



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

**Identificación de sustancias inhibidoras de
los efectos negativos de los finos en las
mezclas cementicias**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el
grado de

Maestro en Ciencias

(Contrucción)

Presenta

Juan Sebastián Rivas Sánchez Salazar

Querétaro, Qro. 2012



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría Ciencias (Construcción)

Identificación de sustancias inhibidoras de los efectos negativos de los finos en las mezclas cementicias

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ciencias (Construcción)

Presenta:

Ing. Juan Sebastián Rivas Sánchez Salazar

Dirigido por:

Dra María de la Luz Pérez Rea

Co-dirigido por:

Dr. Carlos Velasco Santos

SINODALES

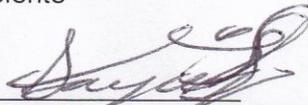
Dra. María de la Luz Pérez Rea
Presidente

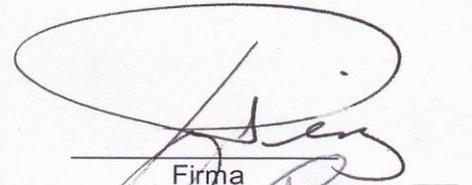
Dr. Carlos Velasco Santos
Secretario

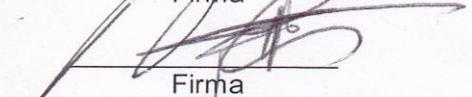
Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Vocal

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Suplente

Dr. Waltter López González
Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

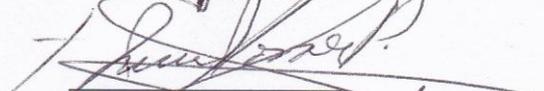

Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo de 2012
México

RESUMEN

Desde hace algunas décadas, se tiene conocimiento de los efectos que las arcillas presentan al contacto con el agua. Si se considera la capacidad de cambio volumétrico de las arcillas y las consecuencias de dicha propiedad, se entiende porque en ciertos rubros industriales (como el caso que atañe a este proyecto) son consideradas dañinas, pero en algunos otros, se convierten en materia prima indispensable.

Se han realizado diversos estudios acerca de las arcillas desde diversos puntos de vista. Tal vez, el más desarrollado hasta el día de hoy es en el área de los suelos, donde se hace uso de determinados productos químicos, sobre todo polímeros para atacar los problemas que las arcillas acarrearán.

Basado en dicha experiencia este proyecto incursiona en el poco explorado terreno de la inhibición de los efectos negativos de las arcillas en las mezclas base cemento. Esto dado que gracias a la estructura de las arcillas (laminares) estas poseen la propiedad de cambio volumétrico, lo cual quiere decir que una cantidad del agua que se adiciona pensando que reaccione en su totalidad con el agua, queda atrapada en la estructura de la arcilla, evitando así el correcto desarrollo de las reacciones de hidratación y por consiguiente la pérdida de las propiedades del material base cemento.

Para este fin, se probaron una serie de sustancias posiblemente inhibidoras (polímeros) y de ellas se seleccionaron las tres mejores, para ser probadas en la mezcla cementicia (pasta de cemento y mortero) con agregado contaminado por arcillas.

Gracias a las pruebas y análisis realizados, se comprobó que en efecto los aditivos inhibidores realizaron la función para la cual estuvieron destinados, sentando así los precedentes de toda una línea de investigación, con un amplio campo de aplicación.

(Palabras clave: arcillas, materiales cementicios, inhibición)

ABSTRACT

From some decades ago, it is known the negative effects that clays present when in contact with water. If the clays' volumetric change capacity and the related consequences are considered one can understand why some industries considered them as harmful (like the case this project is working with), but some others considered it an essential part of their productive process.

In construction industry, with the exception of some cases (as the muds aditioned intentionally with clays), clays' effects are not positives. So far, for the clays' negative effects combat (above all, when these materials are in the surfaces of the cement based mixes' aggregates), the most used but less viable option, is to wash the contaminated aggregates.

There have been diverse studies about the clays from different points of view. Maybe, the most developed to this day is in the soils area, where some chemicals are used, mostly polymers for the combat of the problems these materials carried out. This, given the fact that the clays' structure so called laminar, gives them the ability to change their volume, which means that a certain amount of water added for reacting directly with the cement stays trapped in clay's structure, affecting the development of the hydration reactions and with this, the final performance of the cementicious mix.

Based on the experience this project penetrates the not much studied field of the clays' negative effects in the cement based mixes.

To achieve this goal, a series of possibly inhibitive substances (polymers) where tested, from which the best three where selected, to be tested in cementicious mix (cement paste and mortar) with clay contaminated aggregate.

(Key words: clays, cementicious materials, inhibition)

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias a la cooperación y apoyo, en primer lugar de un excelente grupo de personas, de gran calidad humana y que personalmente admiro en demasía. Contando también con la Universidad, para servirme de plataforma de lanzamiento en este proyecto que significó mi quehacer a lo largo de dos años. Aunado a esto, la empresa Sika mexicana, la cual, sin miramiento alguno, depositó su confianza en este proyecto y lo demostró siendo el espacio fundamental del desarrollo físico-experimental de este trabajo.

Quiero hacer hincapié en esas personas tan especiales. En primer lugar a mis padres, mismos que nunca perdieron la fe en mi y que me apoyaron aún cuando muchos lo hubieran dejado de hacer, aún cuando no tenían ninguna obligación de hacerlo. A mis asesores académicos. Carlos Velasco y Luz Pérez, cuyos conocimientos contribuyeron al enriquecimiento de este trabajo. A mi asesor externo y gerente de un excelente laboratorio de investigación con enfoque industrial, Walter López, cuya visión empresarial con enfoque de liderazgo, ayudó a hacer de este trabajo una base de investigación para la solución de un problema industrialmente desarrollable. Al encargado directo del proyecto en la empresa, Armando Hernández, sin cuyo apoyo, las labores diarias no hubieran seguido una línea lógica y eficiente. A mi mejor amigo, Uriel Pacheco, quien fue uno de los apoyos más fuertes por contar con la capacidad de sembrar paz espiritual en momentos difíciles e inyectar dosis altas de energía para seguir adelante. A la familia Pacheco, por enseñarme que no se debe tener el mismo apellido para ser familia. A TÍ que le diste y sigues dando brillo y vida a este trabajo y a mi mismo. Por último, a la suma de eventos en serie acontecidos a lo largo de mi vida, gracias a los cuales, me encuentro en estos momentos escribiendo estas palabras y que no son más que causa del todo al cual pertenecemos y que para abreviar y facilitar, llamamos Dios.

ÍNDICE

Página

Resumen	i
Abstract	ii
Agradecimientos	iii
Índice	iv
Índice de gráficas	v
Índice de imágenes	vi
Índice de tablas	viii
Índice de ecuaciones	viii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Marco general	1
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Objetivo	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos particulares	6
1.4 Hipótesis	7
2 MARCO TEÓRICO	8
2.2 Las arcillas: estructura, propiedades y sus efectos negativos	8
2.3 Generalidades de los materiales cementantes	16
2.4 Aditivos para mezclas cementicias	21
2.5 estado del arte	23
3 METODOLOGÍA	27
3.1 Espectroscopía de rayos X	28
3.2 Granulometría de Arenas según norma ASTM C-136	30
3.3 Cribado en húmedo de arena para la obtención de finos	32
3.4 Lavado y filtrado de arena para la obtención de finos	33
3.5 Cribado en seco	34
3.6 Determinación de la Densidad mediante norma ASTM D-854	35
3.7 Determinación del contenido de sólidos en los aditivos	36
3.8 Ángulo de contacto	37
3.9 Mezcla de pastas cementicias y de finos de arena	40
3.10 determinación de fluidez y permanencia de pastas	41
3.11 Preparación de Morteros	44
3.12 Porcentaje de fluidez basado en norma ASTM C-230	45
3.13 Contenido de aire	46

3.14	Elaboración de cubos de muestra	48
3.15	Prueba de resistencia a la compresión	50
3.16	Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)	51
4	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN	55
4.1	Caracterización de arenas y cementos	55
4.2	Pastas de finos de arena	61
4.3	Microscopía Electrónica de Barrido	69
4.4	Ángulo de contacto	72
4.5	Pastas de cemento	75
4.6	Morteros	81
4.7	Resistencia a la compresión en morteros	102
4.7	discusión y conclusiones	108
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica		Página
Gráfica 1	granulometría de la arena Dolores Hidalgo, LPM	59
Gráfica 2	testigo vs mejores sustancias en fluidez pasta de finos de arena	63
Gráfica 3	Permanencia PEA I a 1.0% pasta de finos de arena	65
Gráfica 4	Permanencia PEA II a 0.75% pasta de finos de arena	66
Gráfica 5	Permanencia PEG a 0.75% pasta de finos de arena	67
Gráfica 6	Permanencia de las sustancias inhibidoras vs testigo para pasta de finos de arena	68
Gráfica 7	Fluidez testigo y sustancias inhibidoras para pasta de cemento	76
Gráfica 8	Permanencia para pasta de cemento con PEA I a 1.0%	77
Gráfica 9	Permanencia para pasta de cemento con PEA II a 4.0	78
Gráfica 10	Permanencia para pasta cemento con PEG a 1.0%	79
Gráfica 11	Permanencia para pasta de cemento con sustancias inhibidoras y testigo	80
Gráfica 12	Permanencia en mortero para PEA I a 0.5% y 1.0%	85

Gráfica 13	Permanencia en mortero para PEA II a 0.5% y 1.0%	86
Gráfica 1	Permanencia en mortero para PEG a 0.5% y 1.0%	88
Gráfica 15	Permanencia en mortero para las tres sustancias vs testigo	89
Gráfica 16	Permanencia para mortero con PEA I a 3.0% y 4.0%	91
Gráfica 17	Permanencia para mortero con PEA I a 3.0% y 4.0%	92
Gráfica 18	Permanencia para mortero con PEG a 3.0% y 4.0%	93
Gráfica 19	Permanencia en mortero con sustancias 3.0% y 4.0% inhibidoras vs testigo	95
Gráfica 20	Permanencia para mortero con PEA I y PTF a 1.0% y 4.0%	97
Gráfica 21	Permanencia para mortero con PEA II y PTF a 1.0% y 4.0%	98
Gráfica 22	Permanencia para mortero con PEG y PTF a 1.0% y 4.0%	99
Gráfica 23	Permanencia en mortero con sustancias inhibidoras y PTF 1.0% y 4.0% inhibidoras vs testigo	101
Gráfica 24	Resistencia a 1 día para PEA I	103
Gráfica 25	Resistencia a 28 días para PEA I	103
Gráfica 26	Resistencia a 1 día para PEA II	104
Gráfica 27	Resistencia a 28 días para PEA I	104
Gráfica 28	Resistencia a 1 día para PEG	106
Gráfica 29	Resistencia a 28 días para PEG	106

INDICE DE IMÁGENES

Imagen		Página
Imagen 1	Partícula de arcilla encapsulada	3
Imagen 2	Estructura general filosilicatos (Murray, 2007)	8
Imagen 3	Estructura ideal de un silicato 1:1 dioctaédrico (Murray, 2007)	9
Imagen 4	Estructura ideal de un filosilicato 2:1 dioctaédrico (Murray, 2007)	10
Imagen 5	Estructura de la Paligorskita (Murray, 2007)	11
Imagen 6	Difractómetro de rayos X	29

Imagen 7	Tamices apilados para la obtención de la granulometría	31
Imagen 8	Picnómetro	36
Imagen 9	Termobalanza	37
Imagen 10	Tensiones interfaciales en equilibrio	37
Imagen 11	Pastilladora	38
Imagen 12	Mezclador caframo	40
Imagen 13	Depósito de pasta en cilindro	43
Imagen 14	Pasta extendida sobre la mesa de fluidez	43
Imagen 15	Medida de la expansión de la pasta	43
Imagen 16	Mezcladora HOBART	44
Imagen 17	Mesa y molde para determinación de fluidez	45
Imagen 18	Olla para la determinación de contenido de aire	47
Imagen 19	Molde para cubos de mortero	49
Imagen 20	Máquina de resistencia a la compresión	51
Imagen 21	Microscopio electrónico de barrido	53
Imagen 22	Espectro de rayos X Arena Dolores Hidalgo LPM	59
Imagen 23	Espectros DRX para cementos	61
Imagen 24	TEM - reporte de Furukawa et al	69
Imagen 25	TEM - pasta de muestra testigo	70
Imagen 26	TEM - PEA I. a) arcilla sin polímero a X80000; b) arcilla con PEA I a X200000; c) arcilla con PEA I a X200000; d) arcilla con PEA I a 150000; e) arcilla con PEA I a X50000	70
Imagen 27	TEM - PEA II. a) arcilla sin polímero a X80000; b) arcilla con PEA II a X100000; c) arcilla con PEA II a X200000; d) arcilla con PEA II a 100000; e) arcilla con PEA II a X50000	71
Imagen 28	Resultados de ángulo de contacto. a) muestra de finos de arena sin sustancia inhibidora; b) muestra de finos de arena con sustancia PEA I; c) muestra de finos de arena con sustancia PEA II; d) muestra de finos de arena con sustancia PEG.	73
Imagen 29	Etapas de hidratación de la arcilla	108
Imagen 30	Interacción amina y arcilla	111
Imagen 31	Molécula-unidad polietilenglicol	112
Imagen 32	Interacción polietilenglicol - arcilla	113

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
Tabla 1	Lista de arenas caracterizadas	55
Tabla 2	Arenas caracterizadas y minerales presentes	56
Tabla 3	Minerales presentes en las arenas	57
Tabla 4	Datos adicionales de la serie de pruebas de permanencia preliminar	68
Tabla 5	Datos adicionales para la serie de pruebas de pastas de cemento	80
Tabla 6	Rangos aceptables de contenido de aire	84
Tabla 7	Datos adicionales para morteros a con las sustancias a 0.5% y 1.0%	90
Tabla 8	Datos adicionales para morteros a con las sustancias a 0.5% y 1.0%	95
Tabla 9	Datos adicionales para mortero con sustancias inhibidoras y PTF 1.0% y 4.0% inhibidoras	101

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación		Página
Ecuación 1	Determinación de la densidad	36
Ecuación 2	Determinación de porcentaje de sustancia en base seca	41
Ecuación 3	Determinación de la cantidad de sustancia inhibidora en gramos	42

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Marco general

El presente trabajo de investigación, se desarrolla dentro del ámbito de la industria de la construcción, bastión comercial en nuestro país desde hace décadas. Dicha industria había presentado un crecimiento desmesurado, sin tener en cuenta el aspecto de la coexistencia integral entre los factores ambiental, social y económico. Así, la preocupación por lograr el perfecto equilibrio de estos tres factores dio lugar a la construcción sustentable.

“Sustentable” es un término que poco a poco ha ganado popularidad y ha hecho que el mundo tome más consciencia sobre sus acciones y el impacto que estas tienen en el planeta. En 1987 la ONU definió al desarrollo sustentable como "aquel que satisface las necesidades actuales sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (Brundtland, 1987). A la fecha se ha modificado mucho la definición de lo que desarrollo sustentable es pero en esencia, todas responden a la aquí mencionada.

Este proyecto se establece como sustentable, pues se busca que permita el uso de materiales considerados como no benéficos para evitar el gasto de recursos no renovables. Puesto de una forma más descriptiva, se pretende que la presencia de las arcillas en mezclas cementicias, no dañe el desempeño de las mismas. Es muy común, que estos materiales (agregados grueso y fino) sean previamente lavados, y que el agua de lavado sea desechada. Así, al encontrar una forma de trabajar con la presencia de las arcillas, se logrará aminorar el impacto ambiental.

Es importante entonces, vislumbrar el por qué de dichos efectos. En primera instancia, se sabe que las arcillas son materiales con una estructura de tipo laminar. Así mismo es conocido que las moléculas que conforman dichos materiales tienen la capacidad de intercambio iónico. Puntos a cauda de los

cuales, las arcillas pueden cambiar su volumen o expandirse y más importante aún, atrapar otras sustancias dentro de sus láminas de una forma muy eficiente dada la íntima conexión que surge del intercambio iónico. El caso del agua, mismo que atañe e inspira este proyecto es uno de los más ilustrativos de dicho efecto. A continuación se explica el porqué.

A causa de los principales elementos encontrados en la estructura de la arcilla (oxígeno, aluminio, silicio y magnesio), la superficie de las láminas de la arcilla queda con carga densamente negativamente, misma que atrae a las moléculas de agua tanto en su superficie como en las interláminas quedando así atrapada e imposibilitándole cumplir con la función de reaccionar con el cemento.

Para este proyecto se inició con una etapa de caracterización de materiales. A los cementos disponibles se les hizo análisis mineralógico por medio de rayos X, esto con la finalidad de observar la variación de los minerales presentes. De la misma forma, se hizo un estudio sobre todas las muestras de arena disponibles para poder determinar cual de ellas usar para este estudio. Seleccionada la arena, siguió la selección de los polímeros, mismos que se probaron tanto en pastas de arena para elegir a los que aportaron mejor desempeño, como en pastas de cemento para observar su comportamiento y descartar variables. Tras estas etapas, las pruebas fueron escaladas a algo más cercano a lo real, esto mediante la elaboración de morteros.

En sí la meta que este proyecto persiguió fue la de la inhibición de la arcilla por medio del llamado efecto de encapsulamiento. Lo cual quiere decir que la intención era que el polímero rodeara por completo la estructura de la arcilla evitando que esta interactuara con el agua, tal como lo muestra la imagen 1.

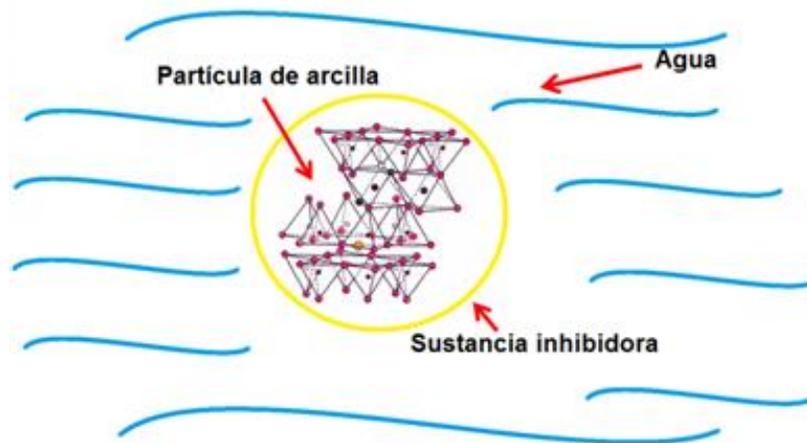


Imagen 1. Partícula de arcilla encapsulada

Habiendo esbozado en panorama dentro del cual el proyecto se desarrolla, se puede ahora retomar el tema de la sustentabilidad con la finalidad de hacer hincapié en que este proyecto contribuye al desarrollo de una cultura amigable con el medio ambiente, al demostrar que se puede tener una industria, no sólo de la construcción sino en general, encaminada hacia la sustentabilidad. Con esto, los beneficios obtenidos, serán numerosos, no quedándose simplemente a nivel de la ganancia de las empresas sino hasta la forma en cómo la sociedad se desenvuelve y desarrolla.

Por otro lado está la enorme capacidad científica-tecnológica con la que actualmente se cuenta para llevar a cabo este “sueño”. Es decir, debemos revertir los efectos del avance, no detenerlo, hacerlo en función de la conveniencia de un todo, que no llegue a un grupo pequeño de personas.

Para este proyecto, se hará uso de dicha capacidad científica-tecnológica, la cual abarca desde el conocimiento ya generado acerca de los materiales involucrados y de su comportamiento y propiedades, hasta el hecho de poder desarrollar o identificar aquellos compuestos que ayuden a lograr el objetivo. En pocas palabras, no sólo se hace uso del conocimiento ya existente, también se

genera nuevo, dado que la investigación en este rubro es escasa y la poca que hay nunca ha atacado el problema de la forma en la que este proyecto pretende hacerlo.

En este sentido, México tiene una gran tradición en la industria de la construcción, reconocida a nivel internacional. Sus cementos no son la excepción. Algo que los hace sobresalientes con respecto a otros países es su bajo contenido de clínker. Uno de los principales contaminantes de la industria cementera es el dióxido de carbono. La cantidad de dióxido de carbono es proporcional a la cantidad de clínker en el cemento. En Estados Unidos los cementos contienen un promedio de 95% de clínker, los países europeos manejan un porcentaje pocas unidades más abajo (del orden del 85%) y México, orgullosamente ha logrado bajar la cantidades de clínker hasta alrededor de 70%, esto sin comprometer el desempeño del producto y cumpliendo con las normas y especificaciones establecidas en el país.

Aunado a la afectación de la industria de la construcción al medio ambiente, la gran demanda de materiales de construcción acarrea la necesidad de extraer y procesar gran cantidad de materias primas, elaborar nuevos materiales y el tratamiento de una elevada cantidad de residuos de construcción y demolición, con el costo energético y de recursos no renovables que ello representa.

No obstante, el reto a superar por la industria de la Construcción, en cualquiera de sus ramificaciones, sigue siendo fundamentalmente el empleo de materiales de construcción de bajo impacto ambiental, dado que son éstos los que más repercuten sobre el medio ambiente, sin descartar otros impactos relacionados con el consumo de energía o los residuos.

Si bien el aspecto de sustentabilidad es de vital consideración para cualquier desarrollo del futuro, es importante remarcar, porqué este proyecto lo es, además de establecer de manera puntual lo que con el estudio realizado se atacará

1.2 Planteamiento del problema

En primer lugar, se debe saber que las arcillas, poseen un tamaño de partícula muy pequeño, hecho que es la base de todos los problemas que causa este material.

Este hecho (el reducido tamaño de partícula), dota a las arcillas de una gran área superficial. Para el caso de la montmorillonita, el área superficial, se encuentra en el rango de 80 a 300 m²/g. Esto, considerando, tanto las superficies de las partículas, como la superficie que se genera en las interláminas (Marina, 2007). En algunos sectores industriales, esta misma propiedad resulta positiva en muchos aspectos, contrario al caso que se da, cuando estas se encuentran presentes en las mezclas cementicias.

Otra de las propiedades de las arcillas es que cuenta con una alta densidad de carga negativa lo cual se presenta gracias a la capacidad de intercambio catiónico. Esto quiere decir que las arcillas, tienen la capacidad de interacción entre los iones de la superficie de la partícula o del interior de la misma, con otros existentes en las soluciones acuosas que rodean a la arcilla (Mengel, 2000).

Lo anterior, nos lleva a la parte medular del problema de las arcillas, esto es su capacidad de absorción y adsorción de agua. Lo cual es la principal razón, por la que este tipo de materiales son también llamados expansivos. Ya que pueden cambiar de volumen atrapando dentro de su estructura al agua. Hecho que resulta dañino, en específico en las mezclas cementicias, puesto que las mezclas, son diseñadas (en general, con la resistencia a la compresión como factor principal) con proporciones específicas de sus componentes, incluida el agua. Este fenómeno afecta a la que tal vez sea la relación más importante en la industria de las mezclas cementicias: la relación agua-cemento.

Es bien sabido que entre mayor sea la relación agua-cemento, menor será la resistencia a la compresión (factor principal de diseño) y viceversa. La

resistencia que las mezclas cementicias logran, es el resultado de una serie de reacciones químicas entre los componentes del cemento (principalmente silicatos cálcicos) y el agua, incluso después de transcurridos varios días dichas reacciones se siguen suscitando.

Sin embargo, al haber presencia de arcillas (recordando la afinidad de las arcillas a los compuestos polares como el agua) éstas alteran dicha relación (agua/cemento). Las arcillas toman el agua adicionada en determinada cantidad, alterando de forma considerable el resultado esperado, según el diseño de mezcla. Este efecto llega al extremo de que con tan sólo 3.0% de arcilla presente en los agregados, la resistencia puede disminuir hasta un 40% y aumentar la contracción hasta el doble (Veniale, 2001; Wangler, 2006)).

Así, basándose en los problemas que la presencia de arcillas acarrearán, se expone ahora el objetivo a perseguir, para la correcta conclusión de este trabajo de investigación.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo general

Analizar una serie de sustancias que puedan fungir como inhibidores de los efectos negativos de las arcillas, considerando su uso en mezclas cementicias.

Para lograr esto, se perseguirán una serie de objetivos particulares.

1.3.2 Objetivos particulares

- Caracterizar 12 diferentes muestras de arena, para la correcta determinación de presencia de arcillas.
- Caracterizar 5 diferentes muestras de cemento, para determinar la variabilidad mineralógica.

- Realizar barrido sobre pasta de finos de arena con las 22 sustancias potencialmente inhibidoras, para seleccionar las 3 mejores.
- Realizar barrido sobre pasta de cemento con las 3 mejores sustancias inhibidoras.
- Realizar barrido sobre mortero, con las 3 sustancias inhibidoras que mejor desempeño aportaron al comportamiento de la mezcla.

1.4 Hipótesis

Los efectos potencialmente negativos de las arcillas en los materiales cementicios, pueden ser inhibidos por medio de la modificación química de las mismas, haciendo uso de sustancias inhibidoras que para este fin resulten benéficos.

2 MARCO TEÓRICO

2.2 Las arcillas: estructura, propiedades y sus efectos negativos

La presencia de arcillas en los agregados es un problema muy poco estudiado. En México esto resulta incongruente pues es conocido por la consistente presencia de material expansivo en diversas zonas del país, incluso existen mapas de la distribución y ubicación de los suelos expansivos dentro del territorio nacional (Zepeda, 1992).

Es importante, habiendo planteado lo anterior, que se esboce un breve panorama acerca de los efectos dañinos de las arcillas.

Estos materiales (las arcillas) han llamado la atención de los humanos desde la edad de piedra. En nuestros días se encuentran entre los minerales más usados para la industria manufacturera y ambiental alrededor del mundo. El término “arcilla” se aplica tanto a los materiales con un tamaño de partícula menor a 2 micrómetros, como a la familia de minerales con composición química y

estructuras similares, también llamados filosilicatos, a causa de su estructura laminar. Los minerales de arcilla tienen un amplio rango de tamaño de partícula, que va desde unas cuantas décimas de angstroms hasta algunos milímetros.

En general las arcillas tienen una serie de propiedades que las caracteriza, esto, derivado de su composición química, estructura laminar y tamaño. La parte más importante, el núcleo de este trabajo es la gran afinidad de las arcillas por el agua. Para entender porque las arcillas presentan tal afinidad, empecemos desde su composición estructural.

La unidad estructural básica de los filosilicatos son tetraedros de silicio y oxígeno ($(\text{SiO})_4^{4-}$) (imagen 2-a). Dichos tetraedros se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$ (capa tetraédrica), que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos, como puede verse en las imágenes 2-b y 2-c. El silicio tetraédrico puede estar sustituido, en parte, por Al^{3+} o Fe^{3+} . Estas sustituciones isomórficas dan lugar a cargas libres (Stubican, 1961).

Los oxígenos del cuarto vértice del tetraedro (oxígenos sin compartir u oxígenos apicales), se dirigen perpendicularmente a la capa y forman parte de una capa octaédrica adyacente, formada por octaedros de grupos OH^- que se unen compartiendo las aristas (imágenes 2-d y 2-e).

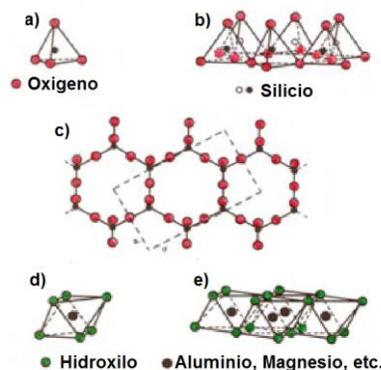


Imagen 2. Estructura general filosilicatos (Murray, 2007)

Los cationes de la capa octaédrica son, generalmente, Al^{3+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn. El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encuentran sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos $(\text{OH})^-$ de la capa octaédrica, de forma que, en este plano, quede un $(\text{OH})^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales. El resto de los $(\text{OH})^-$ son reemplazados por los oxígenos de los tetraedros (imagen 3).

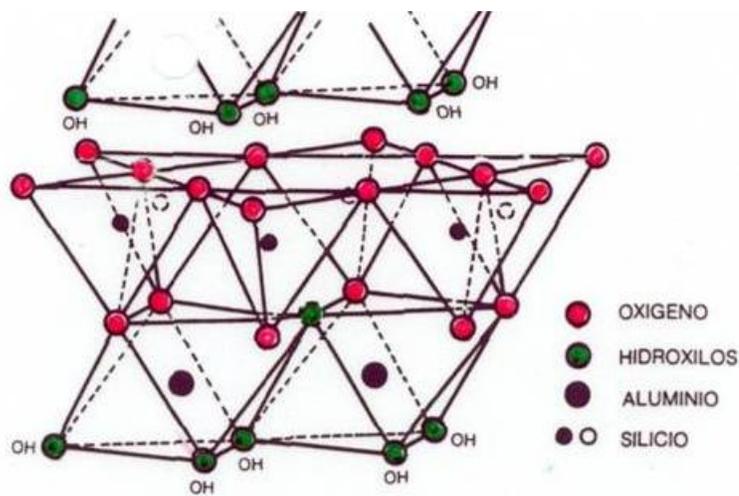


Imagen 3. Estructura ideal de un silicato 1:1 dioctaédrico (Murray, 2007)

Una unión similar puede ocurrir en la superficie opuesta de la capa octaédrica. Así, los filosilicatos pueden estar formados por dos capas: tetraédrica más octaédrica, denominándose bilaminares, 1:1, ó T:O (Figura 3); o bien por tres láminas: una octaédrica y dos tetraédricas y se denominan trilaminares, 2:1 ó T:O:T (Figura 4). A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica más una o dos tetraédricas se la denomina lámina (imagen 4).

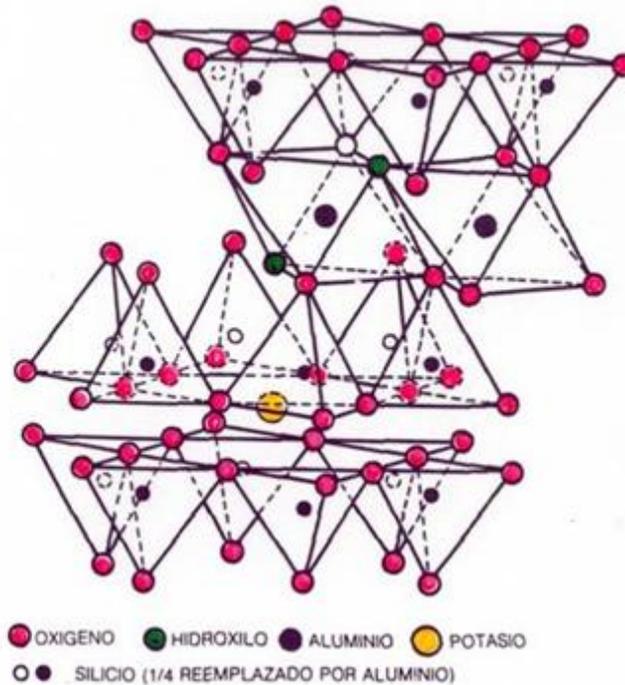


Imagen 4. Estructura ideal de un filosilicato 2:1 dioctaédrico (Murray, 2007)

Si todos los huecos octaédricos están ocupados, la lámina se denomina trioctaédrica (Mg^{2+} dominante en la capa octaédrica). Si dos tercios de las posiciones octaédrica están ocupadas y el tercio restante está vacante, se denomina dioctaédrica (el Al es el catión octaédrico dominante).

En algunos filosilicatos las láminas no son eléctricamente neutras debido a las sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga (sustituciones isomórficas). El balance de carga se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminaar, o espacio existente entre dos láminas consecutivas, de cationes individuales (como por ejemplo en el grupo de las micas), cationes hidratados (como en las vermiculitas y esmectitas) o grupos hidroxilo coordinados octaédricamente, similares a las capas octaédricas, como sucede en las cloritas. A éstas últimas también se las denomina T:O:T:O ó 2:1:1. La unidad formada por una lámina mas la interlámina se denomina unidad estructural. Los términos plano, capa, lámina y unidad estructural tienen unos significados precisos y definen

partes cada vez mayores de la disposición laminar. Los cationes interlaminares mas frecuentes son alcalinos (Na y K) o alcalinotérreos (Mg y Ca) (Carrol, 1959).

Las fuerzas que unen las diferentes unidades estructurales son más débiles que las existentes entre los iones de una misma lámina, por ese motivo todos los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas. Además algunos de ellos (esmectitas, cloritas hinchables, vermiculitas hinchables) son capaces de incluir cationes hidratados, agua y distintos líquidos polares en su espacio interlaminar, dando lugar a una mayor separación de las capas (aumento de su espaciado reticular) y por tanto hinchamiento.

También son arcillas la sepiolita y la paligorskita, a pesar de presentar diferencias estructurales con el resto de los filosilicatos. Estructuralmente están formadas por láminas discontinuas T:O:T (imagen 5). A diferencia del resto de los filosilicatos, que son laminares, este tienen hábito fibroso.

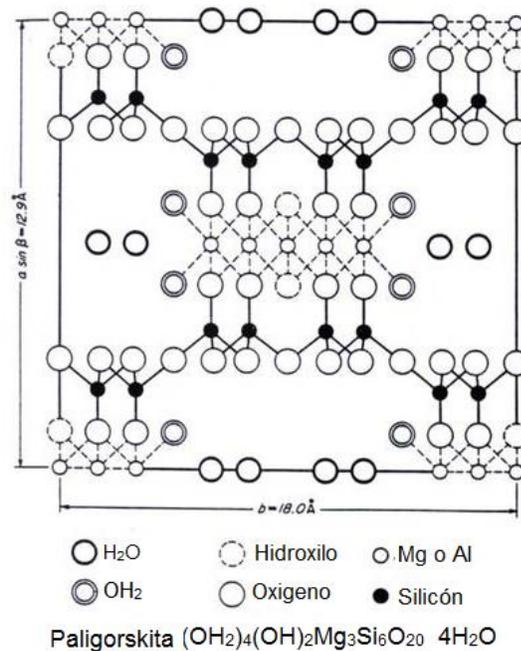


Imagen 5. Estructura de la Paligorskita (Murray, 2007)

Como lo enseña la ciencia de materiales, las propiedades inherentes a determinado material, son consecuencia de su estructura, las principales propiedades que las arcillas presentan, se discuten a continuación.

En primer lugar, la capacidad de Intercambio catiónico. Esta una propiedad fundamental de las esmectitas (como la montmorillonita). Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH (Callister, 1994). Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas resultan independientes del entorno del mineral. En los bordes, sin embargo, aparecen cargas que son dependientes del pH del medio y por lo tanto son variables. Surgen de la disociación de grupos superficiales. Sólo se encuentran neutralizadas bajo una cierta condición de pH, denominada *pzc*: punto de carga cero (point of zero charge), que depende del tipo de enlace químico involucrado. Cuando el pH se eleva por encima del *pzc*, en un medio más alcalinizado, la superficie de borde adquiere carga negativa ($\text{pH} > \text{pzc}$) mientras que al descender por debajo del *pzc*, en un medio más ácido, se vuelve positiva. Esto no implica que el valor de *pzc* sea neutro, dependiendo del grupo funcional implicado puede oscilar entre ácidos y alcalinos (Newman, 1987).

Las cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

- * Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- * Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- * Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del

pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina (Bowden, 1977).

Otra de las propiedades importante de las arcillas, es la capacidad de absorción y adsorción. Es por esto que algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad), en este sentido se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso (Pham, 1970).

Muy ligado a la absorción y adsorción, están la hidratación y deshidratación del espacio interlaminar, las cuales son propiedades características de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión

electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida. Resulta coherente, centrarnos ahora, en la interacción específica agua-arcilla.

En cuanto la arcilla se pone en contacto con el agua se forma una dispersión coloidal cuyo comportamiento depende de las interacciones entre los componentes del sistema que, básicamente son los siguientes:

- Partículas de arcilla
- Moléculas de agua
- Cationes
- Aniones

En el caso de tratarse de una superficie cargada negativamente los cationes asociados a ella reciben el nombre de contraiones, mientras que los aniones acompañantes se denominan coiones. Si se trata de una superficie cargada positivamente los contraiones son los aniones de la solución, y los coiones son los cationes de la solución.

La distribución de los sitios de carga en los minerales es de vital importancia en la adsorción de los contraiones y de las moléculas de agua. Cuando las láminas de mineral son neutras, los oxígenos basales son capaces de actuar como bases de Lewis débiles: donan o aportan electrones formando enlaces débiles con los complejos superficiales acuosos.

Pero a medida que se incrementan las sustituciones isomórficas dentro de las láminas de silicato se genera exceso de carga negativa en la superficie, lo

cual lleva a los oxígenos a actuar como bases fuertes de Lewis formando complejos cada vez más estables con moléculas de agua (dipolo) a través de la interacción tipo puente hidrógeno (Jackson, 1956).

Por último, y en consecuencia a las anteriores propiedades, se sabe que las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas, 1975). La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

Por todo lo anterior y en base a los conocimientos que se tienen acerca de los materiales, es necesario encontrar la forma de inhibir los efectos negativos de las arcillas en las mezclas cementicias. Con esto el aspecto ambiental y económico serán cubiertos, trayendo consigo, un bienestar social a largo plazo (siendo estos tres, la base de la concepción actual de lo que es la sustentabilidad).

Ahora que el panorama en el cual el proyecto pretende desarrollarse, se presenta un esbozo de la parte medular de este proyecto. La física y la química involucradas en los procesos que esta investigación abarcará, para que al final, se pueda aportar solidas conclusiones.

Se debe en primera instancia dar un vistazo a los aspectos fisicoquímicos de los principales materiales involucrados, que en este caso son la arcilla y el cemento. El cemento que es precursor de los materiales cementicios y las arcillas que como ya se menciona con antelación, se encuentran mezclados con los agregados a causa de la misma naturaleza del suelo mexicano.

En primer lugar, las arcillas, dado que son las que representan el objeto de estudio.

2.3 Generalidades de los materiales cementantes

De todo lo anterior se puede dilucidar de muy buena manera como es que las arcillas afectan a los materiales cementicios. Habiendo conocido dichos mecanismos, resulta importante también conocer el papel que juega el cemento.

La propiedad de liga de las pastas de cemento Portland se debe a la reacción química entre el cemento y el agua llamada hidratación. Y para entender mejor dicha reacción hay que conocer primero al cemento.

El cemento Portland no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90% o más de el peso del cemento Portland y son: el silicato tricálcico, el silicato dicálcico, el aluminato tricálcico y el aluminio ferrito tetracálcico (Taylor, 1997). Además de estos componentes principales, algunos otros desempeñan papeles importantes en el proceso de hidratación. Los tipos de cemento Portland contienen los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes. Es así como se

llega al punto en que considerar la química básica del cemento, se vuelve de vital importancia.

Cuando se agrega agua al cemento Portland, los compuestos básicos presentes se transforman en nuevos compuestos por reacciones químicas. Como por ejemplo:

Silicato tricálcico + agua → gel de tobermorita + hidróxido de calcio

Silicato dicálcico + agua → gel de tobermorita + hidróxido de calcio

Ferroaluminatotetracálcico + agua + hidróxido de calcio → hidrato de calcio Aluminato tricálcico

hidrato de calcio Aluminato tricálcico + agua + hidróxido de calcio → hidrato de Aluminato tricálcico Aluminato tricálcico

hidrato de Aluminato tricálcico Aluminato tricálcico + agua + yeso → sulfoaluminatos de calcio

Las dos primeras reacciones, donde intervienen los silicatos de calcio, que constituyen alrededor del 75% por peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para producir dos nuevos compuestos: gel de tobermorita el cual es no-cristalino e hidróxido de calcio que es cristalino. En la pasta de cemento completamente hidratada, el hidróxido de calcio constituye el 25% del peso y el gel de tobermorita, alrededor del 50%.

La tercera y cuarta reacciones muestran como se combinan los otros dos compuestos principales del cemento Portland con el agua para formar productos de reacción.

En la última reacción aparece el yeso, compuesto agregado al cemento Pórtland durante la trituración del clinker para controlar el fraguado (Taylor, 1997).

Cada producto de la reacción de hidratación desempeña una función en el comportamiento mecánico de la pasta endurecida. El más importante de ellos es el compuesto llamado gel de tobermorita, el cual es el principal compuesto aglomerante de la pasta de cemento, porque liga o aglutina entre sí a todos los componentes. Este gel es una sustancia dividida, muy fina, con estructura coherente, con una composición y estructura semejantes a la de un mineral natural, llamado tobermorita. Pero no sólo importa cómo se da la reacción de hidratación, sino que rapidez.

La rapidez de hidratación es afectada, además de la composición, por la finura del molido, la cantidad de agua agregada y las temperaturas de los componentes al momento de mezclarlos. Para lograr una hidratación más rápida, los cementos se trituran hasta dejarlos muy finos. El diámetro promedio de un grano de cemento Pórtland proveniente de la trituración del clinker es de alrededor de 10 μm . Las partículas del producto de hidratación, como el gel de tobermorita, son del orden de una milésima de ese tamaño, por lo que su enorme superficie específica, de alrededor de 3 millones de cm^2 por gramo, produce fuerzas de atracción entre las partículas. Estas fuerzas ocasionan que las partículas de gel de tobermorita se adhieran entre sí y con otras partículas introducidas en la pasta de cemento. De estos, tal vez el más importante es el clinker (Taylor, 1997).

Cuando el clinker (el producto del horno que se muele para fabricar el cemento Portland) se examina al microscopio, la mayoría de los compuestos individuales del cemento se pueden identificar y se puede determinar sus cantidades. Sin embargo, los granos más pequeños evaden la detección visual. El diámetro promedio de una partícula de cemento típica es de aproximadamente 10 micras, o una centésima de milímetro (Taylor, 1997). Si todas las partículas de

cemento fueran las promedio, el cemento Portland contendría aproximadamente 298,000 millones de granos por kilogramo, pero de hecho existen unos 15 billones de partículas debido al alto rango de tamaños de partícula. Las partículas en un kilogramo de cemento Portland tienen un área superficial aproximada de 400 metros cuadrados (Newman, 1983). En la examinación del clinker, se pone especial atención en los silicatos cálcicos, que son los principales responsables de la resistencia de las mezclas cementicias.

Los dos silicatos de calcio, los cuales constituyen cerca del 75% del peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio. Este último es con mucho el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto, fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional principalmente dependen del hidrato de silicato de calcio. Es la médula del concreto (Norris, 1967).

La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene cal (CaO) y sílice (SiO_2), en una proporción sobre el orden de 3 a 2. El área superficial del hidrato de silicato de calcio es de unos 3000 metros cuadrados por kilogramo. Las partículas son tan diminutas que solamente pueden ser vistas en microscopio electrónico. En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia.

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia está en la parte sólida de la pasta, en su

mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas. Pero la resistencia también depende de factores importantes como la porosidad de los elementos fraguados.

Entre menos porosa sea la pasta de cemento, mucho más resistente es el concreto. Por lo tanto, cuando se mezcle el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la absolutamente necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. Aún entonces, el agua empleada es usualmente mayor que la que se requiere para la completa hidratación del cemento. La relación mínima Agua–Cemento (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.25 (P. Bentz, 2008).

Un punto muy importante, aún no mencionada es el hecho de que la reacción del cemento con el agua es exotérmica; es decir, se genera calor en la reacción, durante la hidratación del cemento (Taylor, 1997).

Se puede sacar ventaja de esta propiedad, durante el tiempo frío, para mantener temperaturas adecuadas de curado mediante el aislamiento que brinda el encofrado. No obstante, para las cortinas de presas y otras estructuras de hormigón masivo, deben tomarse medidas para reducir o eliminar el calor mediante el diseño y métodos de construcción adecuados, esto puede comprender la circulación de agua fría u otros medios de enfriamiento. Otro método para controlar el desprendimiento de calor es reducir el porcentaje de compuestos que generan elevado calor de hidratación, como el C_3A y el C_3S , y usar un cemento con menos finura. El uso de agregado grande ($\leq 15\text{cm}$) también ayuda a reducir el requisito del cemento y el calor consecuente, al reducir la cantidad de agua, y por tanto menos cemento, con la misma relación agua/cemento.

El conocimiento de la cantidad de calor liberado a medida de que el cemento se hidrató puede ser útil para planear la construcción. En invierno, el calor de hidratación ayudará a proteger el concreto contra el daño provocado por

temperaturas de congelación. Sin embargo, el calor puede ser dañino en estructuras masivas, tales como presas, porque puede producir esfuerzos indeseables al enfriarse luego de endurece (Taylor, 1997).

Existe una forma de alterar las tasas de hidratación de los concretos. Para este fin se usan aditivos, en su mayoría formados por moléculas poliméricas (V.S. Ramachandran).

2.4 Aditivos para mezclas cementicias

Los aditivos son sustancias químicas naturales o manufacturadas que se adicionan al concreto (hormigón) antes o durante el mezclado mismo. Los aditivos más frecuentemente utilizados son los agentes incorporadores de aire, los reductores de agua, los retardantes y los acelerantes.

Los aditivos se emplean para aportar propiedades especiales al concreto fresco o endurecido. Los aditivos pueden mejorar las características de durabilidad, trabajabilidad o resistencia de una mezcla dada de concreto. Los aditivos son utilizados para vencer diferentes situaciones de construcción.

Los principales tipos son:

Agentes incorporadores de aire - Son sustancias químicas líquidas que se adicionan durante el mezclado para producir burbujas microscópicas en el concreto, llamado aire incorporado.

Reductores de agua - Son utilizados con dos propósitos diferentes:

- 1) para disminuir el contenido de agua e incrementar la resistencia.
- 2) para obtener asentamientos (revenimientos) más altos utilizando el mismo contenido de agua.

Retardantes – Son sustancias químicas que retardan el fraguado inicial del concreto por una hora o más. Los retardantes se emplean con frecuencia

en clima caliente para contrarrestar el fraguado rápido causado por las altas temperaturas.

Acelerantes – Estos aditivos reducen el tiempo de fraguado inicial del concreto y ayudan a obtener una resistencia temprana más alta. Los acelerantes no son anticongelantes; sin embargo, ellos aceleran la velocidad de su asentamiento y el desarrollo de resistencia. Haciéndolo más resistente a los daños producidos por congelamiento en clima frío.

Reductores de agua de alto rango (HRWR) – Son una clase especial de aditivos reductores de agua. Frecuentemente denominados súper plastificantes, los reductores de agua de alto rango reducen el contenido de agua de un concreto dado entre el 12 y el 25%. Por tal motivo, los HRWR se utilizan para incrementar la resistencia y reducir la permeabilidad del concreto reduciendo el contenido de agua en la mezcla, o para incrementar en gran medida el asentamiento y producir un concreto fluido sin adición de agua.

Se puede decir que el proyecto se encuentra dentro del área de los aditivos para concreto, pues se pretende identificar las sustancias que sirvan como inhibidoras de los efectos de las arcillas.

Habiendo expuesto la parte teórico-científica que más importa para el correcto desarrollo del proyecto, cabe realizar una breve panorámica de la estructura que este trabajo escrito seguirá, para su correcto desarrollo.

Los apartados cubiertos hasta ahora, dan al lector un vistazo, a grandes rasgos, de los aspectos más sobresalientes que en esta investigación se consideran. Para el apartado siguiente, se presenta un análisis de las publicaciones más relevantes en relación con el tema que esta investigación trata. El tercer capítulo, versa sobre la parte fuerte y columnar de todo el proyecto, la etapa experimental. El cuarto, etapa de discusión y conclusiones.. Así, a grosso modo, es como esta tesis está estructurada.

2.5 Estado del arte

Según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2005), los finos se definen como la arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre 75 micrómetros (malla N° 200) y 4.75 milímetros (malla N° 4), pudiendo contener finos de menor tamaño, dentro de las proporciones establecidas en esta norma. Es aquí, dentro de este rango de tamaños, que se sabe, se encuentran las arcillas.

Sin embargo, no todos los finos son arcillas, estos pueden ser divididos en tres grandes grupos: polvos, carbonatos y minerales arcillosos (Dólar-Mantuani, 1983). Como característica común, todos los finos tienden a aumentar la demanda de agua en las mezclas cementicias. El impacto de los finos depende principalmente de su naturaleza mineralógica. En el caso de finos de polvos y carbonatos, la demanda de agua se debe a la gran área superficial, en comparación con los agregados. A pesar de las marcadas diferencias que existen entre los tres grupos de finos, para este proyecto, Dado que se trabajó sólo con material dentro del grupo de minerales de arcilla, se referirá a ellos, como finos

Uno de los principales efectos negativos de las arcillas el aumento de la demanda de agua (como ya se mencionó), se debe principalmente a dos mecanismos: absorción del agua, dentro de su estructura laminar y adsorción del agua en la superficie de las partículas (Geruld, 2002). Esto, dependiendo de la naturaleza mineralógica y por ende de su capacidad de absorción y de adsorción, puede impactar de manera negativa el desempeño de la mezcla cementicia. Así, se presenta un decremento de la relación agua-cemento, pero contrario a la regla general, lo que se obtiene es una menor resistencia a la compresión (Goldbeck, 1993). Otro efecto negativo, es el aumento en la contracción final de los elementos colados, lo cual se debe a su capacidad de intercambia catiónico (Muñoz, 2007) Aunado a esto, la presencia de arcillas afecta significativamente a la floculación, misma que se describe como sigue. Cuando el agua y el cemento se combinan en proporciones típicas, la alta concentración, inherente a los sólidos de la pasta, lleva a la rápida formación de flóculos debido al incremento de la frecuencia en las

colisiones de las partículas. durante el mezclado, hay una formación y rompimiento constantes de los flóculos (Jarvis, 2005) Para una velocidad constante de mezcla, el tamaño del flóculo alcanzará un equilibrio en función de la resistencia de la floculación; altas resistencias de floculación pueden sostener flóculos más largos (Liu, 2002). A tasas de mezclado suficientemente altas, la microestructura alcanzará una fracción de volumen de sólidos máxima o una densidad de empaquetamiento que es función de la resistencia de la floculación así como del tamaño y forma de las partículas (Liu, 2000). Para suspensiones con tamaño y forma de partícula similar, teniéndose resistencias de floculación más altas, se obtienen densidades de empaquetamiento más bajas. Una vez que el mezclado se complete, los flóculos pueden crecer libremente formando una red llenadora de espacios, capaz de soportar tensiones. La tasa a la que esto ocurre depende tanto de la tasa de colisiones exitosas como de la tasa de ruptura debido al movimiento de partículas causado por el movimiento Browniano y la acción de asentamiento (Thomas, 1999).

A pesar de los estudios realizados, se ha llegado a reportar que las arcillas, en especial en países en desarrollo (donde supuestamente no existe un riguroso control en la calidad de los materiales que forman las mezclas de concreto) no afectan significativamente el desempeño, y sin embargo reducen la trabajabilidad. Dada la afectación de esta propiedad, los investigadores optaron por aumentar la cantidad de agua, sobre el diseño original, aumentando así la relación agua-cemento. Se reportó que este aumento de la cantidad de agua no afectó la resistencia (V.A. Fernandez, 2007). Sin embargo, desde un punto de vista más realista, se sabe que conforme aumenta la relación agua-cemento, disminuye la resistencia y viceversa. Esto está completamente comprobado y científicamente sustentado. Así que no puede descartar el efecto de las arcillas (como este artículo establece) haciendo un simple aumento de cantidad de agua.

Dentro de los principales efectos dañinos de las arcilla, está la disminución de agua disponible para la mezcla cementicia, a causa de la capacidad de hinchamiento de las arcillas. Esta capacidad, les permite almacenar agua dentro de su estructura y evitar que esta reaccione con los materiales cementantes.

Además, si el agua contiene disuelto algún tipo de aditivo, también lo atrapa y como consecuencia neutraliza el efecto para el cual dicho aditivo fue diseñado. Se determinó un mecanismo de inhibición del hinchamiento para diaminoalcanos (Wangler, 2009) disuelto en arena que se usa para restauración. Las mezclas fueron mojadas en una solución con una concentración particular por un tiempo de 1 a 3 hrs para asegurar saturación total, secada a temperatura ambiente por aproximadamente 1 hrs y luego colocadas en un horno toda la noche a 60 °C. La mayoría de los tratamientos fueron realizados a 0.31 M de diaminobutano.

La adición de arcillas, en concreto, kaolinita y bentonita, tuvo un efecto acelerador de la hidratación tanto del silicato tricálcico (alita) como del silicato dicálcico (belita) en cemento Portland testigo. En cuanto a las kaolinita, se observó que a causa del intercambio catiónico, se forman cadenas tetraédricas de SiO_4 más largas que en el cemento testigo puro (Kroyer, 2003) Sin embargo, se ha reportado también que la presencia de montmorillonit sódica, tiene el efecto completamente contrario, retardar la reacción de hidratación.

Para tratar de evitar los efectos negativos, se ha encontrado que existen policarboxilatos, los cuales resultan superdispersores (Planck, 2009). Estos fueron el metacrilato y alilether. Se logró una relación agua-cemento de 0.22. Esta podría ser una excelente solución para el problema de las arcillas, pues si se logra dispersar la mezcla a pesar de la adsorción y absorción del agua, podría ser descartado su efecto negativo. Sin embargo el objetivo concreto de este trabajo es la interacción directa de la sustancia con la arcilla, producir el efecto de encapsulamiento.

Como posible solución, se estableció que las tasas de reacción y espaciales afectan las transformaciones mineralógicas (Nicolas Martya, 2008). Las variaciones de la porosidad y la extensión de la zona afectada por la perturbación alcalina son comparadas a diferentes tiempos. Esto produce una alteración en la porosidad del material. Esto representa una buena alternativa para la solución del efecto de hinchamiento en las arcillas. Controlando el tamaño de poro se puede controlar el hinchamiento.

Se encontró que una solución de K-Na-OH causó una alteración en la hidrocalcita, la guibsita, la brucita y la montmorilonita (Claire Watsona, 2009). Causando así una marcada disminución en el tamaño de poro. Se logró un bloqueo de poro mediante precipitación mineral y movimiento de intercambio de iones.

En conclusión existen problemas muy identificados y conocidos, causados por las arcillas, asimismo, ha habido trabajos enfocados al ataque de dichos problemas. Aún así, dichos problemas no han sido atacados de la forma en que esta tesis pretende hacerlo. A continuación, se describe el proceso seguido, para completar la etapa experimental del presente estudio.

3 METODOLOGÍA

Dentro de este capítulo se describen todos los procesos que fueron usados para la correcta terminación de la presente tesis. Dichos procesos abarcan desde la caracterización hasta la obtención de las propiedades de los productos finales.

A grandes rasgos, las pastas (arena y cemento) fueron evaluadas mediante pruebas de fluidez, los morteros se evaluaron mediante pruebas mecánicas de resistencia a la compresión, así mismo, mediante microscopía electrónica de transmisión (MEB) se comprobó el encapsulamiento de las arcillas por el polímero, los cementos y las arenas utilizadas se evaluaron y analizaron mediante Difracción de Rayos X (DRX), por último, el estudio de la medida del ángulo de contacto fue de vital importancia.

En general, se sigue una línea, en la que en principio está la caracterización de los materiales involucrados. Esta caracterización abarca a las arenas, para conocer con qué tipo de finos se está trabajando y poder asegurar la presencia de una arcilla y qué tipo de arcilla es, en función de su composición mineralógica. Mineralógicamente también resultó de mucho interés conocer la variabilidad en cuanto a componentes de los posibles cementos a usar, por lo que la caracterización de este material también jugó un papel importante.

Tras la caracterización y habiendo comprobado que los materiales con los que se cuenta resultan representativos para el estudio que se pretendió realizar desde un principio, se procedió a la serie de pruebas que corresponde al llamado *barrido*. Dicho barrido consistió en la realización de una serie de pruebas sobre pastas de finos de arenas con el total de sustancias inhibidoras (veintidós) y sobre pasta de cemento con las tres que mejor desempeño aportaron a la mezcla, cuales son PEA I (polietheramina I), PEA II (poliether amina II) y PEG (polietilen glicol). Este barrido, fue indispensable para conocer la interacción tanto de los

aditivos con el cemento, como de los inhibidores de arcilla. Esto, reflejado de manera muy práctica en la prueba de fluidez. Se usó la fluidez como propiedad representativa, dado que se sabe que las arcillas absorben agua y aumentan su volumen (por esto, también se le llama material expansivo). Dicha agua absorbida (aunada a la alta reactividad superficial de la superficie de las arcillas, hecho por el cual también adsorben agua) deja a la mezcla sin la cantidad óptima, para que todas las reacciones químicas de hidratación se lleven a cabo de forma adecuada.

Tras completar esta etapa se prosiguió con los morteros, donde el objetivo era obtener tanto una fluidez óptima sin afectar la propiedad de resistencia a la compresión de forma significativa (dado que resulta la más importante en casi cualquier tipo de material base cemento), es decir que la presencia de las arcillas no afectara el desempeño del material cementicio y comprometiera la estructura donde estos materiales se apliquen.

A continuación se describen los procesos metodológicos de los que se hizo uso para la realización de la presente tesis. En primer lugar están aquellos que corresponde a la caracterización de los materiales involucrados.

3.1 Espectroscopía de rayos X

Resultó de vital importancia la caracterización de los materiales a usar. La selección de la arena era especialmente relevante, dado que de ella dependía la correcta conducción de este proyecto, bajo la seguridad de la existencia de arcillas contenida en las partículas de la arena. Para ello, se determinó que la base para lograr el objetivo de asegurar la presencia de arcillas en la arena, era por medio del conocimiento composición mineralógica de las arenas involucradas (doce muestras en total), siendo así, la espectroscopía de difracción de rayos X (DRX), la mejor opción.

La espectroscopia de rayos X es un nombre genérico que abarca todas aquellas técnicas espectroscópicas utilizadas para determinar la estructura electrónica de los materiales mediante la interacción de rayos X con materiales de estructura cristalina. La espectroscopia de rayos X tiene una amplia gama de aplicaciones, en especial en la determinación de estructuras cristalinas en muestras sólidas.

Los rayos X son un tipo de radiación electromagnética con una energía muy superior a la radiación ultravioleta que permite su absorción por los electrones del núcleo. Los rayos X son especialmente capaces de penetrar estructuras cristalinas: su longitud de onda, de un orden de magnitud igual al de las distancias interatómicas, hace que se difracten, produciendo los patrones de difracción del cristal.

Para la realización de la caracterización estructural mediante esta prueba se uso un difractómetro de rayos X (imagen 6), el cual hace pasar un haz de rayos X a través de un cristal de la sustancia sujeta a estudio. El haz se incide en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos y, por difracción, da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal.



Imagen 6. Difractómetro de rayos X

Para la preparación de las muestras, sólo se pide que sean de una distribución granulométrica uniforme, que asegura una buena reproducibilidad.

La composición mineralógica es básica para los objetivos que este trabajo persigue, sin embargo, a macroescala el estudio de la distribución de los tamaños de partícula resulta igual de importante, pues el compartamiento de las mezclas depende en gran medida de esta propiedad y tener dicha información es una herramienta más para la predicción del desempeño final de las mezclas.

3.2 Granulometría de Arenas según norma ASTM C-136

La determinación de la distribución granulométrica tuvo un lugar importante en la etapa experimental de este trabajo, esto bajo varios aspectos. Se tenía que asegurar una correcta distribución granulométrica, dentro de norma, para así lograr resultados que sean reproducibles. Aunado a esto, en base a los resultados que este estudio arrojó, se usó la técnica de cribado con los mismos tamices que para la determinación de la granulometría para la obtención de la cantidad de finos necesarios para la realización del número de pruebas requeridas para la correcta conclusión de los efectos observados en la experimentación.

Este ensayo consiste en dividir y separar, mediante una serie de tamices, un material en varias fracciones granulométricas de tamaño decreciente, como lo muestra la imagen 7.



Imagen 7. Tamices apilados para la obtención de la granulometría

Materiales

- Tamices
- Máquina tamizadora
- muestra de arena

Procedimiento

- a) Se acomodan las mallas en forma descendiente (3/8, 4, 8, 16, 30, 50, 100, 200, 325, denominadas de esa forma por la densidad de perforaciones por pulgada cuadrada) y se coloca una charola al final, esta retiene los finos que pasen.
- b) Se procede a agregar aproximadamente 500 gr de material y agitar la hilera de malla que se formó, en un agitador automático por un periodo de 10 minutos.
- c) Se pesa el total de material agregado y las mallas.
- d) Cuando ha sido agitado el cilindro que se forma, se pesan los residuos que fue quedando en cada malla.
- e) Se deberán graficar los datos en las gráficas de la ASTM y en la de Bureau of Raclamation.
- f) Al graficarla se observa si la arena está bien o mal graduada, según limites preestablecidos por norma.

Para poder trabajar con los diferentes aditivos, se determinan las propiedades, tales como la densidad y el contenido de sólidos totales, estos, con la finalidad de poder hacer el ajuste de la reducción del agua necesaria en base a la relación agua/arena o agua/cemento, es decir, la cantidad de agua en peso que se va sustituir por el aditivo adicionado.

Como se mencionó al inicio de esta sección el método de cribado por tamices se usó para la obtención de la cantidad necesaria de finos para la correcta realización de todas las pruebas necesarias. Sin embargo, se utilizaron a modo de prueba otros métodos que se pensó podían agilizar el proceso de obtención de finos.

El primero de los métodos desarrollado, puede ser llamado “cribado en húmedo” y se describe a continuación:

3.3 Cribado en húmedo de arena para la obtención de finos

Como ya se mencionó, esta no es una técnica o método que se desprenda de alguna norma, simplemente se pensó que podía resultar útil en la obtención de los finos necesarios.

Materiales:

- Malla No. 100, de 30 cm de diámetro (en el siguiente capítulo se explica la razón del uso de esta malla para la obtención de los finos).
- Recipientes receptores de material cribado (cubeta común de 20 l).
- Agua potable abundante

Procedimiento:

- a) La malla se calza en el recipiente contenedor.
- b) Se coloca una cantidad de aproximadamente medio kilogramo sobre la malla.
- c) Se lava hasta que el agua deje de tener apariencia turbia.
- d) Se repite el procedimiento hasta haber llenado la cubeta de 20 l.

- e) Se deja decantar la mezcla de agua y finos por tres días.
- f) Se elimina el agua excedente simplemente vertiéndola en otro recipiente.
- g) La mezcla restante de finos con agua, adquiere una consistencia de lodo. Dicho lodo se introduce al horno por un día a 90 °C, para asegurar que el agua sea eliminada por completo, al mismo tiempo que la temperatura no cause un cambio mineralógico.
- g) Como resultado del horneado del lodo, queda una “placa”, por lo que se muele en un mortero, hasta obtener el fino deseado.

Este procedimiento no resultó tan útil como se pensó en un principio, tomaba mucho tiempo y no se sabía cómo afectaba a la arcilla el molido final que se le daba. Tras haber realizado diversas pruebas con este método, se prosiguió al diseño de otro método, dicho método es el de lavado y filtrado.

3.4 Lavado y filtrado de arena para la obtención de finos

Tras la deliberación y conclusión de que el método anterior de obtención de finos no era el más adecuado en cuanto a consumo de tiempo y reproducibilidad de resultados, se esbozó y ejecutó este método como se explica a continuación.

Materiales:

- Malla No. 100, de 30 cm de diámetro (en el siguiente capítulo se explica la razón del uso de esta malla para la obtención de los finos).
- Papel filtro.
- Recipientes receptores de agua filtrada (cubeta común de 20 l).
- Agua potable abundante

Procedimiento:

- a) La malla se calza en el recipiente contenedor.
- b) Se coloca una cantidad de aproximadamente medio kilogramo sobre la malla.
- c) Se lava hasta que el agua deje de tener apariencia turbia.

- d) Se repite el procedimiento hasta haber llenado la cubeta de 20 l.
- e) Se prepara un cono con el papel filtro y se deposita dentro de otro recipiente.
- f) dentro del cono se deposita una la mezcla de agua y finos y se espera hasta que el agua se haya filtrado por completo.
- g) Tras haberse filtrado el agua por completo se retiran los finos, los cuales quedan con apariencia de laja, la cual se muele en mortero.

Por motivos similares al caso anterior este método tampoco resultó ser el mejor dado que el filtrado tomó mucho tiempo y también involucraba molienda de los finos secos, afectando de manera considerable la reproducibilidad de los resultados. Por último y como selección final se deliberó y concluyó que el principal problema de ambos métodos era el lidiar con los lodos que quedaban como resultado del procedimiento, por ello se llegó al diseño del siguiente método.

3.5 Cribado en seco

Tanto el método de cribado en húmedo como el de lavado y filtrado de arenas con el fin de la obtención de finos de arena resultaron no ser la mejor vía para la optimización de un proceso para el logro de dicho objetivo. Esto, dado que ambos consumían en principio una gran cantidad de recurso que resulta clave en cualquier desarrollo, el tiempo. No dejando de lado el uso de una excesiva cantidad de agua, que si bien desmejoraba su calidad, aún podría ser usada para diversos fines. Por esto, se pensó en el método que al final resultó ser el más sencillo y rápido de los tres, punto al que se llegó gracias a la experiencia obtenida con el desarrollo de métodos menos adecuados para fines del correcto desarrollo.

Materiales:

- Malla No. 100, de 30 cm de diámetro (en el siguiente capítulo se explica la razón del uso de esta malla para la obtención de los finos).
- Recipientes receptores de arena cribada (cubeta común de 20 l).
- Horno eléctrico.

-Tapa que calce en la malla (para este caso, se hizo uso de la tapa de la misma cubeta de 20 l).

Procedimiento:

-Se introduce la muestra de arena a cribar en el horno eléctrico por 24 horas, para asegurar la completa eliminación del agua contenida desde su obtención.

-Se calza la malla en el recipiente contenedor.

-Se deposita una cantidad de aproximadamente 200 gr.

-Se tapa la malla.

-Se agita vigorosamente durante un aproximado de 3 minutos.

-Se repite la acción hasta agotar la muestra seca de arena.

Todos los puntos anteriormente mencionados son los necesarios para la etapa previa a la realización de las pruebas, incluso las preliminares o lo que es lo mismo, el barrido. Como ya se mencionó, la importancia de esta parte del trabajo, recae en que se debe tener la certeza de que los materiales usados resultan representativos, además de que en etapas posteriores se pueda realizar una correlación de los mecanismos de reacción entre todos los elementos involucrados. Ahora, se presenta la parte de la metodología que podría llamarse medular o principal, la cual recae en la elaboración de las mezclas.

3.6 Determinación de la Densidad mediante norma ASTM D-854

La densidad de los líquidos se mide de una manera similar a como se mide la densidad de los sólidos. En este caso se emplea el método del *picnómetro*. Es necesario tener en cuenta la temperatura porque ésta influye en el valor de la densidad: a medida que aumenta la temperatura, la densidad del líquido se hace ligeramente *menor*.

Un picnómetro es un pequeño cilindro metálico de volumen exacto y conocido (V_p), como se muestra en la imagen 8. Se pesa vacío (w_p), luego se llena

completamente (incluida la tapa) con el líquido cuya densidad se desea determinar y finalmente se pesa (w_{pl}). Con estos datos se puede calcular la densidad del líquido.



Imagen 8. Picnómetro

Se usará el picnómetro para medir la densidad de cada aditivo. Enjuague primero el picnómetro con un poco del líquido de interés antes de llenarlo. La densidad se calcula por medio de la ecuación 1.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

3.7 Determinación del contenido de sólidos en los aditivos

Es necesario conocer el contenido de sólidos, de un aditivo dado. Esto dado que los cálculos de proporciones de las mezclas se realizan en base seca, puesto que se calcula tomando en cuenta sólo la fracción que realmente reacciona y no el total.

Para este fin, se hace uso de una termobalanza (imagen 9).

Procedimiento

- a) Se introducen alrededor de 5 gramos directamente en la charola destinada para este fin, dentro de la misma termobalanza.
- b) Se inicia la prueba, misma que ya está preprogramada en el equipo.
- c) La termobalanza mide el peso inicial y comienza a desecar la muestra.

d) Cuando detecta que ha quedado sólo la fase sólida, detiene la prueba y le resta el peso final al peso inicial.

e) se obtiene y registra así el porcentaje de contenido de sólidos.



Imagen 9. Termobalanza

3.8 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es una medida de la mojabilidad de la superficie sólida por un líquido e indica los parámetros superficiales que se necesitan medir. El ángulo de contacto es el ángulo formado por el plano tangente a la interfase líquido - gas y el plano formado por el sólido en un contacto trifásico sólido-líquido-gas. La imagen 10 muestra una representación de las tensiones interfaciales en equilibrio.

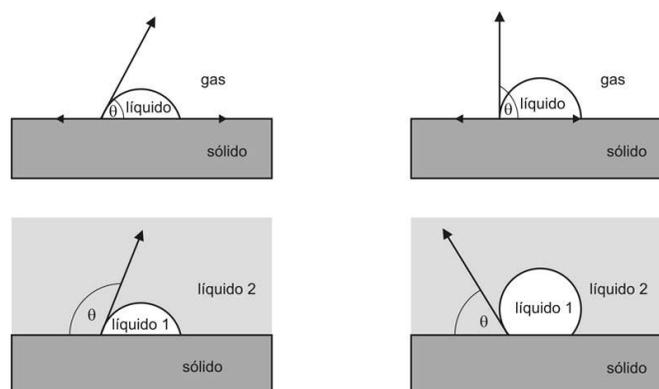


Imagen 10. Tensiones interfaciales en equilibrio

Materiales:

- Microjeringa
- Recipiente de vidrio
- Microscopio adaptado para medición de ángulo de contacto
- Muestras de minerales
- Agua destilada
- Dodecano

Procedimiento para preparación de muestra:

a) La muestra debe desecarse a temperatura ambiente, para evitar cualquier cambio en la calidad de la misma.

b) Se deben pesar aproximadamente 3 g de cada muestra.

c) Se deposita la muestra en la pastilladora, misma que se muestra en la imagen 11.

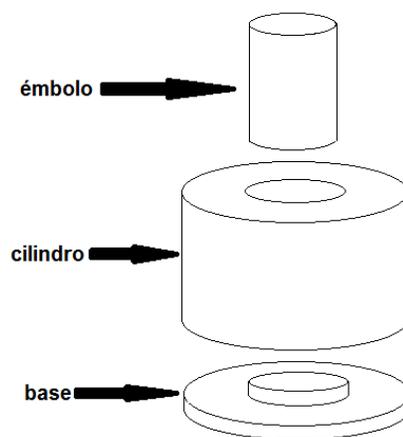


Imagen 11. Pastilladora

Procedimiento para realización de la prueba:

- a) Llenar el recipiente con agua destilada.
- b) Introducir el mineral a ensayar con la cara pulida hacia arriba en la cubeta y alinearla con el objetivo del microscopio.
- c) Cargar la microjeringa con dodecano y ubicarla lo más próxima a la superficie del mineral.
- d) Producir una burbuja casi igual al diámetro externo de la aguja.
- e) Colocar la burbuja en contacto con la superficie del mineral y presionar hacia abajo hasta que la burbuja sufra una pequeña deformación.
- f) Retirar lentamente la microjeringa, evitando que la burbuja se desprenda de la superficie sólida.
- g) Por último medir el ángulo de contacto en ambos lados de la burbuja con el software dispuesto para ello.

Durante la realización de esta prueba se encontraron una serie de contratiempos que fueron poco a poco resueltos. En primer lugar, estaba el hecho de que en el laboratorio en el que se realizaron estas pruebas, no se habían trabajado este tipo de materiales, por lo que la experiencia se obtuvo durante el proceso. Se pensó que las pastillas tendrían las características necesarias (geometría, mínima porosidad) si se realizaban aplicándoles tan sólo 4 t. Al someter a microscopio óptico las muestras obtenidas aplicando dicha presión, presentaron una alta porosidad, lo cual derivaría en falsos resultados, pues la gota estaría siendo absorbida por esta propiedad y no por la verdadera hidrofiliidad o hidrofobicidad. Así, se decidió aumentar la presión a 6 t, observándose una mejora en la calidad

de la muestra pero aún siendo insuficiente para obtener resultados confiables. No fue sino hasta las 10 t de presión que la muestra presentó las características adecuadas para la correcta realización de la prueba. Dentro del proceso, uno de los contratiempos que más resaltó, fue el hecho de que la patilladora perdió su forma, quedando atrapado el émbolo dentro del cilindro a causa de la gran presión aplicada a la pieza. Por tal motivo, se procedió a remanufacturar todo el sistema con un metal de una aleación apropiada, sumado a un tratamiento térmico, siendo esta, la definitiva solución del problema.

3.9 Mezcla de pastas cementicias y de finos de arena

Proceso interno de Sika basado en NMX-057-1997-ONNCE

Este método es un procedimiento que se ajustó por la empresa SIKA basado en la norma mencionada.

Se prepara en una mezcladora caframo de 2000 rpm (imagen 12).



Imagen 12. Mezclador caframo

Procedimiento

- a) 0:00 min a 0:00 min Pesar agua y aditivo de sacrificio en el vaso, mezclar 15 segundos a velocidad de 250 RPM
- b) 0:00 min a 0:15 min Vaciar cemento dentro del vaso con la propela en movimiento a velocidad de 250 RPM

c) 0:15 min a 0:35 min Pare y baje el material de las paredes del vaso, cambie a 2000 RPM

d) 0:55 min a 2:35 min Mezclar a velocidad de 2000 RPM

3.10 determinación de fluidez y permanencia de pastas

Tras haber realizado el procedimiento descrito en el punto anterior, se procede a la toma de las medidas, que tal vez sean las más indicativas de todo el proyecto: la fluidez y la permanencia.

Así, para la determinación del porcentaje de sustancia inhibidora en “base seca” (que como ya se mencionó se refiere sólo a la proporción de material activo de la sustancia inhibidora), se hace uso de la ecuación 2:

$$\% \text{ base seca} = \% \text{ sustancia en solución} \left(\frac{\% \text{ sólidos totales}}{100} \right) \quad (2)$$

Donde:

% base seca \equiv proporción de sustancia adicionada en función de la cantidad real de sólidos.

% sustancia en solución \equiv proporción arbitrariamente asignada según la cantidad de finos.

% sólidos totales \equiv proporción de material activo en la sustancia inhibidora.

Dadas las condiciones de dimensión, en cuanto al vaso usado para el mezclado, el equipo mezclador y el cilindro de prueba, se determinó en un inicio que lo más óptimo sería trabajar con una cantidad de mezcla con un peso total de 250 g, sin embargo, dada la dificultad por la cantidad de tiempo consumido en la obtención de los finos se redujo dicha cantidad a 150 g, lo que dejaba un rango menor de holgura en cuanto a la pérdida de material durante la manipulación, pero que fue superada, gracias a la práctica.

Para determinar la cantidad de sustancia inhibidora en gramos (dado que las adiciones de los componentes se realizaban pesándose en báscula), se recurrió a la ecuación 3:

$$\text{gramos de sustancia} = \frac{(\% \text{ sustancia en solución})(150)}{100} \quad (3)$$

Donde:

% sustancia en solución \equiv proporción arbitrariamente asignada según la cantidad de finos.

Materiales:

- Cilindro metálico (50 mm de diámetro)
- Mesa de fluidez (250 mm de diámetro)
- Vernier
- Enrasador (espátula)
- franela húmeda
- Pasta previamente preparada

Procedimiento:

- a) Humedecer la mesa con la franela húmeda.
- b) Colocar el cilindro al centro de la mesa de fluidez.
- c) verter la pasta dentro del cilindro, como lo muestra la imagen 13.

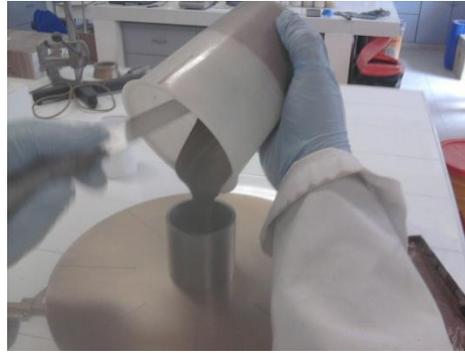


Imagen 13. Depósito de pasta en cilindro

- d) Se golpea el cilindro con el mango de la espátula, 3 veces por cada punto cardinal.
- e) Se enrasa el cilindro con la espátula.
- f) Se retira el cilindro y se deja la pasta esparcir, como se muestra en la imagen 14.



Imagen 14. Pasta extendida sobre la mesa de fluidez

- g) Se mide la expansión de la pasta con el vernier, como muestra la imagen 15.



Imagen 15. Medida de la expansión de la pasta

- h) Se registra la medida.

Para la determinación de la permanencia, el procedimiento es como sigue:

- a) Realizar todo lo expuesto para determinación de fluidez inicial.
- b) Etiquetar un envase sellable con el nombre de la muestra y la hora en que deberá ser medida.
- c) Repetir todos los pasos para la determinación de la fluidez cada 30 min.

Dentro de la realización de la serie de pruebas en pastas y sobre todo en aquellas realizadas con finos de arena, se observó que si las pruebas eran realizadas durante el día (en especial entre las 12:00 y las 15:00 horas), la fluidez aumentaba, atribuible que son las horas dentro de las cuales la temperatura suele ser mayor. Por esta razón, se consideró importante establecer un horario fijo para la realización de las pruebas de fluidez en pastas, con la finalidad de obtener una homogeneidad para fines de capacidad de comparación.

3.11 Preparación de Morteros

NMX-C-021-ONCCE-2004

Procedimiento

- a) El primer paso consiste en pesar todos los componentes de la mezcla (agua, arena, cemento y aditivo), después los componentes se depositan en la olla de la mezcladora HOBART (imagen 16).



Imagen 16. Mezcladora HOBART

b) Durante tres minutos se deja trabajando, cuidando que no se salga parte de la muestra, desplazada por las aspas de la mezcladora, al haber transcurrido los tres minutos el proceso de mezclado se detiene.

c) De inmediato se debe introducir el termómetro en la olla y cubrirla con una franela húmeda para evitar que la mezcla no pierda humedad a causa del reposo.

d) Transcurridos cinco minutos, el proceso de mezclado debe reanudarse por otros tres minutos, con lo cual la mezcla estará lista y se procede a realizar las pruebas siguientes.

3.12 Porcentaje de fluidez basado en norma ASTM C-230

Materiales:

-Cono metálico (69.8 mm de diámetro de base superior y 100 mm de base inferior), mostrado en la imagen 9.

-Mesa de fluidez (250 mm de diámetro), mostrado en la imagen 17.



Imagen 17. Mesa y molde para determinación de fluidez

-Vernier

-Enrasador (espátula)

-franela húmeda

-Mortero previamente preparado

Procedimiento:

a) Se debe poner una primera capa hasta la mitad del molde.

b) Se aplican 10 apisonadas en dirección al lado derecho y 10 en dirección al lado izquierdo alrededor de todo el diámetro de la pared de éste (un movimiento de arriba hacia abajo se considera como una apisonada).

c) Se le agrega una segunda capa sin importar que se exceda el límite del molde.

d) Se apisona nuevamente hasta dejar la mezcla casi al ras del molde y comenzar a enrasar con una espátula o un enrasador.

e) Enseguida se levanta el molde para dejar que caiga por gravedad la mezcla, se dan 10 golpeteos a la mesa y se mide el flujo libre.

3.13 Contenido de aire

Esta prueba determinará el volumen de aire en el mortero durante la operación de mezclado. Se basa en la determinación de la masa que ocupa un recipiente de 400 ml de un mortero elaborado en el laboratorio.

Materiales:

-Olla para la determinación del contenido de aire, como se muestra en la imagen 18.



Imagen 18. Olla para la determinación de contenido de aire

-Apisonador

-Enrasador

-Pera plástica

Procedimiento

a) Se deposita la mezcla hasta la mitad de la olla.

b) Se apisona.

c) Se deposita mezcla hasta llenar el volumen restante.

d) Se apisona.

e) Se enraza.

f) Se deben limpiar los bordes de la olla, para que la parte superior embone sin ninguna fuga.

g) Se coloca la parte superior de la olla.

h) Con la pera se inyecta agua por una válvula hasta que salga por la otra, dando ligeros golpes para sacar todo el aire.

i) Se cierran las válvulas.

j) Se bombea hasta que la aguja llegue a cero.

k) Se ejecuta la prueba.

l) Por último se registra la medida obtenida.

Estas dos últimas están muy relacionadas con la propiedad que resulta de mayor importancia en el campo de aplicación de los materiales cementicios, la resistencia a la compresión. Es por esto que resulta vital correlacionar los efectos de la fluidez y el contenido de aire con esta propiedad.

3.14 Elaboración de cubos de muestra

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm²) a una edad de 28 días se le designe con el símbolo f_c . Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas especímenes de mortero o de concreto. El proceso se describe a continuación.

Materiales:

-Mortero previamente producido

-Moldes de 50 mm x 50 mm

-Apisonador

-Enrasador

Procedimiento:

a) A los moldes (imagen 19) se les aplicará en sus caras interiores una capa delgada de aceite



Imagen 19. Molde para cubos de mortero

- b) después de preparado el mortero, hay que dejarlo reposar en la mezcladora por 90 segundos, sin cubrirla.
- c) Durante los últimos 15 segundos de este intervalo, rápidamente se debe raspar el mortero pegado en las paredes
- d) Remezclar por 15 segundos a velocidad lenta.
- e) Dentro de un tiempo transcurrido no mayor de 2 minutos y 30 segundos después de completar la mezcla original, se inicia el llenado de los moldes.
- f) colocando una capa de más o menos 25 mm (1") de espesor (aproximadamente la mitad del molde), en cada uno de los compartimentos, y se apisonan con 32 golpes que se aplicarán sobre la superficie, en 4 etapas de 8 golpes adyacentes cada una. Los golpes de cada etapa se darán siguiendo una dirección perpendicular a los de la anterior; la presión del compactador será tal, que asegure el llenado de los compartimentos. Se deben completar las cuatro etapas de compactación, en cada compartimento, antes de seguir con el siguiente.
- g) Una vez terminada la etapa de la primera capa en todos los compartimentos, se llenan con una segunda capa y se procede como en la primera.

h) Al finalizar la compactación, checar que las caras superiores de los cubos, queden un poco más altas que el borde superior de los moldes.

i) La superficie de los cubos debe ser alisada con la parte plana del enrasador, retirando el mortero sobrante, con un movimiento de vaivén.

j) terminada la operación de llenado, el conjunto de molde y placa, se colocará en la cámara húmeda durante 20 o 24 horas, con la cara superior expuesta al aire húmedo, pero protegidos contra la caída de gotas. Si los cubos se retiran del molde antes de las 24 horas, se dejarán en la cámara húmeda hasta completar este tiempo. Los cubos que no se van a ensayar a las 24 horas, se sumergen en agua-cal saturada dentro del tanque de almacenamiento, construido con material no corrosivo.

3.15 Prueba de resistencia a la compresión

Materiales:

-Cubos previamente elaborados

-Maquina de compresión

Procedimiento:

a) los cubos que van a ser ensayados a las 24 horas, se sacan de la cámara húmeda cubriéndolos con un paño húmedo, mientras se van pasando a la máquina.

b) Para los otros cubos, deben sacarse del tanque de almacenamiento uno a uno y probarse inmediatamente.

c) Se debe comprobar por medio de una regla, que las caras están perfectamente planas.

d) Se Coloca cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo (imagen 20), debajo del centro de la parte superior de la máquina.



Imagen 20. Máquina de resistencia a la compresión

e) Se corre la prueba.

f) Se registra el valor obtenido.

3.16 Microscopía Electrónica de Transmisión (MET)

Para el funcionamiento de este microscopio se utiliza un haz de electrones, obtenido desde una lámpara especial de tungsteno. El tubo tiene vacío en su interior, para impedir que nada dificulte el paso de los electrones. Un fallo en este vacío ocasiona la aparición de cuerpos extraños en el visor. Luego de ser enfocados por las lentes electromagnéticas, los electrones inciden sobre la muestra, formando la imagen que se obtiene en testigo y negro, la cual puede proyectarse sobre una pantalla especial o película fotográfica. El MET examina partes grandes de la muestra.

En las imágenes de contraste por medio de MET se obtienen imágenes de campo claro o campo oscuro seleccionando mediante diafragmas o aperturas, el haz

directo o los haces dispersados, respectivamente. Dentro del contraste de amplitud existen dos tipos principales: contraste debido al grosor o masa de la muestra y el contraste debido a la difracción de los electrones. En el primer caso el contraste se produce debido a la dispersión incoherente y elástica de los electrones al atravesar la muestra y depende fuertemente del número atómico y del grosor de la misma. Este contraste es el más importante en el caso de muestras no cristalinas, como polímeros, y es el contraste crítico de las muestras biológicas. El contraste de difracción se produce debido a la dispersión coherente y elástica de los electrones al atravesar la muestra y está controlado por la estructura cristalina y la orientación de la misma. Se da cuando la dispersión de los electrones se produce a un ángulo (de Bragg) determinado y por tanto sólo aparece en muestras cristalinas.

El microscopio trabaja dentro del de la óptica electrónica. El nombre que resulta justificado por la estrecha analogía existente entre su formulación teórica y la de la óptica clásica. No hay posibilidad de estudiar la óptica electrónica sin enfrentarse con una de las consecuencias aparentemente paradójicas de la física teórica moderna: la dualidad onda-corpúsculo, cuando los electrones inciden como paquetes de ondas sobre los átomos de una muestra, las colisiones pueden representarse, y a veces con gran precisión como colisiones del tipo bola de billar. Sin embargo, Si la muestra contiene un cristal en una cierta orientación, los electrones deberán representarse por ondas para dar cuenta de las reflexiones.

El sistema óptico-electrónico del microscopio electrónico de transmisión (imagen) está constituido por las siguientes partes:

1. Cañón de electrones
2. Sistema de lentes
3. Pantalla fluorescente



Imagen 21. Microscopio electrónico de barrido

Estos componentes están ensamblados en una columna vertical la cual se encuentra en alto vacío.

El cañón de electrones, es la fuente emisora del haz de electrones. Se encuentra ubicado en la parte superior de la columna. Está constituido por un filamento (cátodo), un cilindro con una apertura central, llamado cilindro de Wehnelt que rodea al filamento y tiene un potencial ligeramente más negativo que éste. El ánodo se encuentra por debajo del cilindro de Wehnelt.

El filamento es calentado por el pasaje de corriente (alrededor de 2800 K). Los electrones emitidos termoiónicamente por el cátodo son acelerados hacia el ánodo, pasan por la apertura circular central de éste y un haz de alta energía es emitido hacia la columna del microscopio.

El sistema de lentes está formado por lentes condensadores objetivo, intermedia y proyectora. Las lentes condensadoras, en los microscopios, más modernos son dos. La primera, proyecta la imagen punto de entrecruzamiento demagnificada (spot size), mientras que la segunda controla su diámetro y el

ángulo de convergencia en que incide sobre la muestra. limita al haz que incide sobre la muestra.

La lente objetivo forma la primera imagen, localizada debajo del espécimen. Es considerada el componente más importante del microscopio electrónico. Cualquier defecto en ésta, será magnificado y transmitido al resto del sistema óptico. Por lo tanto, de ella dependen, en gran medida, la resolución final y la corrección de las aberraciones.

Las lentes intermedia y proyectora son las encargadas de amplificar la imagen dada por la lente objetivo y proyectarla sobre la pantalla fluorescente.

La pantalla del microscopio electrónico de transmisión está recubierta por una pintura de fluoruros de Zn y Cd, que fluoresce cuando es bombardeada por electrones, generando una imagen en el rango de las longitudes de onda del visible

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DE ARENAS Y CEMENTOS

La etapa de caracterización resultó de vital importancia, dado que basándose en esta se pudo determinar la representatividad de los materiales a usar. La primera parte de la etapa de caracterización estuvo completamente enfocada a las arenas. Las técnicas usadas para este fin, fueron la granulometría y el uso de espectroscopia de rayos X.

Para este estudio se recabaron muestras de agregados finos usados por las principales empresas concreteras del país (arenas) y que estos provinieran de las plantas que para este proyecto resultaran más representativos (principal, aunque no necesariamente, buen volumen de distribución a la capital del país), esto dado que el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2011) ha reportado que más del 50% del volumen total de construcción en el país, se concentra en la capital.

Las muestras obtenidas fueron las que se muestran en la tabla 1.

Tabla 10. Lista de arenas caracterizadas

TIPO	ORIGEN
Arena 1	Dolores Hidalgo
Arena 2	Irapuato
Arena 3	Irapuato
Arena 4	San Vicente
Arena 5	Huixquilucan
Arena 6	Veracruz
Arena 7	Veracruz
Arena 8	Veracruz
Arena 9	Coatzacoalcos
Arena 10	Coatzacoalcos

De lo anterior, podemos resumir los resultados como lo muestra la tabla 2.

Tabla 11. Arenas caracterizadas y minerales presentes

TIPO	ORIGEN	MINERALES PRESENTES
Arena 1	Dores Hidalgo	Albita, Anortita, Cristobalita, Cuarzo, Montmorillonita.
Arena 2	Irapuato	Albita, Anortita.
Arena 3	Irapuato	Albita, Anortita.
Arena 4	San Vicente	Albita, anortita, cristobalita.
Arena 5	Huixquilucan	Albita, Anortita.
Arena 6	Veracruz	Albita, Anortita.
Arena 7		Anortita, Margarita.
Arena 8	Veracruz	Albita, Anortita.
Arena 9	Coatzacoalcos	Cuarzo.
Arena 10		Anortita, Montmorillonita, Moscovita, Margarita, Calcita.

La arena constituye de hecho la mayor parte del porcentaje en peso de las mezclas cementicias. Dicho porcentaje usualmente supera el 60% del peso en la mezcla fraguada y endurecida. La adecuación de una arena para la fabricación de una mezcla cementicia debe cumplir un conjunto de requisitos usualmente recogidos en las normas como la EHE, el Eurocódigo 2 o las normas ASCE/SEI. Dichos requisitos se refieren normalmente a la composición química, la granulometría, los coeficientes de forma y el tamaño.

En la tabla 3 se pueden ver más a detalle los minerales presentes en las arenas caracterizadas.

Tabla 12. Minerales presentes en las arenas

MINERAL	FORMULA QUÍMICA	GRUPO	SUBGRUPO	TIPO	S.CRISTALINO
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Silicatos	Tectosilicatos	Fesdelpatos	Triclinico
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Silicatos	Tectosilicatos	Fesdelpatos	Triclinico
Calcita	CaCO_3	Carbonatos	Anhidros		Romboédrico
Cristobalita	SiO_2	Silicatos	Tectosilicatos		Cubica
Cuarzo	SiO_2	Silicatos	Tectosilicatos		Trigonal
Montmorillonita	$(\text{Al}_{1,67}\text{Mg}_{0,33})[(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ $\text{Na}_{0,33}(\text{H}_2\text{O})_n$	Silicatos	Filosilicatos	Arcillas	Monoclinico
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	Silicatos	Filosilicatos	Micas	Monoclinico
Margarita	$\text{CaAl}_2(\text{Al}_2\text{Si}_2)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Silicatos	Filosilicatos	Micas	Monoclinico

Recapitulando y recordando la perspectiva general de la industria de la construcción y muchas veces en base a norma, se acostumbra usar la arena limpia porque en general cualquier material extraño modifica las propiedades del concreto.

Una práctica muy conocida y usada, para tener una idea sobre la calidad de la arena es la de frotarla entre las manos, ya que deja residuos de barro o tierra. En estos casos se suele lavar hasta que se obtiene un flujo claro de agua.

De este estudio se pudo obtener información de forma científica y no empírica de la composición de las muestras de arena obtenidas, para la correcta selección de la que sería el objeto de estudio.

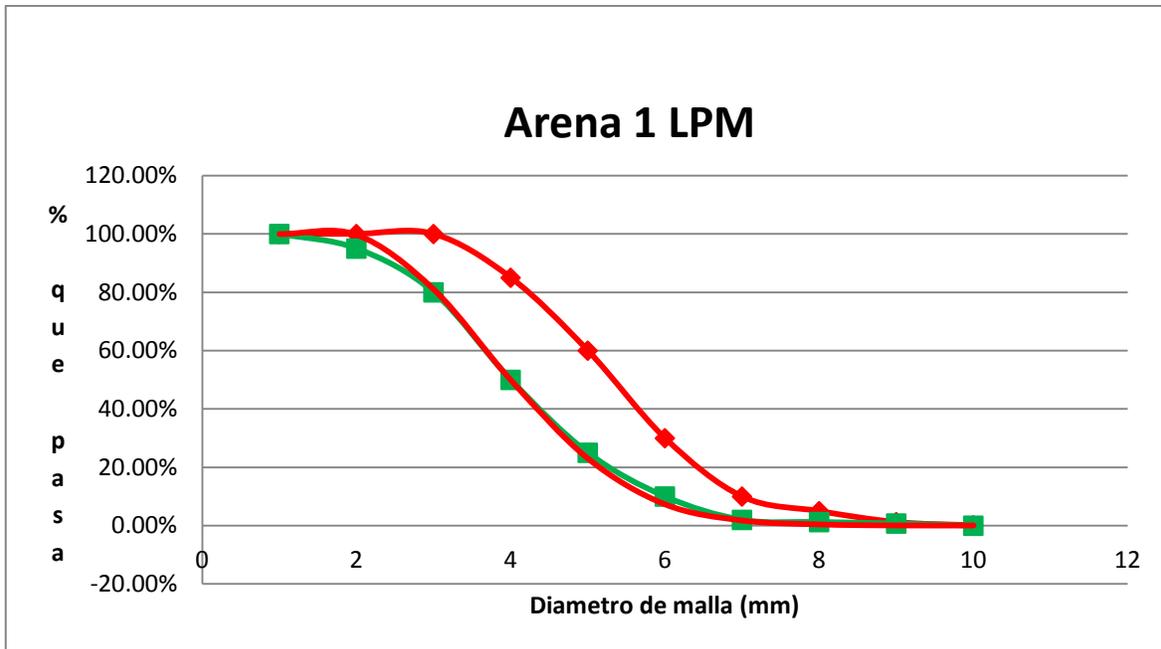
Dado que el objetivo de esta etapa era el de encontrar arenas que contuvieran arcillas, se determinó que dos de las muestras disponible contenían arcilla. Estas arenas fueron: arena 10 y la arena de rio que es usada como agregado fino de referencia en las pruebas realizadas en el laboratorio de prueba de materiales (LPM) en Sika mexicana (1).

De estas dos arenas se pudo determinar, basándose en el estudio granulométrico que la arena natural de 10, tiene alrededor de 6% de material que pasa la malla número 200. Un número muy superior, si se compara con el 1.7% de la arena de río del laboratorio de prueba de materiales.

Una de las aportaciones innovadoras de este proyecto (como más adelante se detallará) fue la de realizar un barrido con sustancias que se sabía podían tener características inhibitorias de los efectos negativos de las arcillas en las mezclas cementicias. Así, se necesitaba obtener una buena cantidad de material que pasara la malla 200. Lo más lógico sería haber usado la arena natural de Holcim, sin embargo se contaba con tan solo un aproximado de 200 Kg de este material, lo que deja disponible sólo 12 Kg de material que pasa la malla 200. Contrario a esto, de la arena 1 del LPM se tenía una gran cantidad de material disponible (del orden de toneladas), dado que como ya se mencionó antes, esta arena se usa como material de referencia para todas las pruebas que ahí se realizan.

Por la presencia de la arcilla Montmorillonita, por su disponibilidad y porque se sabe que una gran cantidad de arena obtenida de la misma zona es usada en construcciones de la ciudad de México, fue elegida la arena del LPM. Cabe mencionar que durante el transcurso del proyecto el lote que se usó al momento de realizar el barrido en pastas de fino, como ya se mencionó, contaba tan sólo con un 1.7% de material que pasa la malla 200, cifra contrastante con el 3.7% que arrojó el análisis granulométrico del lote que se usó al momento de realizar el barrido de morteros. Para conservar la comparativa correspondiente, sólo se hizo el ajuste de proporcionamiento como más adelante se explicará.

Ahora se presentan tanto el estudio granulométrico (gráfica 1) como el espectro de Rayos X (imagen 22) de la 1, del LPM.



Gráfica 2. granulometría de la arena 1, LPM

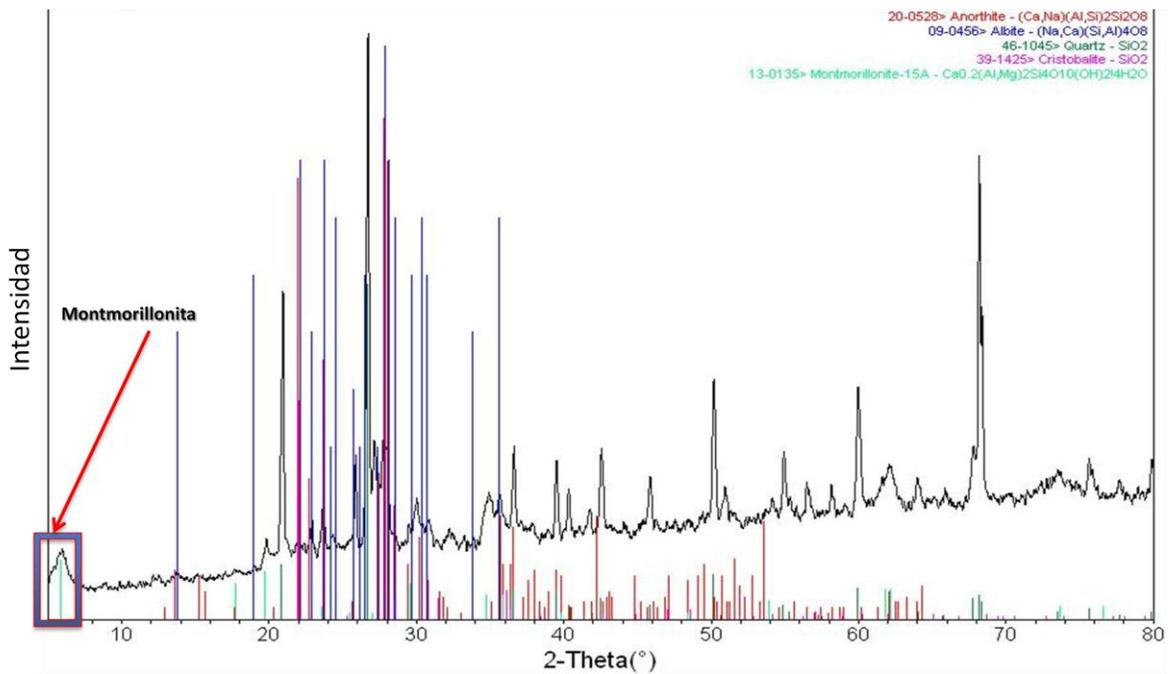


Imagen 22. Espectro de rayos X Arena 1 LPM

Los datos aportados por la imagen 15, indican un alto grado de cristalinidad para la Cristobalita y Albite que concuerdan con los del difractograma

del estándar, Así mismo se observa un pico intenso en 6° dentro de 2-Theta observándose la cristalinidad correspondiente a la Montmorillonita, material expansivo y objeto de estudio de este trabajo.

Los resultados, mostrados en la imagen 15, indican que el primer pico correspondiente a la Montmorillonita, con intensidad visible en 6° , se asigna para d_{001} ; con un valor de 12.30 Å típico de montmorillonitas que presentan una capa molecular de agua adsorbida entre sus láminas.

La cristobalita se identificó con los picos de reflexión d_{101} (4.044 Å), d_{111} (3.121 Å), d_{102} (2.55 Å) y d_{112} (2.481 Å) y para el cuarzo con las reflexiones en d_{100} (4.296 Å), d_{101} (3.346 Å), d_{110} (2.481 Å), d_{112} (1.819 Å), d_{211} (1.544 Å), que corresponden a los estándares. Dichos resultados son consistentes por los ya publicados anteriormente (Vargas-Rodríguez, 2007).

Entre las aplicaciones industriales de las montmorillonitas se puede mencionar su uso como decolorantes de aceites (previamente tratadas con ácidos minerales), como adsorbentes de pesticidas o metales pesados en aguas residuales (Arvanitopyannis et al., 1989) y como catalizadores heterogéneos para promover reacciones químicas (Adams, 1987; Ballatine, 1992; Chitnis y Sharma, 1997; Salmón et al., 1997). Las propiedades catalíticas de las montmorillonitas se incrementan con los tratamientos ácidos y varían dependiendo de la fuerza ácida, de los cambios en la estructura del aluminosilicato y de las propiedades superficiales (Rhodes y Brown, 1992; Breen et al., 1995; Vargas-Rodríguez et. al., 2007).

Habiendo realizado la etapa de caracterización de las arenas se procedió a la etapa de caracterización de los cementos. Para esto, al igual que en las arenas, se hizo uso de la espectroscopia de rayos X (imagen 23), para conocer la composición mineralógica y poder establecer una correlación entre los efectos obtenidos y los componentes de los materiales utilizados.

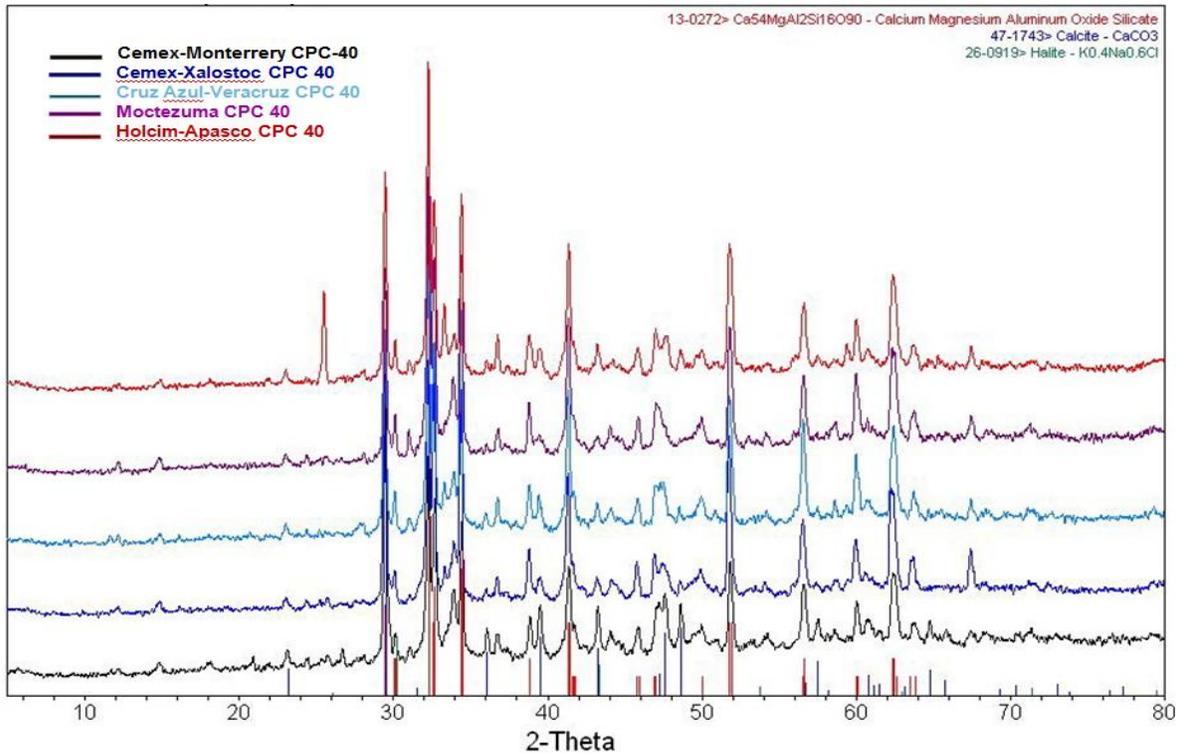


Imagen 23. Espectros DRX para cementos

Por cuestiones similares a las expuestas en el caso de la selección de la arena, el cemento elegido para el estudio fue el CEMEX Monterrey CPC-40. Su composición mineralógica es muy similar a la de los demás cementos estudiados, la ventaja de usar este material es que se contó con muy buena disponibilidad, en cuanto a cantidad, para poder cubrir todas las pruebas necesarias, tanto de pastas de cemento, como de morteros.

4.2 Pastas de finos de arena

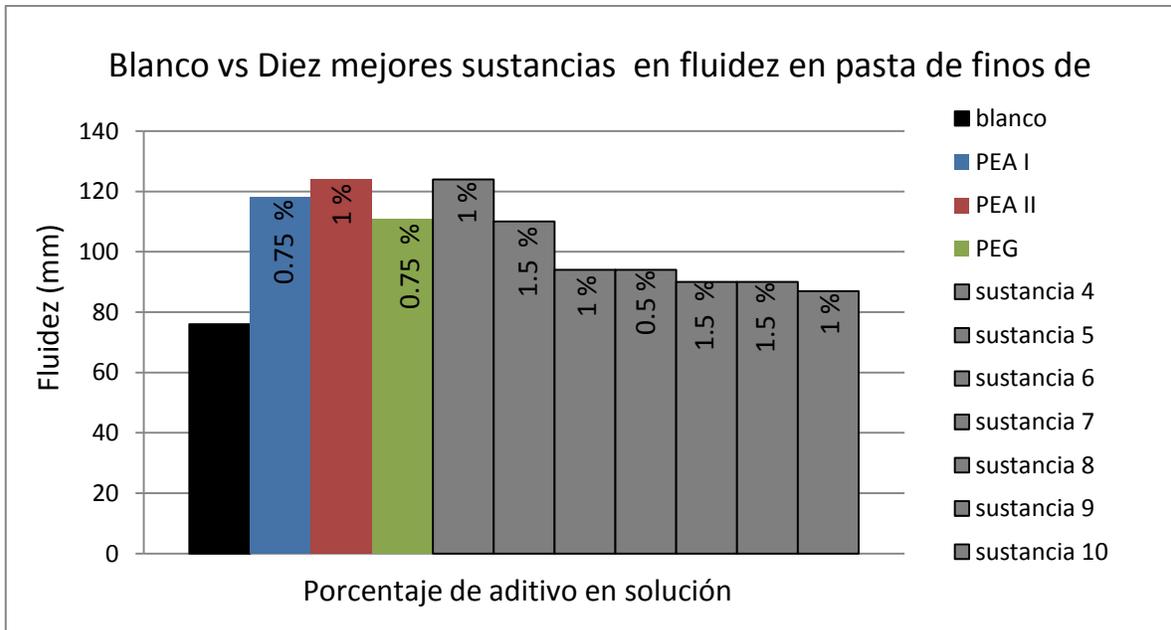
La primera etapa del estudio de la interacciones entre los constituyentes de las mezclas cementicias fue la realizada con finos de arena y las sustancias que se creía podían resultar inhibidores de los efectos negativos de las arcillas. Se probaron un total de veintidós sustancias, esto basándose en la experiencia obtenida por parte de la mecánica de suelos, en cuanto a estabilizadores de suelo.

Dado que la finalidad general del proyecto es la de observar como intervienen en el desarrollo de las reacciones químicas de hidratación todos los componentes de la mezcla cementicia, se decidió que solo se considerarían las tres sustancias con mejores resultados de las veintidós disponibles. Para mayor facilidad de comparativa, más adelante se muestran las 10 sustancias con mejor desempeño, en cuanto a fluidez en la pasta de arena.

La principal propiedad a considerar, tanto como en las pastas de arena y cemento como en los morteros fue la fluidez. Se establece que si una mezcla fluye más que otra, con la misma proporción de componentes es debido a que existe mayor cantidad de agua libre, misma que el caso de las mezclas en las que si hay cemento, permite que dicha agua sea asimilada por la mezcla de forma que las reacciones de hidratación se lleven a cabo de forma correcta, para que las propiedades finales obtenidas sean aquellas para las cuales se realizó el diseño original.

Dadas las pequeñas proporciones (en cuanto a cantidad de material requerido por mezcla), limitado principalmente por la dificultad de obtener la cantidad de finos necesaria para las mezclas, las dosificaciones fueron hechas de la forma más representativa posible. Para esto los cálculos de la dosificación de las sustancias inhibidoras fueron realizados tomando en cuenta sólo la proporción de material activo de las sustancias. Se hizo uso de una termobalanza que determina la proporción de material sólido.

En la gráfica 2 se muestran los resultados de las diez sustancias inhibidoras que con respecto a la muestra “testigo” tuvieron el mejor desempeño en cuanto aumento de fluidez.



Gráfica 3. testigo vs mejores sustancias en fluidez pasta de finos de arena

Otra consideración de importancia relevante en esta etapa de estudio es la llamada propiedad de permanencia. Esta propiedad se refiere a la capacidad de la mezcla para mantener su trabajabilidad (otra forma de verlo es que mantenga la fluidez deseada), por un periodo de tiempo determinado y conveniente, dependiente principalmente de las condiciones de cada obra.

Todas las sustancias que fueron probadas y que desde un principio, se presumía podían resultar benéficas en la inhibición de los efectos negativos de las arcillas, basándose en los reportes existentes de la estabilización de suelos y extrapolando dichos reportes a las mezclas cementicias, fueron obtenidas de proveedores de la industria química. Para el caso de las sustancias finalistas, en adelante, se referirá a ellas en base a su componente en mayor proporción, a los siete restantes, para no distraer de la finalidad que es la comparativa, se referirá a ellos tan sólo con una simple numeración.

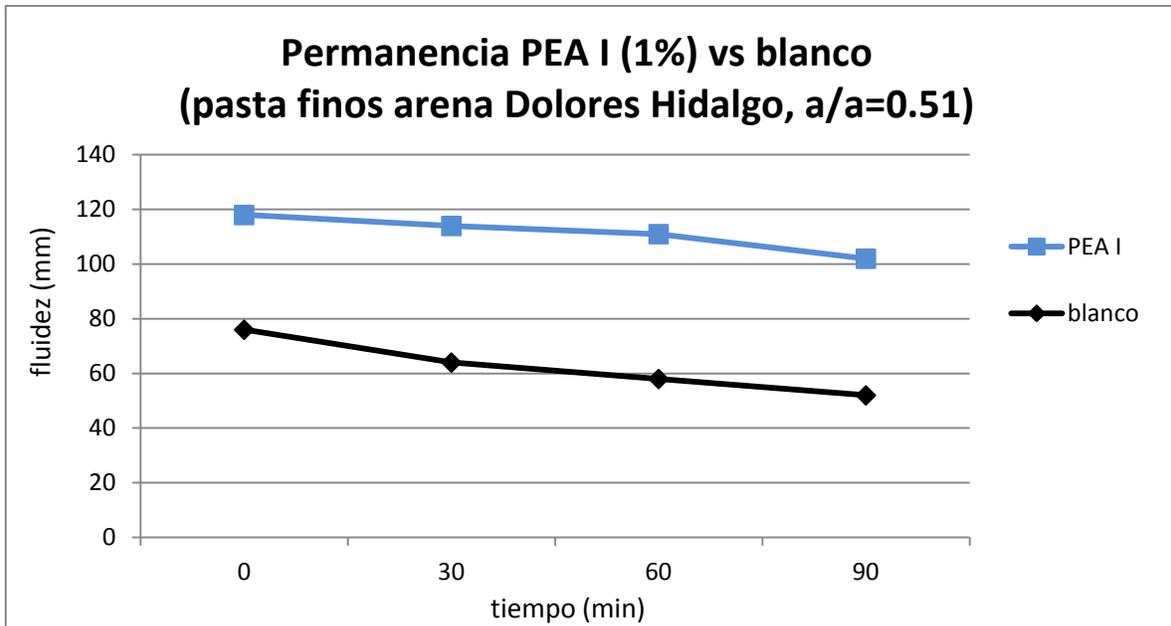
Se muestra en primer lugar a la muestra testigo en color negro, las tres sustancias inhibidoras elegidas a diferentes colores y las siete restantes en gris, ordenadas de izquierda a derecha de forma ascendente en su numeración.

Una de las primeras cosas que saltan a la vista al analizar la gráfica 2 es que la sustancia 4 aporta mayor fluidez que la sustancia inhibidora polietilen glicol (PEG). Las razones por las cuales se eligió al polietilen glicol sobre la sustancia 4, fue que la composición de la sustancia 4 era similar a los poliéter amina I y II (PEA I y II). Por otro lado se tenía más facilidad de obtener la cantidad necesaria de PEG para la etapa de pruebas en morteros.

En la gráfica 2 se presentan las diez sustancias con mejor desempeño en cuanto a fluidez. Esta grafica aporta información de mucha utilidad en varios aspectos. El primero y tal vez mas importante fue que resultó de gran ayuda para la selección de las sustancias que serían utilizadas, en primera instancia para ser probadas con el cemento a utilizar y luego, para realizar el estudio sobre mezclas de mortero. De esta etapa del estudio, se determinó que las mejores proporciones de aditivo con respecto a la cantidad de finos de arena, se encuentra en el rango que va desde 0.75% hasta 1%. Obteniéndose así una muy clara influencia de las sustancias sobre la fluidez de la mezcla. Recordando, el aumento de fluidez es un indicador de inhibición de las arcillas. Esto dado que si la pasta de finos de arena fluye mas, quiere decir que existe más agua libre, es decir no absorbida por la estructura laminar característica de las arcillas y por lo cual también son conocidos como materiales expansivos.

Habiendo analizado la gráfica de las sustancias que mejor efecto tuvieron sobre la inhibición de las arcillas, toca el turno a los resultados de las permanencias de la fluidez, propiedad igualmente importante, dado que en la aplicación en campo, en general se requiere que la fluidez se mantenga dentro de un rango aceptable, por un periodo de tiempo que varía según las condiciones de la obra y que para fines de estudio en este proyecto, las medidas se tomaron hasta una hora y media, cada media hora.

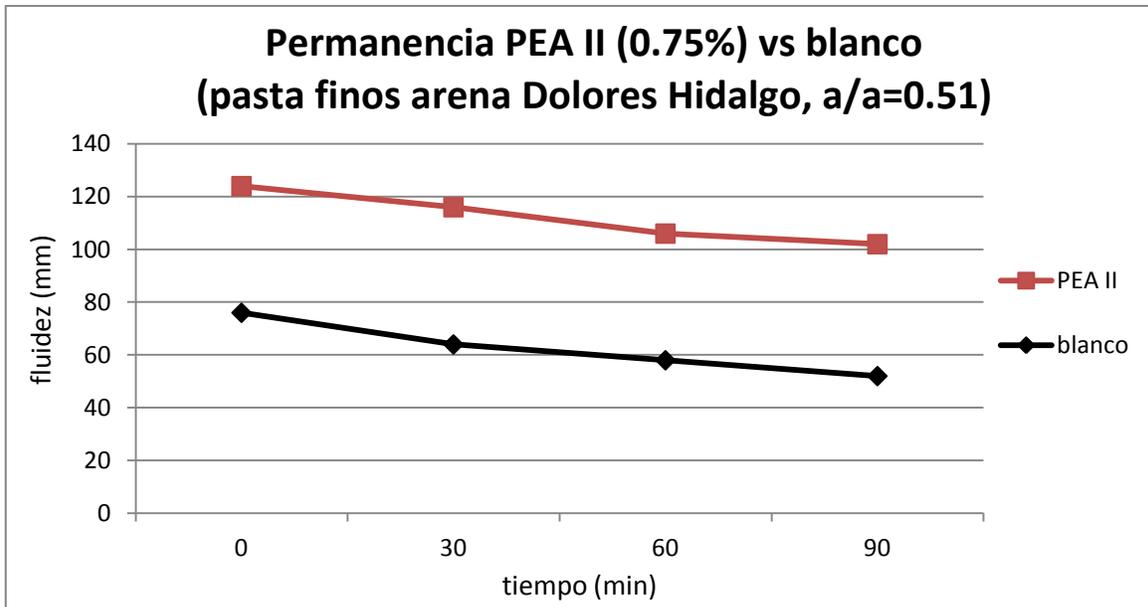
Dicho lo anterior, se muestra la grafica 3 para observar en primera instancia, los efectos de la PEA I sobre la pasta de finos de arena.



Gráfica 4. Permanencia PEA I a 1.0% pasta de finos de arena

En la gráfica 3 se presentan las permanencias de las pastas de finos de arena con PEA I y sin ningún tipo de sustancia inhibidora de arcillas (testigo). A primera vista, es muy notorio como la sustancia inhibidora PEA I aumentó considerablemente la fluidez a lo largo de toda la hora y media. La permanencia es mejorada por la PEA I en un promedio de 80%, lo que quiere decir que la mezcla mantiene sus propiedades de fluidez de manera más que aceptable, a lo largo del tiempo establecido como referencia para poder considerarse como trabajable. Aunado a esto, con la sustancia PEA I la fluidez disminuyo en promedio a una tasa de 7.6%, contra el 15.3% de la pasta de finos de arena sin ninguna sustancia. Es decir, la sustancia PEA I no sólo provee de mejor fluidez sino de mayor permanencia.

La siguiente sustancia inhibidora a comparar contra el testigo es la PEA II, cuyos resultados se muestran en la grafica 4.

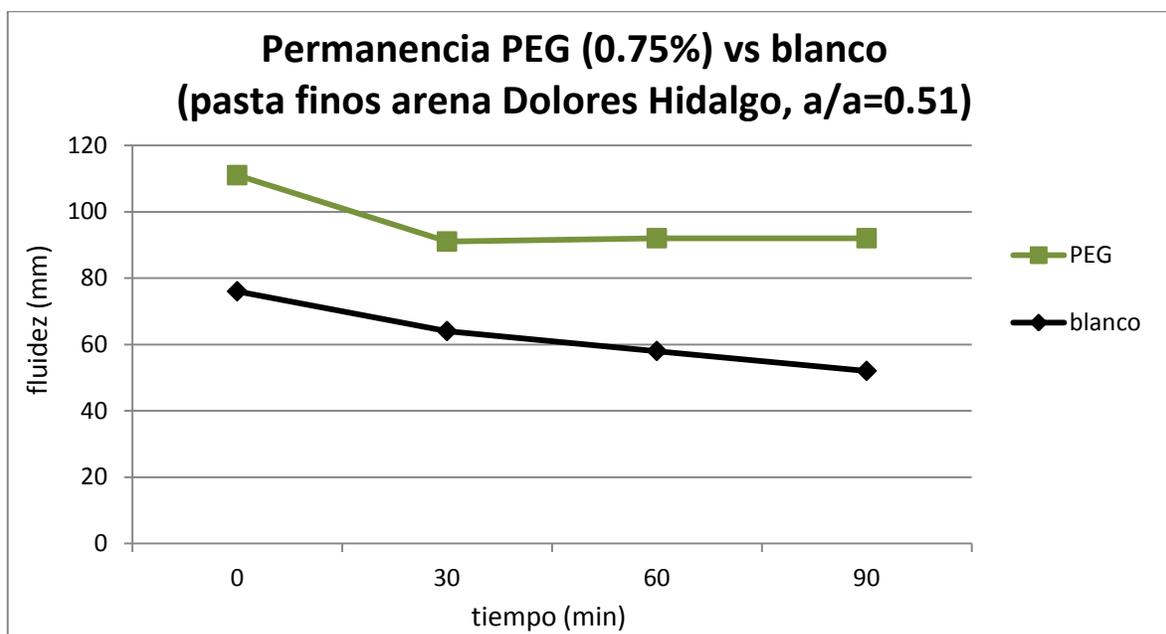


Gráfica 5. Permanencia PEA II a 0.75% pasta de finos de arena

En la gráfica 4 se presentan ahora las permanencias de las pastas de finos de arena con PEA II y la mezcla testigo. Se puede observar claramente como la sustancia inhibidora PEA II aumentó en gran medida la fluidez a lo largo del tiempo establecido. La permanencia es mejorada por la PEA II en un promedio de 81%, superando sólo en 1% a la PEA I y de igual manera se comprueba que la sustancia es una buena opción para que la mezcla mantenga sus propiedades de fluidez según se requiera, a lo largo de la hora y media establecido como el tiempo de referencia para poder considerarse como trabajable. Aunado a esto, con la sustancia PEA II la fluidez disminuyó en promedio a una tasa de 13.5%. Si se compara con la tasa promedio de disminución de la fluidez del testigo (15.3%), resulta levemente superior en desempeño, pues se encuentra por debajo con tan sólo 1.8%, hecho que se compensa con el aumento de la fluidez. Ahora bien, si se compara la PEA II contra la PEA I, se pueden observar una variación de discordancias que en determinado momento, llevarían a elegir a la PEA I por sobre la PEA II. En primer lugar, está el hecho de que la tasa promedio de disminución de la fluidez de la PEA I es inferior en un 5.9% y en segundo lugar y tal vez mas importante aún, que los mejores resultados obtenidos fueron con un

0.75% de aditivo en solución para la PEA I y 1% para la PEA II, un consumo superior en aproximadamente un 30%.

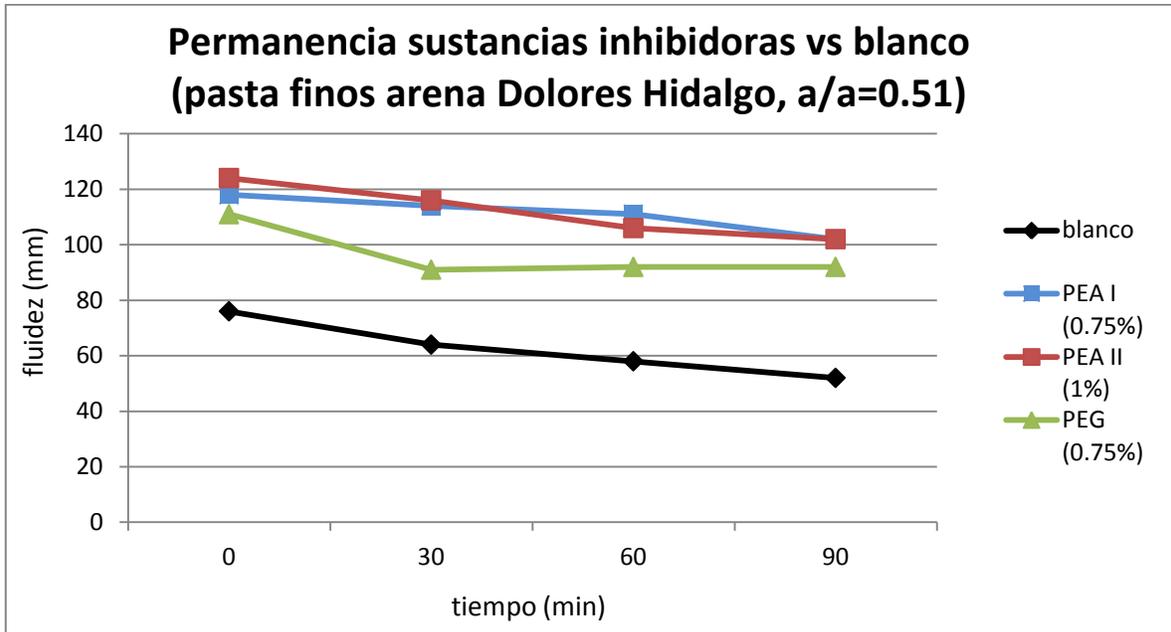
Para terminar de comparar lo respectivo a la fluidez en pastas de finos de arena se presenta ahora, en la gráfica 5 los resultados para la sustancia inhibidora PEG.



Gráfica 6. Permanencia PEG a 0.75% pasta de finos de arena

Se puede observar claramente como la sustancia inhibidora PEG aumentó en gran medida la fluidez a lo largo del tiempo establecido. La permanencia es mejorada por la PEG en un promedio de 51.3%, muy por debajo de las comparativas anteriores, pero aún muy superior a la muestra sin ningún tipo de adición de sustancia inhibidora. En cuanto a la tasa promedio de disminución de la fluidez con respecto al tiempo, se obtuvo un 16.3%, la más alta de todas, incluso más alta que la del testigo (15.3%). Si bien la tasa promedio de disminución de la fluidez, fue muy alta, se puede ver compensado por el hecho de que la proporción de aditivo en solución fue de 0.75% en adición a que si bien no representó un aumento de fluidez tan alto como en los casos de la PEA I y II, siguió siendo bastante considerable, para el caso de estudio que ocupa a este proyecto.

A manera de resumen y para cuestiones de visualización y de una mejor comparación de los resultados, se muestran ahora (gráfica 6) las permanencias de las tres sustancias inhibidoras y de la muestra sin ningún tipo de sustancia inhibidora. Así mismo, se presenta una tabla que resume los resultados de la tasa promedio de disminución de la fluidez (TPDF) y del porcentaje promedio de mejora de la permanencia (PPMP).



Gráfica 7. Permanencia de las sustancias inhibidoras vs testigo para pasta de finos de arena

Tabla 13. Datos adicionales de la serie de pruebas de permanencia preliminar

SUSTANCIA	TPDF (%)	PPMP (%)	cantidad de sustancia en solución (%)
PEA I	7.6	80	0.75
PEA II	13.5	81	1
PEG	16.3	51.3	0.75

En resumen, como lo muestran la grafica 6 y la tabla 4 se puede decir que tanto la sustancia PEA I como la sustancia PEA II tuvieron muy buen desempeño en cuanto a aumento de la fluidez y mejora de la permanencia y aunque en el caso de la sustancia PEG, no se obtiene una mejora tan significativa, no es de ignorar las mejoras aportadas por esta sustancia y que para fines de estudio, resulta importante.

Tras haber realizado las pruebas de fluidez y permanencia en pasta de finos de arena, resultó importante profundizar el estudio en esta etapa, para ello, se consideraron dos pruebas: ángulo de contacto y microscopía electrónica de transmisión.

4.3 Microscopía Electrónica de Transmisión

Gracias a que el caso se presenta para el análisis de las muestras tratadas en este estudio, y que el material (arcilla) es en sí cristalino, el contraste de difracción brindó las bases para el correcto análisis de las imágenes obtenidas por medio de esta técnica.

Así, fue como se comprobó como la cristalinidad de la arcilla producía un tono mas oscuro en la imagen y el polímero (inhibidor) aprecia como una zona menos oscura.

Se ha reportado (Furukawa et.al., 2009), que mediante el uso de TEM, Se pueden diferenciar las fases cuando están involucrados como principales materiales, una arcilla y un polímero, siendo las partes claras, el polímero y las oscuras la arcilla, como se muestra en la imagen 24.

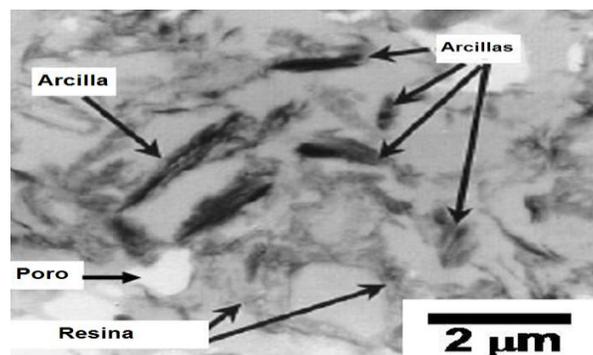


Imagen 24. TEM - reporte de Furukawa et. al.

Si comparamos la imagen reportada por Furukawa con la de la imagen 25 la cual representa la arcilla en cuestión sin ningún tipo de adición, vemos que la información es consistente, puesto que hay una gran concentración de arcilla pura, representada por zonas muy oscuras.

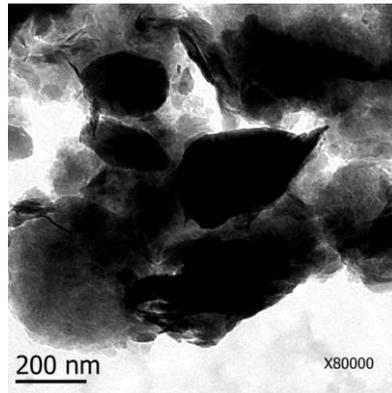


Imagen 25. TEM - pasta de muestra testigo

Ahora, en primer lugar, se presentan la imagen 26, un concentrado de las imágenes más representativas, obtenidas para la sustancia PEA I.

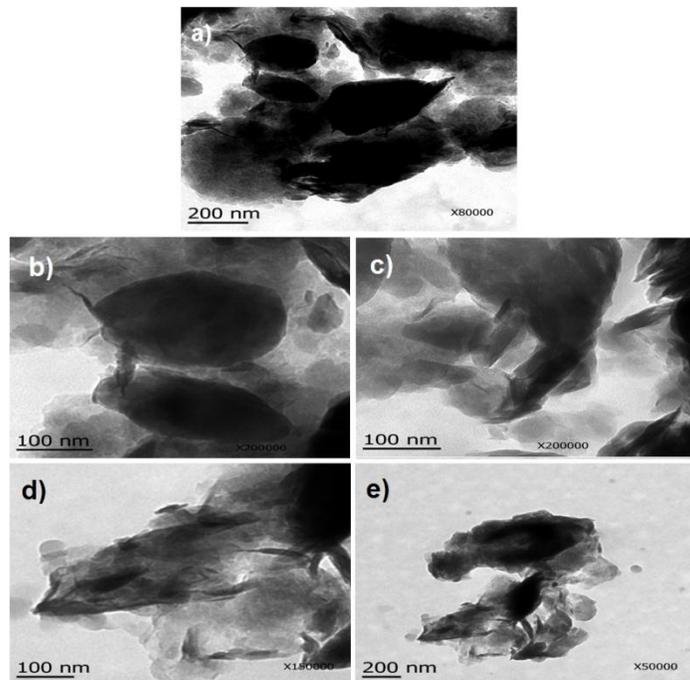


Imagen 26. TEM - PEA I. a) arcilla sin polímero a X80000; b) arcilla con PEA I a X200000; c) arcilla con PEA I a X200000; d) arcilla con PEA I a 150000; e) arcilla con PEA I a X50000.

La imagen 26-a, representa la muestra testigo, que como se mencionó anteriormente, muestra las zonas oscuras como concentración de arcillas. En las imágenes 26-b y 26-c se puede ver como la sustancia comienza a interactuar con la arcilla y se comienza a ver el efecto de encapsulamiento que se busca. La imagen 19-d es una ampliación de la 26-e, esto para mostrar que para el caso de la sustancia PEA I, la distribución de la misma alrededor de la arcilla, pareciera ser poco uniforme, concentrándose en zona específicas, o bien cubriendo de forma pobre a las zonas más oscuras que representan la arcilla.

Los resultados de MET, para la sustancia PEA II, se muestran a continuación, en la imagen 27, que es un concentrado de imágenes para el estudio de esta sustancia.

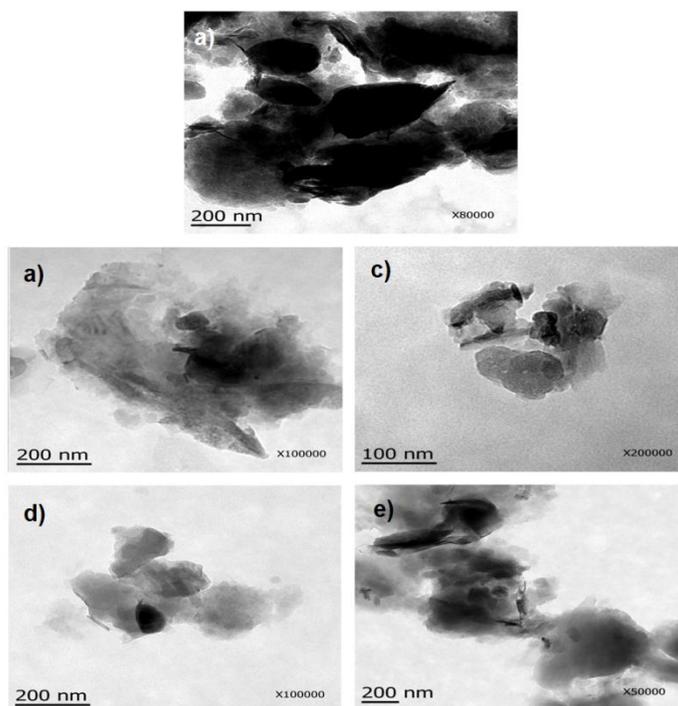


Imagen 27. TEM - PEA II. a) arcilla sin polímero a X80000; b) arcilla con PEA II a X100000; c) arcilla con PEA II a X200000; d) arcilla con PEA II a 100000; e) arcilla con PEA II a X50000.

Al igual que el caso anterior, la imagen 27-a, es la muestra testigo. La imagen 27-b, muestra un ejemplo muy ilustrativo de cómo la arcilla está de forma completa

cubierta por la sustancia inhibidora. La imagen 27-c muestra de cierto modo lo mismo, pero de una forma más azarosa, con arcillas mas distribuida, pero también, aceptablemente encapsulada. La 27-d muestra una zona muy concentrada de arcilla, cubierta por una gran cantidad de sustancia inhibidora, lo cual puede hacer pensar que dicha cantidad de sustancia puede estar lista para tener el efecto encapsulador con alguna otra zona arcillosa. La imagen 27-e es un excelente ejemplo del encapsulamiento al igual que la 27-b, muestra como dicho efecto está en realidad sucediendo, incluso mejor que la sustancia mostrada anteriormente.

En concordancia con los análisis del estudio de MET, se presentan ahora, los resultados de la prueba de ángulo de contacto

4.4 Ángulo de contacto

La importancia de esta prueba radica en la capacidad de definir la afinidad de cada muestra por el agua, según la interacción entre el inhibidor y la arcilla. Así, se puede determinar si la muestra (pastilla de finos de arena con contenido de inhibidor y sin contenido de inhibidor) presenta un comportamiento más hidrófobo o viceversa, una gran afinidad por el agua.

La imagen 28, muestra los resultados de ángulo de contacto para la muestra testigo, así como las tres sustancias.

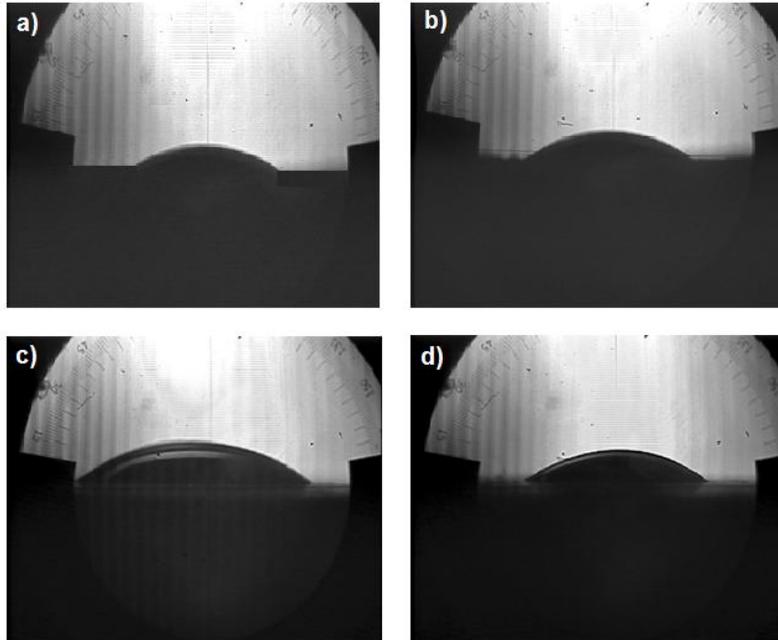


Imagen 28. Resultados de ángulo de contacto. a) muestra de finos de arena sin sustancia inhibidora; b) muestra de finos de arena con sustancia PEA I; c) muestra de finos de arena con sustancia PEA II; d) muestra de finos de arena con sustancia PEG.

La imagen 28-a, es la muestra testigo, la cual arrojó como resultado un ángulo de contacto de 10.5° , seguido (en orden ascendente) por la sustancia PEG (28-d), con 16.0° , la PEA I (28-b), con 18.6° y por último la PEA II (28-c), con 30.4° .

Mediante lo obtenido con esta prueba y haciendo una comparativa con los resultados de las muestras analizadas por MET, se puede establecer una correlación que al mismo tiempo crea una tendencia consistente a lo largo de todo el estudio (corroborada mas adelante con las pruebas de fluidez y permanencia).

En primer lugar, por los resultados obtenidos en general, MET brinda una imagen para una muestra de finos de arena con contenido de arcilla, preparada con la sustancia inhibidora PEA-II (imagen 27), se observa una tonalidad clara que según la capacidad de refracción de electrones del material, corresponde a la sustancia inhibidora (polímero). Dicha tonalidad presenta una distribución muy cerca de a la homogeneidad, en el sentido de que la partícula de arcilla se ve claramente cubierta por la sustancia, de manera que el efecto de encapsulamiento

se está dando de forma tal que el desempeño a nivel macroscópico es sobresaliente por sobre los resultados de las dos sustancias inhibidoras restantes. Así mismo, la determinación de ángulo de contacto (imagen 28-c), arroja que el menisco formado por la gota deposita sobre la muestra es de 30.4° , que en comparación con las muestras de las otras dos sustancias inhibidoras es bastante más alto y ni que decir de la muestra testigo, siendo superior por más de 20 unidades.

En segundo lugar, la sustancia PEA-I analizada por MET (imagen 26) donde como ya se discutió anteriormente, presenta a las partículas de arcilla, en tonalidad oscura, cubiertas escasamente por la sustancia inhibidora (tonalidad más clara). En comparación con el resultado obtenido para la prueba de ángulo de contacto (imagen 28-b), con 18.6° , se encuentra considerablemente por debajo de los 30.4° para la sustancia PEA-I, pero aún así superior al testigo y en menor cantidad, estando casi a la par, de la sustancia PEG.

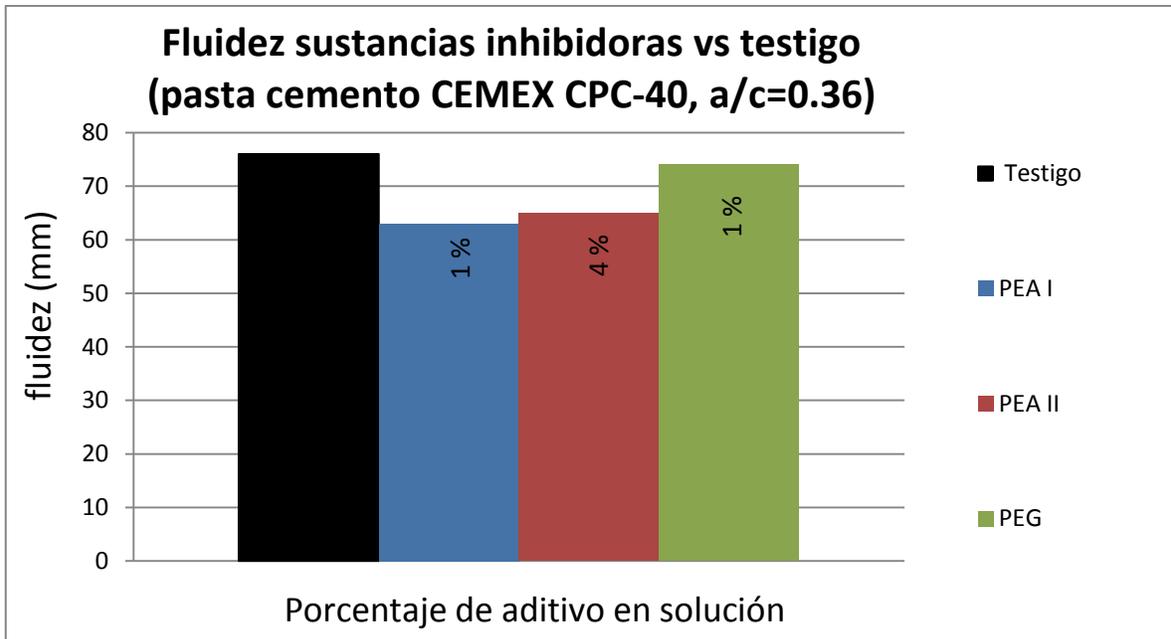
Por último, la sustancia PEG, de la que no se cuenta con imágenes por medio de MET pero que durante el estudio, salvo contadas excepciones es el aporta un menor factor de desempeño para todas las pruebas realizadas. La imagen 28-c muestra el ángulo de contacto para esta sustancia, siendo esta de 18.6° , cercano al resultado de la sustancia PEA-I, y superior en pocas unidades a la muestra testigo, pero considerablemente inferior a la muestra de la sustancia PEA-II.

Con estas pruebas se pudo comprobar de una forma un tanto más sensitiva, en cuanto a que se trata del análisis de imágenes, para la parte experimental tal vez más importante de este proyecto es aquella donde se observa la verdadera interacción que se da entre los materiales involucrados. Así, las pastas (tanto de cemento como de finos de arena) resultan ser el inicio de dicha etapa, misma que sirve de antesala y de establecedora de precedentes para el rumbo que la siguiente etapa (realización de morteros) tomará.

4.5 Pastas de cemento

Lo anterior es en lo concerniente a las sustancias que se pensó podían resultar buenos coadyuvantes en la labor de la inhibición de las arcillas, para evitar daños en las mezclas cementicias. Pero para cuestiones de consideración o eliminación de la mayor cantidad de variables que sea posible, se realizó una serie de pruebas de fluidez y permanencia sobre pastas de cemento CPC-40 CEMEX Monterrey con las mismas sustancias inhibidoras que resultaron con los mejores resultados. Esto con la finalidad de saber cuál es el efecto de las sustancias inhibidoras directamente sobre el cemento y poder inferir las razones de los fenómenos observados en la serie de pruebas de morteros.

Para esta etapa del estudio, en el que lo importante era observar cómo se veía afectada la fluidez de la pasta de cemento con las tres mejores sustancias inhibidoras. No hubo ningún diseño específico en cuanto al proporcionamiento de los componentes de la mezcla. La fluidez buscada (establecida arbitrariamente), para la pasta sin inhibidores fue de $80 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$. Con una relación agua-cemento de 0.36, se logró una fluidez de 76 mm y esta fue la usada para las pastas de cemento con las sustancias inhibidoras. En la gráfica 7 se presentan los resultados de los mejores resultados de fluidez de las sustancias inhibidoras en pasta cemento.

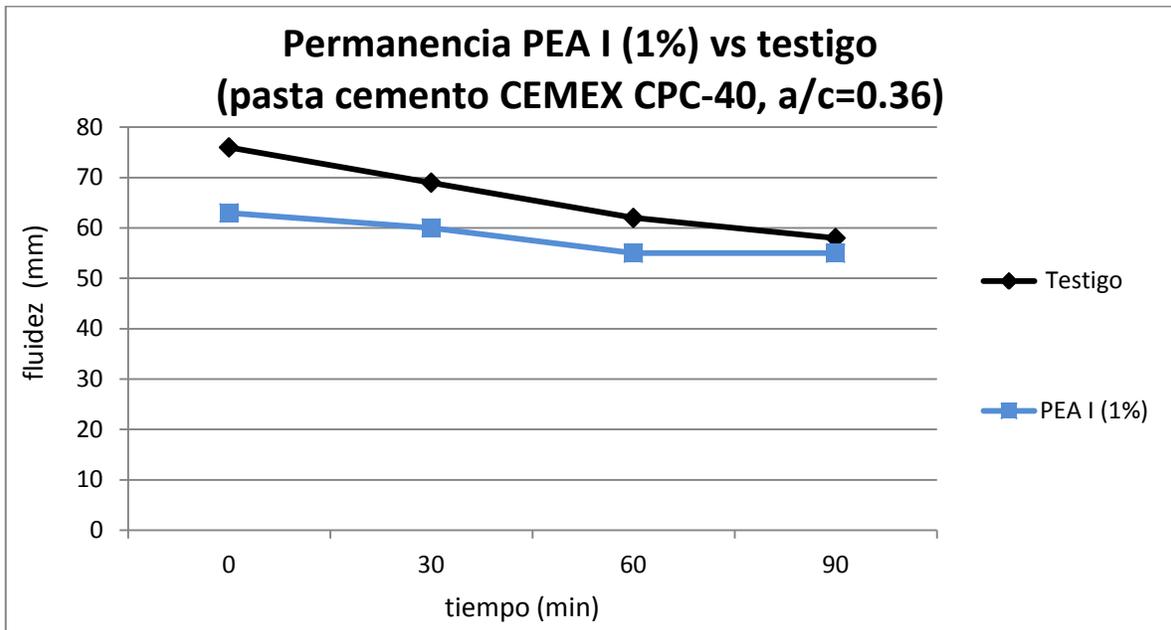


Gráfica 8. Fluidez testigo y sustancias inhibidoras para pasta de cemento

Como ya se mencionó, la muestra testigo arrojó un resultado de fluidez de 76 mm. Los resultados de fluidez de la pasta de cemento con las sustancias inhibidoras, tomando en cuenta las pastas de finos de arena, fueron muy inferiores. Las tres sustancias inhibidoras estuvieron por debajo de la muestra testigo. En el caso, tanto de la PEA I como de la PEA II, el decremento fue muy marcado, 17.1% y 14.5% menos, respectivamente. Este fenómeno se atribuye a lo diferentes que resultan los mecanismos químicos involucrados en cada tipo de material. Dichos mecanismos pueden ser los causantes de que en el caso de las tres sustancias, se registrara un aumento de temperatura promedio de 4 °C. En la literatura (Paillère, 1995) se ha reportado que al usar algunas aminas (mediante la observación del comportamiento térmico de la mezcla), se observan drásticos aumentos exotérmicos que pueden ser atribuidos a la descomposición de la amina con los productos hidratados del Silicato tricálcico (Ca_3SiO_5). Dichos aumentos de temperatura causan el “resecamiento” de la pasta y su consecuente disminución de la fluidez. Para el caso del PEG, con el cual, la disminución de la fluidez fue menor (2.6%) aunado al hecho de que fue el que tuvo el menor incremento de temperatura, se sabe que tiene tendencia a ser un formador de flóculos, que

puede ser la razón del mal desempeño de esta sustancia al verse involucrada con las reacciones de hidratación del cemento.

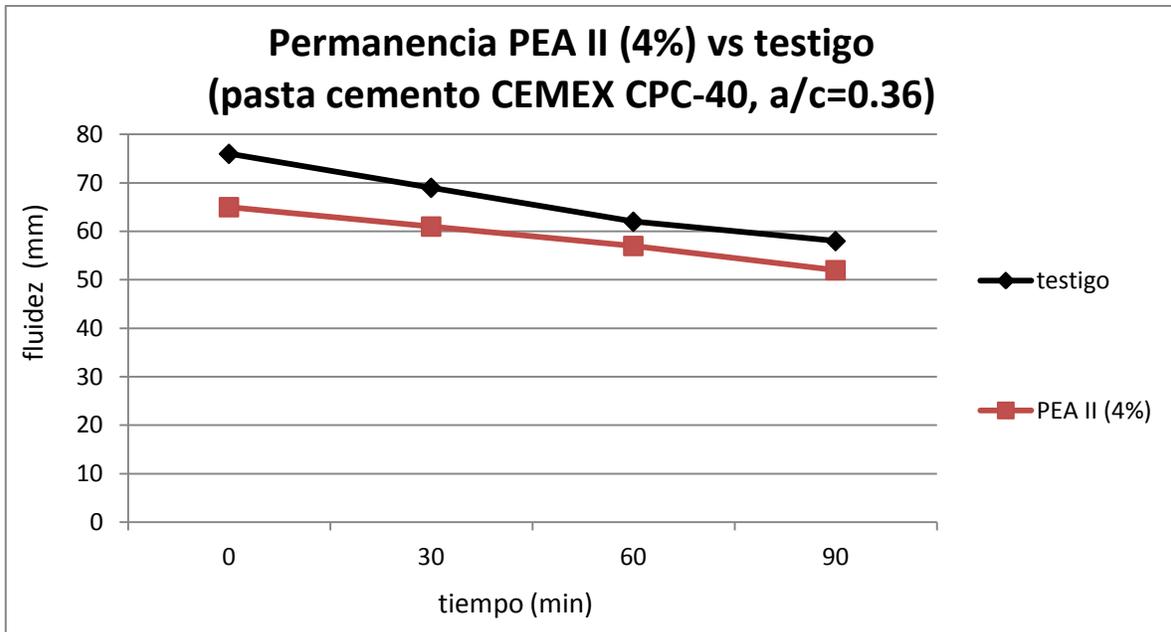
Sabiendo cuales fueron los resultados obtenidos de las pastas de cemento, adicionadas con los tres aditivos, es importante ahora, la observación de la propiedad de permanencia. Para este propósito la gráfica 8, muestra la comparativa entre el resultado de la muestra testigo contra la PEA I.



Gráfica 9. Permanencia para pasta de cemento con PEA I a 1.0%

En la gráfica 8, se puede observar claramente cómo el desempeño de la pasta con adición de la sustancia PEA I disminuyó significativamente, de manera concreta, la tasa promedio de mejora de la fluidez fue de -6.8%. Lo más rescatable del desempeño de esta sustancia es que si bien no proporcionó buena fluidez, la caída de la fluidez a lo largo de la hora y media fue “satisfactoria”, en el sentido de que la tasa promedio de disminución de la fluidez fue de 5.4%.

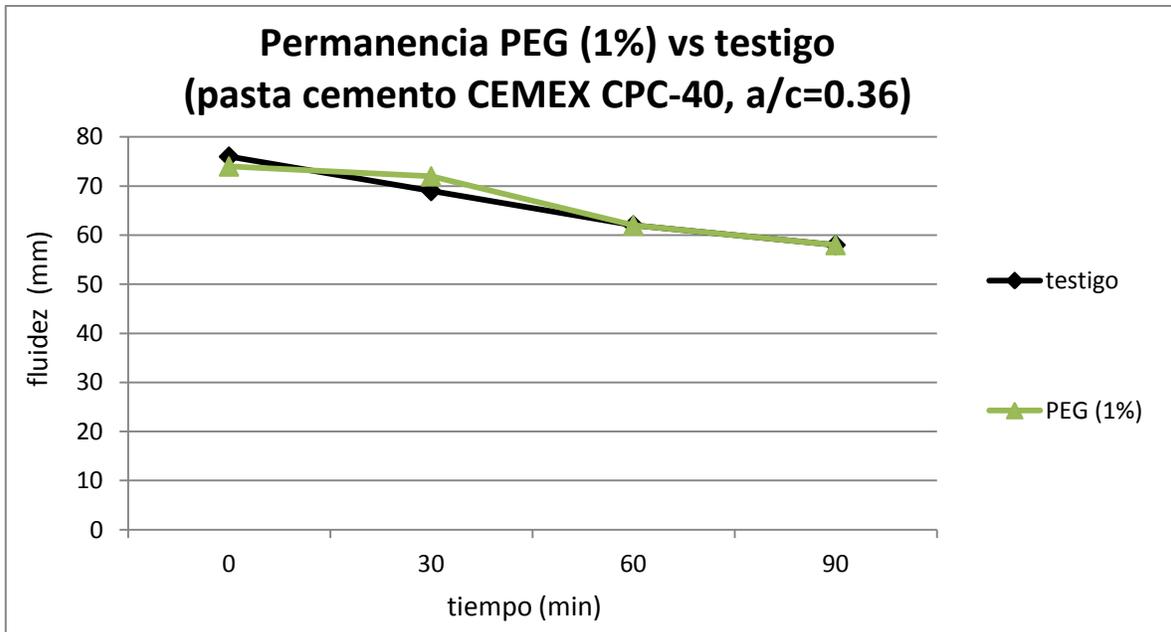
Ahora toca el turno del análisis de resultados de permanencia sobre las pruebas de pasta de cemento adicionadas con la sustancia PEA II. Para este fin, la grafica 9 muestra la comparativa de dichos resultados contra los obtenidos para la muestra testigo.



Gráfica 10. Permanencia para pasta de cemento con PEA II a 4.0%

Algo muy similar a lo que sucede con la sustancia PEA I es lo que podemos observar al analizar los resultados para permanencia en pasta de cementos con la PEA II, como muestra la gráfica 9. La permanencia disminuye de una forma un tanto más marcada, obteniéndose un tasa promedio de disminución de la fluidez de 7.0%, más drástica que los resultados arrojados por la PEA I. En cuanto al porcentaje promedio de mejora de la fluidez, obtenido con respecto a los resultados de la muestra testigo, fue de -6.4%, ligeramente superior a lo obtenido para la PEA I. Algo muy importante a tomar en cuenta es que la adición de esta sustancia fue en dosificación de 4%. Todos los resultados aún por debajo de la muestra testigo.

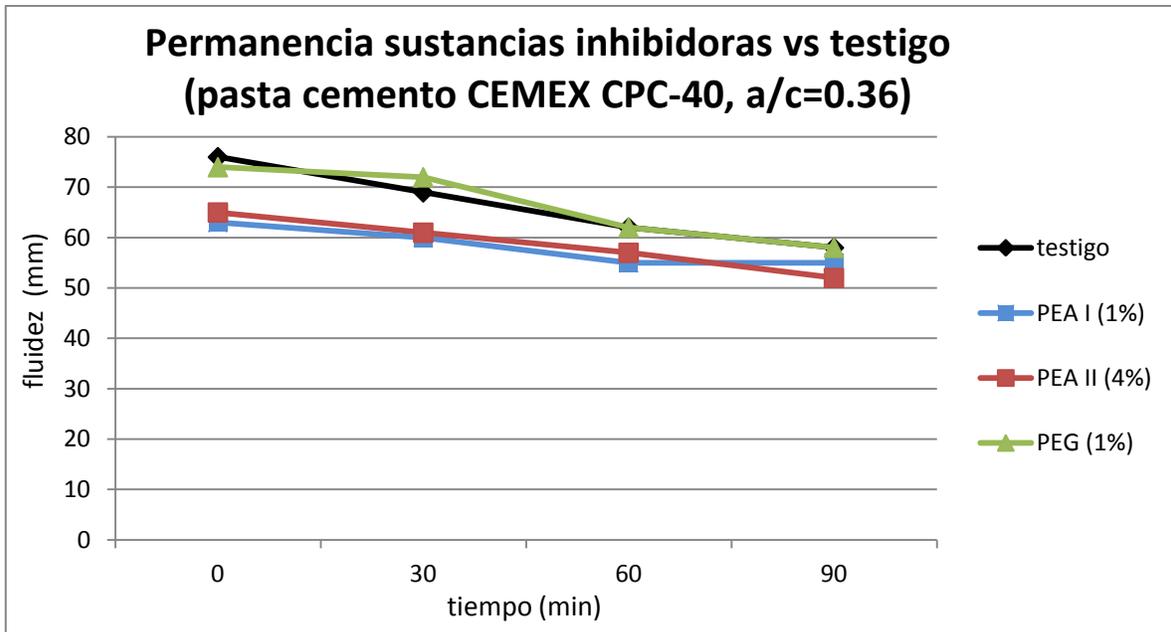
La grafica 10 muestra ahora la comparativa de los resultados de fluidez para la sustancia PEG contra la muestra testigo.



Gráfica 11. Permanencia para pasta de cemento con PEG a 1.0%

La sustancia PEG, arrojó los mejores resultados en cuanto a desempeño, como se observa en la gráfica 10. La tasa promedio de disminución de la fluidez fue de 8.47% las mas alta entre las tres sustancia inhibidoras, sin embargo, si se observa la gráfica, el comportamiento de la permanencia de pasta de cemento con PEG y de la muestra testigo, resultan muy similares. Siendo así, la sustancia PEG que menos pérdida de desempeño mostró. En cuanto al porcentaje promedio de mejora de la fluidez, fue incluso la única sustancia que no arrojó números negativos, obteniéndose así un 0.2%. Esto gracias a que a 0, 60 y 90 minutos, la fluidez no está muy por debajo y a los 30 minutos se obtuvo incluso un leve incremento. Aunado a esto la dosificación de la sustancia fue de 1%.

Para mejor visualización y comparación de los resultados de pastas de cemento con sustancias inhibidoras, los datos de las cuatro permanencias (gráfica 11) y la tabla de datos adicionales (tabla 5).



Gráfica 12. Permanencia para pasta de cemento con sustancias inhibidoras y testigo

Tabla 14. Datos adicionales para la serie de pruebas de pastas de cemento

SUSTANCIA	TPDF (%)	PPMP (%)	cantidad de sustancia en solución (%)
PEA I	5.4	-6.8	1
PEA II	8.5	-6.4	4
PEG	16.3	0.2	1

La gráfica 11 y la tabla 5 no son sino la comprobación de que la interacción química de las pastas con las sustancias es prácticamente nula, registrándose solamente un aumento de temperatura que puede ser el causante de dicho efecto.

De los comportamientos de las permanencias para pastas de cemento con las tres sustancias inhibidoras y los datos que de ellos se desprenden, se infiere que la interacción entre inhibidores y cemento es pobre, lo cual resulta benéfico para los fines que este proyecto persigue. Esto puesto que el uso de las sustancias inhibidoras está pensado para la interacción directa con las arcillas contenidas en los finos de arena. A escala macroscópica con las pruebas hasta ahora presentadas, se ha demostrado que las sustancias inhibidoras cumplen la función para la cual fueron escogidas en primer lugar, esto observando los resultados de pastas de finos de arena, dónde la adición de las sustancias incrementaba de manera sobresaliente su desempeño, caso contrario a lo observado en la pastas de cemento.

4.6 Morteros

Tras haber realizado las pruebas a nivel de pasta, que en primer lugar sirvió para determinar que sustancias serían las elegidas para seguir con el estudio basándose en como estas afectaban las propiedades macroscópicas, se prosiguió a escalar las pruebas a nivel de mortero. Esto quiere decir que las mezclas son compuestas de agua, arena (no finos de arena), y las sustancias inhibidoras seleccionadas por mejor desempeño de la etapa de pastas.

La primera parte de esta etapa, fue el diseño del mortero. De acuerdo a la norma ASTM C-270 los morteros se clasifican, bien por sus propiedades, o por sus proporciones. Toda especificación debe hacerse por una sola categoría de las indicadas, pero no por ambas (son excluyentes). La especificación por propiedades, adquiere sentido para efectos de diseño con base en pruebas de laboratorio, mas no para morteros mezclados en obra. Se asume que las proporciones establecidas en laboratorio son las que se emplearán al mezclar en obra, esperándose del producto un comportamiento satisfactorio.

Es bien sabido que el mortero es la mezcla compuesta por cemento, agua y arena. Para este estudio los materiales usados fueron los mismos que se han expuesto con anticipación: arena 1 del LPM y cemento CPC-40 CEMEX

Monterrey. En cuanto al agua, se utilizó agua purificada, con el propósito de reducir las variables en cuanto a reacción

Fue así que las proporciones del mortero para este proyecto fueron obtenidas en un principio para una resistencia a la compresión ($f'c$) de 250 kg/cm². Sin embargo dichas proporciones fueron modificadas en función de la fluidez obtenida, dado que como ya se ha visto, aún sobre la resistencia a la compresión, para los fines que este proyecto persigue, la propiedad clave a observar es la fluidez. Así las dosificaciones obtenidas fueron para un mortero con un promedio de fluidez inicial de 168 mm. Para cada corrida de pruebas se obtuvo una muestra testigo y con respecto a cada una de ellas es la comparación.

Para esta etapa del estudio (morteros) el método de dosificación fue un tanto distinto al de la etapa de pastas. Como ya se mencionó con anterioridad, la cantidad de material que pasó la malla 100 de la arena usada para pastas fue de 1.7%, contrastando con el 3.7% obtenido para el lote de arena usado para la etapa de morteros. Como se mencionó anteriormente, la dosificación de sustancia inhibidora para pastas, fue basándose en la cantidad de sustancia en solución, a partir de la cual se obtenían tanto la cantidad en gramos como el porcentaje en base seca. Para morteros, pensando en que la dosificación debía ser pensada para trabajar sólo con la cantidad de material que pasó la malla 100, el proporcionamiento era el porcentaje deseado de sustancia inhibidora del 3.7% del total de la arena usada.

Una medida muy importante en los morteros es el contenido de aire. El porcentaje de aire introducido depende de la aplicación, ya que uno de sus principales objetivos es la protección a la intemperie, aunque no es exclusivamente con esta, también se puede incluir aire para producir un material ligero o poroso, el aire introducido puede variar desde un 2% a un 20% en volumen. Si se desea dar una protección contra el intemperismo normalmente se introduce entre un 3 y un 9% de aire, estos porcentajes disminuyen un poco la resistencia con respecto al mortero que no lleva ningún tipo de sustancia, pero esa pérdida se compensa con la protección que proporcionan. Cada

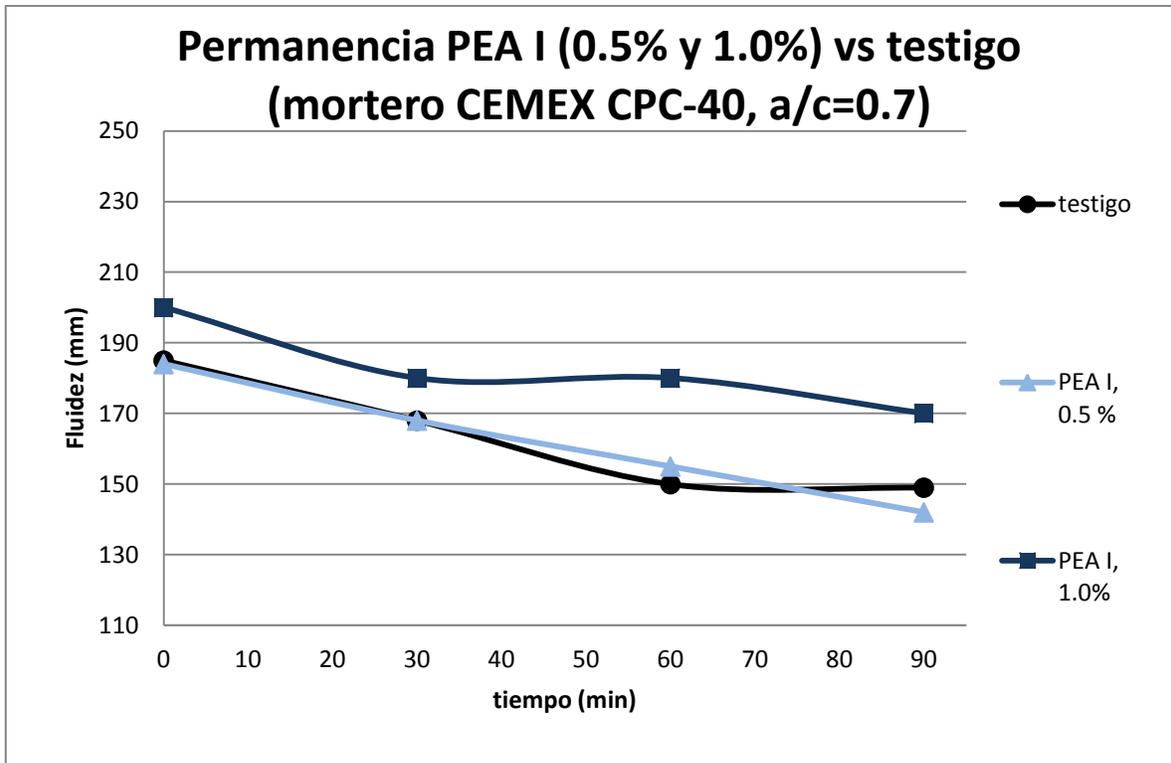
aumento en porcentaje de aire disminuye la resistencia a la compresión del mortero, por lo que si no se controla la dosificación del aditivo checando al mismo tiempo la resistencia de la mezcla, se pueden tener muchos problemas. A los morteros con altos contenidos de aire se les conoce también como mezclas celulares, estas mezclas llegan a tener hasta un 30% de aire en volumen y son excelentes materiales aislantes. Cabe hacer la aclaración que las mezclas con alto contenido de aire son muy secas, esto se puede observar por la proximidad de las arenas y la poca pasta que las separa. Dentro de los beneficios en la inclusión de aire, pensando en el intemperismo, está la mejora de la resistencia a la congelación/descongelación. Otro punto importante a considerar y que está más íntimamente relacionado con este proyecto, es que la inclusión de aire logra mejorar la trabajabilidad del mortero, este funciona como una especie de lubricante dentro del sistema. Así, la influencia del contenido de aire es cercanamente observada y relacionada tanto en los resultados de fluidez como en los resultados de resistencia a la compresión. A medida que aumenta el contenido de aire, aumenta la trabajabilidad y la resistencia a los ciclos de cambios de temperatura; por el contrario disminuye la resistencia, la adherencia y la impermeabilidad. Si bien, lo anteriormente mencionado en cuanto a cómo ciertas propiedades se ven afectadas en función de la variación de contenido de aire, existe una variación de criterios al respecto, alrededor del mundo. Es este sentido es conocido de forma general que el contenido de aire va muy de la mano con el tamaño del agregado que se usa. La norma ASTM C-457 (ASTM, 1990) , indica que los contenidos de aire (según su exposición) varían de 3% a 7%, como lo indica la tabla 6. Por esto, se puede decir que en ciertos casos, ya sea porque el diseño así lo requiere o porque simplemente el contenido de aire es bajo, la inclusión de aire resulta positiva en aras de la búsqueda de mejores propiedades en el concreto.

Tabla 15. Rangos aceptables de contenido de aire

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg)	Porcentaje de aire de concreto expuesto a condiciones severas	Porcentaje de aire de concreto expuesto a condiciones medianamente severas	Porcentaje de aire de concreto expuesto a condiciones ligeramente severas
9.5 (3/8)	7	6	4
12.5 (1/2)	7	5	4
19.0 (3/4)	6	5	3
25.0 (1)	6	4	3

A grandes rasgos, los morteros se trabajaron con las sustancias inhibidoras, primero a bajas dosificaciones, luego a mas altas y por último, en sinergia con un plastificante para comprobar que las sustancias inhibidoras no entorpezcan la acción de otras adiciones en caso de ser necesario, pensando en la aplicación de la vida real.

El primer caso tratado, fueron los morteros con las sustancias inhibidoras a baja dosificación (0.5% y 1.0%). Los primeros resultados de esta etapa son mostrados en la gráfica 12.

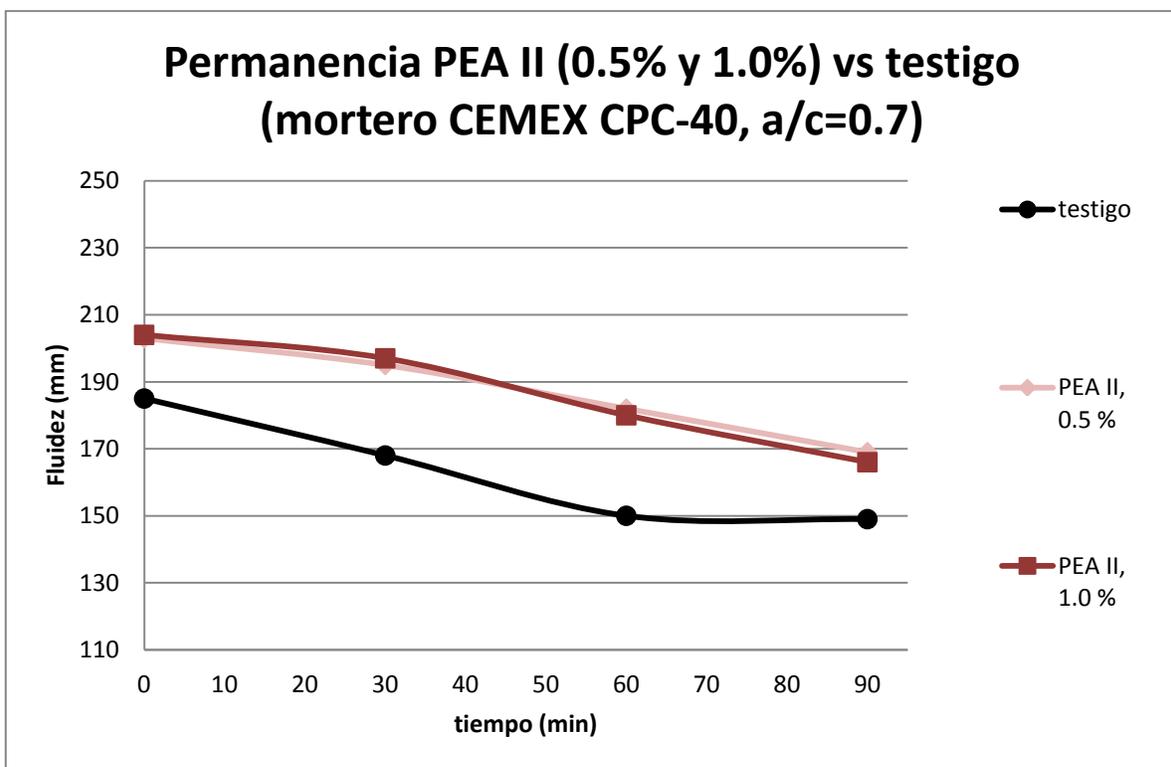


Gráfica 13. Permanencia en mortero para PEA I a 0.5% y 1.0%

En la gráfica 12 se presentan las permanencias de Las mezclas de mortero con PEA I y sin ningún tipo de sustancia inhibidora de arcillas (testigo). Las dos dosificaciones que aquí se presentan son 0.5% y 1%. Se observa claramente que a 1% el desempeño de la sustancia PEA I es superior al mortero dosificado a 0.5%, la diferencia es tan marcada que la dosificación a 0.5% dio un promedio de mejora de la permanencia de -0.4%, contrastante con el 10.8% del mortero dosificado a 1%. En relación, la tasa promedio de disminución de la fluidez para el mortero dosificado a 0.5%, fue de 15.8% notablemente mayor al 11.7% del mortero dosificado con 1% de sustancia PEA I y notoriamente cercano al 15.9% de la muestra testigo. Llama la atención, como a 0.5% de dosificación el comportamiento se vuelve un tanto inesperado, puesto que a 60 minutos la fluidez aumenta, con respecto a la obtenida a los treinta minutos, comportamiento no observado en con ninguna de las 22 sustancias inhibidoras probadas. Así, es muy notorio como a 1% de dosificación de la PEA I provee una mejora muy marcada en desempeño en comparación con la dosificación a 0.5%. En cuanto al contenido

de aire, para la muestra testigo, se obtuvo un 2.8% de aire, la cual resulta baja para fines de trabajabilidad, como se explicó anteriormente. Gracias a la adición de 0.5% 1.0% de PEA I, se logró un aumento notoriamente significativo, alcanzando el 4.6% y 6.0% respectivamente, porcentajes que no representan una amenaza para el desempeño, sino una ventaja. Se observa claramente lo directa que es relación de contenido de aire y la fluidez.

La siguiente sustancia inhibidora a comparar contra el testigo es la PEA II, cuyos resultados se muestran en la grafica 13.

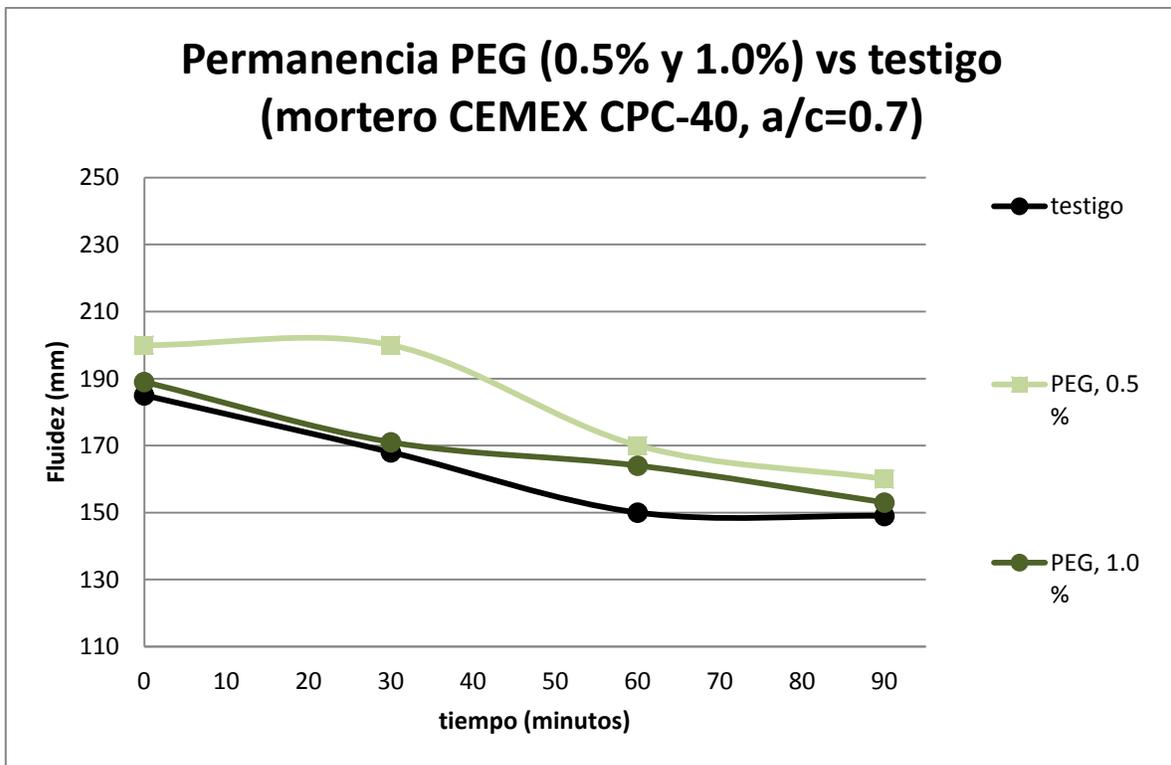


Gráfica 14. Permanencia en mortero para PEA II a 0.5% y 1.0%

La gráfica 13 muestra que al igual que lo sucedido en pastas de finos de arena, la sustancia PEA II, proporcionó mejor desempeño al mortero. Las dos dosificaciones que aquí se presentan son 0.5% y 1%. Un comportamiento muy interesante es observado para esta sustancia, puesto que a ambas dosificaciones los resultados son bastante similares. En concreto, los resultados de las pruebas que para el mortero dosificado a 0.5 con PEA II el porcentaje promedio de mejora de la permanencia es de 13.0%, ligeramente por encima del 12.7% obtenido para

el mortero dosificado a 1%. La tasa de disminución de la fluidez para el mortero con sustancia PEA II dosificado a 0.5% fue de 10.3%, que como resulta obvio, superó al mortero con dosificación de 1% del cual se obtuvo 11.3%, ambos superando de manera satisfactoria el 15.9% de la muestra testigo. Para el caso de la sustancia PEA II, con la adición de 0.05% y 1.0% se logró un contenido de aire de 5.8% y 6.0% respectivamente. Resultados muy similares a los obtenidos para la sustancia PEA I, pero con la diferencia de un marcado aumento de fluidez. De la misma forma que sucedió con la sustancia PEA I, se observa una relación directa entre el contenido de aire y la fluidez, y dado que son muy similares la fluidez también fue similar. Haciendo una comparativa general de los resultados obtenidos para la PEA I y PEA II en morteros, se empiezan a notar las consecuencias de la enorme brecha entre los resultados de pasta de finos de arenas y pasta de cemento, puesto que en las pastas, en menor o mayor medida, la tendencia era, o bien afectar el desempeño o bien beneficiarlo, para morteros, por el contrario pareciera no haber tendencias marcadas.

La siguiente sustancia inhibidora a comparar contra el testigo es el PEG, cuyos resultados se muestran en la grafica 14.

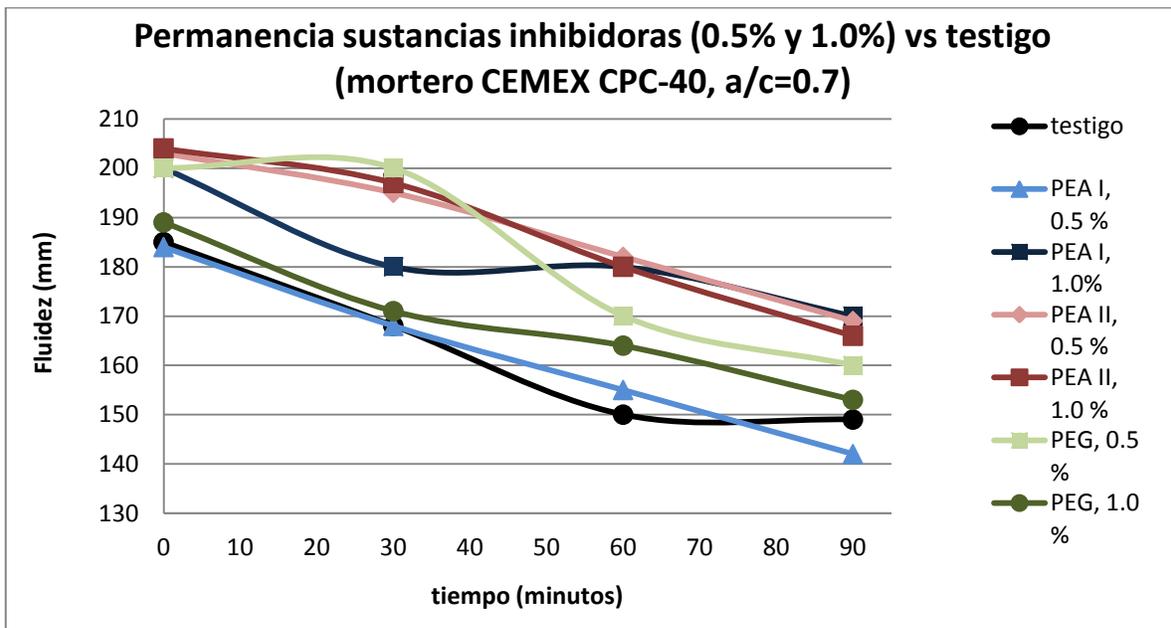


Gráfica 15. Permanencia en mortero para PEG a 0.5% y 1.0%

En la gráfica 14 se observa que para la sustancia PEG se da un comportamiento similar pero de manera inversa a lo que sucedió con la PEA I, esto, porque a 1% de dosificación se presenta un comportamiento muy similar a la muestra testigo y la dosificación a 0.5% arroja resultados bastante superiores a lo largo de la hora y media. El porcentaje promedio de mejora de la permanencia para el mortero dosificado a 0.5% fue de 10.5%, superior en comparación con 3.8% del mortero dosificado a 1% con la sustancia PEG. Ahora bien, lo que no sucede como en casos anteriores en la generalizada relación inversamente proporcional de los resultados de el porcentaje de mejora de la permanencia y la tasa promedio de disminución de la fluidez, esto que si bien el porcentaje de mejora de la permanencia resultó contratante, la tasa promedio de disminución de la fluidez, muestra que el 11.7% del mortero dosificado con 0.5% de la sustancia PEG no supera por mucho al 13.9% obtenido para el mortero dosificado con 1% de la misma sustancia y que a su vez es mejor que el 15.9% de la muestra testigo. En cuanto al contenido de aire de esta sustancia, se obtuvieron resultados

un tanto contradictorios. Para la dosificación a 0.5% el contenido de aire fue de 6.0%, en contraste con el 5.0% de contenido de aire, obtenido para la dosificación a 1.0% y llama mucho la atención, dado que en los casos anteriormente expuestos se veía una marcada tendencia muy diferente a la aquí observada.

Para cuestiones de visualización general de los resultados, se muestran a continuación la grafica 15 y la tabla 6.



Gráfica 16. Permanencia en mortero para las tres sustancias vs testigo

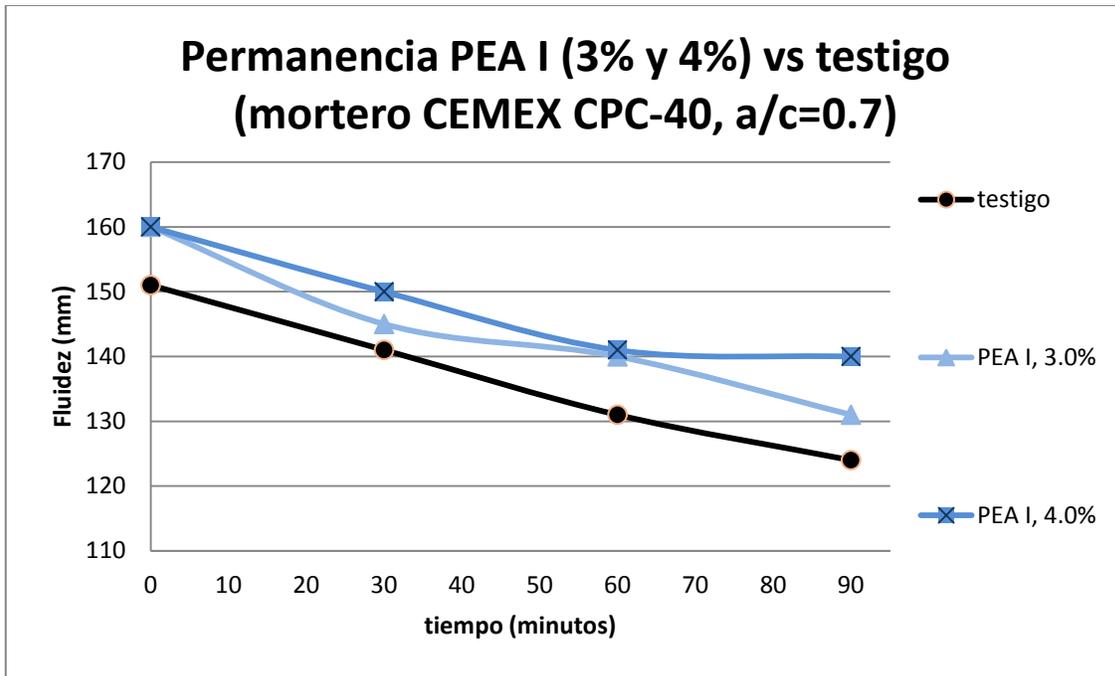
Tabla 16. Datos adicionales para morteros a con las sustancias a 0.5% y 1.0%

SUSTANCIA	TPDF (%)	PPMP (%)	Contenido de aire (%)	Dosificación (%)
PEA I	15.8	-0.4	5.8	0.5
PEA I	11.7	10.8	6.0	1.0
PEA II	10.3	13.0	4.6	0.5
PEA II	11.3	12.7	6.0	1.0
PEG	11.7	10.8	6.0	0.5
PEG	13.9	3.8	5.0	1.0

De los resultados obtenidos en esta serie de pruebas, resumidos en la gráfica 15 y tabla 7, se observa que en general el desempeño de los aditivos en mortero aporta resultados benéficos para la inhibición de las arcillas. Con esto, se dio a conocer como la interacción de todos los materiales involucrados afectan de manera poco previsible los resultados, contrario a lo observado cuando se trabajó con variables limitadas y controladas en las pastas. Como se recordará, los resultados de fluidez de pastas de finos de arena con las sustancias inhibidoras resultaron sobresalientes, cosa que no sucedió en el caso de los morteros. Así mismo se observa un comportamiento muy interesante en el sentido de que el promedio de porcentaje de contenido de aire es de 5.5%, teniendo a la mayoría de los valores en un rango entre 5% y 6%, lo cual indica que dentro de esta propiedad, la variación es muy poco significativa.

Por lo anterior, se pensó que aumentando la dosificación, podrían obtenerse mejores resultados. Fue así como las serie de pruebas de morteros con dosificación de sustancias inhibidoras a 3% y 4% se realizó, cuyos resultados son presentados a continuación.

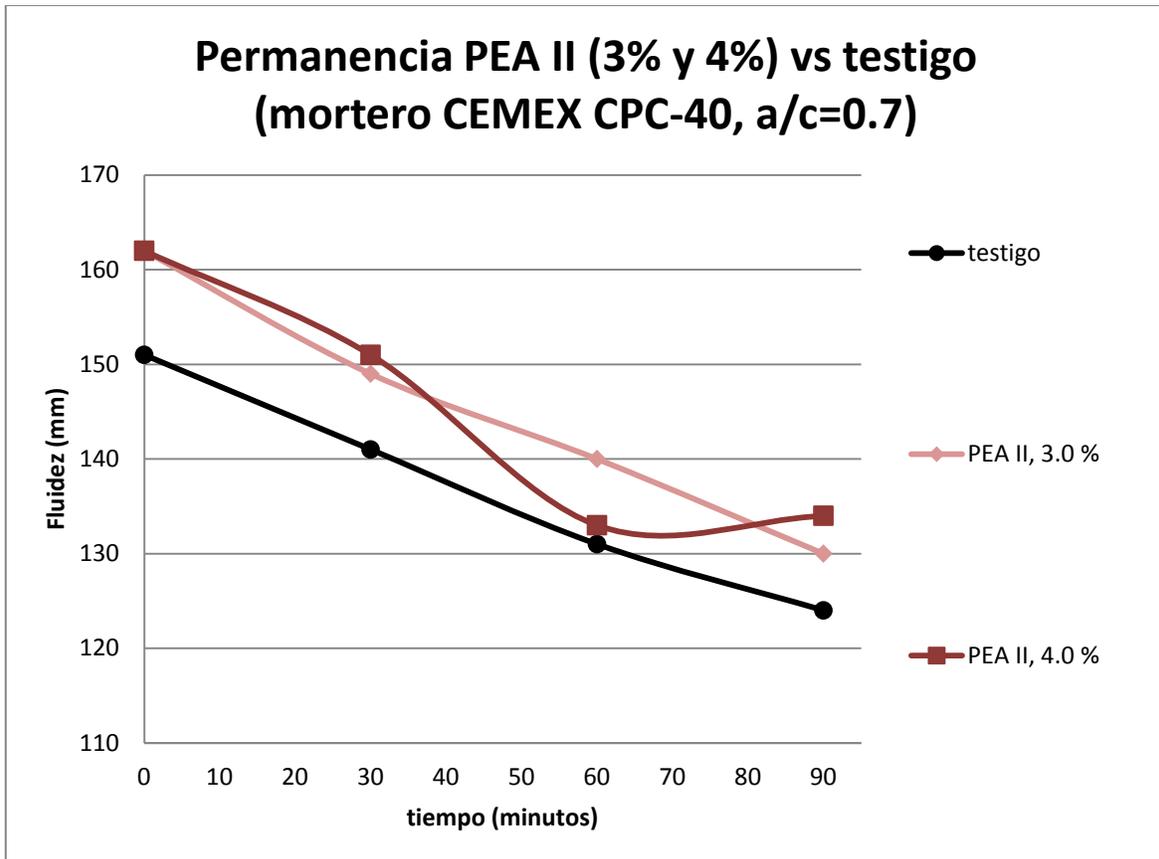
La gráfica 16 representa la comparativa de la sustancia PEA I contra la muestra testigo.



Gráfica 17. Permanencia para mortero con PEA I a 3.0% y 4.0%

De la gráfica 16 lo primero que llama la atención de forma positiva, es el hecho de que a ambas dosificaciones (3% y 4%), el desempeño de las mezclas, en general, está por encima del obtenido en la muestra testigo. Para este caso, los resultados de la muestra testigo arrojaron una tasa promedio de disminución de la fluidez de 10.4% y 10.2% respectivamente, ligeramente inferiores al 12.6% observado en la muestra testigo. Si bien, la tasa promedio de disminución de la fluidez sufrió un efecto negativo, para el porcentaje promedio de mejora de la fluidez, sucedió completamente lo opuesto, ya que para la dosificación a 3.0% de la sustancia PEA I se obtuvo un 20.1% y para la dosificación a 4.0%, un 30.1%. Considerablemente mayores tomando en cuenta el leve aumento de la disminución de la fluidez. El contenido de aire también se vio benéficamente afectado obteniéndose un 4.0% para la mezcla dosificada a 3.0% y un 6.0% para la dosificada a 4.0%. Siendo así la dosificación más alta la que mejor desempeño aportó a la mezcla, como en general, ha venido siendo la tendencia.

Ahora toca el turno de la sustancia PEA II a ser comparada contra los resultados de la muestra testigo, como lo muestra la gráfica 17.

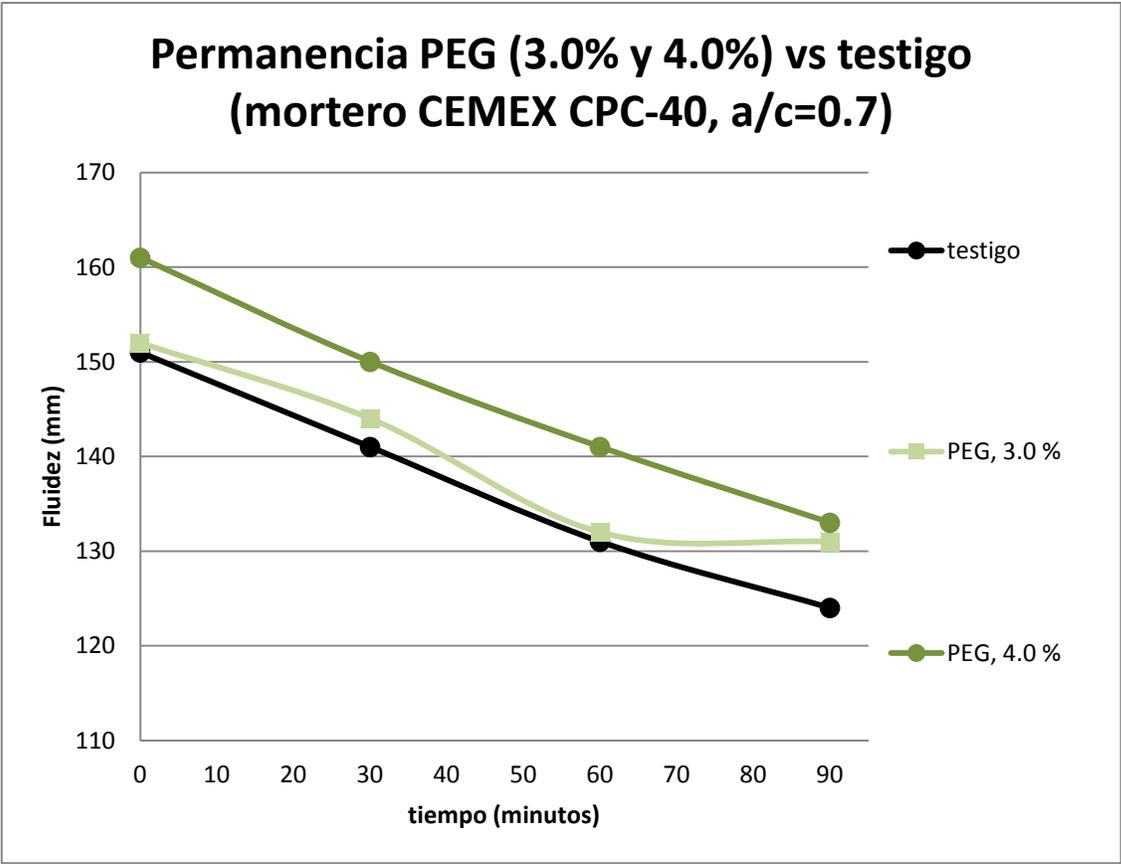


Gráfica 18. Permanencia para mortero con PEA I a 3.0% y 4.0%

La gráfica 17 nos muestra que los resultados de PEA II a las dosificaciones ahí representadas, se muestra un desempeño superior con respecto al testigo. Al mismo tiempo, salta a la vista el hecho de que la diferencia en el desempeño no es muy marcada. Así lo indican los datos, la tasa promedio de disminución de la fluidez para la sustancia PEA II a 3.0% fue de 13.8%, contra el 14.0% para la dosificación a 4.0%. La ganancia en esta propiedad, para la dosificación a 4.0%, se observa cuando durante 60 minutos la tendendencia era a disminuir (incluso a una mayor que la presentada por la mezcla dosificada a 3.0%), pero a los 90 minutos se logra un ligero incremento. En cuanto al porcentaje promedio de mejora de la fluidez como ya se mencionó, para ambos

casos en positivo en cantidades muy similares al igual que sucede con la tasa de disminución de la fluidez, para la dosificación a 3.0%, fue de 23.2%, que comparado con el 22.4% de la dosificación resulta superior. En el caso del contenido de aire sucede algo no visto hasta este punto, pues para ambas dosificaciones el contenido de aire fue de de 4.1%. Por lo que en el uso de la sustancia PEA II a altas dosificaciones, se comienza a dar una caída en la mejora del desempeño de las mezclas de mortero.

Ahora, en la gráfica 18 se presentan los resultados de la sustancia PEG comparados con los de la muestra testigo.

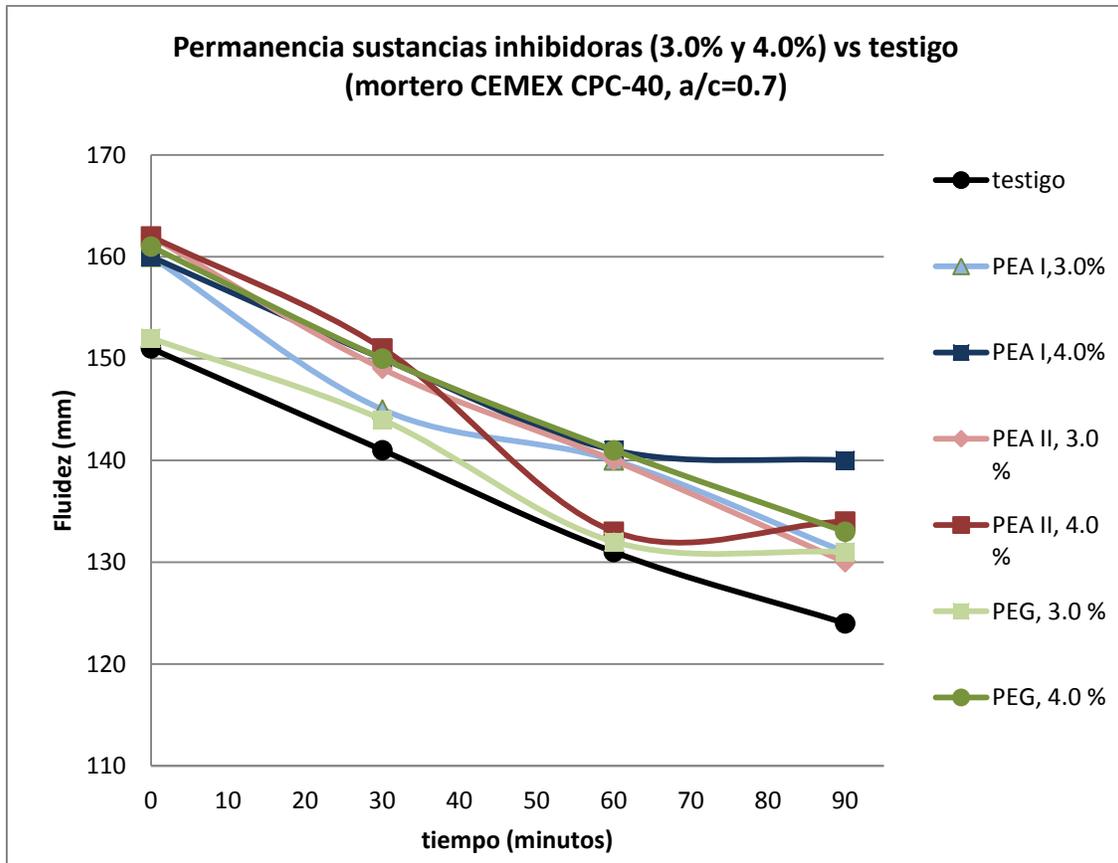


Gráfica 19. Permanencia para mortero con PEG a 3.0% y 4.0%

De la gráfica 18, lo primero que se nota es que al igual que en los casos anteriores, con la adición de las sustancias inhibidoras se logra un efecto positivo en el desempeño de las mezclas, siendo así, que a grandes rasgos la adición de una mayor cantidad en porcentaje de sustancia inhibidora aportó una mejoría

mayor en el desempeño. Para el caso de la tasa promedio de disminución de la fluidez se obtuvieron resultados que se encuentran en un rango medio, entre los obtenidos para la sustancias PEA I y PEA II. Así, para la dosificación a 3.0% la tasa fue de 10.7%, que comparado al 12.2% de la dosificación a 4.0% (y como evidencia la gráfica), resulta superior. Considerando la comparativa con la muestra testigo, para este caso, la tasa de ambas dosificaciones resultan estar por debajo de aquella para dicha muestra (12.6%), sin embargo a 4.0% la mejora es mínima, cosa que no sucede con la dosificación a 3.0%. La diferencia en los resultados de la tasa se comprenden claramente si observamos en la gráfica como la pendiente de la curva que representa la dosificación a 4.0% es continua, por el contrario la de 3.0% muestra incluso una ligera estabilidad en el periodo de 60 a 90 minutos. Para el caso del porcentaje promedio de mejora de la fluidez, sucedió algo completamente fuera de lo que se había venido marcando como tendencia. Con la sustancia PEG se obtuvieron el resultado más bajo y el segundo más alto de la serie de pruebas de dosificaciones a 3.0% y 4.0%. Para la primera dosificación (3.0%) el porcentaje promedio de mejora de la fluidez fue de 8.9% y para la segunda de 26.0%, resultados muy contrastantes, puesto que si se había observado una diferencia en los resultados basado en las dosificaciones, pero hasta ahora, nunca tan marcada. Caso similar y ahora si, atendiendo un poco más a la tendencia antes observada, el contenido de aire, también fue el más bajo de la serie para la dosificación a 3.0% con un 3.4% y un 5.2% (al igual que la tasa promedio de disminución de la fluidez, el segundo mejor de la serie) para la dosificación a 4.0%.

De manera condensada se muestran los resultados antes analizados, la tabla 8 muestra los datos adicionales obtenidos de las mismas, la gráfica 19 muestra los resultados de fluidez de toda la serie de pruebas.



Gráfica 20. Permanencia en mortero con sustancias 3.0% y 4.0% inhibidoras vs testigo

Tabla 17. Datos adicionales para morteros a con las sustancias a 0.5% y 1.0%

SUSTANCIA	TPDF (%)	PPMP (%)	Contenido de aire (%)	Dosificación (%)
PEA I	10.4	20.1	4.0	3.0
PEA I	10.2	30.1	6.0	4.0
PEA II	13.8	23.2	4.1	3.0
PEA II	14.0	22.4	4.1	4.0
PEG	10.7	8.8	3.4	3.0
PEG	12.2	26.0	5.2	4.0

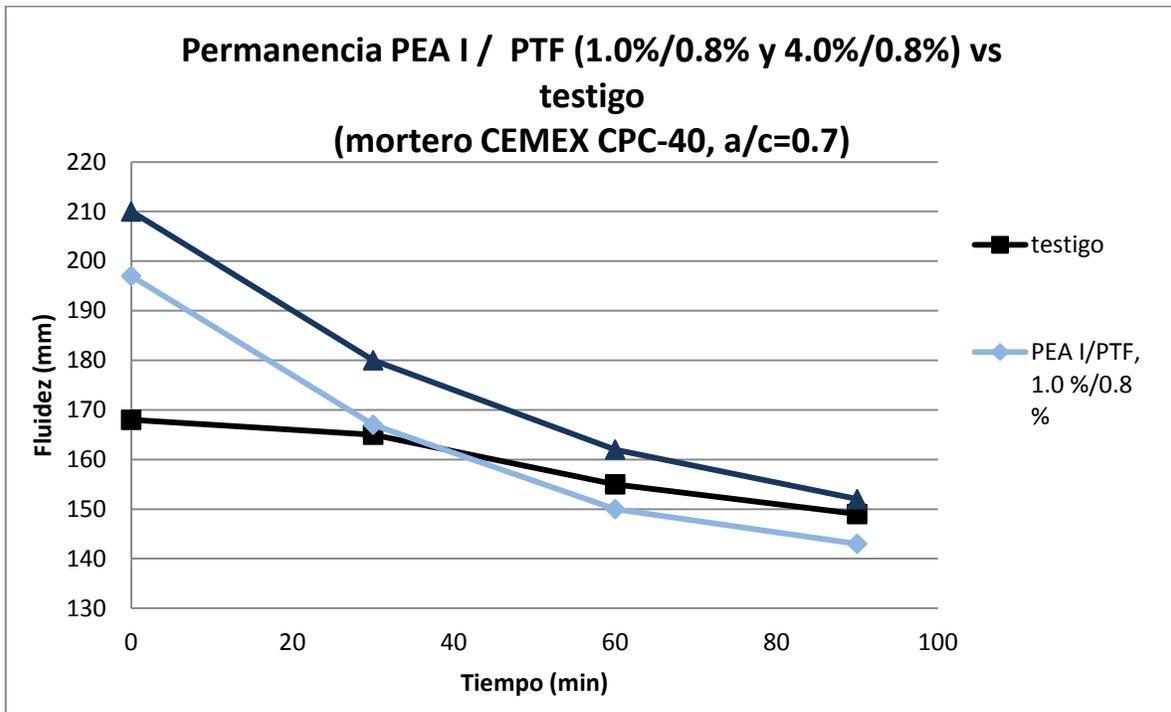
De los resultados obtenidos en esta serie de pruebas, resumidos en la gráfica 19 y tabla 8, se observa que en general el desempeño de los aditivos en mortero aporta resultados benéficos para la inhibición de las arcillas. Con esto, se dio a conocer como la interacción de todos los materiales involucrados afectan de manera poco previsible los resultados, contrario a lo observado cuando se trabajó con variables limitadas y controladas en las pastas. Como se recordará, los resultados de fluidez de pastas de finos de arena con las sustancias inhibidoras resultaron sobresalientes, cosa que no sucedió en el caso de los morteros. Cabe mencionar que tanto la tasa de disminución de la fluidez, como el porcentaje promedio de mejora de la permanencia (salvo un par de casos) se mantuvieron dentro de un rango estrecho. Esto indica que la tendencia del desempeño de las mezclas es disminuir conforme se aplique mayor cantidad de sustancia inhibidora.

Basado en los resultados anteriores, en los que se puede decir que se trabajó a altas y a bajas dosificaciones de sustancia inhibidora, se procedió a usar las mismas sustancias propuestas para este proyecto, en sinergia con un plastificante (PTF), mismo que resulta de los mejores de la empresa Sika mexicana. En cuanto a la dosificación de las sustancias inhibidoras como ya se observó anteriormente, la tendencia es que a mayor cantidad de sustancia menor es el desempeño de la mezcla y viceversa. Por esto se pensó que lo mejor para fines de comparación era tomar una dosificación baja, que fue 1.0% y una dosificación alta que fue 4.0%, recordando que este porcentaje es en función de la porción de finos presentes en la arena. Esto sumado a que por experiencia de personal del laboratorio de investigación y desarrollo de Sika mexicana, la dosificación óptima es 5.8 ml por cada kg de cemento, que en este caso representa el 0.8% en peso de cemento. Cabe mencionar que las muestras testigo aquí presentadas, no son sin ningún tipo de sustancia, puesto que para poder comparar adecuadamente se usó la proporción antes mencionada de PTF.

Dado que en esta etapa se ven involucradas dos sustancias al mismo tiempo, la forma de producción de la mezcla tuvo que ser modificada. Para ello, se separó la cantidad total de agua en dos partes, siendo la primera parte (el 90% del

total del agua) adicionada junto con la sustancia inhibidora durante el primer periodo de mezclado y el resto (el 10% del total del agua), adicionada durante el segundo periodo de mezclado (tras otro periodo de reposo) junto con el aditivo plastificante de línea.

Así, se muestra a continuación en la gráfica 20, los resultados de esta serie de pruebas para la sustancia PEA I en comparación con la muestra testigo.

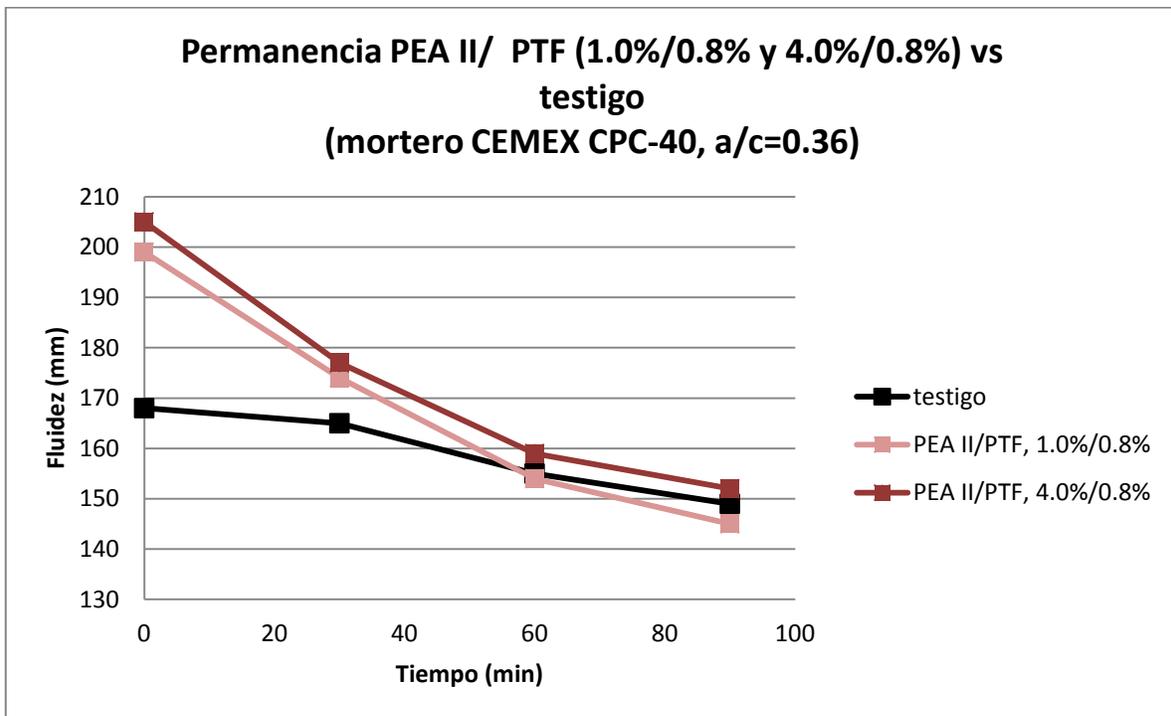


Gráfica 21. Permanencia para mortero con PEA I y PTF a 1.0% y 4.0%

La gráfica 20 muestra como la presencia de ambas sustancias no evita que el desempeño de la mezcla se vea afectado y por el contrario este es benéficamente afectado, sobre todo en la fluidez inicial. Por otro lado, vemos claramente que la tasa de disminución de la fluidez es muy alta, con 1.0% de sustancia PEA I presenta incluso resultados por debajo de la muestra testigo a los 60 minutos. Así, se obtuvieron un 15.2% para la dosificación a 1.0% y 14.3% para la dosificación a 4.0%, que si bien son los más altos hasta ahora presentados en muestras de mortero, para esta serie de pruebas resultan ser los mejores. Es de ponderar, basándose principalmente en el caso específico (pensando una

aplicación real) si la inhibición de la arcilla, previa al uso del PTF, es viable, puesto que el incremento de la fluidez, a tiempo inicial es muy notoria, puesto que para 1.0% la fluidez incrementó en 117.3% y para 4.0% un 125.0% (la más alta de toda la serie). Si bien es un notorio incremento, no se puede decir lo mismo de la permanencia. Esto se demuestra si vemos el porcentaje promedio de mejora de la permanencia nos arroja tan sólo un 2.1% para la dosificación a 1.0% y 8.7% (de nuevo, la más alta de toda la serie) para 4.0%. En cuanto al contenido de aire, se puede decir que la mejoría con respecto a la muestra testigo es positiva, habiéndose obtenido un 3.7% para la muestra dosificada con 1.0% de sustancia y 5.2% para la dosificada a 4.0%, que resulta ser de nueva cuenta el más alto de la serie.

Ahora, en la grafica 21 se muestran los resultados de la PEA

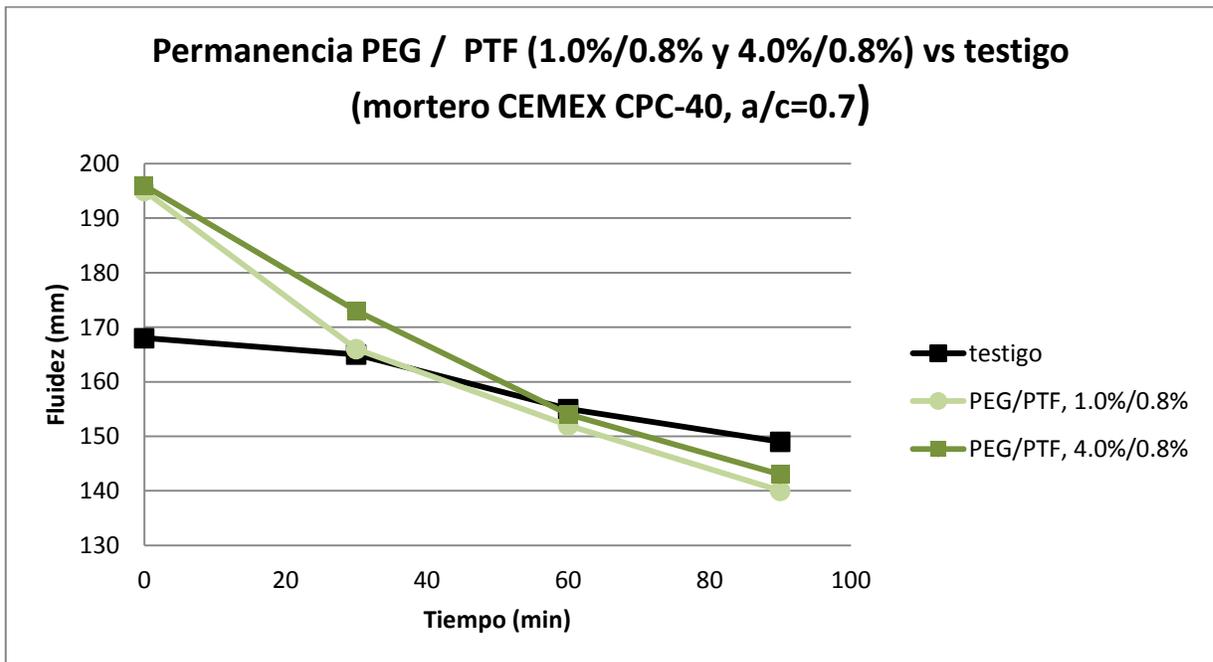


Gráfica 22. Permanencia para mortero con PEA II y PTF a 1.0% y 4.0%

La gráfica 21 muestra una mejora en el sentido de que si bien los resultados tienen la misma tendencia a los presentados para la sustancia PEA I,

se observa claramente que los resultados de la dosificación a 1.0% no caen muy por debajo de la muestra testigo. La tasa de disminución de la fluidez, para la muestra dosificada a 1.0% fue de 20.8% y para la dosificación a 4.0% fue de 20.7%. Ambas considerablemente altas, lo cual indica una abrupta caída de la fluidez con respecto al tiempo y por ende una mala permanencia. Esto, como el porcentaje promedio de mejora de la permanencia indica, con un 4.3% para la dosificación 1.0% y 7.3% para la dosificación a 4.0%. Siguiendo la línea de los resultados obtenidos para la sustancia PEA I, con la sustancia PEA II, el aumento de la fluidez inicial con respecto a la muestra testigo resultó sobresaliente. Siendo así que con 1.0% se logró un 118.5% más de fluidez y con 4.0% se llegó al 122.0%. Para lo cual, las mismas consideraciones de habrían de tener que para la PEA I, pensando en la aplicación en campo. Los contenidos de aire, fueron, para la dosificación a 1.0%, 4.4% y para la dosificación a 4.0%, 4.9%. Que se pueden considerar de igual manera benéficos y de cierta forma explican el incremento de la fluidez tan marcada.

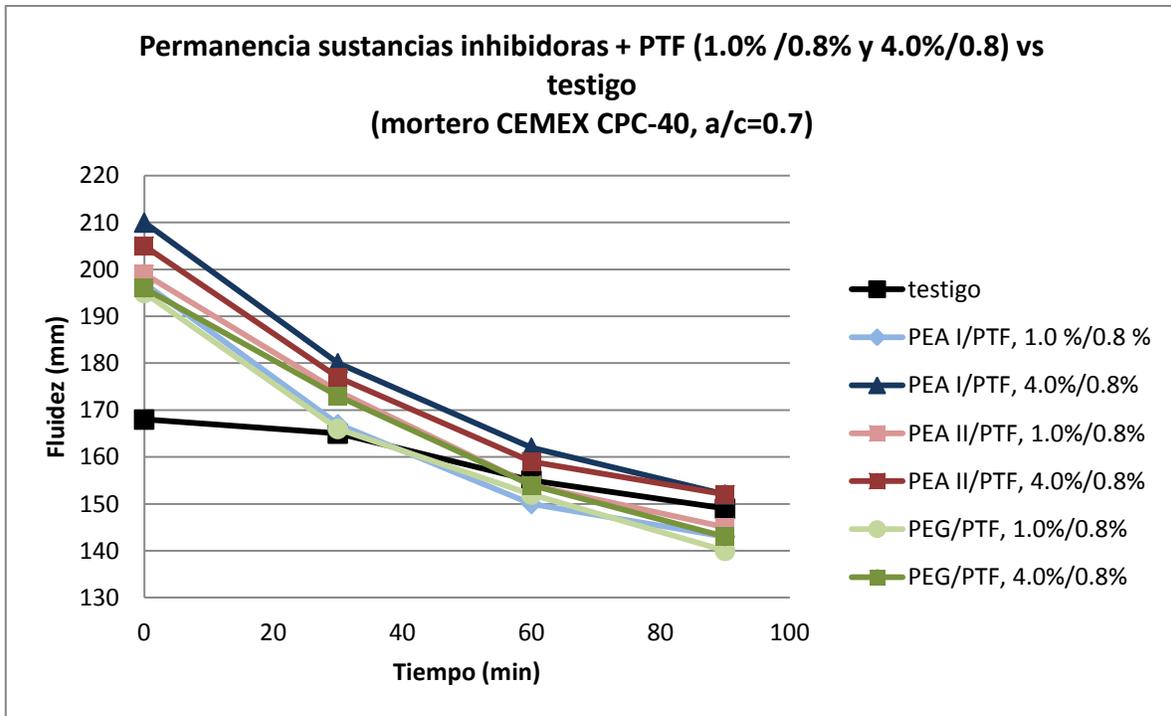
Por último, la gráfica 22 muestra la comparativa de fluidez y permanencia para la sustancia PEA I en sinergia con el plastificante.



Gráfica 23. Permanencia para mortero con PEG y PTF a 1.0% y 4.0%

La gráfica 22 muestra la misma tendencia de desempeño que las dos sustancias anteriores en combinación con el PTF. Se puede decir que en este caso la caída de la permanencia es mucho más drástica. La tasa promedio de disminución de la fluidez fue de 21.7% para 1.0% y 20.1% para 4.0%. Si bien la tasa promedio de disminución de la fluidez no fue muy alta, se observa claramente que a los 60 minutos ambas curvas se encuentran por debajo de los valores del testigo. A fluidez inicial, la sustancia PEG tuvo el último lugar de las tres sustancias, sin embargo no es nada despreciable, pues alcanzó el 116.0% dosificado a 1.0% y 116.7% dosificado a 4.0%, no muy inferiores al máximo logrado que fue de 125.0% con la sustancia PEA I a 4.0%. Presentando ahora los datos de porcentaje promedio de mejora de la permanencia nos podemos dar una idea más certera respecto a esta propiedad, para la dosificación a 1.0% fue de 1.5% (la más baja de toda la serie de pruebas) y 3.5% para la dosificación a 4.0%, muy bajos porcentajes, pero como ya se mencionó con anticipación su utilización es viable si la principal preocupación es la obtención de buena fluidez inicial. Para el contenido de aire sucedió que el mejor contenido y que en cierta forma se contraponen a los resultados de fluidez y permanencia donde los mejores fueron para la dosificación a 4.0% y ahora sucede lo contrario. Para 1.0% se obtuvo un 4.0% y para 4.0% se obtuvo un 3.5% de contenido de aire. Después de todo lo anteriormente mencionado, se puede ver claramente como esta sustancia inhibidora resultó ser la menos beneficiosa de las tres, al trabajar en conjunto con el PTF.

Para fines de una rápida y visualización comparativa entre los resultados, se presenta ahora la gráfica 23 y la tabla 9.



Gráfica 24. Permanencia en mortero con sustancias inhibidoras y PTF 1.0% y 4.0% inhibidoras vs testigo

Tabla 18. Datos adicionales para mortero con sustancias inhibidoras y PTF 1.0% y 4.0% inhibidoras

SUSTANCIA	TPDF (%)	PPMP (%)	Contenido de aire (%)	Dosificación	Dosificación
				Sustancia inhibidora en base a finos (%)	Sustancia inhibidora en base a cemento (%)
PEA I	15.2	2.1	3.7	1.0	0.8
PEA I	14.3	8.7	5.2	4.0	0.8
PEA II	20.8	4.3	4.4	1.0	0.8
PEA II	20.7	7.3	4.9	4.0	0.8
PEG	21.7	1.5	4.0	1.0	0.8
PEG	20.1	3.5	5.2	3.5	0.8

En general, vemos tasas altas y permanencias bajas, pero si bien estos datos a primera vista parecieran negativos, el contenido de aire (en comparación con la series de pruebas anteriores), no está muy alejado. Este hecho no afectó significativamente la resistencia como más adelante se muestra. Estos factores llevan a hacer un balance entre el desempeño de las propiedades observadas y las necesidades de la industria bajo determinadas especificaciones, en función del uso y condiciones en las que la mezcla trabajará.

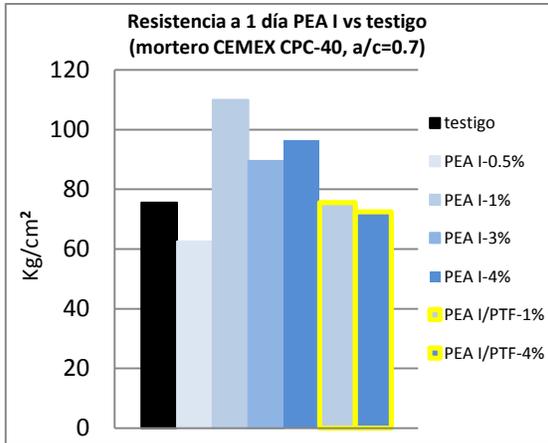
De los resultados de las pruebas anteriormente presentados, surge entonces la incógnita de saber qué es lo que sucede con la propiedad que resulta de mayor importancia para las mezclas cementicias, la resistencia a la compresión.

4.7 Resistencia a la compresión en morteros

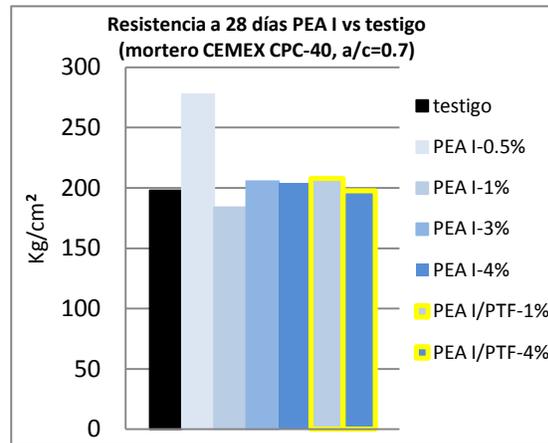
Como ya se mencionó, el mortero se diseñó para obtener una resistencia de 250 kg/cm^2 . En las pruebas realizadas, los testigos tuvieron un promedio de 198 kg/cm^2 . Si bien no se logró la resistencia pensada, tampoco fue desechada, ya que dicha resistencia se utiliza como punto de referencia para la comparativa del desempeño de la resistencia a la compresión.

Las gráficas aquí presentadas, son los resultados de resistencia mecánica a compresión a 1 y a 28 días. A 1 día es importante conocer la resistencia dado que las principales reacciones químicas, en las que el agua se convierte el factor determinante, suceden principalmente dentro de este periodo de tiempo.

Dicho lo anterior, ahora se presentan las gráficas 24 y 25 las cuales representan los resultados de resistencia para todas las dosificaciones utilizadas a 1 día y a 28 días respectivamente, para la sustancia PEA I.



Gráfica 25. Resistencia a 1 día para PEA I

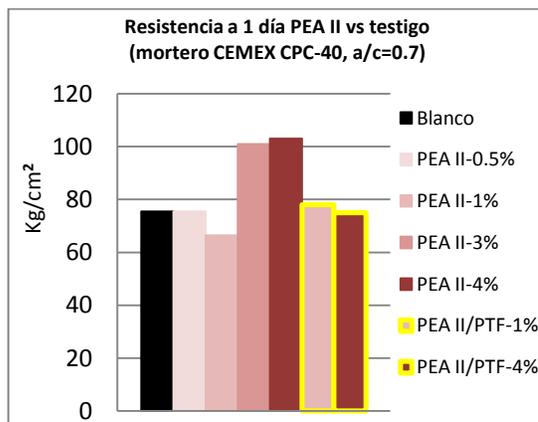


Gráfica 26. Resistencia a 28 días para PEA I

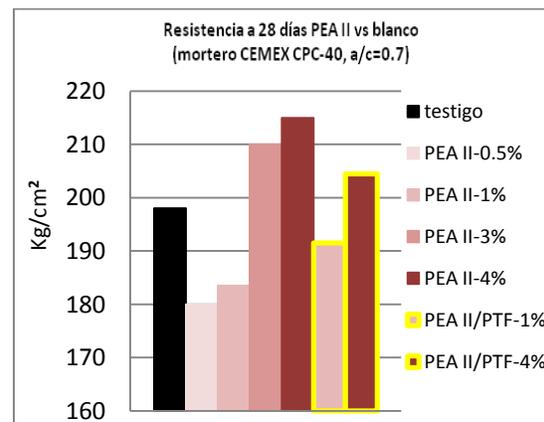
En ambas gráficas podemos observar las resistencias de los morteros tanto a 1 día como a 28 días, en comparación con el resultado de resistencia del mortero que representa a la muestra testigo. Lo primero y tal vez más importante de esta comparativa, es el hecho de que con PEA I a 0.5%, la resistencia a la edad de 1 día llega tan sólo 62.5 kg/cm^2 , siendo así la más baja, incluso que la muestra testigo con 75.5 kg/cm^2 . A los 28 días sucede un fenómeno interesante, la misma muestra, presenta ahora una resistencia muy superior, alcanzando así los 278 kg/cm^2 , la más alta de todas las pruebas realizadas y la única que alcanza y supera la resistencia de diseño. Podemos observar también que a las dosificaciones de 1.0%, 3.0% y 4.0%, a la edad de 1 día rondan los 100 kg/cm^2 (alrededor de la mitad de la resistencia obtenido para la muestra testigo), pudiéndose inferir así, en primera instancia, que la variación de la dosificación dentro de rangos mayores a 1.0% no causa un gran impacto. Lo anterior, se puede corroborar cuando a 28 días, las resistencias aumentaron hasta un rango muy cercano al resultado de resistencia obtenido para la muestra testigo. Incluso sucede que a 1 día, el rango de resultados de resistencia va desde los 97 kg/cm^2 hasta los 110 kg/cm^2 , 13 kg/cm^2 de diferencia, pero a los 28 días el rango se encuentra entre los 185 kg/cm^2 y los 204 kg/cm^2 , existiendo así una diferencia de 19 kg/cm^2 . La variación entre el máximo y el mínimo para las dosificaciones a 1.0%, 3.0% y 4.0% son muy pequeñas para los casos de ambas edades. Para las muestras en sinergia con el plastificante, sucedió, que en comparación con las

dosificaciones antes mencionadas, los resultados fueron inferiores a la edad de 1 día. Para 1.0% de sustancia inhibidora la resistencia fue de 75.5% kg/cm² y para 4.0% fue de 72.5%, una diferencia prácticamente despreciable, pero que en un inicio hace pensar que la resistencia está siendo fuertemente afectada, tal vez porque entre la sustancia inhibidora y el plastificante no se está dando el efecto sinérgico que se esperaba. Esto se desecha fácilmente cuando a 28 días se ve claramente que la resistencia se encuentra dentro del mismo rango del resto de las muestras. Aquí sucede algo muy similar a lo que se discutía en el caso de la permanencia para las mezclas en sinergia, pues la resistencia final no es sobresaliente con respecto a las demás, de hecho muy inferior a la obtenida para la sustancia sola con tan sólo 0.5%. Pero no podemos dejar de lado que lo que si fue sobresaliente es el hecho del importante incremento en la fluidez inicial y que si bien a edad temprana, el desarrollo de la resistencia se ve afectado, a 28 días los resultados muestran que no existe un efecto considerablemente negativo.

Ahora se presentan las gráficas 26 y 27 las cuales representan los resultados de resistencia para todas las dosificaciones utilizadas a 1 día y a 28 días respectivamente, para la sustancia PEA II.



Gráfica 27. Resistencia a 1 día PEA II



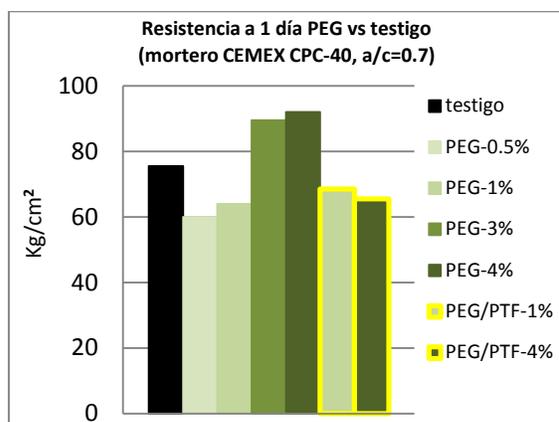
Gráfica 28. Resistencia a 28 días PEA II

Como se recordará, en las pruebas de pasta de finos de arena, los resultados de fluidez y permanencias de las pruebas con la sustancia PEA II fueron, por mucho, los mas sobresalientes. En el caso de los morteros, en general también presentó un comportamiento bastante aceptable. Para la propiedad de

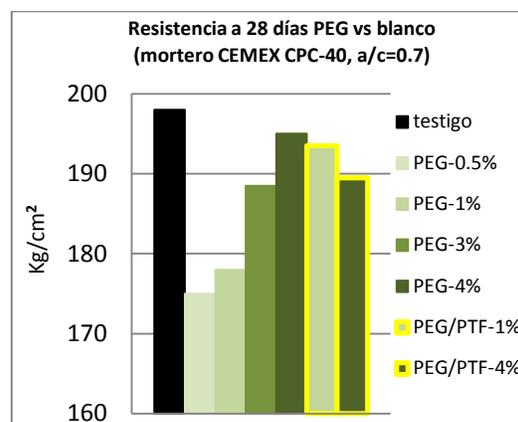
resistencia a la compresión, parece no dejar de ser un excelente candidato por su buen desempeño en la mejora de las propiedades de las muestras. A 1 día es evidente como el efecto de la sustancia PEA II es positivo. Para las menores dosificación, 0.5% y 1.0%, contrario al resto, se obtienen resultados un tanto desalentadores, pues no lograron superar el resultado de resistencia obtenido para la muestra testigo (75.5 kg/cm^2), siendo así, 75.5 kg/cm^2 y 66.5 kg/cm^2 los resultados de resistencia respectivamente. A 28 días el panorama parece no mejorar para estas dos dosificaciones (0.5% y 1.0%) puesto que si bien su resistencia aumentó hasta 180 kg/cm^2 para la dosificación a 0.5% y 183.5 kg/cm^2 para la dosificación a 1.0%, ambos inferiores en comparación a la muestra testigo, que llegó a los 198 kg/cm^2 , si bien no es una diferencia muy marcada, lo ideal sería que con la adición de la sustancia inhibidora, la resistencia sufriera un efecto positivo. Así, pasando a los resultados de resistencia con dosificaciones más altas, el panorama cambia por completo. Para 3.0% y 4.0% las resistencias para ambas edades superan por mucho a la muestra testigo. A 1 día, se obtuvieron 101 kg/cm^2 y 103 kg/cm^2 respectivamente considerablemente superiores a los 75.5 kg/cm^2 de la muestra testigo. A 28 días la diferencia se vuelve mucho más marcada, en comparación a los 198 kg/cm^2 , ambas resistencias en cantidades que superan el orden del 50.0% con respecto a esta referencia, siendo los valores obtenidos 210 kg/cm^2 (para 3.0%) y 215 kg/cm^2 (para 4.0%). Lo cual sumado al nada despreciable desempeño de fluidez y permanencia tanto en pastas de finos como en morteros, lo postulan como el mejor de los tres candidatos. El caso de las muestras en sinergia con el plastificante, siguen la misma línea de comportamiento. A 1 día las resistencias superan el resultado obtenido para la muestra testigo (75.5 kg/cm^2) con 78 kg/cm^2 para la dosificación a 1.0% y 75 kg/cm^2 para la dosificación a 4.0%. A 28 días, la tendencia de tener una resistencia mayor que la de la muestra testigo, cambia la para la muestra dosificada a 1.0% y se mantiene para la muestra dosificada a 4.0% de sustancia inhibidora PEA II. Habiéndose obtenido 191.5 kg/cm^2 y 204.5 kg/cm^2 , respectivamente. La primera menor a los 198 kg/cm^2 de la muestra testigo y la segunda mayor con respecto a la misma. Ninguna de la dos variable en

cantidades muy significativas, pero que invitan a inferir que la sinergia entre la sustancia inhibidora y el plastificante es exitosa.

Las gráficas 28 y 29 las cuales representan los resultados de resistencia para todas las dosificaciones utilizadas a 1 día y a 28 días respectivamente, para la sustancia PEA II.



Gráfica 29. Resistencia a 1 día para PEG



Gráfica 30. Resistencia a 28 días para PEG

La sustancia PEG fue en general la que menor desempeño aportó. Esta tendencia sigue presente en los resultados de resistencia obtenidos tras el uso de dicha sustancia inhibidora. a 1 día, se encuentran dentro de un rango muy estrecho las muestras dosificadas a 0.5%, 1.0%, así como las sinergias a 1.0% y 4.0%. los datos respectivamente son: 60 kg/cm², 64 kg/cm², 68.5 kg/cm², 65.5 kg/cm², mismos que se encuentran considerablemente por debajo de la resistencia de la muestra testigo (75.5 kg/cm²). Por desgracia dicha tendencia (a estar por debajo de la resistencia de la muestra testigo), a los 28 días se mantiene, las dosificadas a 0.5% y 1.0%, las resistencias son 175 kg/cm² y 178 kg/cm², respectivamente, significativamente inferiores a los 198 kg/cm² de la muestra testigo. Las muestras en sinergia lograron un mejor desempeño con respecto a las anteriores, para 1.0%, se obtuvo 193.5 kg/cm² y para 4.0%, el resultado fue de 190 kg/cm², inferiores aunque en menor medida. Para el caso de las muestras dosificadas a 3.0% y 4.0% a 1 día parecían prometedoras, ambas superando a la muestra testigo con 90 kg/cm² y 92 kg/cm², respectivamente. A 28 días esto deja de suceder, ambas resistencias se encuentran por debajo de la muestra testigo con 189 kg/cm² y 195

kg/cm², respectivamente. Todos estos datos corroboran que la sustancia PEG, si bien si presenta evidencia de inhibición de hinchamiento de arcillas, es la menos eficiente de las tres.

4.8 Discusión y conclusiones

Dentro de este proyecto se puede decir que la meta es lograr encontrar sustancias que puedan inhibir los efectos negativos de las arcillas contenidas en los agregados, en mezclas cementicias. Las sustancias inhibidoras fueron escogidas en principio porque esta se encuentran dentro de la clasificación de polímeros, lo cual resultó eficiente pues dichos tipo de materiales, son de por si conocidos por su carácter hidrofílico, pero que al mismo tiempo tienen la capacidad de reaccionar con la superficie negativamente cargada de las arcillas, creando una interfase química.

Como ya se mencionó anteriormente, no se puede dejar de lado el hecho de que las arcillas producen una serie de factores de mucha importancia: su pequeño tamaño de partícula, la morfología laminar (filosilicatos) y Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar. Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas. Esto se puede entender mejor si se analiza la imagen 29.

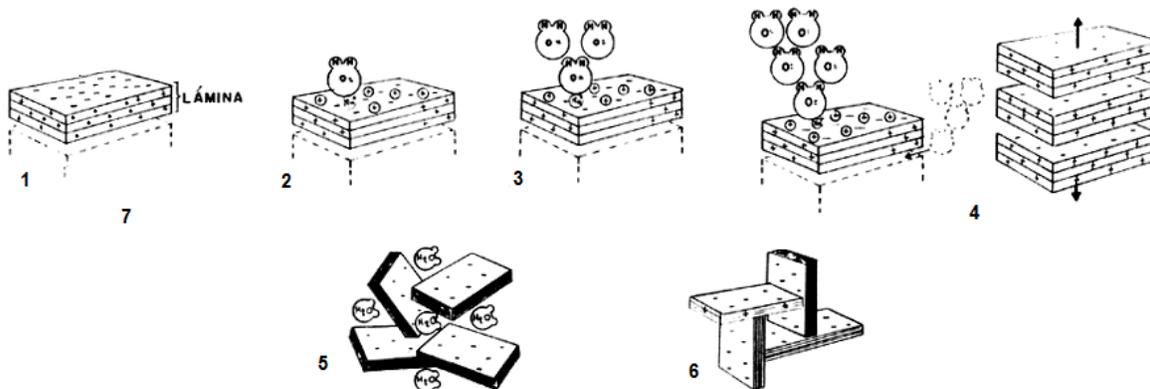


Imagen 29. Etapas de hidratación de la arcilla

Etapa 1: desde el punto de vista electrostático, las cargas negativas en la arcilla se acumulan en las superficies planas de las láminas, mientras que los bordes acumulan cargas positivas. Así, los iones positivos tienden a concentrarse sobre las caras planas.

Etapa 2: al ponerse en contacto con la arcilla, las moléculas de agua son atraídas fuertemente hacia las superficies planas debido a la presencia de los iones sodio cargados positivamente. Hay que recordar que, a la escala molecular, las fuerzas electrostáticas son las más importantes.

Etapa 3: en este estado, las moléculas de agua se hacen más dipolares, atrayendo a otras de su especie.

Etapa 4: la carga negativa en la superficie de las láminas se incrementa conforme las moléculas de agua se enlazan unas con otras al aumentar su polarización. Llega un momento en que la carga superficial es tal, que las láminas se repelen entre sí separándose unas de otras por lo que el espacio interlaminar se expande, originando el hinchamiento característico de las arcillas.

Etapa 5: las moléculas de agua continúan llenando el espacio interlaminar, neutralizando parcialmente las superficies expuestas y manteniendo las láminas apartadas unas de otras, hasta que el agua es eliminada mediante algún

procedimiento de secado, lo cual origina una contracción del volumen de la hojuela.

Etapa 6: el equilibrio de la hidratación es alcanzado cuando termina la mezcla de la arcilla con el agua, dando como resultado una estructura interna hidratada que hace coincidir los bordes cargados positivamente con las caras planas cargadas negativamente, de modo que se forma una estructura de “castillo de naipes”, por lo que las moléculas de agua entran y salen libremente. Dicha estructura puede derrumbarse mediante una agitación vigorosa de la suspensión, pero tiende a formarse de nuevo si la agitación termina, esto es, si el medio queda libre de esfuerzos mecánicos. Este último efecto se debe a que las hojas mantienen la fuerte carga electrostática que las atrae.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa, con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con estado variable de hidratación, que pueden ser intercambiados fácilmente mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, a esta propiedad se la conoce como capacidad de intercambio catiónico y es también la base de multitud de aplicaciones industriales.

En el caso del material elegido para este trabajo, se demostró que la montmorillonita sódica (muy común en el país) era el material expansivo cuyo efecto debía ser combatido. Dicho mineral se encuentra en el caso que ocupa a este estudio incluida en la arena 1 que es usada como material de referencia en la empresa Sika mexicana.

La capacidad de interacción química, indica la amplia gama de posibilidades de interacción química de las arcillas y en especial de la montmorillonita y más aún, con los polímeros. Como lo son las sustancias que en principio se establecieron como inhibidoras y que luego se comprobó que en efecto, actuaban de esta forma.

Las tres sustancias que resultaron seleccionadas para ser estudiadas más a fondo, fueron llamadas, para propósitos de identificación dentro de este proyecto, como: PEA I, PEA II y PEG. Las primeras dos están compuestas por poliéter

amina y sal de poliéter amina, en diferentes proporciones y la sustancia PEG, polietilenglicol. Es importante aclarar, que si bien las sustancias PEA I y PEA II tienen los mismos componentes, su diferencia radica en las proporciones en las que estos se encuentran. La primera tiene un promedio de 45% de sal de poliéter amina y 55% de poliéter amina, la segunda un promedio de 22% de sal de poliéter amina y 78% de poliéter amina.

Es importante por ello echar primero un vistazo a las aminas en general. Se puede considerar a las aminas como compuestos nitrogenados derivados del amoníaco (:NH_3) en el que uno o más grupos alquilo o arilo están unidos al nitrógeno. El átomo de nitrógeno de la molécula de amoníaco contiene un par electrónico libre, de manera que la forma de esta molécula, considerando en ella al par de electrones no enlazantes, es tetraédrica ligeramente distorsionada. El par aislado de electrones no enlazantes ocupa una de las posiciones tetraédricas. El ángulo del enlace H-N-H del amoníaco es de 107° , y tanto la forma de la molécula como el valor anterior se pueden explicar admitiendo una hibridación sp^3 en el átomo de nitrógeno. El par electrónico libre provoca una compresión del ángulo que forman entre sí los orbitales híbridos sp^3 , reduciéndolo de 109° a 107° grados.

Así, es como se sabe que la amina se une a la arcilla mediante fuerzas de Van der Waals gracias los enlaces de hidrógeno, como se muestra en la figura 11.

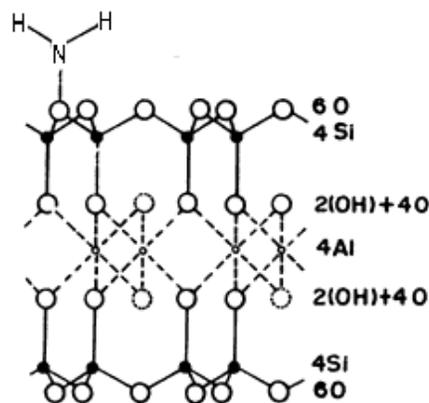


Imagen 30. Interacción amina y arcilla

La imagen 30 representa la estructura de la montmorillonita y se ilustra al mismo tiempo la forma en la que la amina se une a la superficie negativa de la arcilla,

gracias al enlace de hidrógeno. Muchas de las propiedades de las aminas dependen de la concentración de estas, así como del tamaño de la cadena.

Como ya se mencionó, entre las sustancias PEA I y PEA II la sustancia PEA II fue la que mayor concentración de aminas presenta, hecho que se ve reflejado en el desempeño de las mezclas a lo largo de todo el estudio. Desde un principio, en la etapa de selección de sustancias para inhibir arcillas, dicha sustancia mostró un desempeño sobresaliente, con respecto al resto.

En la etapa de pastas de finos era claro el efecto positivo que la sustancia imprimió en el desempeño de la mezcla. La etapa de pasta de cemento, en el caso de las tres sustancias, sucedió lo contrario al resto del estudio, ya que en los tres casos, la fluidez disminuyó y por ello la permanencia fue prácticamente nula. Para las pruebas realizadas en pasta de finos, la sustancia PEA II, resultó superior a las otras dos sustancias. Para la etapa de morteros, dado que se sabe que la química es mucho más compleja, los resultados fueron muy variables, pero siguió siendo un excelente candidato. Todo esto se corroboró con la realización de las pruebas de ángulo de contacto, habiendo dado como resultado el mayor ángulo de las tres.

Si bien la sustancia PEA I no fue la mejor, de igual manera aportó resultados bastante satisfactorios y consistentes a lo largo de todo el estudio. Se observó un importante aumento en la resistencia a la compresión de los morteros, esto con la adición de tan sólo 0.5% de sustancia inhibidora con respecto a la cantidad de finos presentes en la arena.

En cuanto a la sustancia PEG, fue de las tres la que presentó el desempeño más pobre. Su fluidez, permanencia y ángulo de contacto, no fueron tan satisfactorios, como los casos de las dos sustancias restantes. La imagen 31 muestra la molécula-unidad del polietilenglicol, mediante la cual podemos comprender mejor la forma en que este interactúa con el sistema en cuestión.

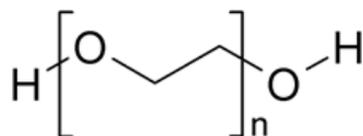


Imagen 31. Molécula-unidad polietilenglicol

Son compuestos orgánicos pertenecientes a la clase de los alcoholes, con propiedades únicas y de especial interés para la industria de los fluidos de perforación. Los aditivos basados en glicoles de uso más difundido son el polipropileno glicol (PPG) y el polietileno glicol (PEG), los cuales son de baja toxicidad, y mejoran la lubricidad, el control de filtrado y la inhibición de las lutitas. Desde hace tiempo se conoce al polietilenglicol por su aplicación como aditivo al para aceites de perforación, con la misma finalidad que la que este estudio persigue, la de inhibir el inchamiento de las arcillas (Durand, 1995)

De forma similar a lo sucedido en las sustancias PEA I y II, el principal mecanismo de interacción del PEG con las arcillas, es mediante la adsorción de polímero en la superficie de la arcilla (imagen 32). Los poliglicoles tienen gran afinidad por la superficie de la arcilla. Las moléculas de poliglicol compiten con las de agua por los sitios activos de adsorción. Esto evita que las moléculas de agua formen estructuras organizadas que produzcan hinchamiento y dispersión (Delgado, 1999). Los glicoles pueden interferir con los puentes de hidrógeno formados entre el agua y la superficie de la arcilla, durante el proceso de absorción de agua (hidratación), con el subsecuente hinchamiento y eventual dispersión. Los glicoles también pueden formar puentes de hidrógeno y por tanto competir tanto con el agua de hidratación alrededor de los cationes adsorbidos, como con el agua de presente en el medio. El polímero debe ser capaz de difundirse dentro de la arcilla, para lo cual requiere de cadenas cortas y flexibles, lo cual hace al polietilenglicol usado para este estudio una excelente elección, en el sentido de que es de bajo peso molecular. Gracias a lo mencionado, se da la formación de complejos arcilla-polímero, como indicadores de patrones de estabilidad.



Imagen 32. Interacción polietilenglicol - arcilla

Lo más importante del efecto químico de los polímeros como inhibidores de agua es la reducción de actividad química del agua. La presencia de poliglicoles reduce la actividad química de la superficie de las partículas de arcilla, lo que pudiera inhibir mecanismos osmóticos que promueven la penetración del agua. Aún así, esta reducción en la actividad química por la presencia de pequeñas cantidades de glicol (máximo 5%), no parece ser suficiente para evitar la penetración del agua y el hinchamiento de arcillas, dado que con la sustancia inhibidora PEG, se obtuvieron los resultados menos favorables en general.

Uno de los principales aportes de este trabajo al campo del conocimiento y es específico en áreas donde el combate de los efectos de las arcillas es vital, es el hecho de que existen una serie considerable de reportes respecto al uso de glicoles en el campo de la mecánica de suelos, como inhibidores de hinchamiento de arcilla en perforación de suelos. Sin embargo, sobre arcillas, no existía algún estudio que considerara aminas, para la inhibición de arcillas, superando así lo pre-establecido y dándole un punto de vista muy distinto y con excelentes resultados para el campo de las mezclas base cemento.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Brundtland Harlem Gro, Our Common Future, Organización de las Naciones Unidas (1987).
- Marina Vargas-Rodríguez Yolanda, Virginia Gómez-Vidales, Eloy Vázquez-Labastida, Arturo García-Bórquez, Guillermo Aguilar-Sahagún, Héctor Murrieta-Sánchez⁶ y Manuel Salmón, "Caracterización espectroscópica, química y morfológica y propiedades superficiales de una montmorillonita mexicana", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (2007).
- Mengel David B., "Fundamentals of soil cation exchange capacity", Purdue university, Agronomy guide (2000).
- F. Veniale, M. Setti, C. Rodriguez-Navarro, S. Lodola, "Procesos de alteración asociados al contenido de minerales arcillosos en materiales pétreos", *Materiales de Construcción* (2001).
- Timothy Wangler, Angela Wylykanowitz, and G.W. Scherer, "Controlling stress from swelling clay", 16th European Conf. Fracture (2006).
- Zepeda Garrido JA, Castañeda AH "Distribución de suelos expansivos en la República Mexicana", Curso Internacional de Mecánica de Suelos Arcillosos". UAQ, Querétaro, Qro; México (1992).
- Stubican, V.; Rustum, Roy, "Isomorphous substitution and infra-red spectra of the layer lattice silicates", *American mineralogist* (1961).
- Murray Haydn H, "applied mineralogy", development clay science (2007).
- Carroll Dorothy, "ion exchange in clays and other minerals", U. S. geological survey, Washington, D. C. (1959).
- Guzmán Gonzáles Omar, tesis de maestría "Influencia del agrietamiento del concreto en la corrosión del acero de refuerzo", Instituto Politécnico Nacional (2008).

Callister W. Jr., Material Science and Engineering, an introduction, third edition, John Wiley & Sons (1994).

Newman A.C.D., Chemistry of Clays and Clay Minerals, Mineralogical Society (1987).

Bowden, J. W., Posner, A. M., and Quirk, J. P. "Ionic adsorption on variable charge mineral surfaces". Theoretical-charge development and titration curves: Aust. J. SoilRes. (1977).

Pham till hang and G. W. Brindley, "methylene blue absorption by clay minerals. determination of surfaceareas and cation exchange capacities (clay-organic studies xviii)", department of geochemistry and mineralogy, and materials research laboratory

Jackson M.L., Soil Chemical Analysis, Advanced Course (1956).

Jiménez Salas, J. A., de Justo Alpañes, J. I. "Geotecnia y Cimientos". Vol. I. "Propiedades de los Suelos y de las Rocas.", 2ª Edición. Editorial Rueda (1975).

Newman A.C.D., The Specific Surface of Soils determined by Water Sorption, Journal of Soil Science (1983).

Noris Shreve R. The Chemical Process Industries. Edt. McGraw-Hills (1967).

Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma de las características de los materiales, materiales para estructuras, SCT (2005).

Dolar-Mantuani, L. Handbook of concrete aggregates: a petrographic and technological evaluation, Noyes Publications (1983).

Gullerud, K., Cramer, S. "Effects of Aggregate Coatings and Films on Concrete Performance", Wisconsin Department of Transportation, Madison (2002).

Goldbeck, A. T. "Nature and effect of surface coatings on coarse aggregates" American Highways annual report (1933).

Muñoz, J. F., Tejedor, M.I., Anderson, M.A., and Cramer, S.M. "Expanded study on the effects of aggregate coating and films on concrete performance" Wisconsin Department of Transportation annual report (2007).

P. Jarvis, B. Jefferson, J. Gregory, S.A. Parsons, "A review of floc strength and breakage", Water Research (2005).

D.M. Liu, "Theoretical determination of floc size in highly-concentrated zirconia wax suspensions", Acta Materialia (2002).

D.M. Liu, "Particle packing and rheological property of highly-concentrated ceramic suspensions: ϕ_m determination and viscosity prediction", Journal of Materials Science (2000).

D.N. Thomas, S.J. Judd, N. Fawcett, "Flocculation modeling: a review", Water Research (1999).

V.A. Fernandes, P. Purnell, G.T. Stilla and T.H. Thomas, "The effect of clay content in sands used for cementitious materials in developing countries", Cement and concrete research (2007).

Timothy Wangler, "Clay swelling inhibition mechanism of diaminoalkanes in Portland Brownstone", Journal of materials research (2009).

H Kroyer, H Lindgreen, H J Jakobsen, J Skibsted, "Hydration of Portland cement in the presence of clay minerals studied by Si-29 and Al-27 MAS NMR spectroscopy", *Advances in Cement Research* (2003).

Johann Plank, Christof Schroeﬂ, Mirko Gruber, Matthias Lesti and Roland Sieber, "Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The Importance of PCE Compatibility with Silica Fume", *Chair for construction chemicals* (2009).

Claire Watsona, Koji Hanea, b, David Savagea, Steven Benbowa, Jaime Cuevas and Raul Fernandez, "Reaction and diffusion of cementitious water in bentonite: Results of 'blind' modeling", *applied clay science* (2009).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, *Anuario de estadísticas por entidad federativa*, INEGI (2011).

Yolanda Marina Vargas-Rodríguez, Virginia Gómez-Vidales, Eloy Vázquez-Labastida, Arturo García-Bórquez, Guillermo Aguilar-Sahagún, Héctor Murrieta-Sánchez⁶ y Manuel Salmón, "Caracterización espectroscópica, química y morfológica y propiedades superficiales de una montmorillonita mexicana", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (2007).

Arvanitopyannis, I., Eleftheriadis I., Tsatsaroni, E., "Influence of Ph adsorption of dye-containing effluents with different bentonites: *Chemosphere*", *Science clays* (1989).

Adams, J.M., "Synthetic organic chemistry using pillared, cationexchanged and acid-treated montmorillonite catalysts- a review", *Applied Clay Science* (1987).

Chitnis, S.R., Sharma, M.M., "Industrial applications of acid-treated clays as catalyst", *Reactive and Functional Polymers* (1997).

Salmón, M., Pérez-Luna, N., López-Franco, C., Hernández, E., Álvarez-Ramírez, R.A., López-Ortega, A., Domínguez, J.M., “Catalytic conversion of propylene oxide on a super acid sulfonic clay (SASC) system”, *Journal of Molecular Catalysis* (1997).

Rhodes, C.N., Brown, D.R., “Structural characterization and optimization of acid-treated montmorillonite and high-porosity silica supports for $ZnCl_2$ alkylation Catalyst”, *Journal of the Chemical Society* (1992).

Breen, C., Madejová, J., Komadel, P., “Characterization of moderately acid-treated, size-fractionated montmorillonites using IR and MAS NMR spectroscopy and thermal analysis” *Journal of Materials Chemistry* (1995).

Vargas-Rodríguez, Y.M., Beltrán H.I., Vázquez-Labastida, E., Linares-López. C., Salmón, M., “Synthesis and characterization of montmorillonite clays with modifiable porosity induced with acids and superacids” *Journal of Materials Research* (2007).

Furukawa Yoko; Watkins, Janet L; Kim, Jinwook; Curry, Kenneth J; Bennett, Richard H., “Aggregation of montmorillonite and organic matter in aqueous media containing artificial seawater”, *Geochemical Transactions* (2009) .

American Standard for Testing Materials, ASTM C-457, ASTM West Conshohocken, Pennsylvania (1990).

C. Durand, T. Forsans, C. Ruffet, A. Onaisi, A. Audibert, *Rev. L.Inst. Fr.*, “Colloids and surfaces” (1995).

ado (1999), “Evaluación de fluidos de perforación base agua formulados con glicoles y poliglicoles”, Tesis de Grado de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo (1999).