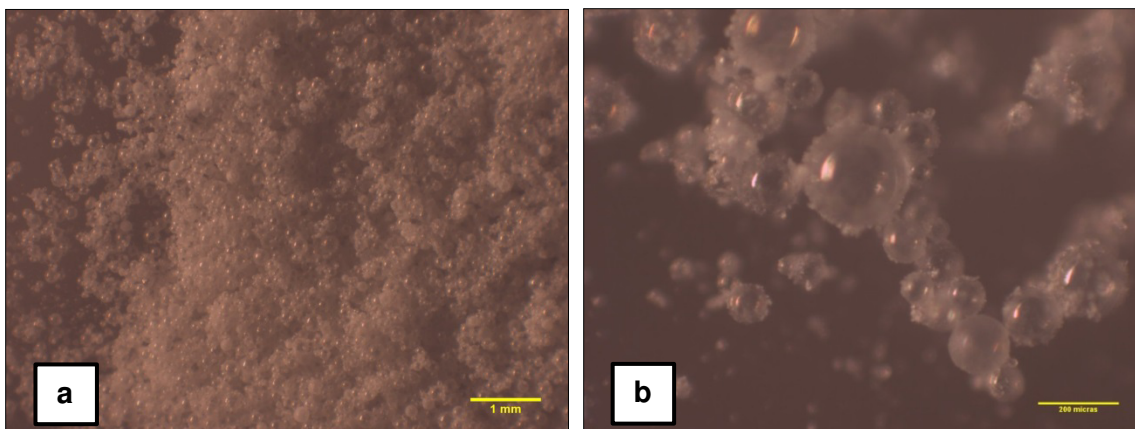


Imagen 16. Imágenes por microscopio óptico del co-polímero.

5.1.7. Microscopía electrónica de barrido (MEB).

En las imágenes 17, 18 y 19 se muestran las microfotografías para el cemento, ceniza volante y el co-polímero respectivamente. Los tamaños de partícula que se observan en estas imágenes son congruentes con los tamaños reportados en 5.1.2 para la distribución de tamaño de partícula.

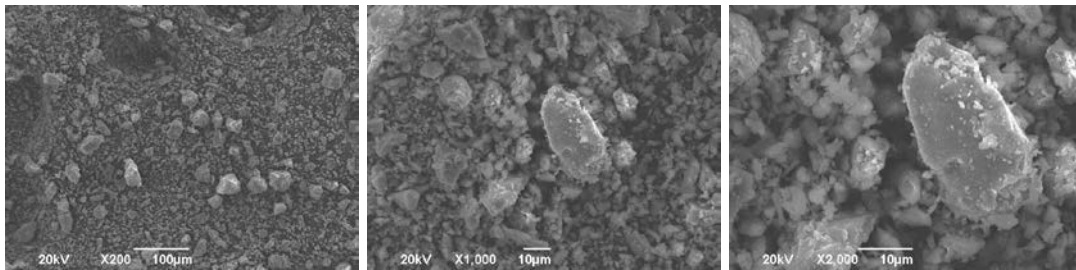


Imagen 17. Microfotografías obtenidas por MEB para el CPO 40.

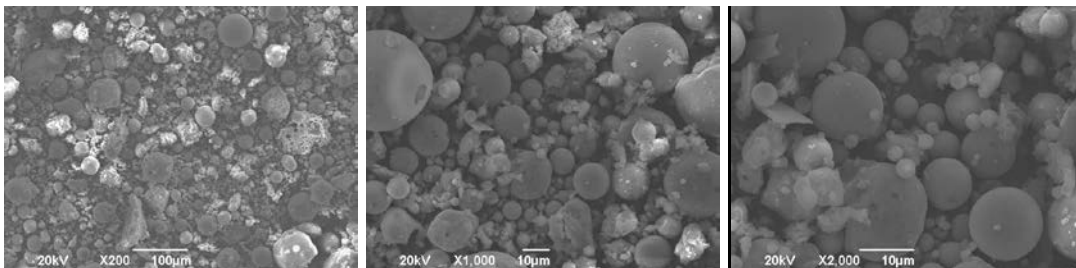


Imagen 18. Microfotografías obtenidas por MEB para la Ceniza volante

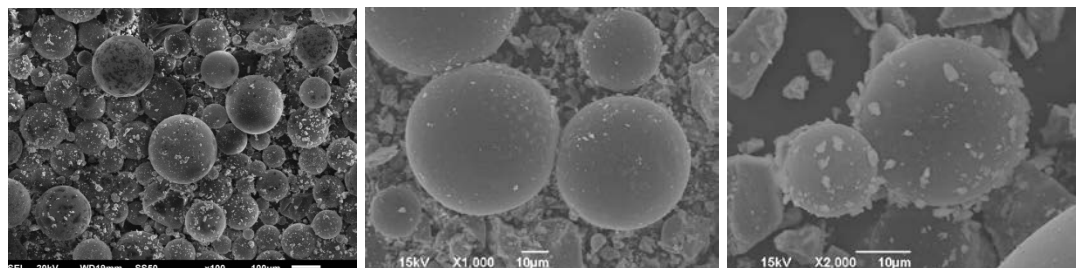


Imagen 19. Microfotografías obtenidas por MEB para el Co-polímero.

5.1.8. Espectroscopia por dispersión de energía de rayos X, EDS.

En las tablas 10, 11 y 12 se muestran la composición elemental para el cemento, la ceniza volante y el co-polímero respectivamente. Los análisis elementales de EDS mostraron que los componentes principales del cemento son silicio y calcio, mientras que para la ceniza volante se encontraron altos contenidos de silicio y aluminio. Esto resulta congruente con lo reportado en la literatura para este tipo de materiales (50). Por otro lado, el análisis sobre el co-polímero registro la presencia de elementos mayoritarios (sílice y calcio). Por ser un material polimérico llama la atención la ausencia de carbono, lo cual atribuimos a que la capacidad de detección de la técnica no es suficiente para la microestructura y para los espesores tan pequeños como el de las esferas estudiadas.

Tabla 10. Espectroscopia de dispersión de energía de rayos para el CPO40.

CPO 40						
Elemento	Peso %					
	1	2	3	4	5	6
O	53.6	46.77	45.3	29.89	35.63	13.34
Al	1	1.09	0.7	1.55	0.9	2.31
Si	9.27	13.7	10.66	6.73	12	4.11
S	1.35	0.75	---	3.85	---	1.08
Ca	34.78	37.69	42.52	54.41	50.92	69.38
Mg	---	---	0.83	0.61	0.55	---
K	---	---	---	1.89	---	---
Fe	---	---	---	1.07	---	9.77
Totales	100					

Tabla 11. Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X para la ceniza volante.

Ceniza Volante				
Elemento	Peso %			
	1	2	3	4
O	43.91	11.81	46.14	49.68
Al	23.5	0.87	3.77	19.35
Si	26.62	3.62	50.09	27.99
Fe	5.97	---	---	1.09
C	---	0.37	---	---
S	---	83.33	---	---
Na	---	---	---	0.72
K	---	---	---	1.16
Totales	100			

Tabla 12. Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X para el co-polímero

Co-polímero 950			
Elemento	Peso en %		
	1	2	3
C	17.87	9.95	---
O	42.21	39.74	46.05
Mg	0.88	0.79	0.81
Al	2.22	1.56	1.82
Si	6.02	6.54	---
S	0.45	0.54	---
K	0.25	0.29	---
Ca	30.1	40.58	43.55
Suma	100		

5.1.9. Conductividad térmica.

Los resultados de las pruebas de conductividad térmica de los materiales granulares utilizados en esta investigación se muestran en la tabla 13. Estos resultados se obtuvieron del análisis de polvos conforme a lo especificado en el anexo B para los distintos materiales utilizados.

Estos resultados evidencian el alto potencial del co-polímero al incorporarlo como agregado en sistemas base cemento portland, ya que como podemos observar en la tabla 13 la conductividad térmica del CPO 40 y de la ceniza volante son 23 y 17 veces mayores que la conductividad térmica del co-polímero, respectivamente. También se evidencia el mejor desempeño térmico de la ceniza volante con relación al CPO 40 ya que la conductividad de este último es 28% mayor a la de la ceniza.

La tabla 13 también muestra la desviación de los resultados individuales con relación al promedio. Estos resultados ilustran una mejor uniformidad en la conductividad térmica del co-polímero.

Tabla 13. Conductividad térmica de polvos.

<i>Material</i>	<i>k promedio calculada W/(m·K)</i>	<i>Desviación* W/(m·K)</i>
<i>CPO 40</i>	1.050	±0.095
<i>Ceniza volante</i>	0.816	±0.083
<i>Co-polímero</i>	0.043	±0.004

* Con relación al promedio de resultados individuales.

5.2. Evaluación de mezclas de mortero.

En esta sección, se presentan los resultados de las diversas propiedades evaluadas para las diferentes mezclas consideradas en esta investigación.

5.2.1 Proporciones de las mezclas.

En esta etapa, se establecieron las proporciones para los 15 morteros evaluados en esta investigación. Para el establecimiento de las proporciones se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se evaluaron 3 relaciones agua/cementante (a/cm); 0.6, 0.5 y 0.4.
- Se evaluaron 4 dosificaciones de co-polímero que se identificaron con las letras A, B, C y D, para diferenciar entre los cuatro diferentes porcentajes evaluados, donde $D > C > B > A$.
- Se estudiaron 4 porcentajes de ceniza volante en sustitución del cemento portland a razón de 25, 35, 45 y 55 % en peso.
- La fluidez y el contenido de aire fueron variables.

En la tabla 14 se muestra la identificación utilizada para las distintas mezclas de mortero evaluadas en esta investigación.

Tabla 14. Identificación de mezclas.

ID	a/cm	Sustitución en % de Ceniza volante	% de co-polímero	Densidad aparente (kg/m ³)
1A	0.6	0	43	615
1B			45	---
1C			47	---
1A-CV1		25	43	621
1A-CV2		35		---
1A-CV3		45		---
1A-CV4		55		---
2A-CV2	0.5	35	43	637
2B-CV2			45	---
2C-CV2			47	---
2D-CV2			50	565
3A-CV2	0.4	35	43	739
3B-CV2			45	---
3C-CV2			47	---
3D-CV2			50	672

5.2.2 Distribución granulométrica para diferentes combinaciones de los materiales granulares.

En la tecnología de polvos es ampliamente conocida la distribución granulométrica de fuller para maximizar el empaquetamiento que resulta al combinar diferentes materiales granulares. En el grafico 9 se proporcionan las distribuciones correspondientes a diferentes combinaciones de CPO+COP y CPO+COP+CV.

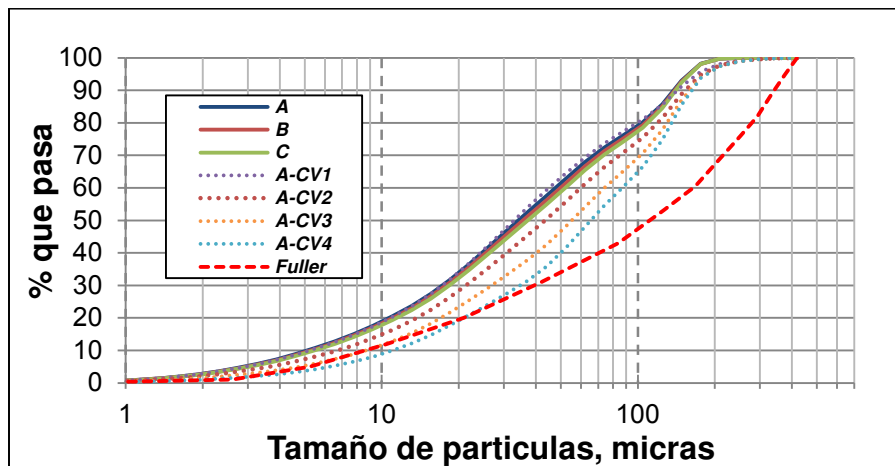


Gráfico 9. Granulometrías combinadas.

5.2.3 Propiedades en estado fresco.

Para las mezclas enlistadas en la sección 5.2.1. se presentan los resultados de las pruebas en estado fresco como fluidez, contenido de aire y expansión.

5.2.3.1. Fluidez

Para las relaciones a/cm 0.5 y 0.4 se planteó una fluidez objetivo de 132%, en la mesa de fluidez ASTM C 230 (52) la misma que para la relación a/c 0.6, sin embargo, para llegar a este valor se requirieron cantidades importantes de aditivo. Una vez integrados tanto la ceniza volante y el co-polímero el micro-mortero resulto con una consistencia altamente cohesiva, de tal manera que a pesar de las altas dosificaciones de aditivo no se logró igualar la fluidez del micro-mortero de referencia con relación a/c 0.6, por tal motivo los micro-morteros con las relaciones a/cm 0.5 y 0.4 se hicieron con una dosificación de aditivo fija de 5 y 23 g/kg de cementante respectivamente, lo cual se fijó con el cono Marsh en base a los puntos de saturación del aditivo.

Para los micro morteros con relación a/cm 0.6, en el grafico 10 se muestra el efecto de la ceniza volante en la fluidez. En este grafico observamos que en todos los casos la ceniza volante tiende a disminuir la consistencia y que la disminución es mayor con forme aumenta la cantidad de ceniza volante en sustitución. Esta disminución es atribuida al aumento del volumen del material cementante, con el cual se disminuyó la cantidad de agua por unidad de volumen de las pastas ceniza volante.

Para las relaciones a/cm 0.5 y 0.4, en los gráficos 11 y 12 se observa que al incrementar el contenido de co-polímero la consistencia tiende a disminuir. Esto se debe a que conforme se incrementa el contenido de co-polímero también se incrementa el área superficial de este material y en consecuencia se reduce el volumen de pasta.

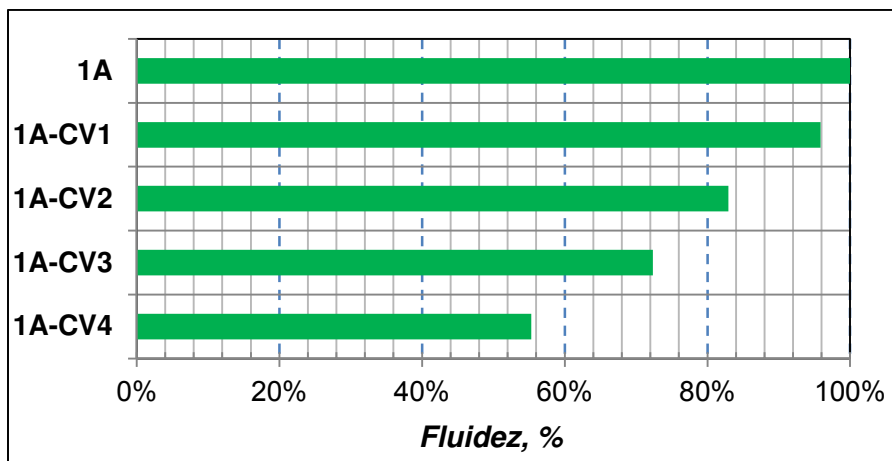


Gráfico 10. Efecto de la adición de ceniza volante en la fluidez, a/cm 0.6.

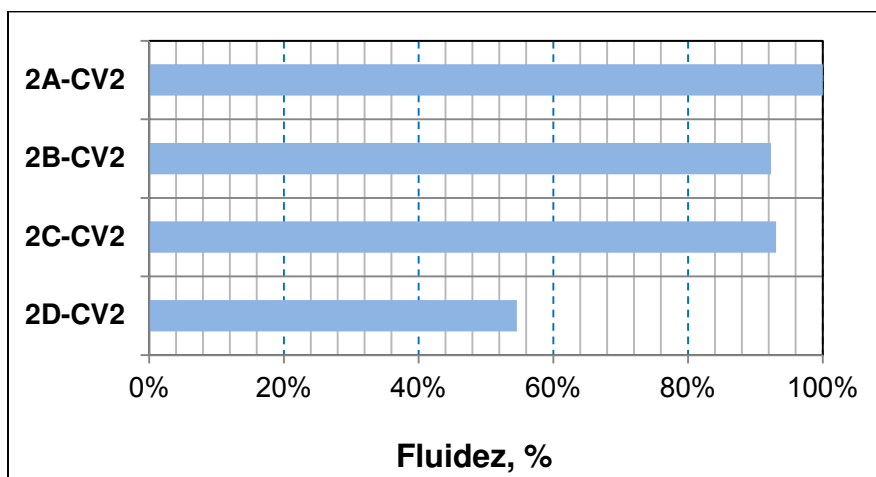


Gráfico 11. Efecto sobre la fluidez de la adición del co-polímero, a/cm 0.5.

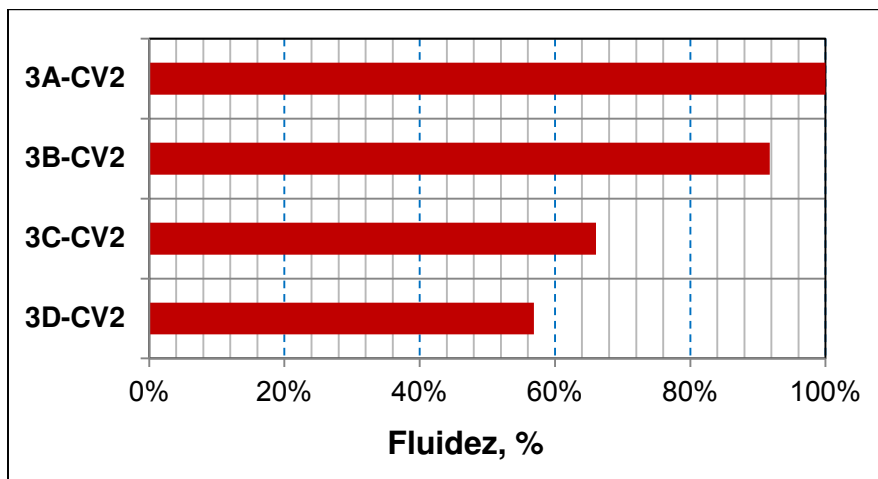


Gráfico 12. Efecto sobre la fluidez de la adición del co-polímero, a/cm 0.4.

5.2.3.2. Contenido de aire.

Para las relaciones a/cm 0.5 y 0.4 y para las diferentes dosificaciones de ceniza volante en los gráficos 13, 14 y 15 se muestra la relación entre la fluidez y el contenido de aire.

Para las tres relaciones a/cm se puede observar que el incremento en el volumen de co-polímero origina un aumento en el contenido de aire. En todas los casos el incremento en el contenido de aire vario de 7 a 11%, 8 a 13% y del 7 a 13% para las relaciones a/cm 0.6, 0.5 y 0.4 respectivamente.

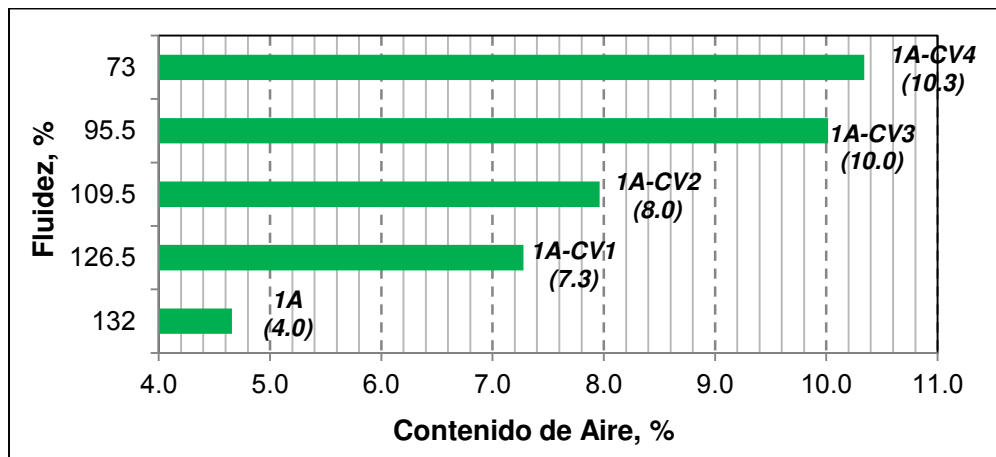


Gráfico 13. Efecto de la ceniza volante en el contenido de aire.

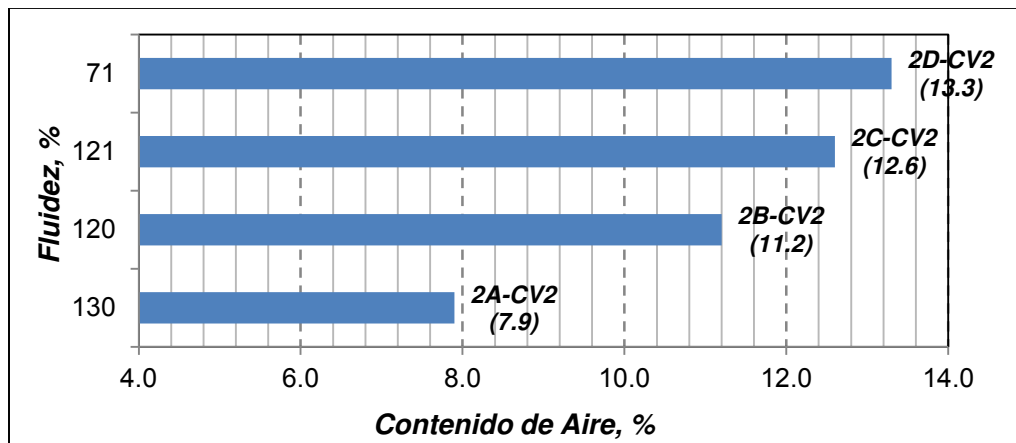


Gráfico 14. Efecto de la adición de co-polímero en el contenido de aire, a/cm 0.5

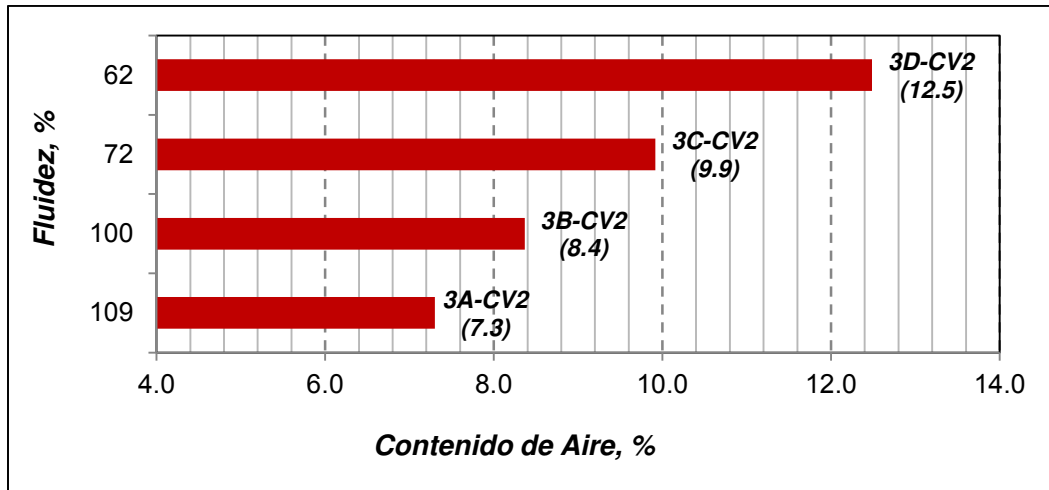


Gráfico 15. Efecto de la adición de co-polímero en el contenido de aire, a/cm 0.4

5.2.3.3. Estabilidad Volumétrica (expansión).

Durante la fabricación de los especímenes cúbicos para determinar la resistencia a la compresión, se observó una expansión importante en todas las mezclas que tenían co-polímero, la cual resulto de mayor magnitud conforme disminuía la relación a/cm (imagen 20).

Debido a esto se decidió evaluar de manera cuantitativa la expansión lineal en morteros, por medio de ASTM C 1698, iniciando las mediciones una hora después de fabricados los especímenes.

Para evaluar el efecto del co-polímero en relación a la expansión observada, como referencia para las tres diferentes relaciones a/cm se fabricaron especímenes de mortero con arena silica, en los cuales el volumen de pasta fue igual al utilizado en las mezclas con un contenido de co-polímero A y fueron identificados con la letra R.

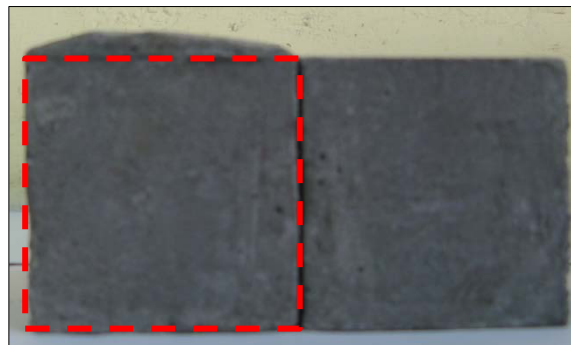


Imagen 20. Expansión de los especímenes

Debido a que el desarrollo de la expansión fue característico en todas las diferentes mezclas con co-polímero, para su evaluación se establecieron los dos segmentos que se distinguen en el gráfico 16, donde la etapa AB representa el segmento de mayor expansión, el cual ocurre durante las primeras horas después del mezclado, mientras que el segmento BC presenta una expansión gradual de menor magnitud, que en algunos casos ilustra que la expansión se ha estabilizado.

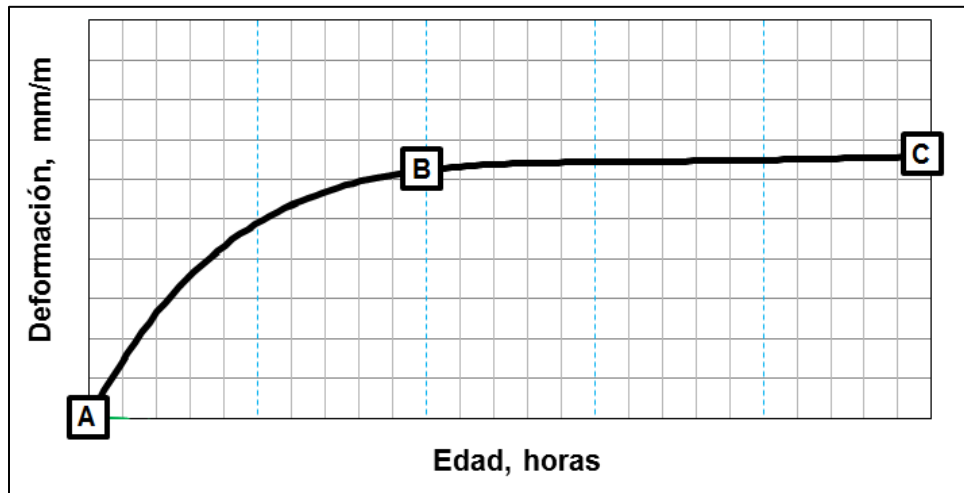


Gráfico 16. Desarrollo típico de la expansión para las mezclas con co-polímero.

Con relación a la longitud promedio inicial de las barras evaluadas (430 mm, incluyendo tapones) en el gráfico 17 se observa que para la relación a/cm de 0.6 la muestra de referencia (R1) presentó una retracción de 0.11% y que a la edad de 6 horas las mezclas con co-polímero identificadas como 1A y 1A-CV2 presentaron expansiones de 1.3 y 1.6 % respectivamente.

Para las mezclas con esta relación a/cm segmento AB se presentó durante las 2 primeras horas después del mezclado, representando una expansión de 76 y 55% para las mezclas sin ceniza y con ceniza volante (1A y 1A-CV2) con respecto al registrado a las 6 horas. En este caso se observa que en la mezcla con ceniza volante se genera mayor expansión.

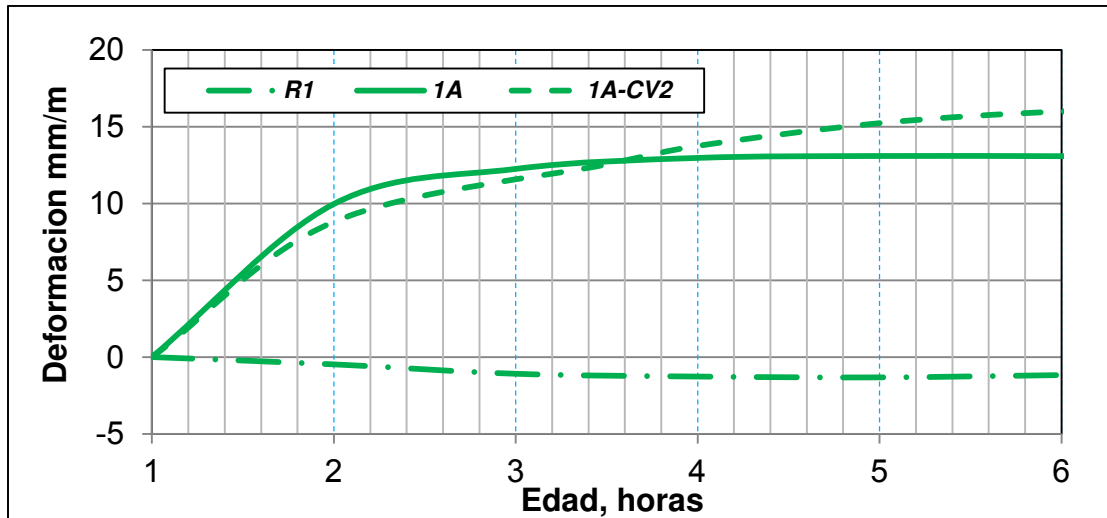


Gráfico 17. Expansión en mezclas relación a/cm 0.6.

Para la relación a/cm 0.5, el desarrollo de la expansión lineal se muestra en el gráfico 18, en este podemos observar que la mezcla de referencia R2 se contrajo un 0.08% con respecto a la longitud promedio inicial, mientras que las mezclas con co-polímero presentaron una expansión de 2.1 y 2.7% para los contenidos de co-polímero A y D respectivamente a la edad de 6 horas.

Para esta relación a/cm, el segmento AB se presentó durante las primeras 4 horas después del mezclado, representando el 94 y 98% para los contenidos de co-polímero A y D respectivamente, con respecto al total registrado a las 6 horas. En este caso, la mezcla con mayor contenido de co-polímero fue la que presentó la mayor expansión.

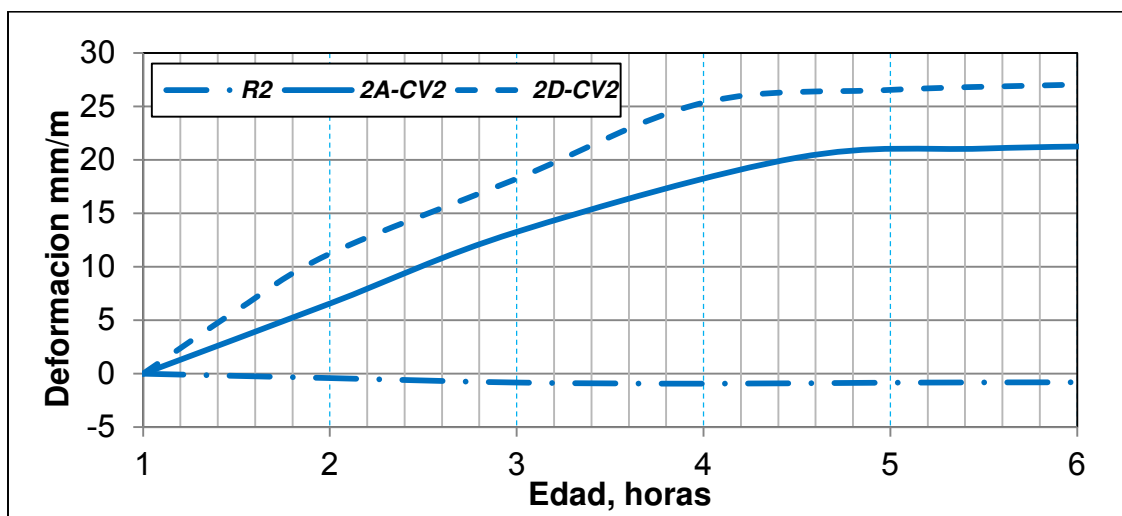


Gráfico 18. Expansión de mezclas relación a/cm 0.5.

Para la relación a/cm 0.4 el desarrollo de expansión lineal se muestran en el gráfico 19, en este se observa que para la mezcla de referencia R3 se presentó una retracción del 0.1% con respecto a la longitud promedio inicial, por otro lado la expansión de las mezclas con co-polímero fue de 3.3 y 4.6% para el contenido de co-polímero A y D respectivamente a la edad de 7 horas.

En el segmento AB se presentó durante las primeras 5 horas después del mezclado representando un 86 y 89% para los contenidos A y D respectivamente, con respecto al total que se registró a las 7 horas.

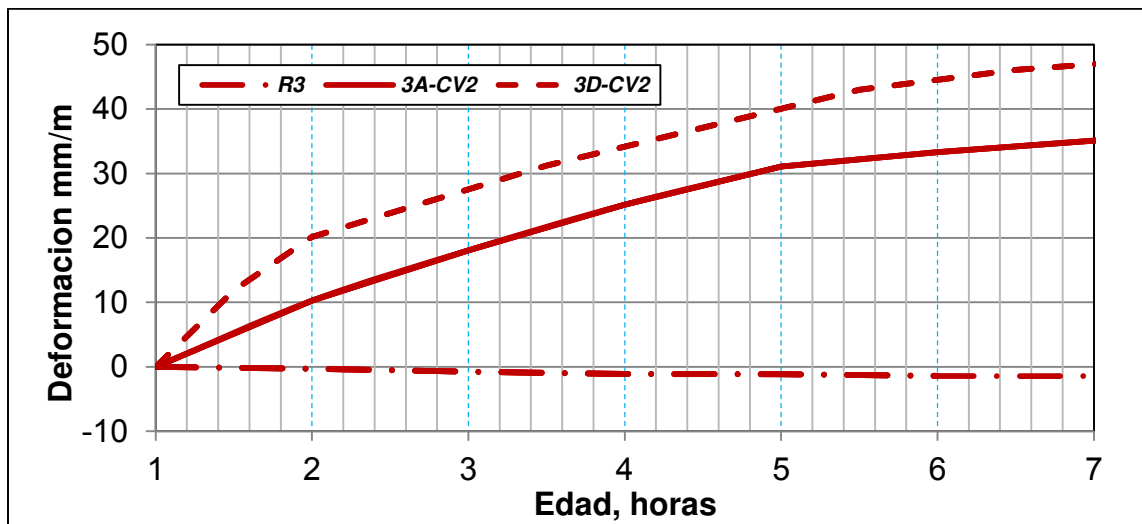


Gráfico 19. Expansión de mezclas relación a/cm 0.4.

En el gráfico 20 podemos observar que la pendiente de la línea de tendencia indica el incremento en expansión que se pudiese esperar conforme disminuye la relación a/cm, de acuerdo a las pendientes obtenidas de las líneas de tendencia para los contenidos de co-polímero A y D el incremento de la expansión es del 0.95% de expansión por cada 0.1 de reducción en la relación a/cm y 2.0% por cada 0.1 de reducción en la relación a/cm, respectivamente.

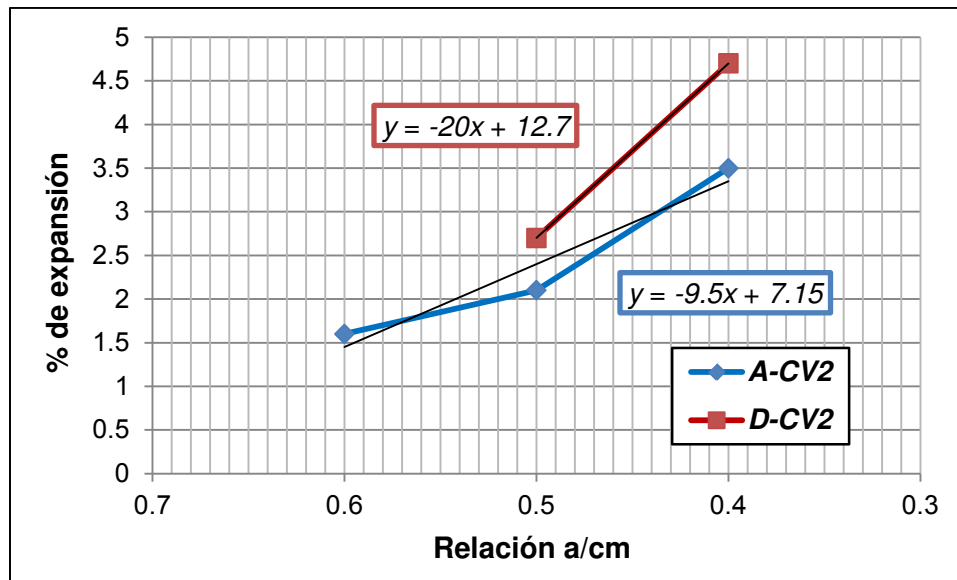


Gráfico 20. Expansión de mezclas de mortero para las diferentes relaciones a/cm.

Las expansiones son atribuibles a los altos contenidos de Al_2O_3 y MgO encontrados en el co-polímero, que podrían incitar la formación de productos expansivos hidratados como $Mg(OH)_2$ e incluso formación de etringita.

5.2.3.4. Tiempos de fraguado

En el gráfico 21 se presentan los resultados de los tiempos de fraguado que fueron determinados mediante el aparato de Vicat, siguiendo el procedimiento en ASTM C807-08 y teniendo como desviación la consistencia de las mezclas utilizadas en relación a la requerida por este método. En este procedimiento se utilizaron las proporciones indicadas en la tabla 15 con las consistencias que se reportan en el apartado 5.2.3.1.

En este gráfico podemos observar que los tiempos de fraguado tienden a ser mayores conforme se reduce la relación agua cementante. Por otro lado, se observa que el incremento en la dosificación del aditivo súper fluidificante magnifica la expansión e incrementa el retardo en los tiempos de fraguado, el cual comúnmente sin el uso de aditivo disminuiría al reducir la relación a/c(m). Los resultados de las mezclas con relación a/c 0.6 ilustran que la ceniza volante origina un retardo en los tiempos de fraguado y que este retardo permite el incremento de la expansión. Por otro lado, los resultados para las relaciones a/cm 0.5 y 0.4 con contenidos de co-polímero de 43 y 50% ilustran que la expansión tendera a ser mayor conforme se incrementa el contenido de co-polímero, esto se atribuye a que en las mezclas con mayor contenido de co-polímero poseen una cantidad de cristales germinados menor en relación a las mezclas que poseen mayor volumen de pasta.

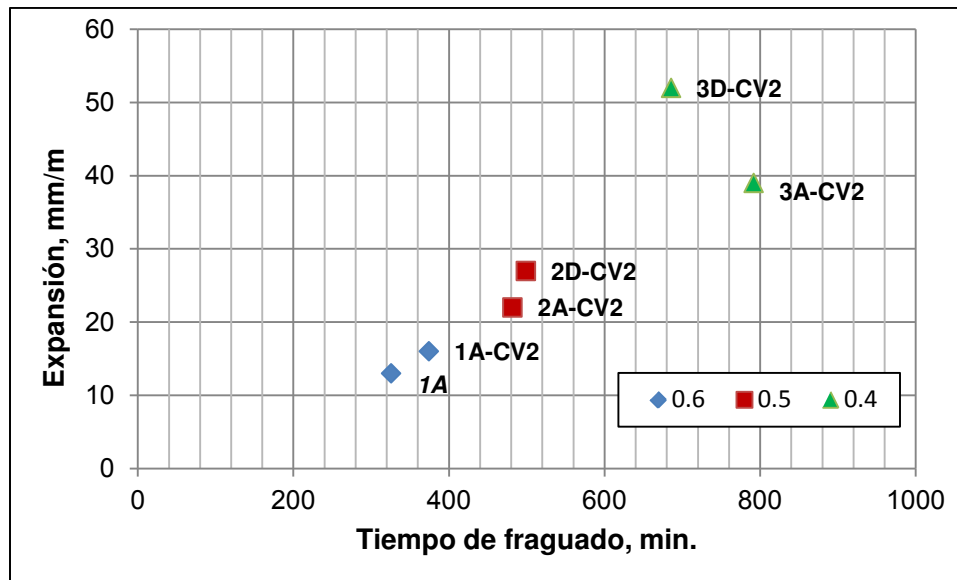


Gráfico 21. Tiempos de fraguado de mezclas con co-polímero.

5.2.3.5. Calorimetría

Un análisis de calorimetría fue obtenido con el fin de obtener la velocidad de reacción de los morteros con co-polímero, esta prueba se realizó para una mezcla de referencia sin co-polímero y otra con un 43% de este material.

Los resultados se muestran en los gráficos 22 y 23, en los cuales se puede observar que el co-polímero acelera un poco la reacción del cemento, liberando una cantidad de energía (calor) en el proceso de hidratación mayor que al de la referencia.

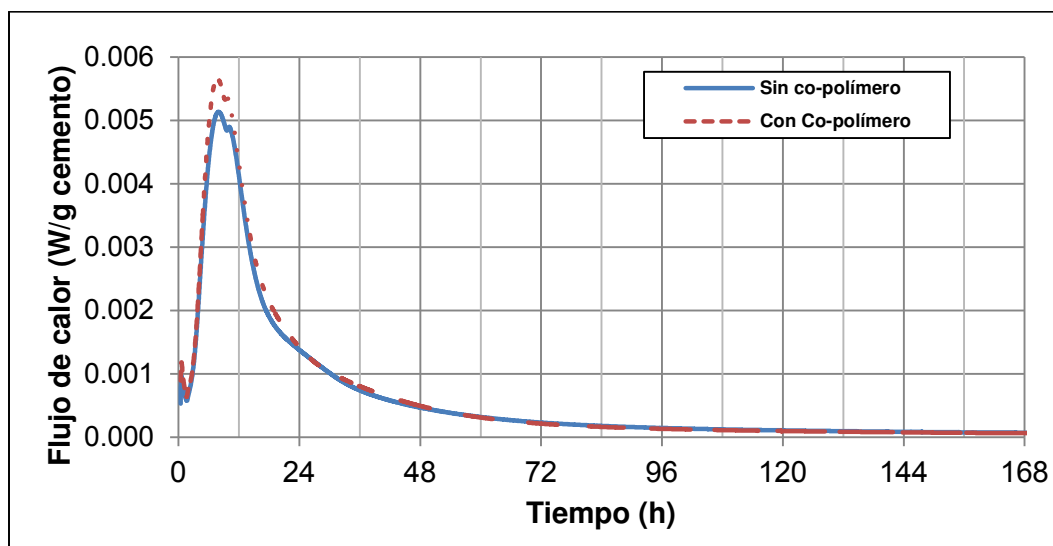


Gráfico 22. Flujo de calor en el proceso de hidratación.

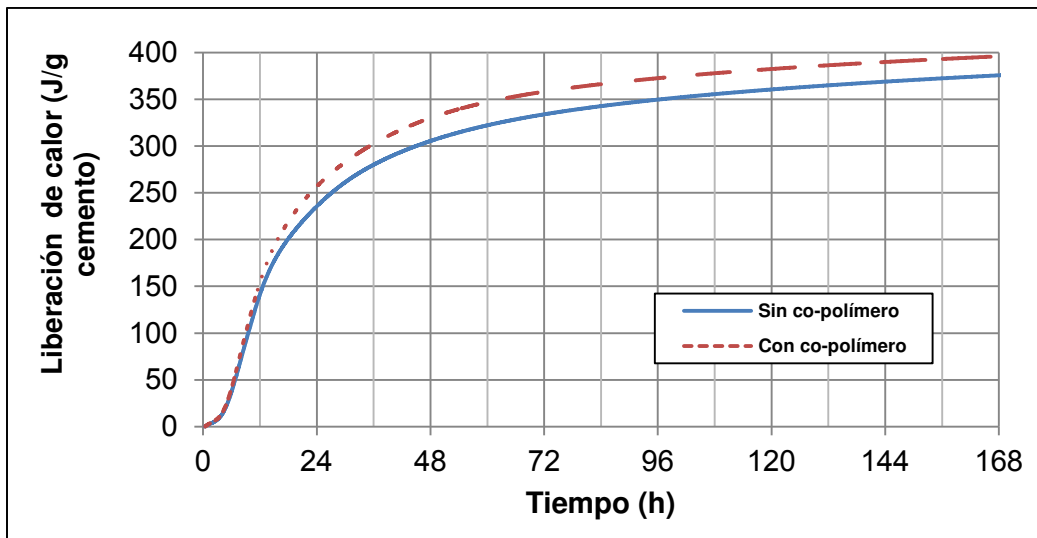


Gráfico 23. Calor liberado en el proceso de hidratación.

5.2.4 Resistencia a la compresión.

Para los diferentes morteros la resistencia a la compresión para especímenes moldeados de dos diferentes maneras, sin confinamiento o sin restricción de la expansión y con confinamiento o restricción de la expansión, siendo el objetivo del confinamiento el evaluar el incremento en la resistencia atribuible a la expansión del compuesto.

5.2.4.1. Resistencia de especímenes sin confinamiento.

En el gráfico 24 se muestran los resultados de resistencia a la compresión para las mezclas con relación a/c 0.6 correspondientes a la primera optimización de co-polímero (ver sección 4.2).

Como resultado de esta etapa, para una relación a/c de 0.6 se decidió utilizar el co-polímero A ya que fue el que arrojó mayor resistencia a la compresión, ofreciendo al mismo tiempo la posibilidad de permitir mayores substituciones de ceniza volante por cemento.

La resistencia a la compresión se fijó en 35 kgf/cm^2 en base a la NMX-C-441 ONNCCE-2005. Este requerimiento es para piezas de mampostería, sin embargo por la facilidad de manejo y ensaye se optó por realizar la optimización por medio de cubos, por tal motivo, para transferir los resultados a piezas de mampostería será necesario otra etapa para estudiar su comportamiento con distintas geometrías y dimensiones propias de estos elementos.

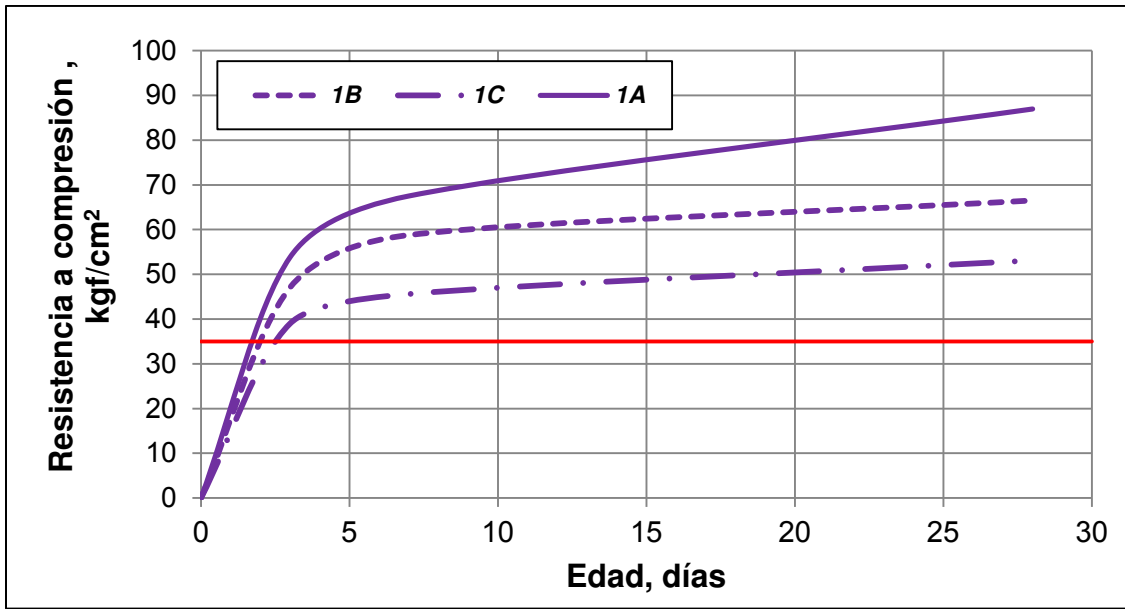


Gráfico 24. Resistencia a la compresión de compuestos con relación a/c 0.6.

Para la relación a/cm 0.6 la resistencia a la compresión de morteros con diferentes contenidos de ceniza volante se presenta en el gráfico 25, en este se observa que los morteros con porcentajes de ceniza volante en sustitución entre el 25 al 45 % (1A-CV1 a 1A-CV3) satisfacen el requerimiento de resistencia a la compresión para su aplicación como bloque de mampostería no estructural según NMX-C-441-ONNCCE-2005, sin embargo solo las mezclas con 25 y 35 % de ceniza volante (1A-CV1 y 1A-CV2) cumplen con esa resistencia a edades tempranas (≤ 2 días).

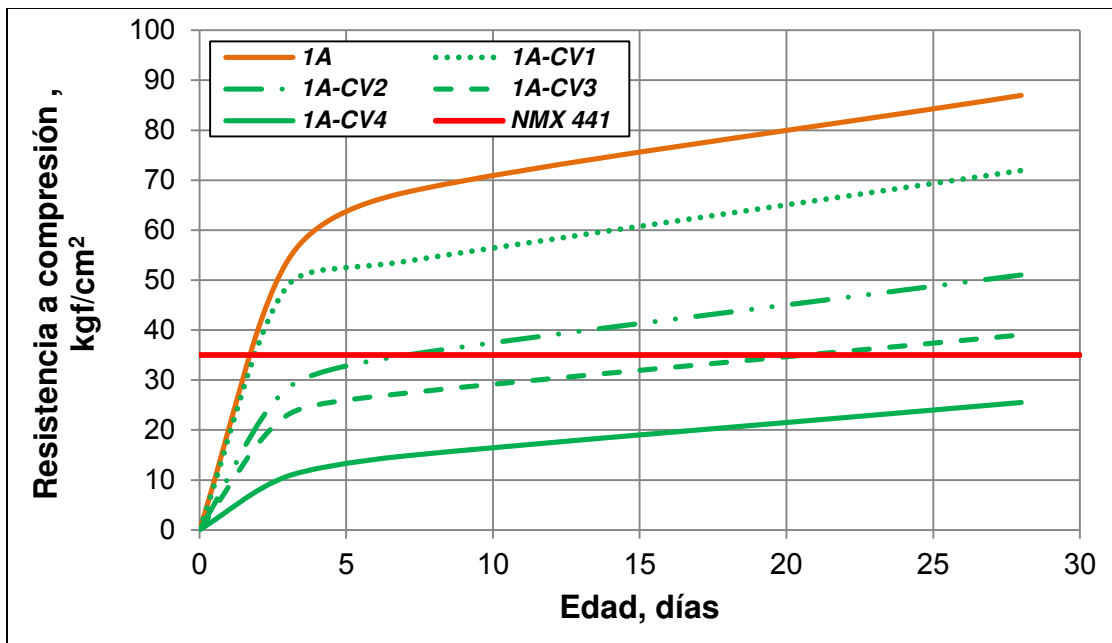


Gráfico 25. Resistencia a la compresión de compuestos con ceniza volante.

Para los morteros con ceniza volante y relaciones a/cm 0.5 y 0.4, en los gráficos 25 y 26 se muestran los respectivos desarrollos de resistencia a compresión.

En el gráfico 26 se observa que las mezclas que satisfacen el requerimiento de resistencia a la compresión objetivo a edades tempranas son la 2A-CV2 y la 2B-CV2 para edades mayores a los 6 días.

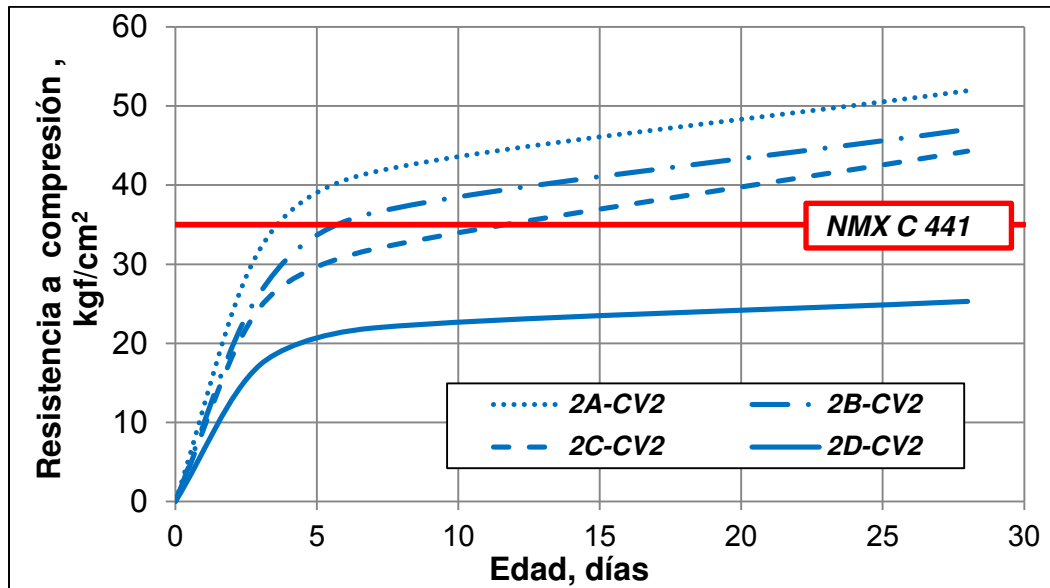


Gráfico 26. Resistencia a la compresión de morteros con relación a/cm 0.5.

Mientras que todas las mezclas con relación a/cm 0.4 (gráfico 23) cumplieron con la resistencia a la compresión mínima requerida por NMX-C-441-ONNCCE-2005 ($\geq 35 \text{ kgf/cm}^2$) a partir de los 2 días de edad, la identificada como 3D-CV2 cumple con este requisito hasta la edad de 20 días, esta mezcla es la que posee un mayor contenido de co-polímero por consiguiente un mayor potencial como material aislante.

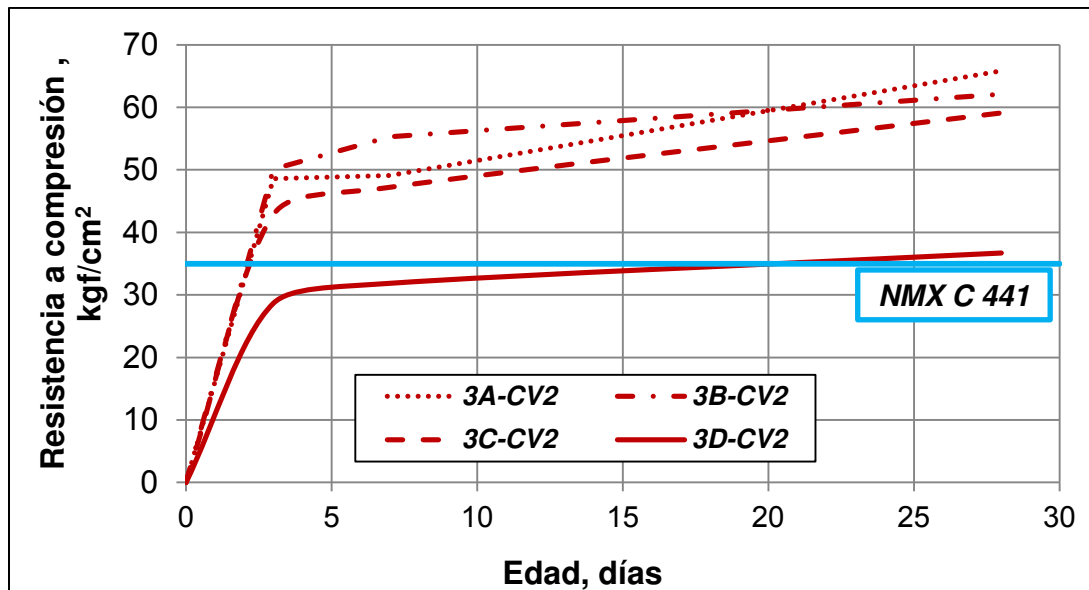


Gráfico 27. Resistencia a la compresión de morteros con relación a/cm 0.4 para diferentes porcentajes de co-polímero

5.2.4.2. Resistencia a compresión de especímenes confinados.

Adicionalmente a la estabilidad dimensional de los especímenes, en esta sección se evaluó la contribución de la expansión restringida por el confinamiento en la resistencia a la compresión a una edad de 7 días.

En el gráfico 28 se presentan los resultados para tres mezclas con diferentes relaciones a/cm (0.6, 0.5 y 0.4). Con relación a los resultados obtenidos para las mismas mezclas en cubos sin confinamiento, los resultados ilustran que la expansión restringida origina incrementos en la resistencia a la compresión de 15% y 8% para las relaciones a/cm de 0.4 y 0.6 respectivamente y que la pendiente de la línea de tendencia es de 13 kg f/cm² por cada 0.1 de variación en la relación a/cm y con un coeficiente de correlación de 0.9 (R²).

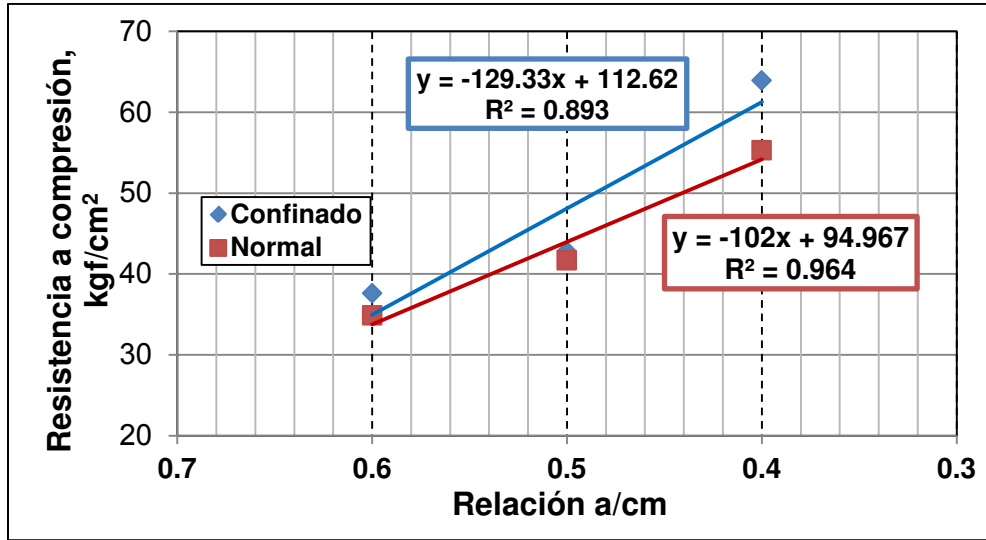


Gráfico 28. Efecto del confinamiento en morteros con diferentes a/cm.

En el gráfico 29 se muestran los resultados de resistencia a la compresión para mezclas con relación a/cm de 0.4 y cuatro diferentes contenidos de co-polímero. Los resultados ilustran que la resistencia a la compresión disminuye conforme aumenta el contenido de co-polímero ya que las líneas de tendencia arrojaron que por cada 1% de disminución en el contenido de co-polímero, se disminuye 3.22 kgf/cm² y 4.27 kgf/cm² para las mezclas sin y con confinamiento respectivamente. Además en este gráfico se puede observar que el confinamiento condujo a incrementos significativos en la resistencia a la compresión.

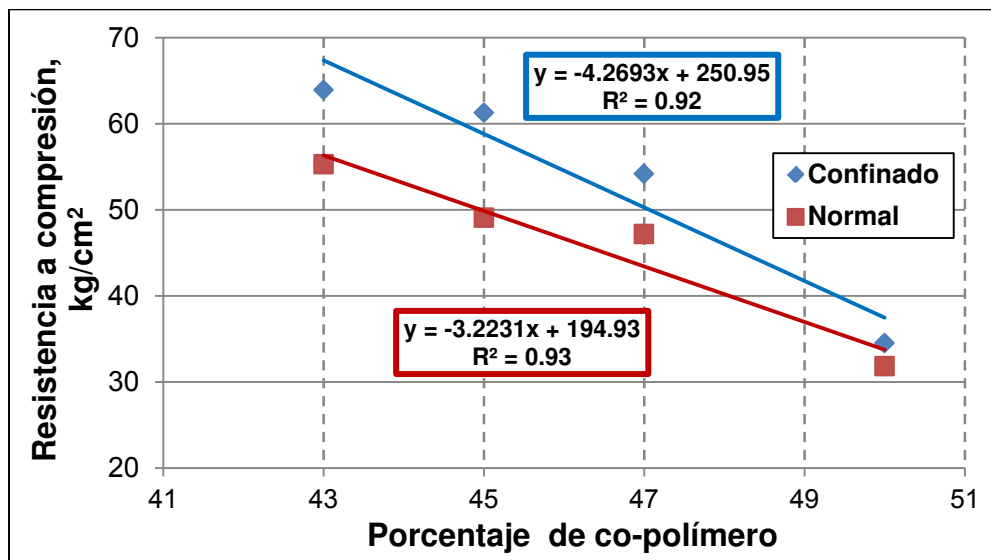


Gráfico 29. Efecto del confinamiento en morteros con diferentes porcentajes de co-polímero.

5.2.4.3. Efecto del curado sobre la resistencia a la compresión.

El curado es una etapa clave para el desarrollo de resistencia a la compresión, por ello, en este trabajo se evaluaron diferentes condiciones de curado representativas de procesos de fácil implementación en la práctica.

Para la mezcla 2B-CV2, en el gráfico 30 se muestra la resistencia a la compresión de los especímenes sometidos a las diferentes condiciones de curado (ver sección 4.7). Para cada una de las edades indicadas, se presenta el comparativo en porcentaje con relación a las resistencias obtenidas en especímenes curados de forma estándar.

En este gráfico se observa que aquellos especímenes que se mantuvieron sin humedad bajo condiciones de laboratorio, poseen una resistencia a la compresión 23% mayor en promedio con relación a aquellos que fueron curados bajo condiciones estándar.

En general, la mayor resistencia obtenida para aquellos especímenes sin curado se atribuye a la auto-deseccación que se presenta en el interior de los poros, lo que conduce a una disminución del diámetro de los mismos (51,52). En el caso de los especímenes saturados que se someten a compresión, estos arrojan resistencias inferiores debido a que el agua en los poros genera presiones internas al momento del ensaye que sumadas a las cargas de prueba contribuyen a debilitar la estructura del material (53).

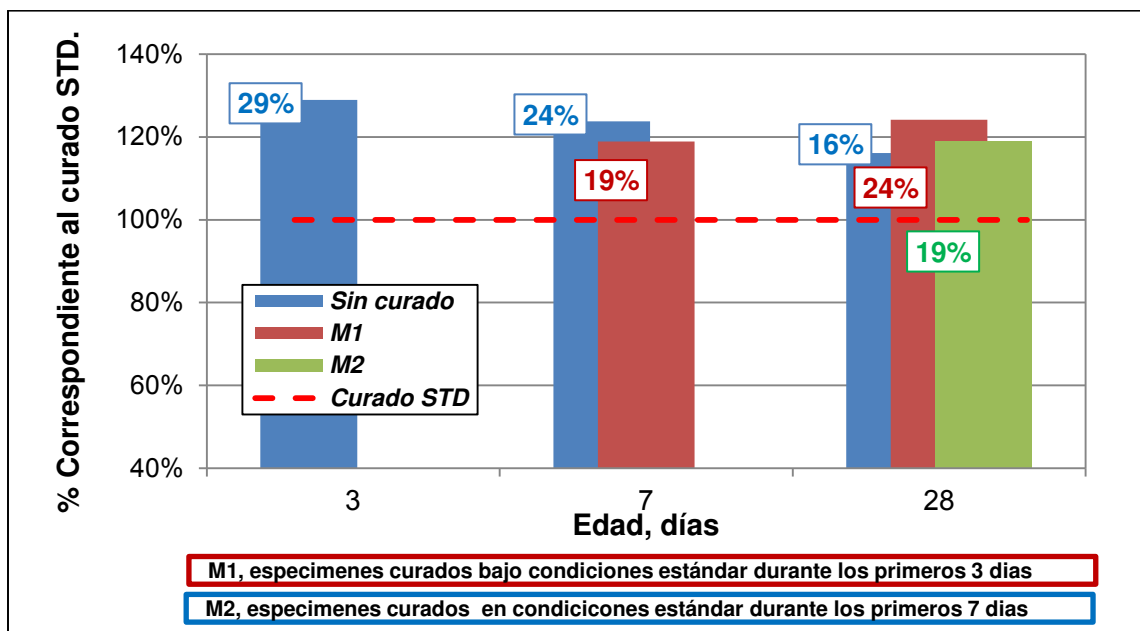


Gráfico 30. Resistencia a la compresión de especímenes sometidos a diferentes tipos de curado.

5.2.5. Microscopia óptica.

En las imágenes 21 y 22 se muestran microfotografías de la mezcla 1A-CV2, en esta imagen se puede observar que a pesar que la partícula de co-polímero posee una estructura frágil ya que prácticamente es una esfera hueca, la morfología de la partícula no se deteriora por la abrasión a la que se somete durante el proceso de mezclado.

Por otro lado en la imagen 23 la distribución de poros de un material comercial base cemento portland, este material se caracteriza por poseer una conductividad más eficiente entre los materiales base cemento portland. Se observa que los poros son de mayor tamaño que los del mortero en la imagen 21, lo cual conducirá a una mayor capacidad de retención de agua, y por consiguiente a un incremento en su conductividad térmica.

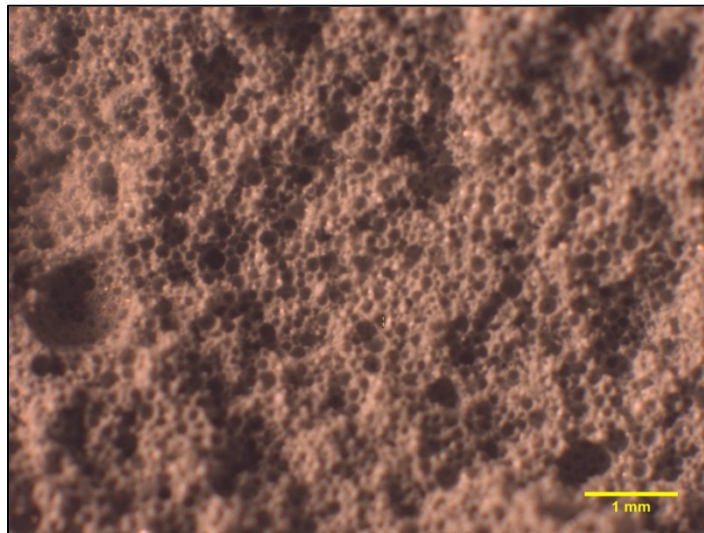


Imagen 21. Mezcla de mortero con co-polímero y ceniza volante, 1A-CV2.

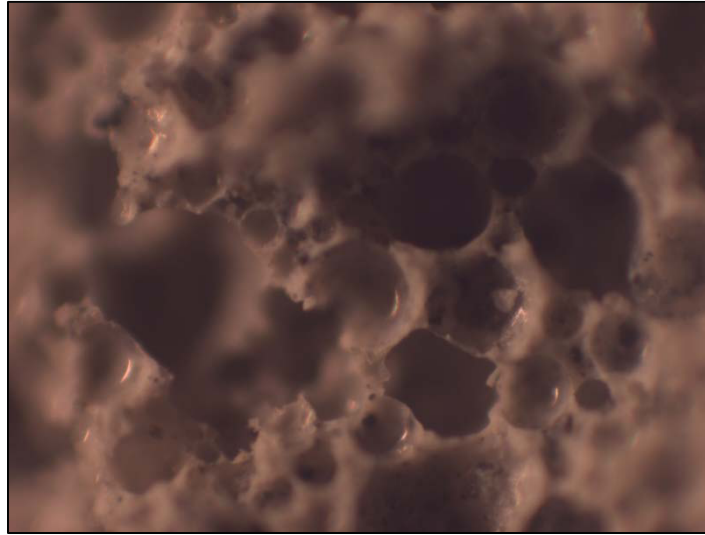


Imagen 22. Mezcla de mortero con co-polímero y ceniza volante, 1A-CV2.

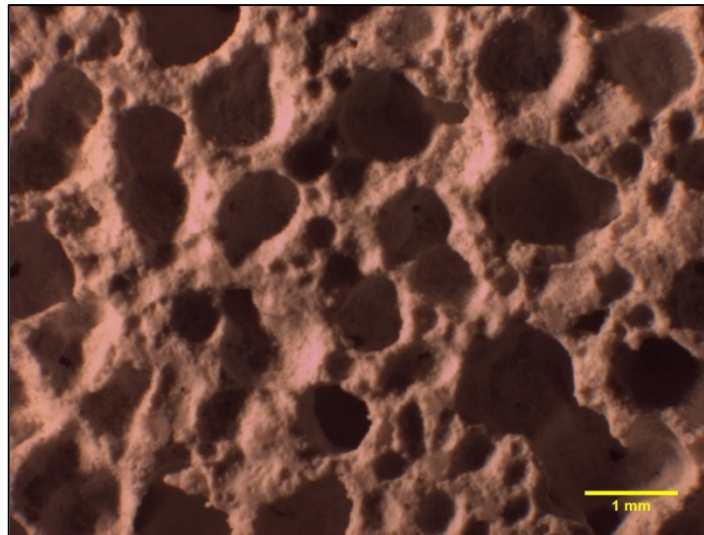


Imagen 23. Mortero aislante comercial, H.

5.2.6. Propiedades térmicas

Para los diferentes morteros evaluados, en esta sección se muestran los resultados obtenidos del análisis de las propiedades térmicas (calor específico, difusividad térmica y conductividad térmica).

Con el fin de realizar una comparación de las propiedades térmicas con materiales comerciales considerados como aislantes base cemento portland, se decidió evaluar el considerado de mayor eficiencia en la región el cual se denominó H.

5.2.6.1. Calor específico.

El calor específico es una propiedad intrínseca del material, que nos dice cuál es la cantidad de energía requerida para cambiar en 1°C la temperatura de un gramo de material. Esta propiedad se obtuvo para aquellos morteros que cumplieran con los requisitos mínimos de resistencia a la compresión según NMX-C-441-ONNCCE-2005 a edades tempranas. Estos valores fueron utilizados para el cálculo de la difusividad térmica que aparece en la sección 5.2.6.2.

Tabla 15. Calor específico.

<i>Calor específico (J/g K)</i>						
1A	1A-CV2	2A-CV2	2B-CV2	3A-CV2	3D-CV2	H
1.434	1.41	1.427	1.358	1.284	1.232	0.892

Como se observa en la tabla 15, la cantidad de energía promedio necesaria para cambiar la temperatura de los morteros que se desarrollaron es 34% mayor con relación a la muestra de referencia H.

Esto es un indicador de los morteros producidos con co-polímero ya que estos materiales requerirán de mayor energía para registrar un cambio en su temperatura a los niveles del material H.

5.2.6.2. Difusividad térmica.

La difusividad térmica es útil en estudios relacionados con la tasa de calentamiento del material, ya que involucra parámetros relacionados con la transferencia de calor en estado no estacionario como tiempo transcurrido de exposición, densidad y calor específico del mismo.

En el gráfico 31 se muestra la difusividad térmica calculada para los distintos compuestos estudiados usando la conductividad térmica en estado seco, en este se observa que la tasa de calentamiento promedio de los compuestos desarrollados es 30% menor que el de la referencia H, esto quiere decir que los morteros producidos con co-polímero requerirán más tiempo para calentarse al mismo nivel que el material H.

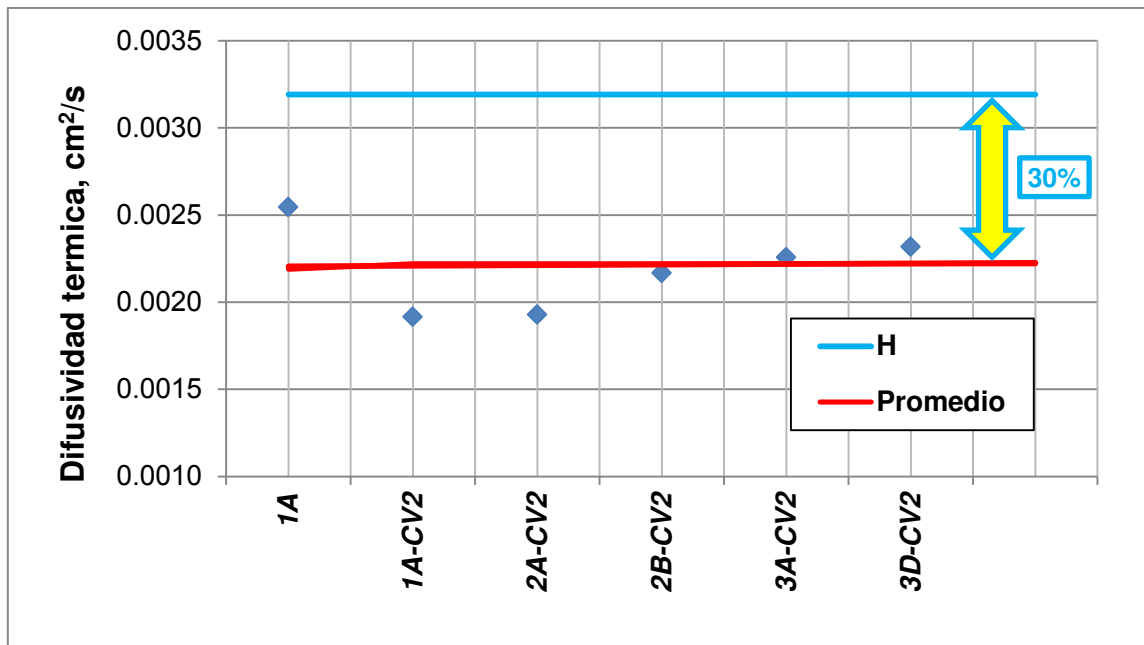


Gráfico 31. Difusividad térmica de diferentes compuestos.

5.2.6.3. Conductividad térmica.

La conductividad térmica es un parámetro confiable que permite determinar la capacidad aislante de un material, esta propiedad es intrínseca del material y se relaciona con su micro y macro estructura.

En esta sección, se muestran los resultados de conductividad térmica obtenidos del análisis de los diferentes morteros desarrollados, las pruebas de conductividad térmica se realizaron en dos laboratorios, en el primero (LAB1) se realizaron pruebas sobre morteros seleccionados en base a su resistencia a la compresión. Una segunda evaluación (LAB2) de la conductividad térmica se llevó a cabo para las mezclas con relación a/cm 0.6, 0.5 y 0.4.

5.2.6.3.1. Conductividad térmica LAB1.

En el gráfico 32 se muestran los resultados de conductividad térmica para los diferentes morteros seleccionados en base a su resistencia a compresión, estos fueron evaluados bajo dos condiciones de humedad, seco al horno a 100°C por 24 h (Seco) y saturado en agua destilada por 24 h (SSS).

En este grafico se observa que al aumentar la humedad del espécimen la conductividad térmica se incrementa, esto se debe a que el agua dentro de los

poros tiene una conductividad térmica 31 veces mayor a la del aire (17), de esta manera entre mayor sea la cantidad de poros interconectados presentara un incremento en la conductividad de mayor consideración.

Para las dos diferentes condiciones de humedad en el gráfico 33 se comparan los morteros desarrollados con mortero comercial aislante H. Para los morteros desarrollados se presentan las líneas del porcentaje promedio con relación al promedio obtenido para el concreto celular. Esta comparación ilustra que los morteros evaluados en condición seca presentaron en promedio una conductividad térmica 33% mayor a la del concreto celular H y que cuando estos están en condición SSS registraron una conductividad térmica 23% menor a la del concreto celular H.

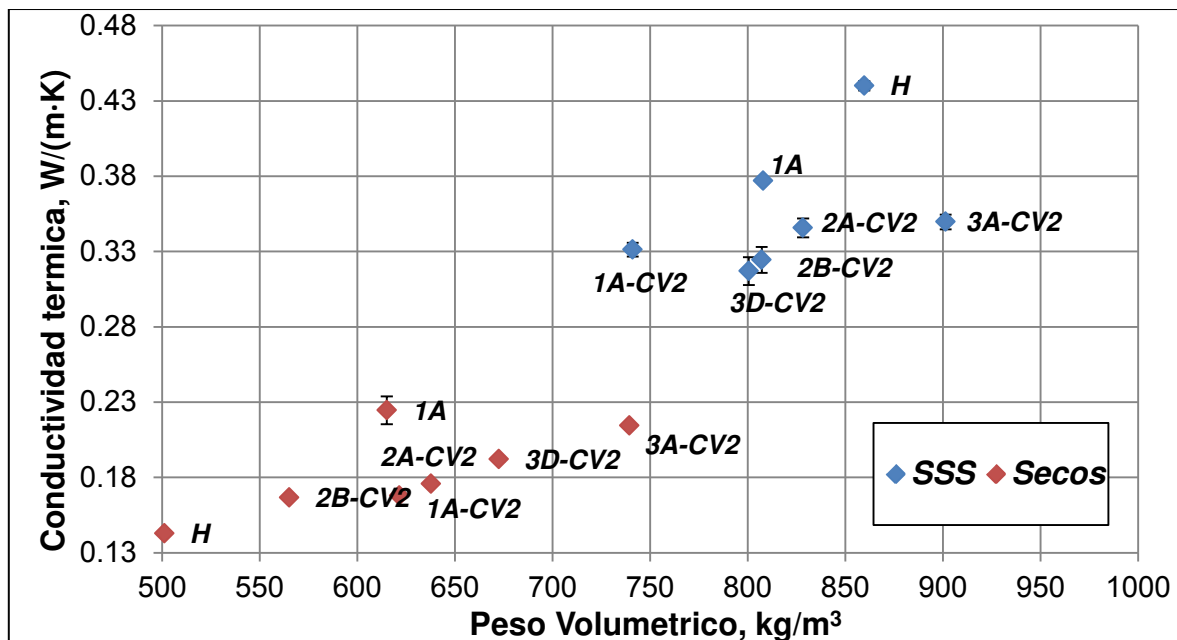


Gráfico 32. Conductividad térmica en estado saturado y seco.

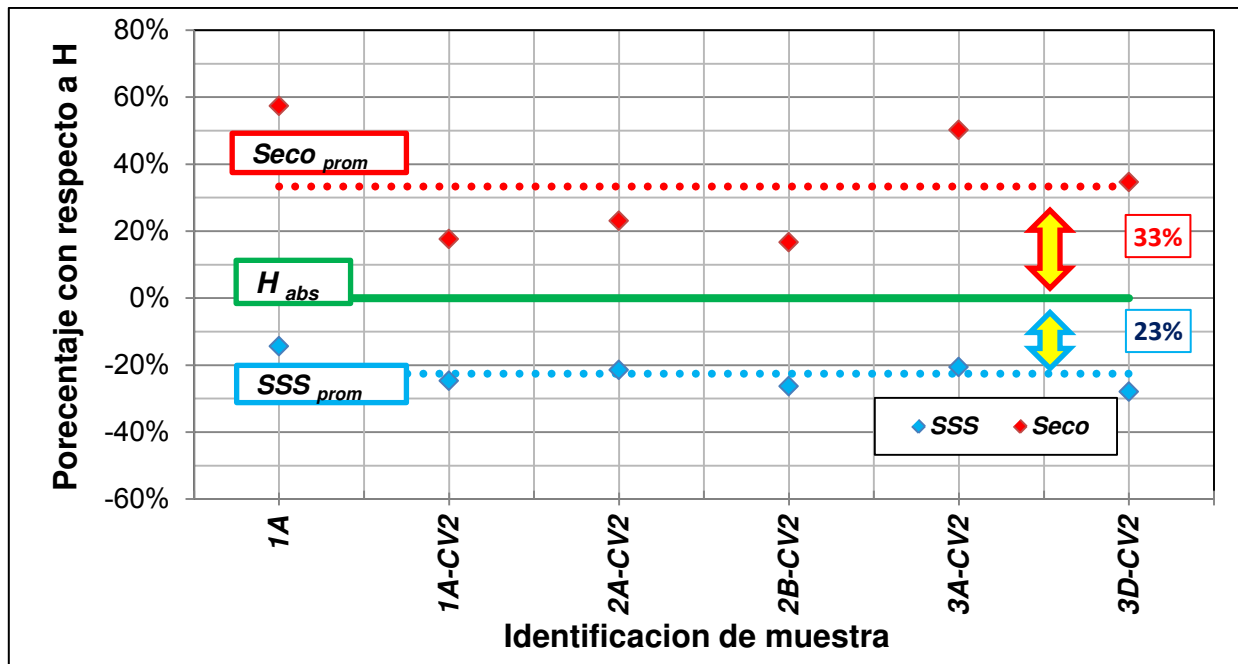


Gráfico 33. Comparativa de la conductividad térmica entre compuesto comercial aislante y morteros desarrollados.

En el gráfico 34, se presentan los resultados de conductividad térmica para diferentes materiales base cemento portland (54), que fueron sometidos a las mismas condiciones de prueba que los morteros desarrollados en la presente investigación. En congruencia con la bibliografía consultada, para nuestros resultados, también la relación entre el peso volumétrico y la conductividad térmica tiende a ser lineal (23-26). Entre mayor sea el volumen de aire en un material menor será su peso volumétrico y su conductividad térmica, ya que la energía en forma de calor viaja más rápido en un sólido que en los vacíos del material donde el aire está presente.

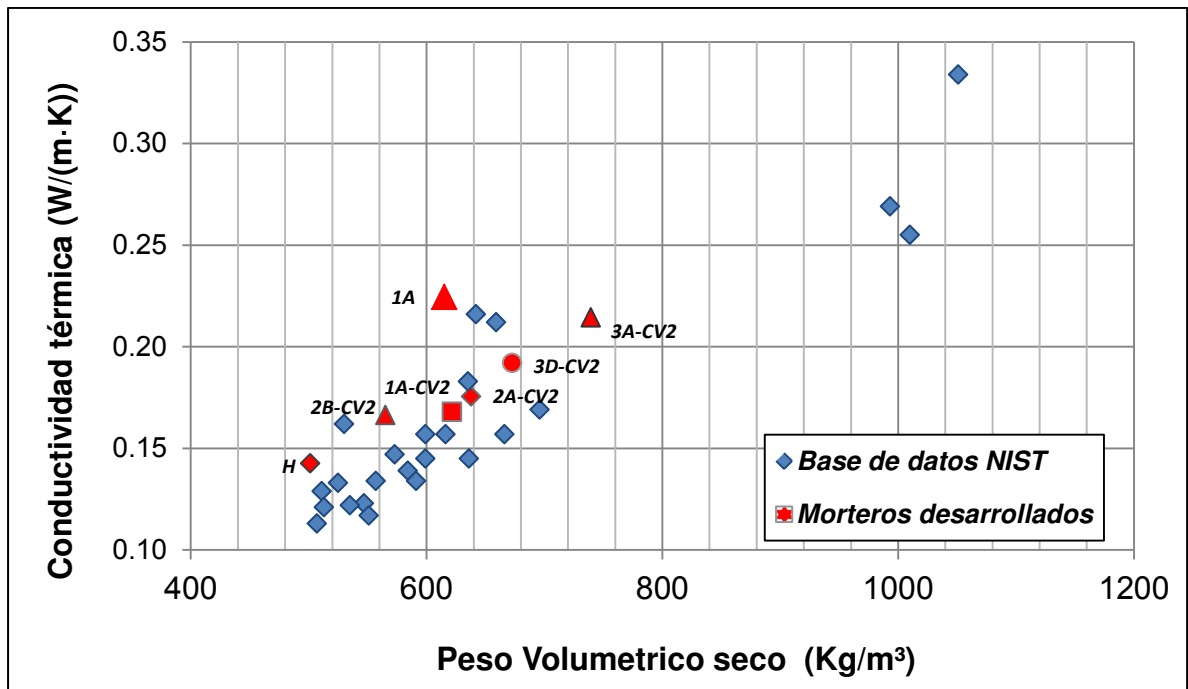


Gráfico 34. Comparativa de la conductividad térmica de diferentes materiales aislantes base cemento portland.

5.2.6.3.2. Conductividad térmica LAB2.

El efecto de la reducción de la conductividad térmica por la adición de ceniza volante a mezclas base cemento portland ya ha sido ampliamente reportada en trabajos previos (29,51), en estas investigaciones se reporta que la adición de la ceniza volante condujo a la disminución de la conductividad térmica hasta en un 15%. Para una relación a/cm 0.6 en el gráfico 35 se ilustra el desempeño térmico de mezclas con diferentes contenidos de ceniza volante. En este gráfico se observa que las mezclas con ceniza volante presentan una reducción en la conductividad térmica promedio del 31%.

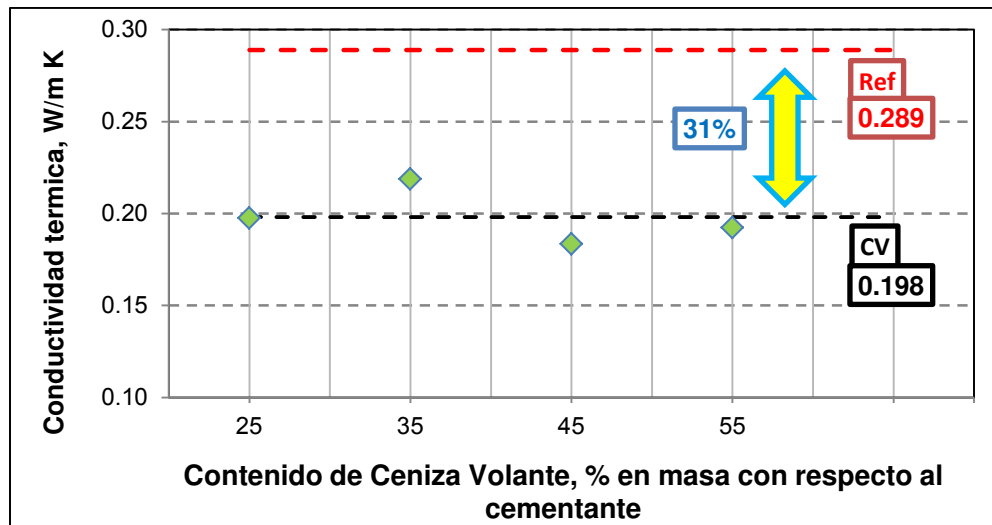


Gráfico 35. Efecto de la adición de Ceniza Volante en la conductividad térmica.

Para las relaciones a/cm 0.4 y 0.5 para los diferentes contenidos de co-polímero, en el gráfico 36 se muestra la comparación entre los valores de la conductividad térmica calculada con las ecuaciones de Hashin-Shtrikman (k_{H-S}) contra la conductividad obtenida de manera experimental (k_e).

Para las 4 dosificaciones de co-polímero con relación a/cm 0.4, la k_e estuvo dentro del rango 0.19 y 0.26 W/(m·K), y para los morteros con relación a/cm 0.5 la k_e resultó en valores entre 0.15 y 0.19 W/(m·K). En ambos casos se observa claramente que conforme aumenta la dosificación de co-polímero la k_e disminuye. El mejor desempeño a favor de los morteros con relación a/cm 0.5 se atribuye a los diferentes niveles de densificación de la matriz cementante, los morteros con relación a/cm 0.4 tienen una matriz más densa que facilita la conducción de calor.

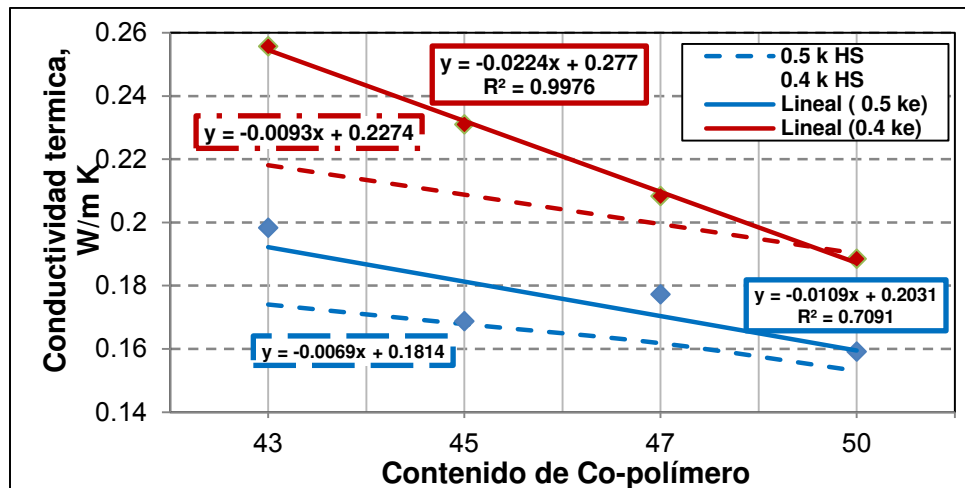


Gráfico 36. Efecto de la adición de co-polímero en la conductividad térmica.

Cabe mencionar que existe una pequeña contribución de parte del aire atrapado en las mezclas en la reducción de la conductividad de la conductividad térmica.

5.2.7 Resistencia térmica.

Como se mencionó en secciones anteriores, en la industria de la construcción la resistencia térmica (R) es el parámetro más utilizado para referirse a la capacidad aislante de un material. Según la normativa mexicana NMX-C-460-ONNCCE-2009 que establece los requisitos de R para toda la república Mexicana, esta norma ubica a Nuevo León dentro de la zona térmica 2 cuyos valores de R deben ser como mínimo 1.00 m² K/W, para la habitabilidad 1.10 m² K/W y para el ahorro de energía 1.40 m² K/W. En el tabla 16 se presentan los espesores mínimos requeridos para satisfacer estos valores.

Tabla 16. Espesor mínimo requerido para satisfacer los requisitos de la NMX-C-460-ONNCCE-2009.

Identificación	Espesores mínimos en muros, cm.		
	Mínimo	Habitabilidad	Ahorro de energía
1A-CV2	20	25	30
2B-CV2	15	20	20
3D-CV2	15	20	25
H	15	15	20

En esta tabla se puede observar que el espesor mínimo para satisfacer los requerimientos de la norma como material ahorrador de energía el espesor deberá ser ≥20 cm en el caso de la mezcla con mayor resistividad (2B-CV2), el cual coincide con el de la referencia H.

Capítulo 6

Conclusiones

Para los objetivos planteados, los materiales utilizados y el programa experimental previsto en esta investigación, a continuación se presentan las conclusiones correspondientes:

Caracterización

1. Los resultados de DRX evidencian que el co-polímero es un material con estructura química amorfa y en conjunto con los resultados de conductividad térmica constituye un argumento a favor de su potencial como aislante térmico.

Expansión

2. Durante las primeras horas de vida la adición de co-polímero condujo a expansiones del mortero en estado fresco. El efecto fue mayor en los morteros con súper fluidificante.
3. Además los tiempos de fraguado inicial y final fueron prolongados a causa de la incorporación del aditivo, esto presumiblemente maximizó la expansión producida por la incorporación del co-polímero.
4. El mayor porcentaje de expansión para todas las mezclas con co-polímero se produjo antes del fraguado inicial.

Resistencia a la compresión

5. Para maximizar la resistencia a la compresión de estos compuestos y cumplir con el requisito de NMX-C-441-ONNCCE-2005 es factible su producción con relaciones a/cm de 0.4 y 0.5 y con contenido de co-polímero de 50 y 47% en volumen respectivamente.
6. Sustituciones máximas del 35% de ceniza volante por cemento portland conducen a satisfacer el requisito mecánico de resistencia a la compresión especificado en NMX-C-441-ONNCCE-2005 para mampostería no estructural.
7. Para un volumen de co-polímero del 43% el confinamiento de la expansión a edades tempranas condujo a incrementos en resistencia a la compresión de 15 y 8% para las relaciones a/cm 0.4 y 0.6 respectivamente,

Curado

8. Los resultados de resistencia a la compresión a 3, 7 y 28 días ilustran que el curado bajo condiciones de laboratorio sin humedad arrojó resistencias a la compresión al menos 16% superiores a las obtenidas con curado estándar.
9. El curado estándar con humedad a 3 y 7 días también condujo a mantener resistencias superiores a los obtenidos para el curado estándar a edades posteriores.

Impermeabilidad

10. Las imágenes de MO confirman que las partículas de co-polímero no se deterioran durante el mezclado y que mantienen su geometría en estado fresco y endurecido.
11. La impermeabilidad de las esferas de co-polímero y su contribución a bloquear la interconexión de la red de poros en el interior del compuesto representa una ventaja favorable para disminuir el ingreso de la humedad y mantener una conductividad térmica estable.

Conductividad térmica

12. Los resultados de conductividad térmica constatan que esta propiedad está asociada a la capacidad del material para retener la humedad, a su porosidad y a la interconexión entre sus poros.
13. En comparación con el material de referencia H, los resultados de conductividad térmica ilustran que los morteros con co-polímero arrojaron mayores conductividades cuando el material está en condición seca y menor conductividades cuando el material está húmedo.
14. La sustitución de cemento portland por ceniza volante originó una reducción de la conductividad térmica del 31%.
15. La relación a/cm de 0.4 presentó mayores conductividades térmicas que las mezclas con relación a/cm de 0.5. Esto se atribuye a que en una matriz cementante muy densa el calor se conduce con mayor facilidad.

Otras propiedades térmicas

16. En comparación con el material de referencia H, las propiedades térmicas de los compuestos con co-polímero indican resultados mayores de calor específico, lo cual indica que estos compuestos requerirán una mayor cantidad de energía para registrar cambios en su temperatura.
17. La difusividad térmica indica que la tasa de calentamiento de las mezclas con co-polímero será 30% menor que la de la referencia H en estado seco.

General

18. Esta investigación condujo a establecer formulaciones de mortero base cemento portland cuya conductividad térmica (k) resultara competitiva con productos base cemento portland existentes en el mercado. Para su transferencia a la práctica sería necesario evaluar su factibilidad económica.

Capítulo 7 Recomendaciones

La experiencia y las observaciones producto del desarrollo de esta investigación condujeron a los siguientes propuestas para trabajo futuro:

1. Estudio comparativo para evaluar la capacidad aislante de los morteros producidos en sistemas a escala natural en base a ciclos anuales para evaluar su desempeño en las distintas temporadas de calor y frío.
2. Complementar la información con pruebas de durabilidad apropiadas para las condiciones de servicio de este material.
3. Realizar un análisis de costos para obtener el precio del compuesto con mejor desempeño.
4. Fabricar piezas de mampostería sólida y hueca con el objetivo de adaptar los métodos de laboratorio a métodos prácticos que puedan llevarse a cabo para la posible industrialización del producto.

Anexo A

Descripción del proceso de mezclado para micro morteros ligeros con co-polímero.

Como se mencionó en el apartado 4.1. el procedimiento de mezclado fue establecido mediante pruebas exploratorias, así mismo las recomendaciones de la ficha técnica del aditivo fueron consideradas, en especial el tiempo de mezclado aditivo-mortero (mínimo 5 min).

El procedimiento de mezclado para cada una de las muestras se describe a continuación.

- a. El material ligero (co-polímero) se vacía en el tazón de la batidora e inmediatamente después los materiales cementantes y se procede a homogenizar levemente con una espátula.
- b. Se toma un fragmento del agua (20 - 50 ml) de mezclado para homogenizar el aditivo por separado cuando sea necesario.
- c. Se vierte el agua restante a la mezcla de los materiales en polvo citado en el inciso a, se tapa el tazón completamente y se inicia el mezclado a velocidad 1 por un periodo de 60 s, dentro de este periodo se vierte el mezcla citada en el inciso 2.
- d. Al término del periodo se detiene la batidora y se raspa por 30 s, para después encender de nuevo en velocidad 1 por 60 s.
- e. Se repite el inciso d aumentando ahora la velocidad a 2 para los mismos intervalos de tiempo.
- f. Se realiza un último raspado por 30 s y se mantiene la velocidad 2 hasta llegar a los 10 min en tiempo global.

Consideraciones especiales

Por cuestiones de seguridad se recomienda utilizar el equipo mínimo de protección, como guantes, mascarilla de seguridad o cubre bocas y lentes de protección, debido a que el material es muy volátil y fácil de ingresar a las vías respiratorias durante las primeras etapas del mezclado.

Anexo B1

Procedimiento de obtención de la conductividad térmica del material ligero co-polímero

En polvos medir la conductividad térmica resulta ser complicado, ya que la muestra que se toma para evaluar dicha propiedad presenta una cantidad de vacíos entre las partículas, que está directamente relacionada con la energía de compactación aplicada a los especímenes sometidos a prueba. Debido a esto para obtener la conductividad térmica de este polvo con la mayor aproximación posible fue necesario auxiliarse de un líquido viscoso con conductividad térmica conocida, y basados en las ecuaciones de Hashin-Shtrikman se pudo obtener un valor satisfactorio aproximado de esta propiedad.

Para esto se decidió utilizar jarabe de maíz el cual es un líquido viscoso que nos permitió mezclar las partículas ligeras del material sin el efecto de segregación de las partículas, además de permitirnos una mejor distribución de las mismas en el componente resultante, a comparación de utilizar agua.

El procedimiento utilizado consistió de lo siguiente:

- a. Se mezcló el jarabe de maíz con el co-polímero en un frasco de vidrio y se mezcla hasta obtener homogeneidad.
- b. Se aplica vacío hasta observar que una mínima cantidad de aire queda dentro el compuesto.
- c. Se colocó el TPS de manera vertical como se muestra en la Imagen **B1**.

Los porcentajes de co-polímero utilizado fueron de 24.3 y 36.6 % en volumen del compuesto global.

Imagen B1. Jarabe de maíz (izq), esquema de medición de la conductividad térmica de polvo utilizando jarabe de maíz(derecha)



Anexo B2

Calculo de la conductividad térmica del material ligero co-polímero conforme la ecuación de Hashin-Shtrikman

Aplicando las ecuaciones de Hashin-Shtrikman (37) para un material bifásico, estas ecuaciones establecen los límites superior e inferior de conductividad térmica para una combinación de materiales, considerando su fracción en volumen del global en la mezcla.

Las ecuaciones de Hashin-Shtrikman se citan a continuación:

$$k_l = k_1 + \frac{x_2}{\frac{1}{k_2 - k_1} + \frac{x_1}{3k_1}}$$

$$k_h = k_2 + \frac{x_1}{\frac{1}{k_1 - k_2} + \frac{x_2}{3k_2}}$$

Donde

k_l y k_h , conductividad térmica calculada por H-S límites inferior y superior correspondientemente, W/ m °C.

k_1 y k_2 , es la conductividad térmica de cada compuesto, W/ m °C.

x_1 y x_2 , es la fracción en porcentaje del volumen total unitario.

Las limitantes para aplicar estas ecuaciones son:

$$k_2 \geq k_1$$

$$x_2 = 1 - x_1$$

Para obtener el valor de conductividad térmica se realizaron tanteos estableciendo que $k_{calculada} = (k_l + k_h)/2 \approx k_{medida}$, donde la conductividad térmica k_2 fue de 0.359 W/m °C perteneciente al jarabe de maíz y k_1 la conductividad del co-polímero.

Anexo B3

Calculo de la conductividad térmica de los moteros con co-polímero conforme la ecuación de Hashin-Shtrikman

En base a las ecuaciones las ecuaciones de Hashin-Shtrikman (37) para un material bifásico, se establecieron los límites superior e inferior de conductividad térmica y se obtuvo un promedio de este valor para estimar la conductividad térmica teórica o calculada denominada k_e .

Para el cálculo de k_e se utilizaron los valores de conductividad térmica de la pasta de cemento correspondiente a cada relación a/cm (0.5 – 0.39 W/mK y 0.4 – 0.54 W/Mk) que fue obtenida de manera experimental y la conductividad obtenida para el polvo de co-polímero, además del su correspondiente volumen en la mezcla.

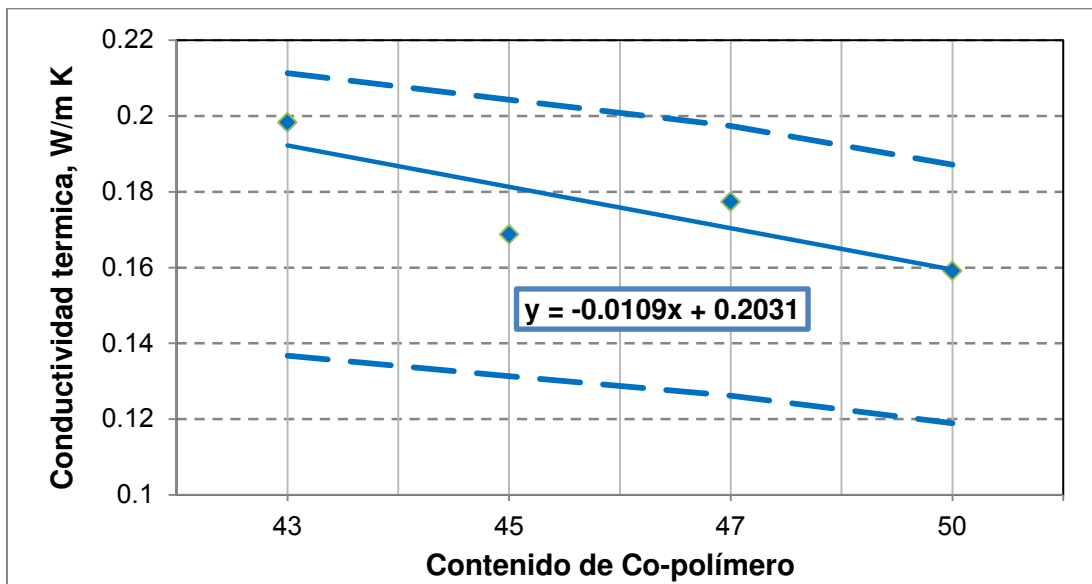


Gráfico B3.1. Límites superior e inferior de Hashin-Shtrikman para una a/cm 0.5.

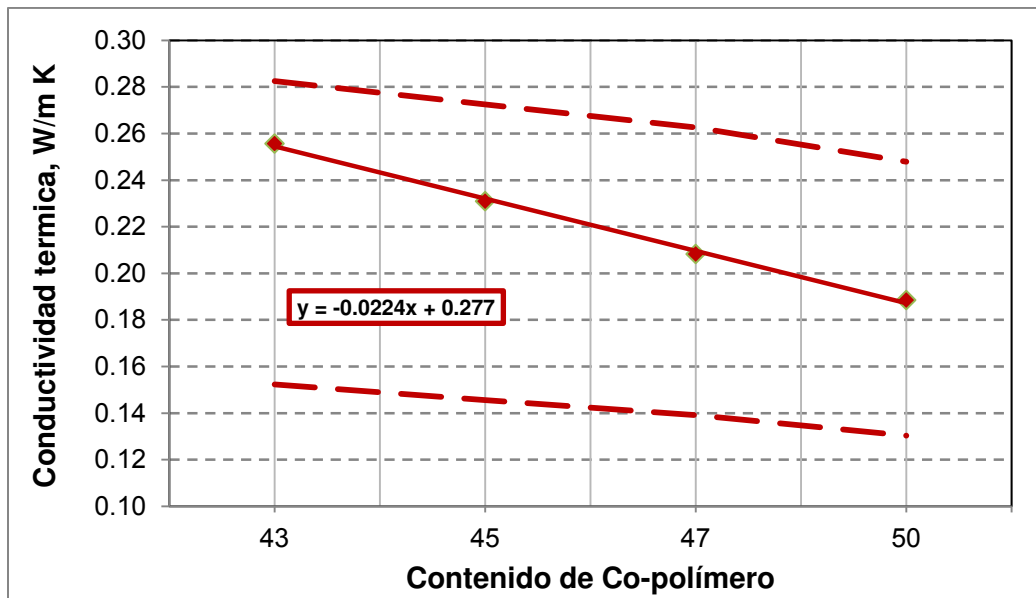


Gráfico B3.2. Límites superior e inferior de Hashin-Shtrikman para una a/cm 0.4.

Anexo C

Modificación al método ASTM 1698-09 (48)

Al presentarse expansiones en las distintas mezclas con co-polímero se decidió medir de manera cuantitativa este fenómeno el cual fue reportado en etapas previas, esto se hizo mediante el método ASTM 1698-09 el cual comúnmente se utiliza para medir la retracción autógena de las mezclas base cemento portland.

Este metodo se adapto a las necesidades del proyecto debido a que el comportamiento de la mezcla con co-polímero presentaban expansiones que excedían lo reportado comunmente en la literatura para mezclas de cemento portland con agregado normal, se opto por agregar una extensión (C2), con el fin de aprovechar al maximo la carrera del micrometro.

Esta extensión se fabricó de un material durable y con propiedades similares a la barra de referencia, las dimensiones de esta extensión se presentan en la imagen C3.

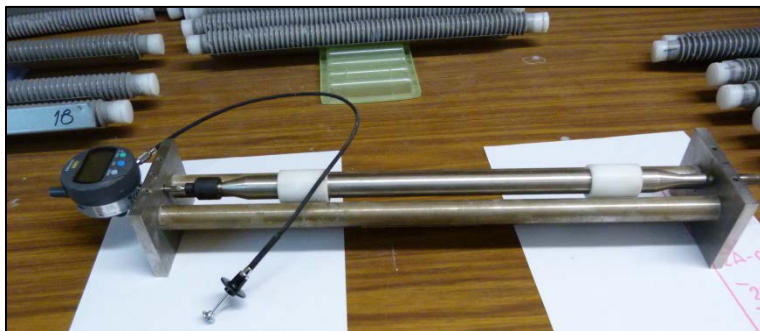


Imagen C1. Prueba ASTM C 1698-09.



Imagen C2. Extensión para prueba de expansión

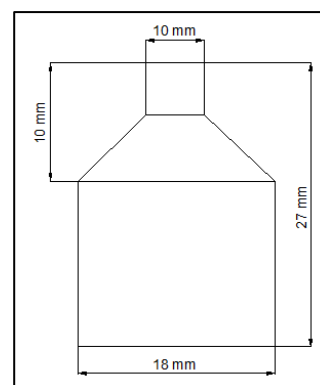


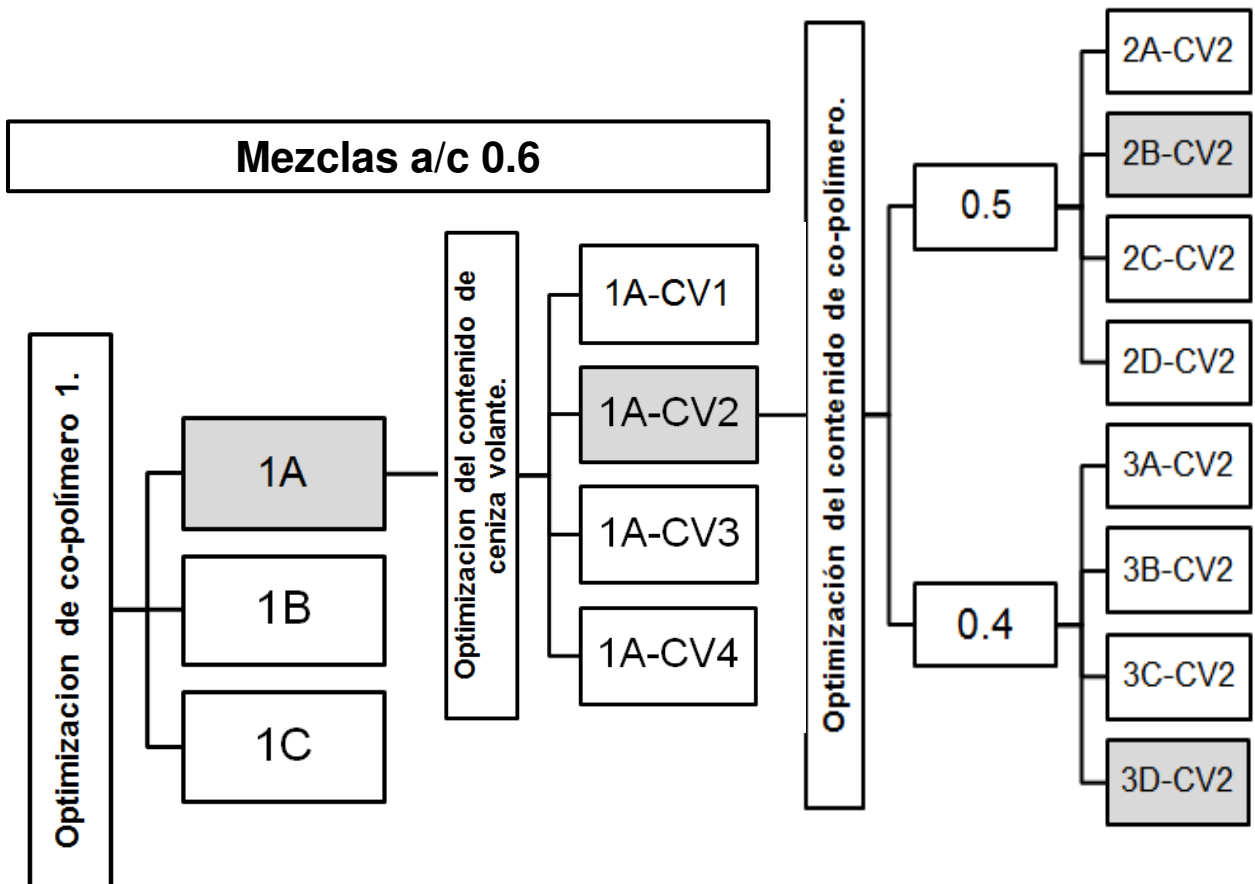
Imagen C3. Dimensiones de la extensión.

Anexo D

Esquema de muestras

A continuación en el diagrama D1 de muestra el diagrama de mezclas desarrolladas en la presente investigación.

Diagrama D1. Esquematización de mezclas desarrolladas.



Las celdas marcadas en color gris son aquellas que cumplieron con los requisitos mínimos de resistencia según la NMX-C-441-ONNCCE-2005.

Bibliografía

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate change 2014, <http://www.ipcc.ch/index.htm>.
2. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2014, http://www2.inecc.gob.mx/cclimatico/edo_sector/que_pasa.html.
3. Cámara Nacional de la Industria de Transformación., Caintra Verde, Adaptation to Climate Change 2011, http://www.canacintraverde.org/canacintraverde/assets/adaptacioncm_bioclimatico.pdf.
4. V. Magaña y E. Caetano, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2007, Pronostico Climático estacional regionalizado para la república mexicana, <http://www.ine.gob.mx>.
5. V. Magaña et al, Medidas de adaptación al cambio climático, 2011, http://awsassets.panda.org/downloads/librohumedales_baja_julio2011.pdf.
6. Instituto Nacional de estadística y geografía, **Conociendo a México 2012**, http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/mexcon/folleto_nacional_pliegos_baja.pdf.
7. A.M. Neville, **Properties of concrete**, 4ta edición, John Wiley & Sons editorial.
8. ACI 213R-87, “**Guide to Structural Lightweight Aggregate Concrete**” ACI manual of concrete Practice, Parte 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
9. Sidney Mindess, J. Francis Young, David Darwin, “**Concrete**”, 2da edición, Prentice Hall editorial, pp. 459-467.
10. Miguel Payá, “**Aislamiento térmico y acústico**”, CEAC Ediciones, Barcelona España, 1986, pp. 8-10.
11. C. Rougeron, “**Aislamiento térmico y acústico en la construcción**”, editores técnicos asociados Barcelona, 1977, pp. 51-55.

12. Donald Q. Kern, “**Procesos de transferencia de calor**”, 13th edición, compañía editorial, 1998.
13. Frank P. Incropera, “**Procesos de la transferencia de calor**”, 4ta edición, Prentice Hall editorial, pp. 3-5, 19.
14. Kurt C. Rolle, “**Termodinámica**”, 6ta edición, Prentice hall editorial, pp. 9.
15. Yunus A. Cengel, “**Heat transfer**”, 2da edición 2002, McGraw-Hill Science, pp. 26.
16. Latif M. Jiji, “**heat convection**”, City University of New York School of Engineering, Springer, pp. 1-2.
17. J. P. Holman, “**Transferencia de calor**”, 10 edición 2010, McGraw-Hill Science, pp. 272.
18. A. Serway Raymond et al., “**Física**”, 5ta edición. Pearson editorial pp.350.
19. James E. Mark, “**Physical properties of polymers handbook**”, Springer science 2da edición, pp 145-154.
20. Kenneth J. Anusavice, “**Ciencia de los materiales**”, 11va ed. Elsevier pp. 52-55.
21. MSE 2090, Lecture Notes, University of Virginia, “**Introduction of materials science**”, chapter 19, thermal properties.
22. W. D. Kingery, Harvey Kent Bowen, Donald Robert Uhlmann, “**Introduction to ceramics**”, 2da edición, Wiley, New York.
23. H.K. Kim, J.H. Jeon, H.K. Lee, “**Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air**”, Construction and Building Materials 29 (2012) pp.193-200.
24. Ozkan Sengu , Senem Azizi , Filiz Karaosmanoglu , Mehmet Ali Tasdemir, “**Effect expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete**”, Energy and Buildings 43 (2011) pp.671–676.

25. A. Benazzouk, O. Douzane, K. Mezreb, B. Laidoudi, M. Quéneudec, **“Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modeling”**, Construction and Building Materials 22 (2008), pp. 573–579.
26. D.K. Panesar, B. Shindman, **“The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork”**, Cement and Concrete Composites 34 (2012), pp. 982–992.
27. Ramazan Demirboga, Rustem Gul, **“The effect of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete”**, Cement and concrete research 33, 2003, pp. 723-727.
28. Osman Ünal, Tayfun Uygunoglu, Ahmet Yildiz, **“Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation”**, Building and Environment 42, 2007, pp. 584-590.
29. D.P. Bentz, M.A. Peltz, A. Durán Herrera, P. Valdez, C.A. Juárez, **“Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes”**, Journal of Building Physics 34(3), 2011, pp. 263–275.
30. Yunsheng Xu, D.D.L. Chung., **“Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement”**, Cement and concrete research 30, 2000, pp. 59-61.
31. Kook-Han Kim, Sang-Eun Jeon, Jin-Keun Kim, Sungchul Yang, **“An experimental study on thermal conductivity of concrete”**, Cement and Concrete Research 33, 2003, pp. 363-371.
32. D.P. Bentz, **“Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes”**, Materials and Structures 40, 2007, pp. 1073-1080.
33. Comisión Nacional del agua Registros de temperaturas máximas promedio mensuales 2003-2014, <http://smn.cna.gob.mx/climatologia/TempsyPrecip>

34. Instituto Nacional de estadística y geografía, Cambio climático estadística oficial 2010, http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/egi/productos/integracion/especiales/revistainter/num_1_2010/Doctos/RDE_Num01_Nov2010_Art01.pdf.
35. ASTM C-150-00, **Standard specification of portland cement**.
36. Steven H. Kosmatka, Kerkhoff, Panarese y Tanesi, “**Diseño y control de mezclas de concreto**”, Portland Cement Association, primera edición, 2004.
37. Z. Hashin, S. Shtrikman, “**A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials**”, Journal of Applied Physics 1962, 33:3125–3131.
38. ASTM C-188-09, “**Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement**”.
39. ASTM C-109-05, “**Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)**”.
40. ASTM C-311-07, “**Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete**”.
41. ASTM C-618-08, “**Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete**”.
42. ASTM C-494-09, “**Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete**”.
43. A. Duran et al., “**Diseño de mortero aligerado con co-polímero de baja resistencia**”, Proyecto desarrollado por el Departamento de Tecnología del Concreto, Facultad de ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, Diciembre 2011.
44. ASTM 1437-09, “**Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar**”.
45. ASTM C 185-01, “**Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar**”.

46. ASTM C511-98, “**Standard Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes**”.
47. ASTM-C-1698-09, “**Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar**”.
48. A. Durán Herrera, “**Desarrollo de compuestos densificados reforzados base cemento portland CPO 40**”, Tesis Doctoral, 2003.
49. **Handbook of analytical techniques in concrete science and technology**, V.S. Ramachandran y James J. Beaudoin, Institute for Research in Construction National Council Canada”, William Andrew publishing, capítulo 8, pp.309-311.
50. Peter C. Hewlett, “**LEA’s Chemistry of Cement and Concrete**”, Arnold editorial, 4ta edición, capítulo 4 y 10.
51. F. Wittmann, “**Surface Tension, Shrinkage and Strength of Hardened Cement Paste**”, Materials and Structures, Research and Testing (RILEM, Paris), V. I, No.6, Nov-Dec. 1968, pp. 547-552.
52. T. C. Powers, “**Physical Properties of Cement Paste**”, Proceedings, 4th International Symposium on the Chemistry of Cement (Washington, D.C., 1960), Monograph No. 43, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1962, V. 2, pp. 577-609.
53. Sandor Popovics, “**Effect of Curing Method and Final Moisture Condition on Compressive Strength of Concrete**”, ACI Journal, technical paper, Title no. 83-60, July-August 1986, Pp. 650-657.
54. National Institute of Standards and technology, Base de Datos de materiales Aislantes cemento Portland, http://srdata.nist.gov/insulation/insul_search_menu_12.asp.
55. Ramazan Demirboga, Rustem Gul, “The effect of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete”, Cement and concrete research 33, 2003, pp. 723-727.
56. ASTM C 230-98, “**Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement**”.

57. A. Bouguerra, A. Ledhem, F. de Barquin, R.M. Dheilily y M. Quenedec, **“Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement and wood aggregates”**, Cement and concrete research, 1998, vol.28, No.8, pp.1179-1190.
58. B. Milovanovic, I. Banjad Pecur; I.Gabrijel, **“Measuring thermal properties of hydrating cement pastes”**, 31st Cement and Concrete Science Conference, Novel Developments and Innovation in Cementitious Materials 12-13 September 2011, Imperial College London, United Kingdom.
59. T.Z. Harmathy, **“Thermal properties of concrete at elevated temperatures”**, Journal of Materials 1970;5:47–74.
60. N.G. Zoldners, **“Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures”**, ACI Publication SP-25, 1971. p. 1–31.
61. D. Campbell-Allen, **“Thorne CP. The thermal conductivity of concrete”**, Magazine of Concrete Research 1963;15(43):39–48.
62. M.I. Khan, **“Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models”**, Building and Environment 37 (2002) 607 – 614.
63. Mohammad S. Al-Homoud, **“Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials”**, Building and Environment 40 (2005) 353–366.
64. Habib Uysal, Ramazan Demirboga, Remzi Sahin, Rustem Gul, **“The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete”**, Cement and Concrete Research 34 (2004) 845–848.
65. Ramazan Demirboga, **“Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar”**, Energy and Buildings 35 (2003) 189–192.
66. Milos Jerman, Robert Cerny, **“Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials”**, Energy and Buildings 53 (2012) 39–46.

67. M. Z. Bessenouci, N. E. Bibil Triki, S. Khellad, B. Draoui, A. Abene, “**The apparent thermal conductivity of pozzolana concrete**”, Seventh International Conference on Material Sciences (CSM7), Beirut–Lebanon, May 2010.
68. A. G. Loudon, “**The thermal properties of lightweight concretes**”, The International Journal of Lightweight Concrete. Vol 1, No 2, pp 71-85, 1979.

Joana Ketterine Campos Dimas

Julio 2014

Ingeniero Civil egresado de la FIC-UANL en el año 2012. Reconocimiento del ACI y German Instruments por el 3er lugar en FRC Bowling Ball Competition, llevado a cabo durante la convención de ACI primavera 2012 en Dallas Texas, EUA. Obtención de diferentes reconocimientos por excelencia académica durante estudios de licenciatura. Participaciones como ponente con los siguientes temas: “Optimización de las propiedades térmicas en mampostería base cemento portland” en febrero de 2013 y “Concretos de ultra alto comportamiento” en diciembre de 2013. Estancia internacional como Investigador invitado en el National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, Maryland, bajo la supervisión del investigador Dale P. Bentz, evaluando las propiedades termo-físicas de materiales aislantes base cemento portland, en el periodo julio – agosto 2013.



Contacto:

Teléfonos:
Fijo 1870-3626
Móvil 81 8685-0728
E- mail Ketterine@hotmail.com
Monterrey, Nuevo León, México.

