

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**“EFECTO DEL VIDRIO BOROSILICATO EN CONCRETOS DE ULTRA  
ALTO DESEMPEÑO: PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y  
MICROESTRUCTURA”**

**POR**

**ING. ALFREDO LANDAVERDE GARCÍA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES  
DE CONSTRUCCIÓN**

**NOVIEMBRE, 2017**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS  
“EFECTO DEL VIDRIO BOROSILICATO EN CONCRETOS DE ULTRA ALTO  
DESEMPEÑO: PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA”**

**POR  
ING. ALFREDO LANDAVERDE GARCÍA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES  
DE CONSTRUCCIÓN**

**DIRECTOR DE TESIS  
DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA**

**CO-DIRECTOR DE TESIS  
DR. ALBERTO ANTONIO ZALDIVAR CADENA**

**NOVIEMBRE, 2017**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**  
Subdirector de Estudios de Posgrado  
Facultad de Ingeniería Civil, UANL

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que un servidor ha concluido con la revisión del trabajo de Tesis (Trabajo final) titulado "Efecto del Vidrio Borosilicato en Concretos de Ultra Alto Desempeño: Propiedades Físico-Mecánicas y Microestructura", que presenta el ING. ALFREDO LANDAVERDE GARCÍA, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción en nuestra Facultad. Así mismo, me permito informarle que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** para su disertación ante sinodales, teniendo como fecha del examen de grado el día 15 de diciembre del año en curso.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente,  
"Alere Flammam Veritatis"  
Ciudad Universitaria, 10 de noviembre de 2017

**DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA**  
Director de Tesis y Evaluador  
Comité de Evaluación



"Educación de clase mundial,  
un compromiso social"

Av. Universidad S/N Ciudad Universitaria  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455  
Tel.: 1442 4400 Fax: 1442 4443  
<http://www.fic.uanl.mx>



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**  
**SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente. -

Estimado Dr. Juárez:

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que un servidor ha concluido con la revisión del trabajo de Tesis (Trabajo final) titulado "Efecto del Vidrio Borosilicato en Concretos De Ultra Alto Desempeño: Propiedades Físico-Mecánicas Y Microestructura", que presenta el ING. ALFREDO LANDAVERDE GARCÍA, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción en nuestra Facultad. Así mismo, me permito informarle que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** para su disertación ante sinodales, teniendo como fecha del examen de grado el día 15 de diciembre del año en curso.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

**ATENTAMENTE**

**"ALERE FLAMMAM VERITATIS"**

Cd. Universitaria, a 13 de noviembre del 2017

**DR. ANTONIO ALBERTO ZALDIVAR CADENA**  
**CO-DIRECTOR DE TESIS Y EVALUADOR**  
**COMITÉ DE EVALUACION**



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455  
Tel: (81) 8329-6000 ext. 7229  
[uanl@uanl.mx](mailto:uanl@uanl.mx)



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**FIC**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
DIRECCIÓN

FIC-708/2017

**DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**  
Subdirector de Estudios de Posgrado  
Facultad de Ingeniería Civil  
Universidad Autónoma de Nuevo León  
Presente. -

Estimado Dr. Juárez-Alvarado:

En atención a su oficio, en el que me informa que he sido designado como Evaluador de la tesis "Efecto del vidrio Borosilicato en Concretos De Ultra Alto Desempeño: Propiedades Físico-Mecánicas Y Microestructura", que presenta el Ing. Alfredo Landaverde, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, le comunico que después de ver leído, evaluado y constatado la calidad y los cambios sugeridos a la tesis, dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular por el momento, quedo a sus órdenes para cualquier aclaración que considere pertinente.

ATENTAMENTE  
"ALERE FLAMMAM VERITATIS"  
Ciudad Universitaria, a 14 de noviembre de 2017



DIRECCION

**DR. PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ**  
Evaluador



"Educación de clase mundial,  
en compromiso social"

Ave. Pedro de Alba S/N. Cd. Universitaria, Apdo. Postal 58F  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66459  
Tels. (01-81) 8320 4000 - 8320 4650 Fax ext. 100  
<http://fic.uanl.mx>

## **Agradecimientos**

A mis padres, Leonor García Reséndiz y Alfredo Landaverde, porque siempre me han apoyado, por los consejos brindados, que son mi motor y motivación para continuar superándome.

A mi novia Rocío M. Martínez Ballesteros, por su apoyo incondicional y porque siempre me motivo a ser mejor.

A mis tíos, Maura y Casimiro Landaverde, que me motivaron y apoyaron continuar con mis estudios de maestría, desde niño siempre nos inculcaron que la mejor forma de salir adelante es mediante la preparación.

En especial al Dr. Alejandro Duran Herrera, por ser mi directo de tesis, por el apoyo brindando para desarrollar la tesis, por su paciencia en las revisiones y por todo el conocimiento compartido.

Al Dr. Antonio Zaldívar, por ser mi Co-asesor, siempre me apoyo en todos los análisis requeridos para mi tesis que tiene dentro de los laboratorios que están a su cargo.

Al Dr. Pedro Valdez Tamez, por formar parte de mi jurado calificador.

También quiero agradecerle, a mi compañero Guillermo, por compartirme su conocimiento y por formar parte de formación dentro de la maestría.

A los miembros académicos y administrativos del Instituto de Ingeniería Civil, por su apoyo brindando, en especial al Departamento de Tecnología del Concreto y al Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción.

Por último, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento del proyecto y haber creído en mi capacidad para realizarlo.

## Resumen

Hoy en la actualidad uno de los principales retos que se tiene en la industria de la construcción es el incrementar la vida útil de las estructuras, por lo que los concretos de ultra alto desempeño (CUAD) son los candidatos ideales para cumplir con dicho requerimiento. La limitante de los concretos de ultra alto desempeño es su alto costo, debido a que se utilizan altos consumos de cemento, agregado fino arena de sílice y como material cementante suplementario se utiliza la microsílíce. Además, la disponibilidad de la microsílíce como material cementante suplementario en ciertas partes del mundo se encuentra limitada. Por estas razones los expertos en tecnología del concreto están enfocando sus investigaciones en hacer al Concreto de ultra alto desempeño un material competitivo al reducir la cantidad de cemento por materiales que funcionen como rellenos y/o mediante el uso de nuevos materiales cementantes suplementarios que permitan mantener sus altas resistencias y su gran durabilidad de los CUAD.

Este trabajo se enfocó en utilizar vidrio de borosilicato, es un subproducto que se genera en la industria local de Monterrey. La primera parte de la tesis se dedicó especialmente a determinar las moliendas que permiten obtener áreas superficiales, similares al del cemento y al microsílíce medidas mediante el método blaine, se usó un molino de vibro energía para ejecutar dichas moliendas. Se seleccionaron dos tamaños de polvo de vidrio, los cuales fueron caracterizados con la finalidad de determinar si pueden funcionar como filler o material cementante suplementario.

Para el desarrollo de los CUAD se probaron 3 diferentes granulometrías de agregado calizo, con la finalidad de comprobar si al reducir el tamaño máximo del agregado, es posible alcanzar una resistencia a compresión mayor a 150 MPa. Posteriormente, se procedió a utilizar el polvo de vidrio de borosilicato como reemplazo parcial del agregado fino con el objetivo de mejorar el empaquetamiento entre las partículas del agregado fino.

Una vez establecidas las mezclas óptimas se procedió a reemplazar el 40% del cemento por un polvo de vidrio de borosilicato con un blaine similar al cemento; y sustituir a la microsílíce en su totalidad por un polvo de vidrio de borosilicato con un blaine parecido a este último material. A estas mezclas se les determinó la resistencia a compresión, indicadores de durabilidad como resistividad eléctrica superficial, coeficiente de migración y se realizó el cálculo la vida útil. Como parte final las pastas de las mezclas óptimas fueron analizadas mediante el análisis termogravimétrico con la finalidad de determinar si existe una influencia de la cantidad de hidróxido de calcio en las propiedades de resistencia e indicadores de Durabilidad.

1. Introducción.....	1
1.1. Generalidades.....	1
2. Antecedentes .....	2
2.1. Materiales de producción de CUAD .....	2
2.2. Propiedades en estado fresco, mecánicas y de durabilidad de CUAD .....	5
2.3. Generalidades del vidrio .....	8
2.4. El uso del vidrio como cementante suplementario y filler en CUAD .....	11
2.5. Efecto del polvo de vidrio en las propiedades en estado fresco, mecánico y de durabilidad en el concreto.....	14
3. Planteamiento del Problema .....	15
3.1. Hipótesis .....	15
3.2. Objetivo General .....	15
3.3. Objetivos específicos .....	15
3.4. Justificación .....	16
4. Materiales.....	17
4.1. Descripción de los materiales .....	17
4.1.1. Cemento .....	17
4.1.2. Microsílice.....	18
4.1.3. Vidrio de Borosilicato .....	18
4.1.4. Agregado Fino .....	19
4.1.5. Aditivo Superplastificante .....	20
4.2. Caracterización de los Materiales .....	20
4.2.1. Cemento .....	20
4.2.1.1. Densidad .....	21
4.2.1.2. Distribución de tamaño de partículas .....	21
4.2.1.3. Área Superficial Especifica.....	22
4.2.1.4. Composición química .....	22
4.2.1.5. Fases minerales .....	23
4.3. Materiales Cementantes Suplementarios .....	24
4.3.1. Microsílice.....	24
4.3.1.1. Densidad .....	24
4.3.1.2. Distribución de tamaño de Partícula.....	24

4.3.1.3.	Composición química .....	24
4.3.1.4.	Índice de Actividad Puzolánica .....	24
4.3.1.5.	Área Superficial Especifica .....	25
4.3.2.	Polvos de vidrio de borosilicato .....	25
4.3.2.1.	Morfología .....	25
4.3.3.	Densidad .....	25
4.3.4.	Distribución de tamaño de Partícula .....	26
4.3.5.	Composición química .....	26
4.3.6.	Fases minerales .....	26
4.3.7.	Índice de Actividad Puzolánica .....	26
4.4.	Aditivo Superplastificante .....	27
4.4.1.	Densidad .....	27
4.4.2.	Contenido de Sólidos .....	27
4.5.	Agregado fino .....	27
4.5.1.	Densidad y Absorción .....	27
4.5.2.	Distribución Granulométrica .....	27
5.	Metodología Experimental .....	28
5.1.	Caracterización de la molienda .....	28
5.1.1.	Trabajo preliminar de molienda .....	28
5.1.2.	Molienda del vidrio de borosilicato .....	30
5.1.3.	Fineza por malla #325 .....	31
5.1.4.	Área específica superficial por el "Método Blaine .....	31
5.2.	Influencia de la granulometría de a agregado fino en CUAD .....	32
5.3.	Influencia del polvo de vidrio de borosilicato como agregado fino .....	34
5.4.	Efecto del vidrio de Borosilicato como filler y/o material cementante .....	36
5.5.	Métodos de prueba para indicadores de Durabilidad .....	40
5.5.1.	Resistividad eléctrica superficial .....	40
5.5.2.	Migración al Ion Cloruro .....	41
5.5.3.	Contracción química .....	43
5.6.	Caracterización de la reacción puzolánica del vidrio de borosilicato .....	43
5.6.1.	Análisis termogravimétrico .....	44
5.6.2.	Contracción química .....	53

6. Resultados y discusión.....	54
6.1. Evaluación de moliendas .....	54
6.1.1. Determinación de la Fineza por la malla #325 para las moliendas 1,3 y 4. ....	55
6.2. Caracterización de materiales Cementantes .....	60
6.2.1. Morfología de los tamaños de vidrio. ....	60
6.2.2. Densidad .....	61
6.2.3. Distribución de tamaño de partículas.....	62
6.2.4. Área superficial específica .....	62
6.2.5. Fases minerales .....	63
6.2.6. Composición química .....	66
6.3. Caracterización del Agregado fino .....	67
6.3.1. Densidad y Absorción de los agregados finos de caliza.....	67
6.3.2. Granulometría.....	67
6.4. Caracterización de la reacción puzolánica del vidrio de borosilicato .....	69
6.4.1. Índice de reactividad Puzolánica .....	69
6.4.2. Consumo de Hidróxido de Calcio .....	71
6.4.3. Contracción química del Polvo de vidrio de Borosilicato .....	81
6.5. Desarrollo de Concretos de ultra alto desempeño utilizando 3 granulometrías .....	82
6.6. Desarrollo de Concretos de ultra alto desempeño utilizando polvo de vidrio borosilicato PVB-1 como componente granular.....	85
6.7. Efecto de polvo de vidrio borosilicato como filler/ Cementante suplementario.....	89
6.8. Indicadores de Durabilidad .....	97
6.8.1. Resistividad Eléctrica Superficial .....	97
6.8.2. Coeficiente de migración .....	99
6.8.3. Vida útil.....	100
6.9. Evaluación de la hidratación de las pastas de las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C. ....	101
6.9.1. Contracción química de las mezclas .....	101
6.9.2. Análisis Termogravimétrico de las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C.....	102
7. Conclusiones y recomendaciones.....	114
8. Bibliografía .....	115

# 1. Introducción

## 1.1. Generalidades

En los años 90's se dio un importante descubrimiento en la tecnología del concreto con el desarrollo de los llamados concretos de polvos reactivos (CPR), ofertando resistencia a la compresión que sobre pasaban los 200 MPa, con resistencia a la flexión que sobre pasa a los 40 MPa y mostrando comportamiento algo de Ductilidad[1]. Debido a este comportamiento poco común en los concretos, se comenzó una investigación basada en los CPR, para un análisis de las resistencias a compresión tan altas y al mismo tiempo se tenía ductilidad.

En la literatura se menciona que el resultado de estas investigaciones trajo consigo un desarrollo en la tecnología del concreto, llamado Ductal. Dentro de este campo lo consideran como un desarrollo tecnológico, ya que, por sus ultra propiedades mecánicas y durabilidad, contribuye de manera general en el desempeño de la construcción, reduciendo la mano de obra, mejorando la seguridad y durabilidad de la construcción, disminuyendo el mantenimiento de la estructura e incrementando su ciclo de vida útil[2]. Básicamente este es un Concreto de Ultra Alto Desempeño (CUAD) que se ha ido comercializando poco a poco en el mundo y cada vez se vuelve más popular dentro de la industria de la construcción.

Los CUAD son concretos los cuales combinan altas resistencias ( $f'_c > 150$  MPa), una trabajabilidad adecuada para la colocación, menor requerimiento de mano de obra para la colocación, ahorros económicos a largo plazo, un acabado estético. Por sus propiedades mecánicas y de durabilidad de los CUAD son los candidatos ideales en el desarrollo de nuevas soluciones para las exigencias que demanda el deterioro, reparación o reemplazar la infraestructura de carreteras. Desde los años 2000, cuando el CUAD llegó a ser comercialmente viable en los Estados Unidos, se realizaron una serie de proyectos de investigación para demostrar sus capacidades como material.

Un CUAD es un material compuesto por cemento, microsílíce que en conjunto con sus componentes granulares tengan una granulometría optimizada para maximizar el empaquetamiento, relación agua-materiales cementantes ( $a/cm$ ) comúnmente utilizadas son menores a 0.25. Las propiedades de un CUAD incluye resistencias a la compresión mayores

a 150 MPa y una resistencia mínima de 5 MPa a módulo de ruptura (resistencia a la flexión)[3]. Esta resistencia a compresión como requisito mínimo para ser considerado como CUAD fue establecida en los años 90's por Ricard y Cheyrez[1]. Esta propiedad caracteriza a este tipo de concretos además de su gran durabilidad.

## 2. Antecedentes

### 2.1. Materiales de producción de CUAD

El factor clave en la producción de CUAD nace de las propiedades macro y micro de los ingredientes para asegurar la homogeneidad de la mezcla, tamaño máximo de partícula para obtener una densidad máxima de empaquetamiento y tamaño mínimo de defectos.

Los materiales típicos utilizados para un CUAD son cemento, microsílíce, polvo de cuarzo, arena de sílice, aditivo superplastificante (SP), agua y fibras de acero[4], [5]. En la siguiente tabla se muestran las cantidades típicas usadas de los diferentes ingredientes de un CUAD.

*Tabla 2.- 1 Ingredientes típicos de un CUAD.*

<b>Ingredientes de CUAD</b>	<b>Intervalo (% por peso)</b>
<b>Cemento</b>	27-40
<b>Microsílíce</b>	6-12
<b>Polvo de cuarzo</b>	7-14
<b>Arena Sílice</b>	35-45
<b>Aditivo Superplastificante</b>	0.5-3
<b>Agua</b>	4-10
<b>Fibras de acero</b>	0-8

- **Cemento**

El cemento que se recomienda utilizar en este tipo de concretos son cementos con contenidos bajos de aluminato tricíclico ( $C_3A$ ), con área superficial bajas, es decir granos de cemento gruesos, ya que cementos muy finos incrementa la posibilidad de que gran cantidad de las partículas más finas queden sin hidratar y terminen como relleno o filler [6]. También cabe mencionar que un cemento con alto contenido de  $C_3A$  inhibe la efectividad de los aditivos superplastificantes (SP), entre más alto es la cantidad de el  $C_3A$  mayor será la demanda de superplastificante(SP) [7]. Por estas razones es importante tomar en cuenta el

tipo de cemento que se utilizará, en la literatura se recomienda usar los cementos tipo V o Cemento H. La cantidad de cemento usada es entre el 27% y 40% con respecto al peso del concreto.[8][5]

- Agregados

Un componente primordial de los CUAD, que en los concretos convencionales y de alto desempeño no se toman mucho en cuenta son los agregados. Los agregados independientemente del tipo de concreto que se esté diseñando influyen en las propiedades en estado fresco, mecánicas y de durabilidad. Su forma, textura, tamaño afectan directamente sus propiedades en estado fresco. La densidad y porosidad de los agregados afectan las propiedades en estado endurecido como por ejemplo la resistencia a la compresión y las propiedades de durabilidad como el desgaste a la abrasión.[9][4]

Los agregados en los concretos de CUAD tiene un rol muy importante, ya que para dar las altas resistencias a compresión que los caracteriza, se necesita que existan una excelente adherencia entre la pasta y el agregado, la cual está dependen de la rugosidad de la partícula. También depende del tamaño del agregado, ya que en agregados con tamaños grandes tiene menor área superficial por kg, lo cual implica que se acumule mayor cantidad de agua en su superficie del agregado, dando como resultado una la relación agua cemento mayor cerca de la superficie del agregado, comparada con la del resto de la matriz cementante, teniendo como consecuencia disminuyendo la resistencia a compresión, incrementando de tamaño la zona de transición pasta-agregado, disminuyendo la durabilidad del concreto.[10]

Por las razones mencionadas anteriormente en la literatura se recomienda eliminar el agregado grueso, y así reducir la zona de transición entre la pasta y el agregado. Por lo que se recomienda utilizar un tamaño máximo de agregado es de 600 micras de diámetro, agregados de alta dureza y densos. Por lo regular para este tipo de concretos se utiliza la arena sílice, la cantidad varía entre un 35% y 45 % con respecto al peso del concreto[2].

Se utiliza como agregado la arena de cuarzo para reducir la demande pasta que se tiene por eliminar el agregado grueso de las mezclas de CUAD, donde se ha encontrado que la arena de cuarzo con un tamaño entre 1.4mm y 0.8mm, con una proporción dentro de la mezcla

entre un 7% a un 14% respecto del concreto es la proporción óptima entre la relación arena de cuarzo y cemento[11][5].

- Aditivos superplastificantes

Como ya se mencionó anteriormente una característica de los CUAD es que tienen relaciones (agua/cementante) menores a 0.25, lo cual reduce la trabajabilidad de los CUAD, este problema puede ser resuelto utilizando aditivos superplastificantes (SP). Los SP son aditivos reductores de agua de alto rango, básicamente ingredientes del concreto, que además del cemento portland, del agua y los agregados se adicionan antes o durante el mezclado[9][12][8].

El uso de aditivos SP son a base de un polímero llamado policaboxilato, los aditivos que están hechos con este polímero son considerados como la tercera generación de los aditivos reductores de agua. La forma cómo funcionan está basada en dos efectos que ejercen en las partículas de cemento que son los siguientes:

- Efecto de dispersión: Las moléculas del aditivo son atraídas inmediatamente por las suaves partículas de cemento la envuelven alrededor del cemento durante el mezclado.
- Efecto Estérico: Las moléculas tienen una larga cadena lateral estos construyen un efecto estérico que mejora la habilidad de la partícula de cemento de seguir separándose.

La cantidad de aditivo superplastificante (SP) que se requiere en la producción de CUAD depende de la compatibilidad entre los ingredientes de la mezcla y el tipo SP. Para que un CUAD tenga las características de trabajabilidad adecuada y buena estabilidad sin problemas de segregación. En la literatura se menciona un rango de dosificación del aditivo SP entre 1% y 8% con respecto al peso de cemento de la mezcla CUAD.[12], [13]

- Cementantes suplementarios

La cantidad de cemento que se utiliza en los CUAD es relativamente alta comparada con la cantidad que se usa en los concretos convencionales y concretos de alto desempeño (CAD). Se ha observado que al incrementar el contenido de cemento aumenta la resistencia a compresión de los CUAD, pero cuando se sobre pasa la cantidad óptima de cemento tiene

como consecuencia que disminuye la resistencia a compresión debido a la resistencia del agregado es menor a la resistencia de la pasta de cemento.

Como ya se mencionó anteriormente las relaciones agua/cementantes ( $a/cm$ ) típicamente en los CUAD son muy bajas. De acuerdo en el modelo de hidratación propuesto por Powers para que 1 gramo de cemento se hidrate completamente se necesitan 0.42 gramos de agua. Powers menciona que la  $A/C$  mínima que se requiere para que los granos de cemento se hidrate completamente es de 0.42. [14]

Basándose en el modelo de Powers, los investigadores de CUAD mencionan que, de la cantidad total del cemento utilizada en estos concretos, el 40% queda sin hidratar. Además, se ha reportado que parte del volumen del cemento se ha reemplazado por polvo de cuarzo, escoria molida, ceniza volante, polvo de caliza etc. sin comprometer la resistencia a compresión.

El cementante suplementario típicamente utilizado en los CUAD es la microsílíce, básicamente está compuesta por sílice amorfa. Cuando se adiciona a los CUAD proporciona mejor trabajabilidad por su forma esférica de sus partículas. También se usa para rellenar los espacios vacíos que quedan entre las mismas partículas del agregado debido a que sus partículas son mucho más finas. Además, este *microfiller* llamado microsílíce tiene el efecto de mejorar las propiedades del concreto a través de la reacción puzolánica. [15], [16]

Las dosificaciones de microsílíce que se recomienda en los CUAD son entre un 20% y 30% del total del material cementante para mejorar el empaquetamiento entre las partículas y la reacción puzolánica consume totalmente todo el hidróxido de calcio producido por la reacción de hidratación del agua con el cemento. Hay investigaciones en la que recomiendan el 25% de microsílíce con respecto al peso del cemento como la dosificación óptima para mejorar las propiedades en estado endurecido y de durabilidad para los CUAD.[5]

## 2.2. Propiedades en estado fresco, mecánicas y de durabilidad de CUAD

Los CUAD están compuestos por una gran cantidad de pasta que les da la característica de tener una excelente fluidez, es lo que permite que se pueda colocar por el simple vaciado en la cimbra, en otras palabras, que se autocompactable.

Las diferentes investigaciones que se han reportado contenidos de aire en las mezclas de CUAD varían en un intervalo de 0.3 a 5.4% por volumen de mezcla de concreto dependiendo

del diseño de mezcla. En la tabla 2.-2 se muestran ejemplos de diferentes contenidos de aire que se han medido en diferentes mezclas de CUAD con diferentes relaciones a/cm utilizando diferentes cantidades de aditivo superplastificante.

*Tabla 2.- 2* Contenidos de aire típicos de CUAD

<b>a/cm</b>	<b>Superplastificante (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Contenido de Aire (%)</b>
<b>0.25</b>	----	4.3
<b>0.18</b>	45	3.5
<b>0.13</b>	46	1.8
<b>0.17</b>	20	1
<b>0.11</b>	15	2.5
<b>0.13</b>	52	4.6

Cabe mencionar que aparte de medir contenidos de aire también los CUAD se mide la fluidez, básicamente este tipo de concretos lo que se ha reportado se debe tener una extensibilidad de 32 cm utilizando el cono de fluidez. Se considera que es un buen parámetro para la trabajabilidad en este tipo de concretos.

La característica principal de este tipo de concretos son sus altas resistencias, alrededor del mundo poco a poco se han ido utilizando cada vez más, un ejemplo de esto se muestra en la tabla 2.-3, donde se mencionan diferentes CUAD, que se han usado en diferentes estructuras, como puentes, puentes peatonales, losas para aeropuertos etc., por mencionar algunas aplicaciones, así como también las diferentes resistencias a compresión que varían desde 140 MPa hasta un máximo de 220 MPa.

*Tabla 2.- 3* . Ejemplos de diferentes estructuras donde se han utilizado CUAD

<b>Estructura</b>	<b>Lugar</b>	<b>Año</b>	<b>Resistencia a Compresión (MPa)</b>	<b>Módulo de Ruptura (MPa)</b>
<b>Puente Peatonal de Shebrooke</b>	Sherbrooke, Canada	1997	200	40
<b>Silo de Clinker Joppa</b>	ILLinios, USA	2001	220	50
<b>Puente Peatonal Soonyu</b>	Seoul, Corea	2002	180	32

<b>Puente Sherherds creek</b>	Sydney, Australia	2005	180	-
<b>Puente peatonal, Papateoteo</b>	Auckland, Nueva Zelanda	2006	160	30
<b>Puente Gaertherplatz</b>	Kassel, Alemania	2007	150	35
<b>Turbina de viento</b>	Dinamarca	2008	210	24
<b>Losas de Aeropuerto Haneda</b>	Tokyo, Japon	2010	210	45
<b>Puente Whiteman</b>	Branford, Canada	2011	140	30
<b>Columnas de Concreto</b>	Alemania	2012	179	-
<b>Puente</b>	España	2012	150	-

Este tipo de concretos no solo se ha popularizado por su ultra alta resistencia a compresión sino también por su ultra altas propiedades de durabilidad debido a que disminuye tanto el número de poros como su tamaño, donde se han encontrado tamaños de poros menos a 5 nanómetros y un rango de volumen de poros menor a 1 a 2 %. Y esto está íntimamente relacionado con las propiedades de durabilidad.

También en este tipo de concretos se han medido la capacidad de absorción del agua son muy bajas, comparadas con un concreto de alto desempeño son de hasta 10 veces menos. El coeficiente de permeabilidad que se han reportado es menor a 0.0005, comparado con concreto normales es muy pequeño ya que un concreto normal los coeficientes de permeabilidad que se han reportado son de 0.0015. En la tabla 2.-4 se muestran ejemplos de coeficientes de Sortividad que fueron medidos a CUAD.

*Tabla 2.- 4 Coeficientes de Sortividad determinados en CUAD.*

<b>Investigador</b>	<b>Año</b>	<b>a/cm</b>	<b>Temperatura de Curado</b>	<b>Coficiente de Sortividad (kg/m<sup>2</sup>/h<sup>0.5</sup>)</b>
<b>Roux</b>	1996	0.14	20°C curado con Agua	0.01
				0.0052
<b>Franke</b>	2008	0.17	90°C por 2 días	0.033
		0.19		0.044

Un parámetro muy utilizado para medir la vida útil de los diferentes concretos es el coeficiente de difusión de los iones cloruro, este parámetro es importante ya que es una medida de un mecanismo de transporte por el cual los agentes agresivos pueden ingresar al concreto. En la tabla 2.-5 se muestran ejemplos de diferentes coeficientes que se han medido en distintos CUAD.

Tabla 2.- 5 Coeficiente de difusión de CUAD.

Referencia	Condiciones de curado	a/cm	Solución	Periodo de Exposición	Coeficiente de Difusión ( $\times 10^{-13}$ )
Roux	20 °C y aplicación de presión	0.14	0.15 M NaCl	---	0.2
Pierard and Cauberg	20°C y 95% de HR	0.18	16% NaCl	56 días	4
Juanhong	90°C a vapor por 1 día	0.15	10% NaCl	---	4
Scheydt and Muller	90°C por 3 días	0.21	16% NaCl	63 días	1.3
Pierard	20°C por 90 días	0.21	16% NaCl	90 días	2.3
Thomas	90 °C por 2 días	0.12	Ambiente Marino	5 años	1.3

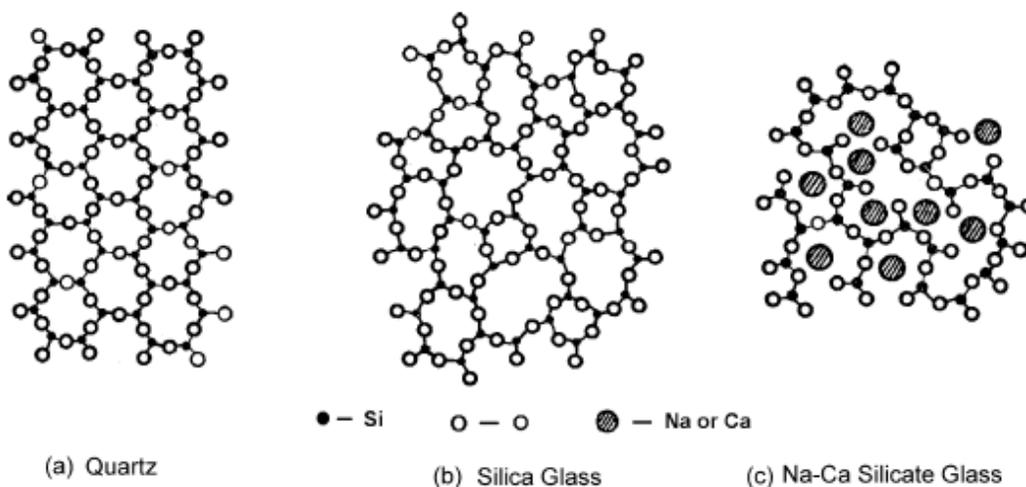
Las propiedades de ultra durabilidad de CUAD son en gran medida por la optimización de los sus componentes granulares para incrementar el empaquetamiento y también por el uso de cementantes suplementarios que mejoran el matriz cementante densificándola, reduciendo su porosidad. De aquí la importancia de este tipo de materiales en los CUAD.

Todas las características que caracteriza a los CUAD son principalmente otorgadas por la microsílíce que es un excelente material cementante suplementario, pero desafortunadamente por su alto costo y su poca disponibilidad, se han enfocado investigaciones en probar nuevos materiales cementantes suplementarios que puedan obtener estas propiedades que caracterizan a los CUAD o mejorarlas. En nuestro caso de estudio es el uso del polvo de vidrio de borosilicato como filler o material cementante suplementario.

### 2.3. Generalidades del vidrio

El vidrio se define como un sólido que tiene una estructura amorfa, como ya se mencionó que contiene SiO<sub>2</sub>, si se compara con el cuarzo, básicamente en su composición química también tiene SiO<sub>2</sub>, sin embargo, existe una gran diferencia entre ambos materiales, en la

fig.1. Se puede distinguir que la diferencia que existe entre la estructura del cuarzo y del vidrio, básicamente es que el vidrio tiene una estructura amorfa y el cuarzo tiene una estructura cristalina, es decir, la estructura del vidrio es amorfa y el cuarzo tiene una red cristalina[17].



*Fig 2.- 1 Se muestra la diferencia entre las estructuras de Cuarzo y del Vidrio.*

El vidrio por su composición química se clasifica de la siguiente manera: Sílice vítrea, silicato alcalino, sódico cálcico, borosilicato, bario y aluminosilicatos. En la Tabla.1 se presentan las composiciones químicas de los componentes presentes en los diferentes tipos de vidrio, donde se puede observar que la cantidad presente de  $\text{SiO}_2$ , depende del tipo de vidrio, como en el caso del vidrio borosilicato que contiene hasta un 81% de este compuesto, en cambio el sódico cálcico contiene entre un 66% a un 75%[17]. Cuando se le agrega el boro le proporciona durabilidad, estabilidad térmica y química. Los álcalis (sodio y potasio) se agregan durante el proceso de fabricación para bajar el punto de fusión del vidrio durante su producción

Tabla 2.- 6 Composición química de diferentes tipos de vidrio comerciales

Vidrios y usos	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	PbO
<i>Vidrio sodica</i>								
Contenedores	66 - 75	0.7 - 7		12 - 16	0.1 - 3	0.1 - 5	6 - 12	
Flotador	73 - 73			13.5 - 15	0.2	3.6 - 3.8	8.7 - 8.9	
Bombillas	73	1		17		4	5	
Hornos de microondas	75	1.5		14			9.5	
<i>Vidrio Borosilicato</i>								
Aparatos químicos	81	2	13	4				
Farmacéutica	72	6	11	7	1			
<i>Vidrios de Plomo</i>								
Tubos para TV color	54	2		4	9			23
Tubos de Neón	63	1		8	6			22
Partes electrónicas	56	2		4	9			29
Vidrio Sillex	32			1	2			65

Teóricamente el vidrio se puede reciclar completamente de manera infinita sin pérdida de sus propiedades físicas y químicas, pero, el vidrio durante el proceso de recolección se quiebra o rompe y se mezclan los diferentes colores en el proceso de reciclado siendo esto impráctico porque esto genera una alta variación en su composición química después de reciclarlo. Las impurezas y contaminantes que se encuentran en el desperdicio de vidrio con la mezcla de color puede afectar las propiedades de la mezcla de los diferentes tipos de vidrio [18] [19]. El reciclado del vidrio es una actividad que se realiza muy poco alrededor del mundo, por lo regular se termina almacenando en contenedores o empaquetando en ciertos lugares [20].

Con el paso del tiempo se ha estado generando una gran cantidad de residuos del vidrio en el mundo. En la década de los 60's se iniciaron investigaciones para reciclar el desperdicio del vidrio para ser utilizado dentro de la industria de la construcción por ejemplo en pavimentos, concretos, etc.

Las investigaciones inicialmente se enfocaron en el vidrio como agregado para concreto, donde los diferentes estudios mostraron que, al usar el vidrio como agregado fino en el concreto afecta su trabajabilidad, disminuye el revenimiento, aumenta el sangrado y la segregación, incrementa el contenido de aire y disminuye el peso volumétrico del mismo, debido a que el agregado de vidrio requiere mayor cantidad de agua comparado con el concreto sin vidrio. La resistencia a compresión y flexión también se ven afectas. Esto es porque el vidrio como agregado no tiene suficiente adherencia con la pasta y además con el incremento de agua en la mezcla se incrementa la relación agua cemento [21][22].

Lo que hace interesante al vidrio es su composición química, la cual contiene sílice amorfa, que es común en materiales reactivos como las rocas vítreas volcánicas y tobas constituidas por ópalo y otras rocas con alto contenido de sílice. Cuando el vidrio se usa como agregado se genera una reacción llamada reacción álcali sílice (RAS)[23]. La reacción álcali-sílice (RAS) es la reacción química que se presenta entre los álcalis (Sodio y Potasio) del cemento portland con ciertos elementos constituyentes de algunos agregados, que, bajo condiciones de humedad y temperatura, pueden provocar expansiones deletéreas en el concreto.

El mecanismo de reacción de álcali-sílice empieza con el ataque de los minerales silíceos del agregado por los hidróxidos alcalinos derivados de los álcalis del cemento. Como resultado se forma un gel, observándose una zona característica de superficie alterada. Esto puede destruir la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento hidratado que lo rodea. El gel que se encuentra confinado presenta presiones internas que en un momento dado causarían expansión, agrietamiento y ruptura de la pasta de cemento.

Se ha visto que el vidrio como agregado fino disminuye la resistencia a compresión la contracción por secado, especialmente referente a la reacción álcali sílice.

En la literatura se ha reportado estudios sobre el tamaño de partícula adecuado para evitar esta reacción. Algunos autores afirman que al usar tamaños mayores de 1mm se genera esta reacción y otros aseguran que es a partir de 300 $\mu$ m[24] [25]. En la literatura se comenta que dependiendo del color del vidrio se incrementa la reacción y han encontrado que los colores oscuros generan más expansión [20]. El color del vidrio depende de su composición química, que esto se liga también al contenido de álcalis, y el contenido de álcalis se asocia a que se promueve esta reacción[26].

Existen publicaciones donde se ha investigado el reemplazo entre un 30 y 70% de la arena por vidrio molido. Donde determinaron que cuando el vidrio molido tiene un tamaño de partícula menor a 100  $\mu$ m la RAS ya no es deletéreo.

#### 2.4. El uso del vidrio como cementante suplementario y filler en CUAD

Los diferentes tipos de vidrio por su composición química uniforme, amorfa y su alto contenido de sílice son candidatos ideales para ser usados como cementantes suplementarios [27]. Cuando el vidrio es molido a un tamaño de partícula apropiado menor de 81 $\mu$ m presenta un comportamiento puzolánico [27]-[28]. Se han investigado diferentes

intervalos de tamaños de partículas del vidrio sódico cálcico reemplazando parte del cemento (100–80  $\mu\text{m}$ ; 80–40  $\mu\text{m}$ ; <40  $\mu\text{m}$  and < 20  $\mu\text{m}$ )[29]. Se determinó que el mejor comportamiento puzolánico se observa cuando el tamaño de las partículas está en el rango de 20  $\mu\text{m}$  y 10  $\mu\text{m}$  [30]. Otros investigadores han observado que el comportamiento puzolánico del vidrio tiene una correlación lineal con su área superficial[31]: Lo que se puede concluir a partir de estas investigaciones es que el tamaño de partícula del polvo de vidrio tiene una gran influencia en el comportamiento puzolánico.

En la literatura se menciona que existen dos conceptos generales de la hidratación del polvo de vidrio, primero la solubilidad del vidrio es constante en un rango de pH entre 2 y 8; segundo, todos los componentes de vidrio se liberan en la solución cuando no hay acumulación de productos de reacción insolubles en la superficie de la partícula[32]. Unido a esto hay otros factores que determinan la velocidad de reacción puzolánica: la composición y cristalinidad del vidrio, tamaño de partícula, solución de poro pH, y condiciones de curado [33]. Se ha encontrado que el polvo de vidrio tiene un comportamiento puzolánico en un rango  $10.5 < \text{pH} < 11.5$  dependiendo de la relación de hidróxido de calcio y del polvo de vidrio (CH/GP) [32]. Esta propiedad puzolánica es relativamente débil, especialmente en tamaños de partículas más grandes, porque el tipo de C-S-H que se forma tiene relación calcio/sílice menor que del C-S-H que se forma de la hidratación del cemento[18]. Algunos estudios se han enfocado a evaluar la reacción puzolánica del polvo de vidrio determinando el consumo de hidróxido de calcio. Se ha encontrado que el polvo de vidrio consume 5 veces menos que la microsílice, lo cual representa una buena alternativa tomando en cuenta que la microsílice ha sido el mejor cementante suplementario que se ha reportado hasta hoy en día[34]–[36] [37]. Todas estas investigaciones nos indican que hay muchos factores que influyen para que el polvo de vidrio reaccione con el hidróxido de calcio.

Por otro lado, recientemente se han estudiado los mecanismos por los que el calcio en solución actúa durante la alteración del vidrio borosilicato en medios diluidos y confinados. Los parámetros más importantes son: pH, el proceso de la reacción puzolánica y concentración de calcio. En la fig.2 se presenta de manera gráfica, la relación de estos parámetros en la reacción puzolánica del polvo de vidrio borosilicato. En esta figura se puede

observar que las condiciones ideales para la precipitación del C-S-H se tiene con altas áreas superficiales y elevados valores de pH en la solución de poro [38].

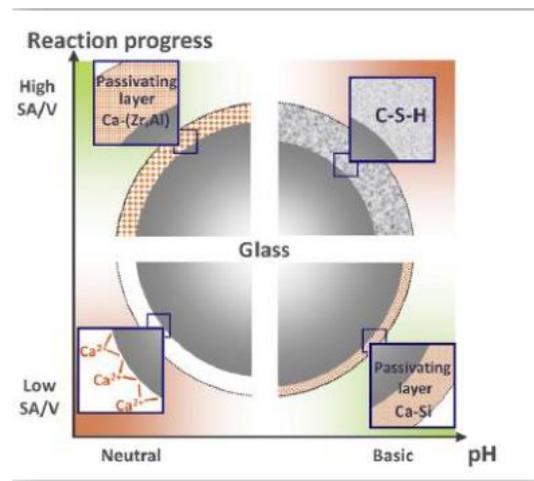


Fig 2. - 2 Parámetros que influyen de la reacción puzolánica del vidrio

A mayor concentración de iones alcalinos en la solución de poro se acelera la hidratación temprana de las pastas de cemento. La presencia de iones alcalinos en la solución de poro, deprime la solubilidad del calcio y aumenta la solubilidad de la sílice debido al efecto de ion común. Este efecto puede acelerar la hidratación temprana mediante la formación de C-S-H con relación calcio / sílice baja, unido con iones alcalinos en su superficie. [25] Otros investigadores han encontrado que existe una relación al aumentar la cantidad del polvo de vidrio y la edad del espécimen, con el consumo de hidróxido de calcio durante la reacción puzolánica del vidrio. Debido a esto se mejora la estructura de las pastas de cemento reduciendo la cantidad de poros capilares, sin embargo, en edades tempranas solo se tiene un efecto como relleno. [30].

El polvo de vidrio del proceso de trituración consiste principalmente en grandes partículas en forma de escamas, mientras que el polvo de vidrio del proceso de molienda consiste principalmente en partículas angulares más pequeñas. Para la distribución de tamaño de partícula similar, el polvo de vidrio molido muestra una mayor área de superficie específica Blaine que el Cemento Portland debido a la angulosidad de las partículas de vidrio [39].

Se han utilizado las técnicas SEM, EDS, TGA, DTA, DRX para analizar el efecto del polvo de vidrio en la microestructura de la pasta cementante, donde se evidenció que la adición

del polvo de vidrio a la muestra, disminuye la cantidad de hidróxido de calcio [40]. La presencia de álcalis en la solución de poro puede acelerar la hidratación temprana para formar C-S-H con una relación baja de calcio/sílice con iones alcalinos en la superficie. Los productos de hidratación se precipitan en la superficie de los granos de vidrio [32][36].

De acuerdo a este análisis bibliográfico, el polvo de vidrio con un tamaño de partícula y área superficial adecuados podría ser un excelente candidato para utilizarse como cementante suplementario.

## 2.5. Efecto del polvo de vidrio en las propiedades en estado fresco, mecánico y de durabilidad en el concreto.

Se han hecho investigaciones alrededor del mundo sobre el uso del vidrio como cementante suplementario y la forma en cómo modifica las diferentes propiedades del concreto. Se han hecho investigaciones donde se ha sustituido para del cemento por polvo de vidrio, han sustituido entre un 10% hasta un 60% con respecto del cemento, donde han encontrado, en concretos convencionales habido un incremento de la resistencia a compresión[41]. En la mayoría de las investigaciones reportan que reemplazar el 30% del cemento por el polvo de vidrio lo consideran como el óptimo es el que tiene mayor incremento de resistencia, cuando se sobrepasa este límite hay un decremento de la resistencia[42]. Este incremento de resistencia es atribuido a que la cantidad de vidrio es suficiente para consumir todo el hidróxido de calcio dentro de la matriz cementante.

Las investigaciones que se han realizado sobre el uso del vidrio ya sea como agregado fino o como cementante suplementario o filler han sido utilizado el vidrio sódico cálcico. Investigaciones sobre este material como cementante suplementario en CUAD se han realizado poco, por ejemplo. Kay Wille en el 2012 reportó que hizo CUAD utilizando polvo de vidrio, hasta un 25% con respecto a la masa de cemento, donde lo se usó como filler, y obtuvo resistencias mayores de 240 MPa, donde él indica que el vidrio solo funciona como relleno.[5]

Posteriormente otros investigadores comenzaron a utilizar el polvo de vidrio sódico cálcico pero como cementante suplemento en CUAD, por ejemplo Vitoldas Vaitkevicius en su artículo reportó al utilizar el polvo de vidrio combinado con microsílice obtuvo mejores

resultados que solo usar microsílíce, reporto hasta un incremento de 30 MPa, por utilizar este material como cementante suplementario.[37]

Recientemente se han realizado más investigaciones donde han utilizado al polvo de vidrio como cementante suplementario en CUAD, donde han llamado a este nuevo desarrollo tecnológico como Concretos de Ultra Alto Desempeño con Vidrio (CUADV) [43]–[45], donde queda muy claro que el polvo de vidrio tiene un gran potencial para ser utilizado en los CUAD.

### **3. Planteamiento del Problema**

#### **3.1. Hipótesis**

El vidrio de borosilicato con tamaño de partícula y área superficial apropiada, adicionado en sustitución total por la microsílíce y/o sustituto parcial del cemento en concretos de ultra alto desempeño, conducirá a un desempeño similar o mejorado en relación al uso de la microsílíce típicamente utilizada en la producción de ultra alto comportamiento.

#### **3.2. Objetivo General**

Evaluar el efecto del polvo de vidrio borosilicato como material cementante suplementario o filler, en la producción de concretos de ultra alto comportamiento mediante propiedades en estado fresco, endurecido e indicadores de durabilidad.

#### **3.3. Objetivos específicos**

1. Caracterizar los materiales como Cemento H, microsílíce, aditivo, Agregado fino.
2. Determinar la carga de bolas para la molienda que permita obtener áreas superficiales similar a la del cemento y otra a un área superficial a la de la microsílíce medida por el método blaine.
3. Evaluación de la reacción puzolánica del polvo de vidrio de borosilicato utilizando un área superficial similar a la del cemento y al área superficial medida a la microsílíce por el método blaine.
4. Determinar la influencia de la granulometría del agregado fino calizo en la resistencia a compresión en CUAD.

5. Desarrollar concretos de ultra alto desempeño mediante la utilización de polvo de vidrio de borosilicato como reemplazo parcial del agregado calizo mediante la máxima densidad de empaquetamiento.
6. Determinar el efecto del polvo de vidrio borosilicato (área superficial de 380 m<sup>2</sup>/kg) en la resistencia a la compresión y en estado fresco (masa unitaria, contenido de aire y fluidez) al sustituir el 40% del cemento y al sustituir el 100% de la microsílíce.
7. Evaluar los indicadores de durabilidad: Resistividad Eléctrica, coeficiente de migración de cloruros para estado no estacionario.
8. Determinar la cantidad de hidróxido de calcio en las mezclas de CUAD optimizadas con polvo de vidrio de borosilicato.

### 3.4. Justificación

En la actualidad, la industria de la construcción enfrenta un gran reto, el incrementar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado mediante el desarrollo de concretos con gran durabilidad. Para cumplir con estos requerimientos, los CUAD son los candidatos ideales; sin embargo, por los materiales que se utilizan para su producción y sus altos consumos de cemento, lo hacen un material demasiado costoso y con gran impacto ambiental. Debido a esto, los tecnólogos del concreto enfocados en el desarrollo y la optimización de los CUAD, han direccionado sus esfuerzos en investigar la aplicación de fillers y de materiales cementantes suplementarios en la producción de este tipo de concretos. Lo anterior tiene la finalidad de reducir los consumos de cemento, usar materiales de menor costo, y así, disminuir su impacto ambiental y hacerlo un material más competitivo comercialmente.

En la industria vidriera local que se encuentra en el área metropolitana de Monterrey, cuenta con 6000 toneladas de un subproducto industrial, el vidrio de borosilicato. Este vidrio de borosilicato es producto de la merma de su proceso de fabricación, el cual se tiene almacenado y no se recicla; debido a los altos costos económicos y energéticos. EL polvo de vidrio de borosilicato por su composición química, tiene un alto contenido en sílice, lo que lo hace un candidato a ser utilizado como cementante suplementario. Se han realizado proyectos de investigación con desperdicio de polvo de vidrio sódico cálcico, con los que sea determinado que el vidrio molido a ciertos tamaños de partículas, presenta un comportamiento puzolánico. Sin embargo, no existen trabajos previos en los que se hayan

utilizado el vidrio borosilicato como material cementante suplementario/o filler en concretos de ultra alto desempeño.

## 4. Materiales

### 4.1. Descripción de los materiales

#### 4.1.1. Cemento

Cemento marca Holcim, de acuerdo a las especificaciones API 10A (American Petroleum Institute) es un cemento clase H, este tipo de cemento es manufacturado como un cemento común, pero con un estricto control calidad para obtener sus propiedades químicas que lo caracterizan, en la tabla 4.-1 se muestra la composición química del cemento H, que de acuerdo a las especificaciones de la API 10A, puede clasificarse de dos maneras: un cemento con Moderada Resistencia a los Sulfatos (RMS) o con Alta Resistencia a los Sulfatos (ARS). Donde las principales diferencias en estas dos clasificaciones, es el contenido máximo de aluminato tricálcico y de silicato tricálcico, demás que se limita la cantidad de Ferro aluminato tetra cálcico en el cemento H ARS. Los límites en composición química de los cementos de la API A10 son principalmente basados en las especificaciones de la ASTM C 150 para los cementos Portland usados en la construcción.

*Tabla 4.- 1 Composición química del Cemento H de acuerdo a la del Instituto Americano del Petróleo.*

Identificación	RMS (%)	ARS (%)
Óxido de Magnesio (MgO), máximo	6.0	6.0
Trióxido de Sulfuro (SO <sub>3</sub> ), máximo	3.0	3.0
Pérdida por ignición, máximo	3.0	3.0
Residuo Insoluble, máximo	0.75	0.75
<b>Silicato Tricálcico (C<sub>3</sub>S)</b>		
<b>Máximo</b>	58	65
<b>Mínimo</b>	48	48
<b>Aluminato Tricálcico (C<sub>3</sub>A), máximo</b>		

<b>Máximo</b>	8.0	3.0
<b>Ferro aluminato Tetra cálcico (C<sub>4</sub>AF), máximo</b>	-	24
<b>Álcalis totales (Na<sub>2</sub>O), máximo</b>	0.75	0.75

#### 4.1.2. Microsílice

El cementante suplementario por excelencia y típicamente utilizado para la producción de CUAD es la llamada Microsílice o también conocida como humo de sílice, es un subproducto que se obtiene durante la producción de la aleación de silicio y ferro-silicio, de la reducción de cuarzo alta pureza con carbón en hornos de eléctricos de arco. Es un aditivo mineral que consiste básicamente en micro partículas esféricas con un alto contenido de Sílice (SiO<sub>2</sub>) amorfa entre el 85% y 98%. El tamaño promedio de las micro partículas es aproximadamente de 0.1 μm, siendo alrededor de 100 veces menor que el tamaño promedio de las partículas del cemento. Otra característica importante de la microsíllice es su área superficial que varía entre 15000m<sup>2</sup>/kg a 20000m<sup>2</sup>/kg por absorción de nitrógeno [16], estas características en conjunto lo hace un material con una alta efectividad actividad puzolánica.

Es bien sabido que la microsíllice, es usada principalmente por su alta reactividad puzolánica comparado con otros materiales cementantes suplementarios como la ceniza volante, su tamaño promedio de partícula, les proporciona cierta viscosidad a las mezclas de concreto, lo cual permite realizar mezclas con mayor trabajabilidad evitando la segregación. Además, por su tamaño micrométrico rellena los espacios vacíos entre las partículas de cemento.

#### 4.1.3. Vidrio de Borosilicato

Existen diferentes tipos de vidrio, acorde a su composición química es como se clasifican, en esta investigación se enfocó especialmente en utilizar el vidrio de borosilicato también conocido como Pyrex. En su composición química contiene Boro aproximadamente entre un 11% y un 15%, lo cual le proporciona estabilidad volumétrica y térmica. Este material es comúnmente utilizado para manufacturar equipo de laboratorio y utensilios de cocina, entre otras aplicaciones, como para evaluar los cementos comerciales en la reacción álcali sílice, debido a que contiene entre un 4% y 7% de óxido de sodio. Este vidrio de borosilicato es un

subproducto de la industria local de Monterrey, se cuenta con una disponibilidad de 6000 toneladas, las cuales hoy en día se tiene solo almacenadas como se muestra en la Fig. 2.- 3.



*Fig. 4.- 1 Lugar de Almacenamiento del Polvo de vidrio de borosilicato como desperdicio de la Industria Vidriera de Monterrey.*

#### 4.1.4. Agregado Fino

El agregado fino es la arena utilizada en la producción de concreto en el Área Metropolitana de Monterrey, que se obtiene de la trituración de roca caliza de la región de acuerdo a la norma NMX-C-111, debe cumplir con los límites de pasar el 100% por la malla 4.75 (No.4) y retenerse en la malla de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200). El agregado fino de la región por su proceso de manufactura se caracteriza por tener un alto contenido de finos de hasta un 15.09%, por lo que puede incrementar el consumo de agua y de aditivo superplastificante. En la Fig.4.-2 se muestra una imagen del sitio donde se encontraba depositado el agregado fino en las instalaciones del laboratorio.



*Fig. 4.- 2 Arena caliza comúnmente utilizada en la industrial del concreto Premezclado en el Área Metropolitana de Monterrey.*

#### 4.1.5. Aditivo Superplastificante

Los CUAD se han podido desarrollar gracias al desarrollo de los aditivos Superplastificante (SP) a base de policarboxilatos. Dentro del mercado de aditivos superplastificantes se utilizó el Aditivo Plastol Precast Plus proporcionado por la empresa Eucomex (Euclid Chemical), el cual con su ficha técnica cumple con las especificaciones de la norma ASTM C 494-10 para los tipos “A” y “F”, está diseñado especialmente para dar alta fluidez y reducir el agua. En la ficha técnica se recomienda una dosificación en un rango de 4 a 15 cm<sup>3</sup> por kg de cemento y después se proceda a mezclar durante 5 a 10 min.

### 4.2. Caracterización de los Materiales

#### 4.2.1. Cemento

El cemento utilizado se caracterizó para obtener sus propiedades físicas para el diseño de las mezclas de CUAD, además para conocer si cumplía con las propiedades químicas para ser utilizado en CUAD.



*Fig. 4.- 3 Cemento H.*

#### 4.2.1.1. Densidad

La densidad del cemento se determinó utilizando el procedimiento descrito en la norma ASTM C 188, en lugar de usar Keroseno como se indica en la norma se utilizó petróleo, es material que no reacciona con las fases químicas del cemento.

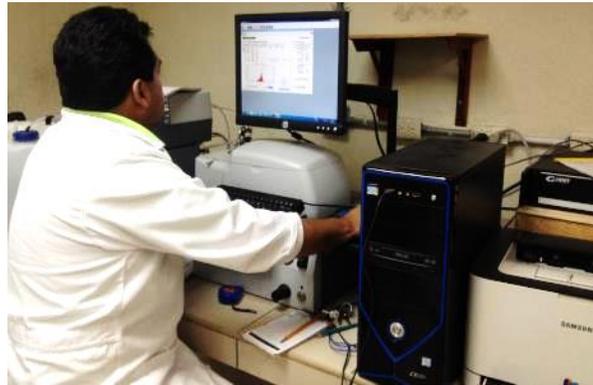


*Fig. 4.- 4 Determinación de la Densidad del Cemento de acuerdo a la norma ASTM C 188.*

#### 4.2.1.2. Distribución de tamaño de partículas

La distribución de tamaño de partícula (DTP) se determinó usando un equipo analizador de difracción de rayo láser de la marca MICROTRAC, modelo S3500. Se utilizó alcohol isopropílico con grado de pureza de 99.5%, dándole un ultrasonido a la muestra por un

periodo de tiempo de 15s para dispersar las partículas y evitar aglomeraciones, y así también para que el equipo pudiera tomar una medida más exacta del tamaño de las partículas.



*Fig. 4.- 5 Determinación de la distribución de tamaño de partícula mediante el Análisis de difracción de rayo láser.*

#### 4.2.1.3. Área Superficial Específica

El área superficial específica del cemento fue medida por el método de permeabilidad al aire descrito en la norma ASTM C 204, utilizando el equipo de Blaine. Para la calibración del equipo se utilizó una muestra patrón del NIST Q 512, dicha calibración se realizó en condiciones de laboratorio.



*Fig. 4.- 6 Aparato de Blaine para determinar el Área superficial específica.*

#### 4.2.1.4. Composición química

La composición química del cemento se determinó usando un equipo de fluorescencia de rayo x por energía dispersiva (ED-FRX) utilizando un equipo de la marca PANalytical modelo Epsilon3-XL, con estos resultados obtenidos se trató de obtener fases potenciales por medio de la ecuación de Bogue, lo cual arrojó datos erróneos.

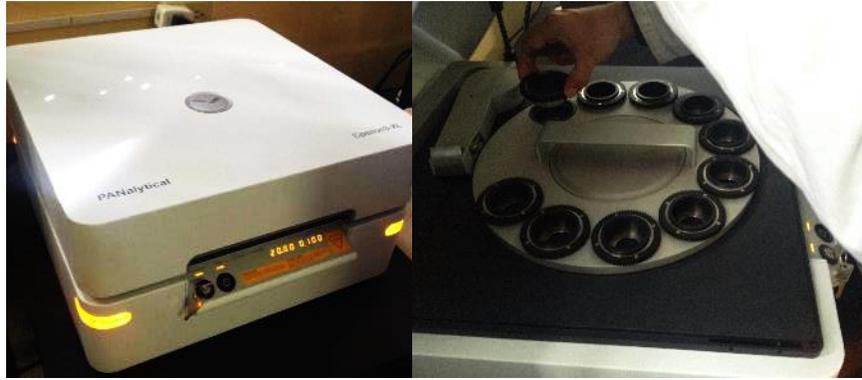


Fig. 4.- 7 Equipo de Fluorescencia de rayo x por energía dispersiva (ED-FRX).

#### 4.2.1.5. Fases minerales

Las fases del cemento H fueron determinadas mediante la técnica de difracción de rayos "X" Bruker D8 Advance con radiación de  $\text{CuK}\alpha$  de  $1.5418\text{\AA}$ , y un detector marca Vantec de alta velocidad equipado con filtros de níquel. Las pruebas se ejecutaron dentro de un rango de  $5^\circ$  a  $70^\circ$ , con una velocidad de rotación de 15 rpm y un tamaño de paso  $0.05^\circ 2\Phi$ . El equipo de muestra en la Fig.4.-9.



Fig. 4.- 8 Equipo utilizado para analizar el cemento el Cemento mediante la técnica de difracción de rayos X.

## 4.3. Materiales Cementantes Suplementarios

### 4.3.1. Microsílice

Para el diseño de mezclas de CUAD, como cualquier mezcla de concreto es indispensable tener la caracterización de los materiales cementantes que se van a utilizar. En este caso los materiales cementantes suplementarios que se van a utilizar son microsílice, y dos polvos de vidrio de borosilicato.

#### 4.3.1.1. Densidad

La densidad de la microsílice fue determinada, utilizando un frasco de Le Chatelier descrito en el procedimiento de la norma ASTM C 188, en lugar de usar Keroseno como se indica en la norma se utilizó agua, la microsílice no tiene fases minerales que reaccionen solo con el agua.

#### 4.3.1.2. Distribución de tamaño de Partícula

La distribución de tamaño de partícula se determinó usando un equipo analizador de difracción de rayo láser de la marca MICROTRAC, modelo S3500. Se utilizó alcohol isopropílico con grado de pureza de 99.5%, dándole un ultrasonido a la muestra por un periodo de tiempo de 15s para dispersar las partículas, la microsílice comercial por lo regular viene en presentación densificada.

#### 4.3.1.3. Composición química

La composición química de la microsílice fue determinada mediante la técnica de fluorescencia de rayo x por energía dispersiva (ED-FRX), el equipo utilizado es de la marca PANalytical modelo Epsilon3-XL.

#### 4.3.1.4. Índice de Actividad Puzolánica

La microsílice como material cementante suplementario es caracterizado por su alta reactividad puzolánica, la cual esta propiedad fue evaluada de acuerdo a la norma ASTM C

1240, donde se usó la cantidad de aditivo superplastificante necesaria para obtener una fluidez de  $110\pm 5\%$  como se especifica en dicha norma.

#### 4.3.1.5. Área Superficial Especifica

La permeabilidad al aire por el método blaine es una medida del área superficial específica de los materiales en polvo. El área superficial específica de la microsílíce fue medida de acuerdo al método de prueba que se especifica en la norma ASTM C 204.

#### 4.3.2. Polvos de vidrio de borosilicato

Se utilizaron dos polvos de vidrio de borosilicato con diferente área superficial y tamaño de partícula promedio, pero del mismo lote de vidrio de borosilicato.

##### 4.3.2.1. Morfología

Para observar la morfología de los dos polvos de vidrio de borosilicato después de la molienda, se utilizó un microscopio óptico de barrido de la marca Scanning Electronic Microscope JEOL, model JSM-6510LV.



*Fig. 4.- 9 Microscopio óptico de barrido utilizado para analizar la morfología del polvo de vidrio de borosilicato.*

#### 4.3.3. Densidad

Para la determinación de la densidad de la microsílíce, se utilizó un frasco de Le Chatelier descrito en el procedimiento de la norma ASTM C 188, en lugar de usar Keroseno como se indica en la norma se utilizó agua, la microsílíce no tiene fases minerales que reaccionen solo con el agua.

#### 4.3.4. Distribución de tamaño de Partícula

La distribución de tamaño de partícula fue determinada usando un equipo analizador de difracción de rayo láser de la marca MICROTRAC, modelo S3500. Se utilizó alcohol isopropílico con grado de pureza de 99.5%, dándole un ultrasonido a la muestra por un periodo de tiempo de 15s para dispersar las partículas, ya que comercialmente la presentación de la microsílíce que se vende está densificada.

#### 4.3.5. Composición química

Se obtuvo la composición química de los polvos mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos "X" (FRX) para obtener los porcentajes de óxidos presentes.

#### 4.3.6. Fases minerales

Las fases del vidrio de borosilicato fueron determinadas mediante la técnica de difracción de rayos "X" Bruker D8 Advance con radiación de  $\text{CuK}_\alpha$  de  $1.5418\text{\AA}$ , y un detector marca Vantec de alta velocidad equipado con filtros de níquel. Las pruebas se ejecutaron dentro de un rango de  $5^\circ$  a  $70^\circ$ , con una velocidad de rotación de 15 rpm y un tamaño de paso  $0.05^\circ 2\Phi$ .

#### 4.3.7. Índice de Actividad Puzolánica

El polvo de vidrio por sus altos contenidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), lo hace un material muy atractivo para ser utilizado como material cementante suplementario, el cual, su índice de actividad puzolánica fue determinado como si fuera una microsílíce, de acuerdo al procedimiento de la ASTM C 1240. El procedimiento descrito en dicha norma fue modificado para mantener la misma relación agua cemento, respecto a la mezcla de mortero con microsílíce debido que las mezclas de polvo con vidrio deban una mayor trabajabilidad con la misma cantidad de agua.

## 4.4. Aditivo Superplastificante

### 4.4.1. Densidad

La densidad y contenido de sólidos del aditivo Superplastificante (SP) Plastol Precast Plus, fueron determinadas de utilizando un matraz de 100 ml, el cual fue llenando hasta la marca de aforo, el cual se obtuvo el peso de aditivo SP y fue dividido entre el volumen.



*Fig. 4.- 10 Determinación de la densidad del aditivo superplastificante (SP).*

### 4.4.2. Contenido de Sólidos

Es la cantidad de agente activo que tiene el aditivo, el resto es solo agua, esta propiedad se determinó colocando una muestra de 100 gr de SP a 105°C por 24 horas en un horno. Después del secado, se midió la masa final, la diferencia entre los 100 gr de SP y la masa final dividida entre la masa final por cien, se calculó el porcentaje del contenido de sólidos. Este valor fue utilizado para corregirla la relación agua/ cementantes.

## 4.5. Agregado fino

### 4.5.1. Densidad y Absorción

La densidad y absorción de los agregados fino y grueso se determinaron de acuerdo a los procedimientos de las normas ASTM C128 y ASTM C127 respectivamente.

### 4.5.2. Distribución Granulométrica

La granulometría del agregado fino se obtuvo de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C 33. Para complementar la distribución granulométrica, el tamaño de polvo del agregado fino que pasa la malla No.100, fue determinada por difracción de rayo láser.

## 5. Metodología Experimental

### 5.1. Caracterización de la molienda

#### 5.1.1. Trabajo preliminar de molienda

Como ya se mencionó anteriormente, el vidrio de borosilicato es un subproducto industrial que se encuentra almacenado al aire libre, el cual está expuesto a contaminación de materia orgánica e inorgánica, por lo cual es necesario darle un tratamiento previo, además tiene un tamaño de partícula mayor a 2 pulgadas, por lo que se tiene que procesar antes de someterlo a molienda. El procedimiento se muestra en los siguientes pasos.

1. El material fue lavado con la finalidad de retirar el material orgánico e inorgánico.

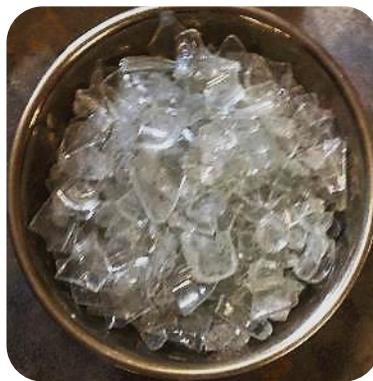


Fig. 5.- 1 Vidrio de Borosilicato.

2. El material fue secado en un horno a una temperatura de 105°C por 24 horas.



Fig. 5.- 2 Horno.

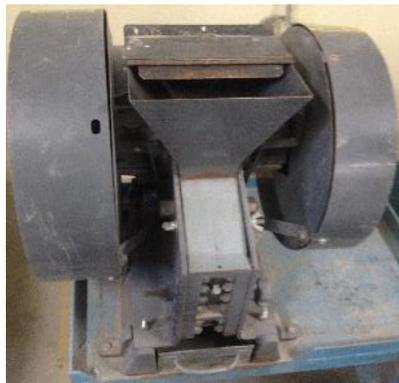
3. Realizo una trituración previa en una máquina de quijadas.

- Para la trituración inicial se realizó en una trituradora de mandíbulas con una capacidad de molienda de 8 kg/minuto. Se obtuvo un tamaño máximo del vidrio de borosilicato aproximadamente de 5 cm.



*Fig. 5.- 3 Triturador de mandíbulas.*

- Posteriormente, se continuó con una segunda trituración en un molino de quijadas de la marca Bico Chipmunk Jaw Crusher LC-33, con una capacidad de molienda de 8 kg/minuto. Se obtuvo un tamaño máximo del vidrio de borosilicato aproximadamente de 10 mm.



*Fig. 5.- 4 Molino de quijadas.*

4. Pulverización se llevó a cabo en una máquina con un disco giratorio para arena de la marca Bico Pulverizer LC-53, que se muestra en la Fig. 17, con una capacidad de

molienda de 4 kg/minuto. Con este equipo se obtuvo un tamaño máximo de partícula de alrededor de 0.6 mm.



Fig. 5.- 5 Maquina pulverizadora.

### 5.1.2. Molienda del vidrio de borosilicato

Después de obtener el vidrio de borosilicato de una distribución granulométrica, que permite ser considerado como una arena, se procedió a realizar su molienda en un molino de Vibrio Energía de la marca SWECO, modelo MD1, se muestra en la Fig.5.- el equipo, las bolas metálicas y alúmina.

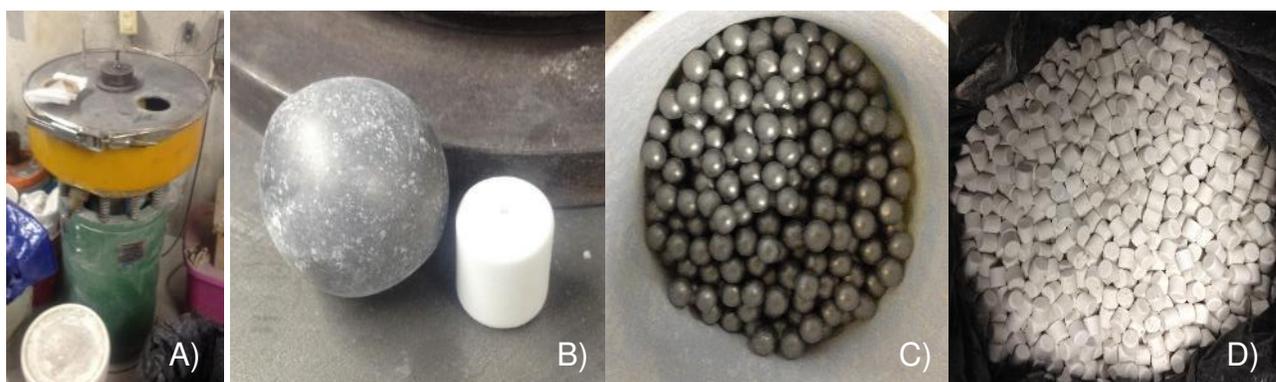


Fig. 5.- 6 **A)** Molino de Vibro Energía, **B)** Bolas Metálicas y Cilindros de Alúmina, **C)** Bolas Metálicas y **D)** Cilindros de Alúmina.

Para moler el vidrio de borosilicato se utilizaron diferentes cargas de bolas metálicas y alúmina, como se muestra en la tabla 5.-1 Como el tamaño de las bolas metálicas y los cilindros de alúmina.

Tabla 5.- 1 Descripción de las moliendas usadas para moler el polvo de vidrio de borosilicato.

Molienda #	Descripción
------------	-------------

<b>1</b>	13 kg de bolas metálicas / 1 kg de vidrio
<b>2</b>	16.25 de bolas metálicas / 1 kg de vidrio
<b>3</b>	18.75 kg de bolas metálicas / 1 kg vidrio
<b>4</b>	18.75 kg de bolas metálicas 30 min y 18.10 kg de Cilindros de Alúmina el resto del tiempo/ 1 kg de vidrio
<b>5</b>	18.10 kg de cilindros de alúmina/1 kg de vidrio

### 5.1.3. Fineza por malla #325

Como ya se mencionó anteriormente, el tamaño de partícula del polvo de vidrio es muy importante para pueda ser utilizado como un material cementante suplementario o ser utilizado como filler, y también evitar la reacción álcali sílice. Debido a esto, la fineza por la malla #325 fue considerada como un buen parámetro para evaluar las moliendas, ya que esta malla tiene una abertura de 45  $\mu\text{m}$ , lo que se buscaba era asegurar un tamaño de partícula menor a 74 micras.



*Fig. 5.- 7 Malla # 325 para determinar la finura.*

### 5.1.4. Área específica superficial por el “Método Blaine

De acuerdo con los resultados obtenidos de la fineza de las moliendas (1, 3 y 4) por la malla #325, se observó que la fineza no proporcionaba suficiente información para diferenciar cuál molienda era mejor, cuando se cambiaba la carga de bolas metálicas o alúmina, y al incrementar el tiempo de molienda. Debido a esto, se caracterizaron las moliendas por el método de permeabilidad al aire, de acuerdo a la norma ASTM C 204. Cabe mencionar que la finalidad de determinar cuál carga de bolas y con cuanto tiempo de molienda, era posible obtener un polvo de vidrio de borosilicato (PVB-1) con un área superficial similar del cemento para ser usado como filler. También obtener otro polvo de vidrio de borosilicato (PVB-2) con un área superficial máxima posible para reemplazar la microsíllice.

## 5.2. Influencia de la granulometría de a agregado fino en CUAD

Debido al objetivo principal de esta investigación, es estudiar la influencia del vidrio de borosilicato en concretos de ultra alto desempeño, es importante contar con una mezcla de referencia. Para esto, se tomó como constante 800 kg de cemento, 64 kg de microsílíce y una relación agua cemento de 0.25, basados en investigaciones anteriores donde se encontró que con estas cantidades por metro cubico, se pueden desarrollar concretos de ultra alto desempeño utilizando agregado calizo del área metropolitana de Monterrey. Ya que en esta investigación se utilizó el cemento H, el cual, no ha sido objeto de estudio en ninguna investigación anterior, se probaron tres diferentes distribuciones granulométricas de agregado fino (AF), se describen de manera general en seguida:

- **Agregado fino 1 (A.F.1.):** es la arena caliza normal, tal cual proviene de banco de trituración que comúnmente se utiliza en el concreto.
- **Agregado fino 2 (A.F.2.):** es el mismo AF1, pero usando solo lo que pasa la malla No.16.
- **Agregado fino 3 (A.F.3.):** es la arena normal que pasa la malla No. 16 y lo que se retiene en la No.100.

Los agregados A.F.2., A.F.2. y A.F.3. los podemos observar en la Fig. 5- 8.



*Fig. 5.- 9 Agregados utilizados: A) Agregado fino 1 (A.F.1.), B) Agregado fino 2 (A.F.2.) y C) Agregado fino 3 (A.F.3.).*

Adicionalmente, en la literatura se ha reportado que la distribución granulométrica y el tamaño máximo del AF influyen en el desempeño del CUAD, por lo que comúnmente se utiliza o recomienda un tamaño máximo de 600  $\mu\text{m}$ , pero como en investigaciones anteriores

utilizando el AF de la región de monterrey con tamaños mayores a los recomendados, se utilizó un tamaño máximo de partícula que pasa la malla No 4 (4.76 mm)

Para todas las mezclas de concreto se utilizó una batidora planetaria con una capacidad máxima de 14.2 litros, marca UNIVEX modelo SRM 12. El procedimiento de mezclado consistió en utilizar el 20% del agua para diluir el aditivo SP, después los materiales se colocaron en el siguiente orden: Cemento H, Humo de Sílice, Polvo de vidrio de Borosilicato (PVB-1 y PVB-2) y el 50% del volumen de agua; en este momento se encendió la mezcladora en velocidad 1 ( $\approx 145 \text{ rpm}$ ) se mezcló por un minuto, después se cambió a velocidad 2 ( $\approx 210 \text{ rpm}$ ) y se mezcló por 4 minutos, en este periodo de tiempo en el último minuto se agregó el aditivo SP gradualmente y el resto del agua. Posteriormente se mezcló por 3.5 minutos más en velocidad 3 ( $\approx 285 \text{ rpm}$ ). El tiempo de mezclado acumulado fue de 8.5 minutos.

Para evaluar el desempeño del CUAD, se midieron propiedades en estado fresco como: masa unitaria, contenido de aire y fluidez o extensibilidad, esta última se consideró un diámetro de  $320\text{mm} \pm 20\text{mm}$ . Este criterio es reportado como un buen parámetro para evaluar su desempeño en estado fresco. Estas pruebas se ejecutaron acorde a los procedimientos descritos en las siguientes normas ASTM:

- **ASTM C 185** Método estándar para el contenido de aire de mortero de cemento hidráulico. La masa unitaria y contenido de aire fueron determinados de acuerdo a metodología descrita en esta norma, realizando ciertas modificaciones como: la masa unitaria se llenó en una sola capa, sin compactarse ni dándole golpes para expulsar el aire, debido a que se desarrollaron mezclas de concreto muy fluidas que se autoconsolidaban.
- **ASTM C 240** Método estándar para el flujo del mortero de cemento hidráulico. Esta norma permitió determinar la fluidez del CUAD. Se modificó el procedimiento para medir la fluidez: el molde se llenó en una capa sin apisonarse; no se requirió darle los 25 golpes en 15s y se midió la fluidez tomando dos lecturas perpendiculares usando una cinta de medir o flexómetro.

Para evaluar el comportamiento del CUAD, en estado endurecido se moldearon cubos de 50 mm de lado, en una capa sin compactarse, inmediatamente después se colocaron a curar en

un cuarto con una humedad relativa del 100% a una temperatura de  $23^{\circ}\text{C}\pm 2$ . A las 24 horas, se desmoldaron y se mantuvieron en una pileta con agua e hidróxido de calcio hasta la edad de ensaye. La determinación de la resistencia a compresión se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 109, a las edades de 3, 7, 28 y 90 días. Para lo cual, se hicieron 4 mezclas: Mezcla 1 (1) con A.F.1., Mezcla 2 (2) y Mezcla 3 (3) con A.F.2. y la Mezcla 4 (4) con el A.F.3.

### 5.3. Influencia del polvo de vidrio de borosilicato como agregado fino

En el desarrollo de concretos de ultra-alto desempeño se utilizan polvos para reemplazar parte del agregado fino, con la finalidad de mejorar el empaquetamiento en la mezcla de concreto. El polvo de cuarzo o de arena de sílice son los polvos comúnmente utilizados, con área superficial o tamaño de partícula promedio ( $d_{50}$ ) similar a la del cemento. Como estos polvos se consideran perjudiciales para la salud, en esta investigación se utilizó el polvo de vidrio borosilicato 1 (PVB-1).

Para mejorar el empaquetamiento de las mezclas de concreto, se utilizó el programa RENÉ-LCPC, que fue desarrollado por Thierry Sedran et François de Larrard en la Laboratorio Central de carreteras y puentes de París (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). Este programa está basado en el Modelo de Empaquetamiento Compresible (MEC), el cual utiliza el concepto que la máxima densidad de empaquetamiento (MDE) es posible, si todos los componentes granulares se acomodarán de uno por uno.

Para la obtención de las curvas de empaquetamiento se usaron las distribuciones granulométricas de los agregados: A.F.1., A.F.2. y A.F.3., para cada uno de los agregados se calculó la su curva de densidad de empaquetamiento, combinados con el PVB-1 en un medio considerado como pasta suave ya que se buscaba producir un CUAD fluido. En la imagen xx se muestra un diagrama resumiendo la metodología utilizada para la optimización de las mezclas de concreto.

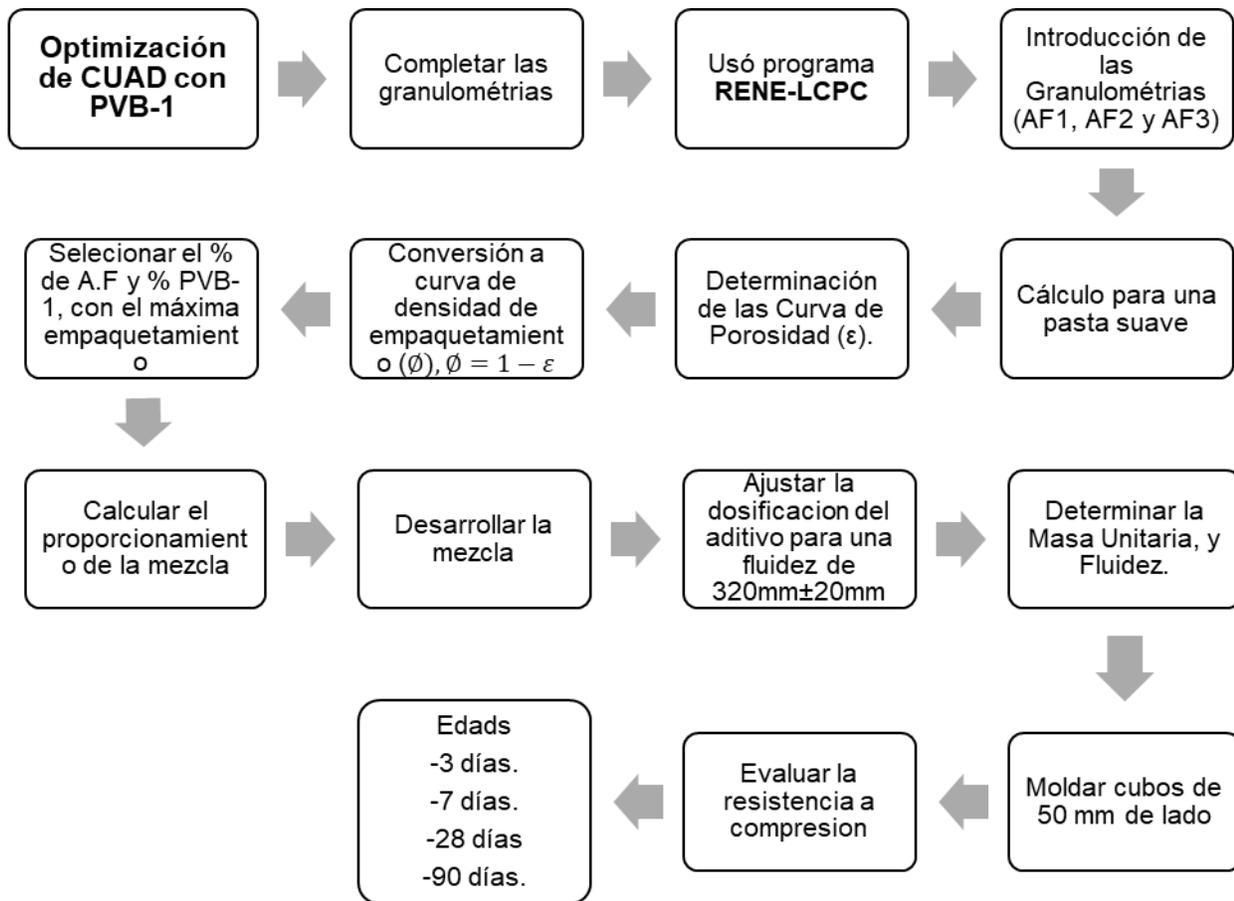


Fig. 5.- 10 Diagrama con la metodología para la optimización de CUAD, utilizando el PVB-1 para mejorar la densidad de empaquetamiento.

Después de obtener las curvas de la densidad de empaquetamiento entre el agregado fino y el PVB-1, se calcularon las proporciones del agregado fino y PVB-1 en masa, usando la máxima densidad de empaquetamiento para las mezclas: 4, 5 y 7, excepto para la mezcla 6, ya que esta mezcla se hizo para ver cómo influye al disminuir el empaquetamiento en la resistencia a compresión. Las proporciones de los agregados en masa de las mezclas se muestran en la siguiente lista:

- Mezcla 5 (5): 85% de A.F.1. + 15% de PVB-1.
- Mezcla 6 (6): 85% de A.F.1. + 15% de PVB-1.
- Mezcla 7 (7): 55% de A.F.2. + 45% de PVB-1.
- Mezcla 8 (8): 62.5% de A.F.3. + 32.5% de PVB-1.

Como ya se mencionó anteriormente la cantidad de cemento, agua y % de microsílice se mantuvieron constantes, en todas las mezclas para que el volumen de pasta se mantuviera constante.

#### 5.4. Efecto del vidrio de Borosilicato como filler y/o material cementante

En la actualidad, la industria de la construcción enfrenta un gran reto, el incrementar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado mediante el desarrollo de concretos con gran durabilidad. Para cumplir con estos requerimientos, los CUAD son los candidatos ideales; sin embargo, por los materiales que se utilizan para su producción y sus altos consumos de cemento, lo hacen un material demasiado costoso y con gran impacto ambiental. Debido a esto, los tecnólogos del concreto enfocados en el desarrollo y la optimización de los CUAD, han direccionado sus esfuerzos en investigar la aplicación de fillers y de materiales cementantes suplementarios en la producción de este tipo de concretos. Lo anterior tiene la finalidad de reducir los consumos de cemento, usar materiales de menor costo, y así, disminuir su impacto ambiental y hacerlo un material más competitivo comercialmente.

Para evaluar el cómo influye el polvo de vidrio de borosilicato en un CUAD, se tuvieron dos consideraciones, la primera fue evaluar el PVB-1 como filler, reemplazando parte del cemento. La segunda fue reemplazar la microsílice completamente, por el polvo de vidrio de borosilicato 2 (PVB-2).

La cantidad de cemento que se reemplazó por PVB-1 fue determinada basándose en las investigaciones de Powers. En una pasta de cemento calculó dos tipos de agua por gramo de cemento; la químicamente ligada y la físicamente ligada, que fueron de 0.23 g y de 0.19 g, respectivamente. Donde se asume que, para lograr una hidratación completa de un gramo de cemento se necesitan aproximadamente 0.42 gramos de agua. Cabe mencionar que esta cantidad de agua depende del tipo de cemento y si se usan sistemas binarios. En esta investigación se asumió que, es la cantidad de agua suficiente para obtener el 100% del cemento hidratado.

Aunado a lo anterior, se calculó el grado de hidratación de las mezclas como el cociente entre la relación a/c de la mezcla y la relación  $a/c=0.42$ , como se muestra en la ecuación 1 (ecu.1).

- *Grado de hidratación del cemento (GHC)* =  $\left(\frac{a}{c}\right)$ ; ecu.1

La relación a/c utilizada en las mezclas desarrolladas de CUAD fue de 0.25, el grado de hidratación se calculó:

- $GHC = \frac{0.25}{0.42} = 0.59$ ;

De acuerdo al cálculo anterior, se asume que aproximadamente el 60% del cemento se hidrata y el resto queda como relleno o material inerte dentro del concreto. Para asegurar que el cemento se hidrate completamente en las mezclas de CUAD diseñadas, se reemplazó el 40% del cemento en volumen por PBV-1, manteniendo la cantidad de agua de la mezcla constante, con la finalidad de incrementar la relación a/c de 0.25 a 0.42.

Para evaluar el efecto filler del PBV-1, se desarrollaron dos mezclas usando las granulometrías A.F.1. y A.F.2. Cuando se evaluaron las granulometrías en CUAD después de ser empaquetadas con el PVB-1, ya que alcanzaron resistencias superiores a los 150 MPa a la edad de 28 días. El proceso a seguir del desarrollo del CUAD cuando se utiliza el PVB-1 como filler, de muestra en la Fig.5.11.

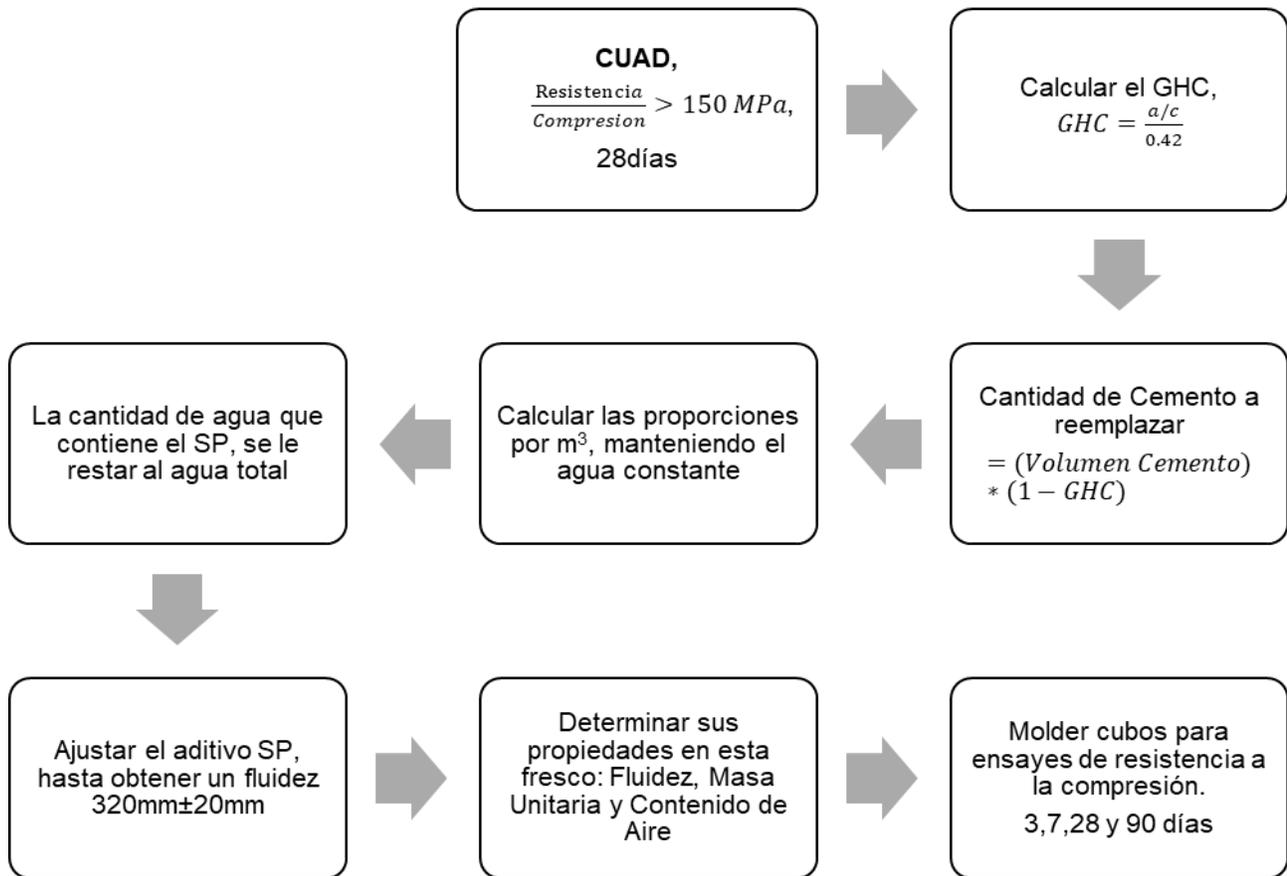


Fig. 5.- 11 Metodología para el desarrollo de CUAD reemplazando el PVB-1 como filler.

Para evaluar el desempeño del polvo de vidrio de borosilicato como material cementante suplementario, la microsílíce fue reemplazada en volumen por el PVB-2, que tiene áreas superficiales similares, determinadas por el método de Blaine. Los pasos seguidos se muestran en la Fig.5.-12.

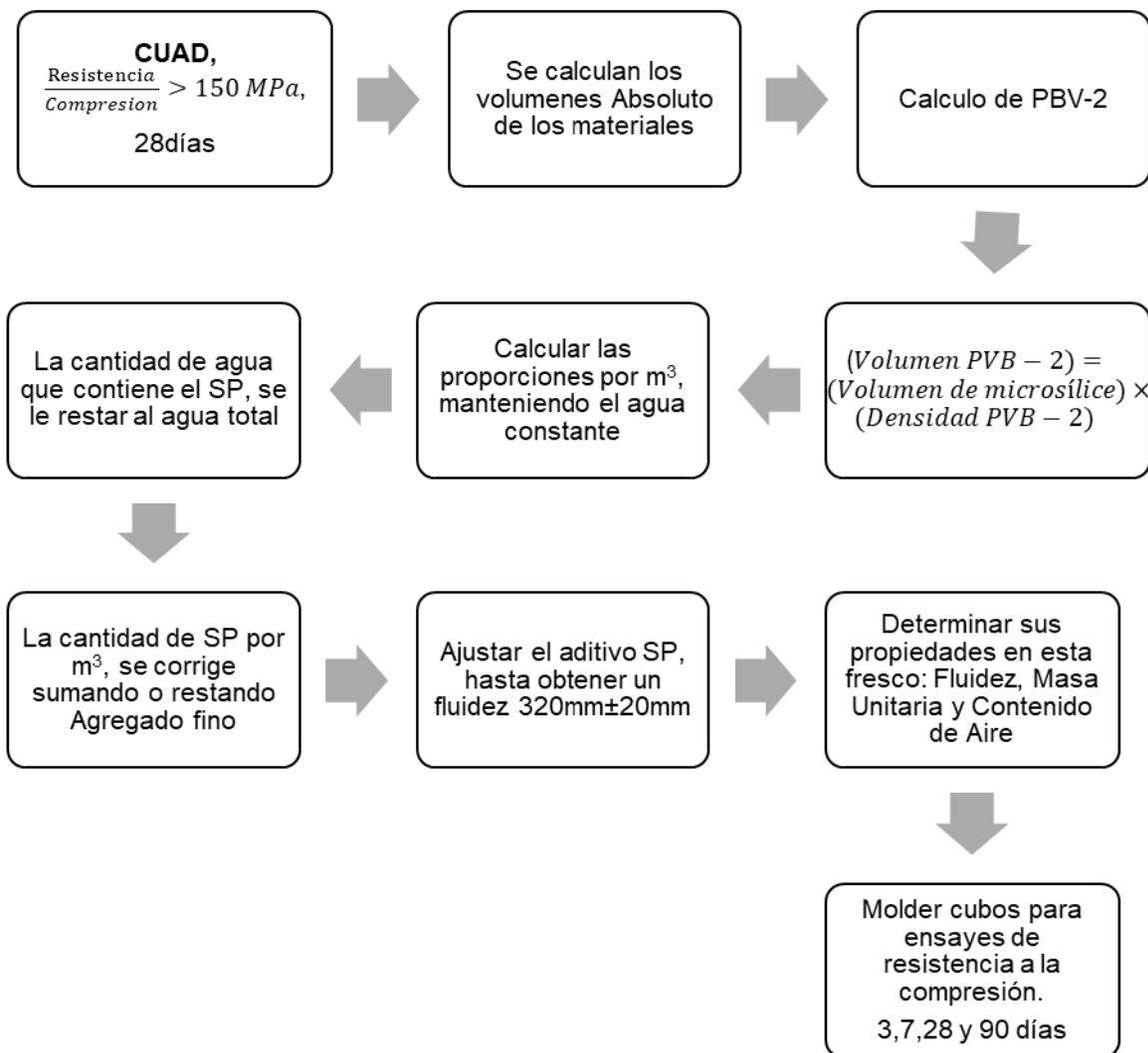


Fig. 5.- 12 desempeño del polvo de vidrio de borosilicato como material cementante suplementario.

En resumen, las mezclas que se utilizaron para esta sección se dividieron en dos series: A y B. La serie A esta constituida por las mezclas: mezcla 7 (7), mezcla 9 (9) y Mezcla 10 (10), las cuales se describen en la siguiente lista:

- Mezcla 7: En su desarrollo se utilizó el máximo empaquetamiento entre A.F.2. y PVB-1.
- Mezcla 9: Es la 7, reemplazándole el 40% del cemento en volumen por PVB-1.
- Mezcla 10: Es la 9, con el reemplazo del 100% de la microsílíce por PVB-2.

La serie B, corresponde a las mezclas R, A, B y C, se describen a continuación:

- Mezcla R (M-R): Es básicamente la Mezcla 5, con el mismo proporcionamiento.
- Mezcla A (M-A): Es la mezcla R, sustituyendo el 40% del cemento por PVB-1.
- Mezcla B (M-B): Es la mezcla R, reemplazando el 100% de la microsílíce por el PVB-2.
- Mezcla C (M-C): Es la mezcla A, reemplazando el 100% de la microsílíce por el PVB-2.

Las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C, se le realizaron las pruebas en estado fresco como masa unitaria (M.U.), contenido de aire, fluidez. Además, en estado endurecido se realizaron las evaluaciones de resistencia a compresión a las edades de 3, 7, 28 y 90 días.

### 5.5. Métodos de prueba para indicadores de Durabilidad

En la industria de la construcción de nuestro País se encuentra en constante cambio y modernización, tanto los métodos constructivos como los mismos materiales. Los requerimientos de la construcción para infraestructura y vivienda, se han transformado de estar regidos por requerimientos de resistencia a la compresión a solicitudes de durabilidad. La forma de diseñar se está enfocando al desempeño global de la estructura, en la cual se buscan tomar en cuenta la durabilidad de los materiales. Debido a esto es muy importante considerar pruebas que nos permitan evaluar de manera correcta y confiable a nuestros materiales, en este caso al concreto. Para esto se utilizaron las pruebas de RES y Migración de iones cloruro (MIC), se ha demostrado en la literatura que son confiables para evaluar la vida útil del concreto.

#### 5.5.1. Resistividad eléctrica superficial

El método de resistividad eléctrica superficial (RES) está basado en la norma AASHTO TP 95, es un método no destructivo, donde se usa el arreglo de los 4 puntos de Webber para aplicar una corriente alterna sobre la superficie del espécimen de concreto, donde se mide el cambio de potencial como se observa en la Fig.5.-13. La resistencia eléctrica se corrige por el factor de forma, para ser convertido en resistividad eléctrica superficial del material.

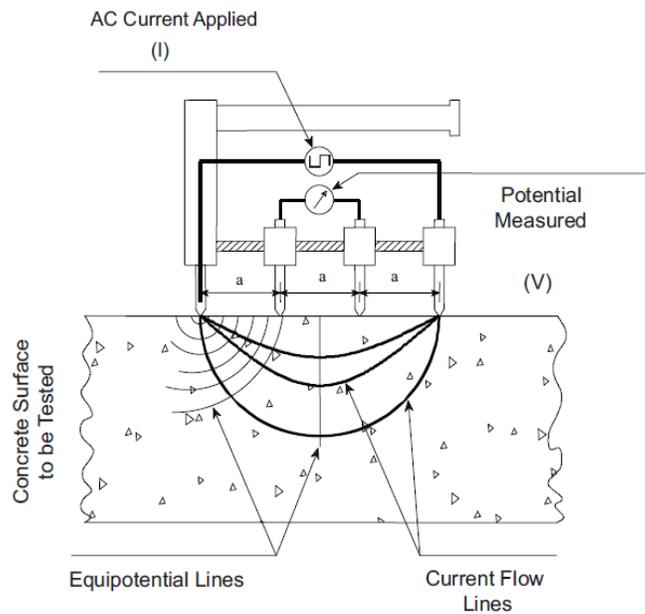


Fig. 5.- 13 Método de Wenner (4 puntos) para medir la resistividad eléctrica superficial.

La RES se determinó en cilindros de concreto de 10 cm de diámetro y 20 cm de largo, las mediciones se realizaron de acuerdo a la AASTHO TP 95, se realizaron las mediciones a las edades de 3, 7, 14, 21, 28, 35, 56, 90 y 120 días.

### 5.5.2. Migración al Ion Cloruro

El coeficiente de migración se realizó para evaluar los CUAD, se usaron 3 rodajas de 10 cm de diámetro por 5 cm de largo, la preparación de las muestras se realizó de acuerdo a la norma NT Build 492, al procedimiento de esta norma se le hicieron modificaciones.

En la norma se especifica que se aplique un voltaje de 30 v, si se mide una corriente menor a 5 mA, la prueba se tiene que realizar en un voltaje de 60 volts, el tiempo de duración de la prueba depende de la corriente registrada en este voltaje. Debido a que al aplicar el voltaje de 30 volts se tenía una corriente menor a 1 mA, la muestra se colocó a 35 volts por 28 días. A pesar de realizar este cambio en las muestras medidas solo alcanzaban a penetrar un par de milímetros se cambió el voltaje a 60 volts a 28 días. En la figura xx se muestra la prueba NT Build 492.



Fig. 5.- 14 Se muestran las rodajas de los cilindros colocadas en las mangas de Neopreno y B) Se muestra cómo se determinó el voltaje.

Para realizar la prueba se necesitan dos soluciones, cloruro de sodio e hidróxido de sodio. El Cloruro de sodio, se rellenaba con agua destilada para mantener el nivel del agua por la evaporización. El hidróxido de sodio que se cambió cada 7 días para asegurar que el cambio del pH en la solución no fuera mayor a 1.

Este método permite que mediante la aplicación de corriente los iones cloruro  $Cl^-$  migren a través del concreto de la solución anódica hacia la solución catódica. Al finalizar la prueba, mediante el uso de nitrato de plata se determina la profundidad del frente de cloruros. Posteriormente, se calcula el Coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario ( $D_{nssm}$ ), con la ecuación 2 (ecu.2).

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)*L}{(U-2)*t} \left( X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)*L*X_d}{U-2}} \right) \text{ (ecu.2).}$$

Donde:

**$D_{nssm}$** : Coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario,  $\times 10^{-12} m^2/s$ .

**T**: Promedio de la temperatura inicial y final en la solución anódica, °C.

**U**: Valor absoluto del voltaje aplicado, V.

**L**: Ancho del espécimen, mm.

**T**: Tiempo que llevo la prueba, horas;

**$X_d$** : Promedio de las medidas de las distancias que penetran los cloruros, mm.

### 5.5.3. Contracción química

La contracción química (CQ), es la reducción del volumen absoluto de la pasta debido a los cambios de volumen que se presentan durante la hidratación del cemento. La medición del desarrollo de la contracción química es una forma de medir el proceso de hidratación, e indica que a mayor contracción química más activa será la hidratación del cemento o de los cementantes. La contracción química fue medida a las pastas de las mezclas R, A, B y C, de acuerdo al procedimiento que se indica en la norma ASTM C 1608. En las figuras xx y zz, se muestra imágenes del procedimiento resumido.

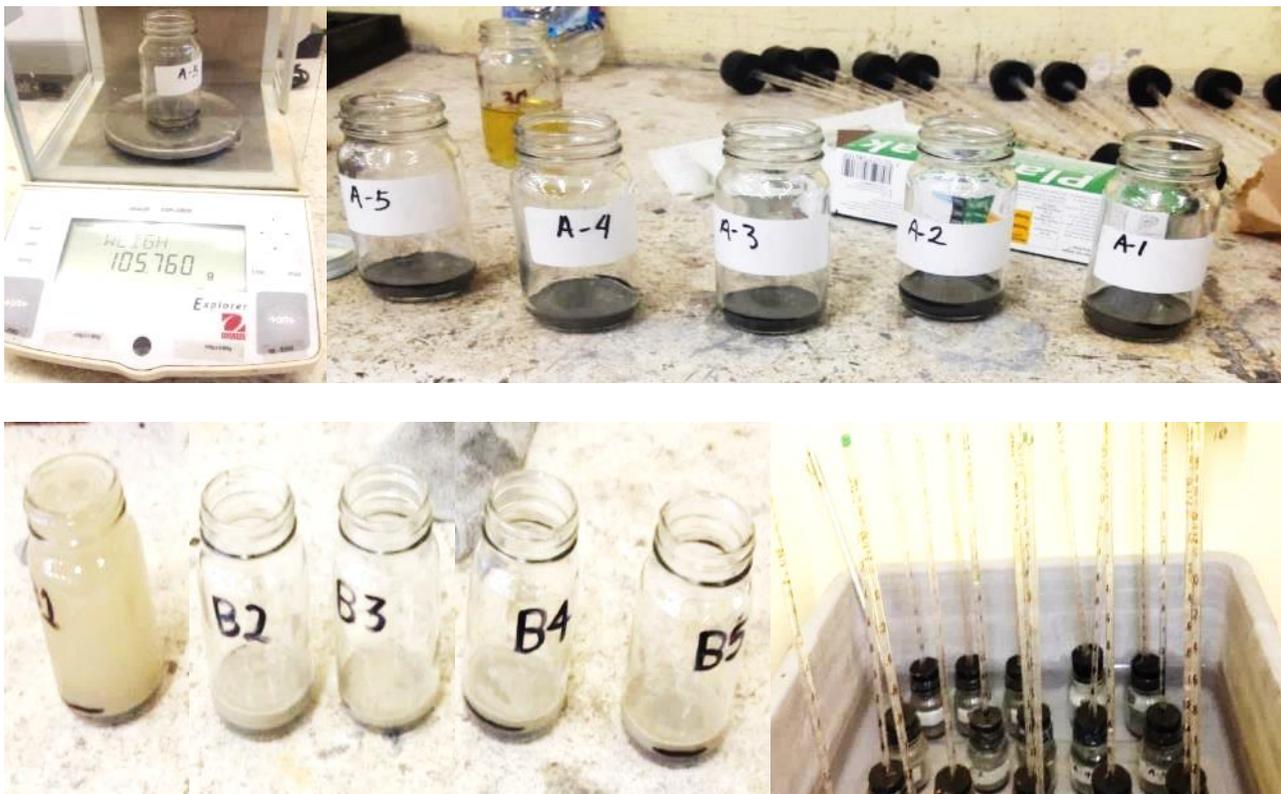


Fig. 5.- 15 Preparación de las muestras para medir contracción química.

### 5.6. Caracterización de la reacción puzolánica del vidrio de borosilicato

La reacción puzolánica (RP) se genera entre el hidróxido de calcio (CH) formado de la hidratación del cemento y la sílice amorfa que contienen los materiales cementantes suplementarios. En esta reacción se forma principalmente silicatos de calcio hidratados (C-S-

H), lo que se traduce en la disminución en la cantidad de CH. Una técnica donde se puede cuantificar la pérdida del CH, en pastas de cemento es el Análisis Termogravimétrico (TGA).

### 5.6.1. Análisis termogravimétrico

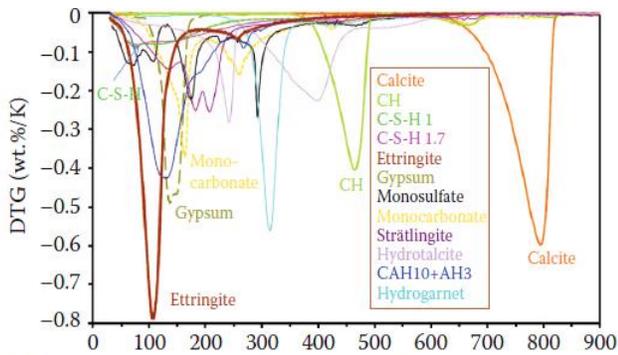


Fig. 1 Picos de los diferentes productos de hidratación.

El análisis termogravimétrico consiste básicamente en la aplicación de calor a una muestra midiendo la temperatura y la variación de masa en una atmosfera controlada. Con esta técnica se es posible caracterizar la hidratación del cemento y la reacción puzolánica de los materiales cementantes suplementarios. En la literatura se reporta que a diferentes temperaturas se descomponen los distintos productos de hidratación. Sin embargo, existen productos de hidratación como etringita, C-S-H, entre otros; los rangos de temperatura de descomposición se quedan muy juntos o en ciertos casos se traslapan, como se muestra en la Fig.5.-16.

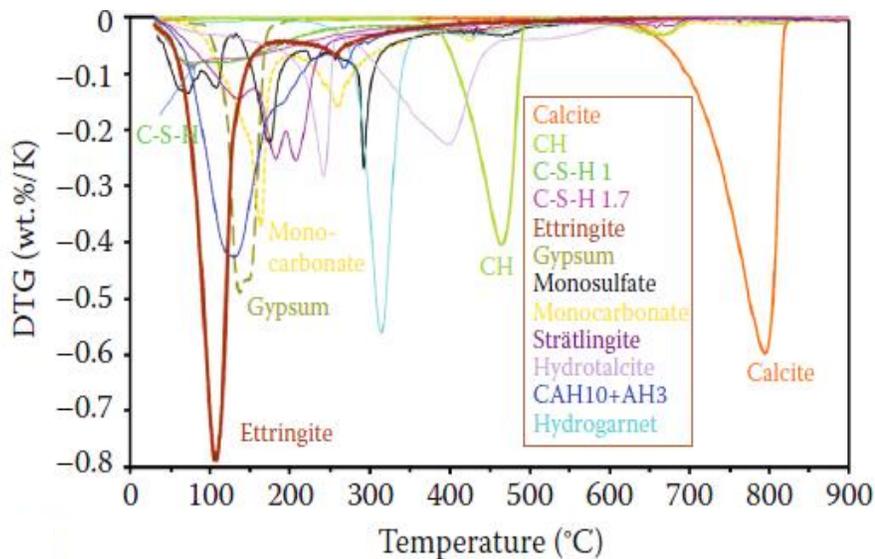


Fig. 5.- 16 Picos de los diferentes productos de hidratación

Esta técnica a pesar que tiene sus inconvenientes es posible obtener información interesante de pastas de cemento, como se menciona en la siguiente lista:

- **Temperatura de 0°C a 105°C:** Es el agua que se encuentra libre en los poros de la pasta de cemento, la cual no se encuentra químicamente liga a ningún producto de hidratación ni tampoco adsorbida.
- **Temperatura entre 105 °C a 1000°C:** Es la cantidad de agua que se encuentra liga a los productos de hidratación independientemente si esta químicamente o no.
- **Temperatura entre 400 °C y 500°C:** La portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) o CH, generalmente se descompone en este rango de temperatura, debido a la perdida de masa del agua evaporada la cantidad de CH presente en la pasta de cemento usando el peso molecular del CH ( $m_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 74\text{gr/mol}$ ) y la masa molar del agua  $m_{(\text{H}_2\text{O})} = 18\text{gr/mol}$ , con la ecuación 3 (ecu.3), se puede calcular la cantidad de CH, en pastas de Cemento.

$$\text{Ca}(\text{HO})_2 = \text{Peso}_{\text{Ca}(\text{OH})_2} \times \frac{74}{18} \text{ (ecu.3).}$$

Donde;

$\text{Ca}(\text{HO})_2$  = Cantidad de hidróxido de calcio en la muestra.

$Peso_{Ca(OH)_2}$  = Cantidad de masa pérdida debido a la evaporización del agua entre los 400°C y 500°C.

La forma típica de calcular la cantidad de agua ligada al CH es usando la diferencia de masa entre las temperaturas 400°C y 500°C. Esto puede proporcionar un resultado incorrecto ya que la descomposición del CH no se encuentra exactamente al inicio y al final de este rango de temperaturas, así que para medirlo adecuadamente hay que determinar el punto inicial y final donde se desliga el agua liga del CH. La metodología utilizada se describe en la Fig.5.-17.

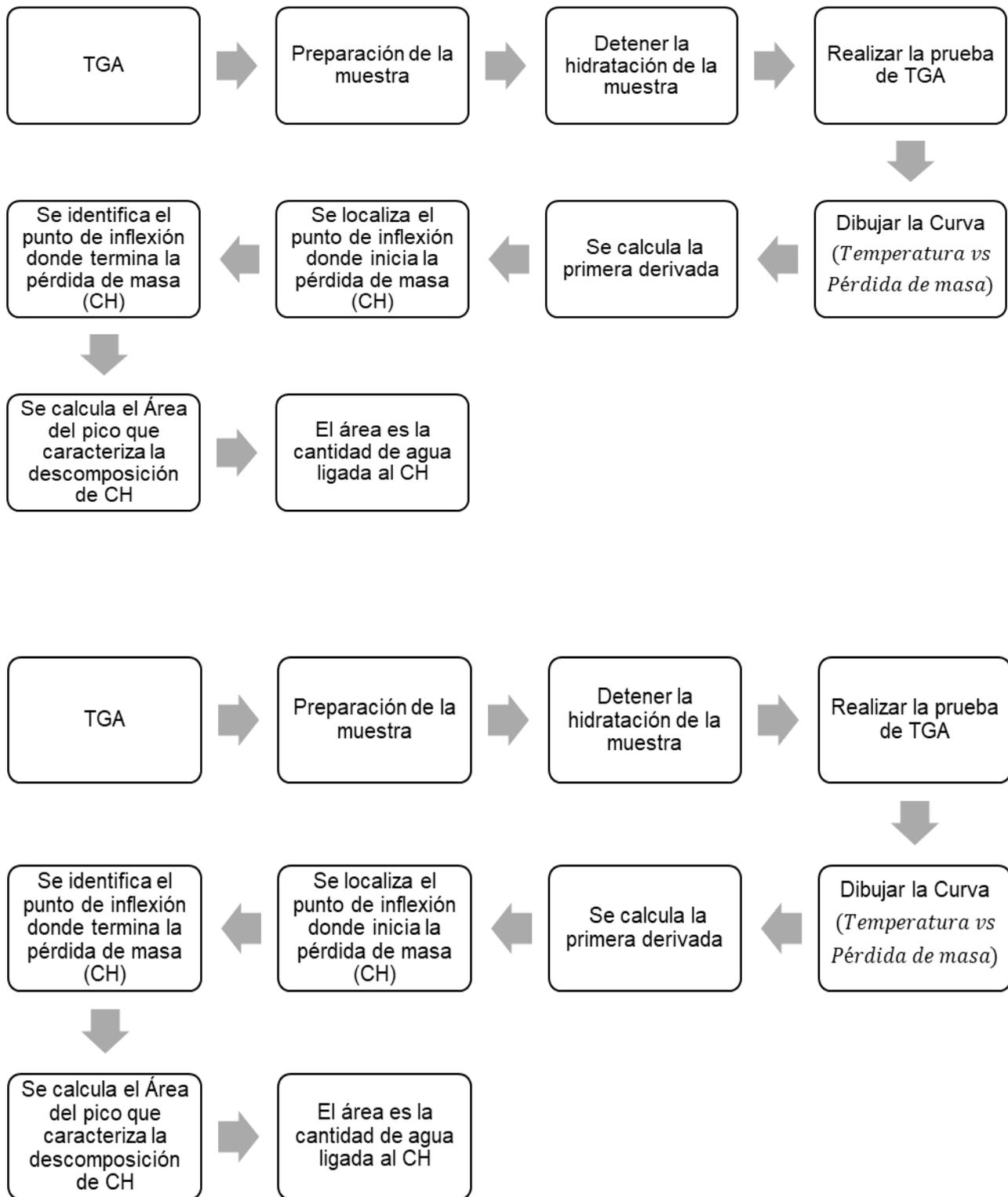


Fig. 5.- 17 Metodología a seguir para la interpretación del Análisis Termogravimétrico.

En la Fig.5.-17, se muestra un ejemplo del cálculo de la cantidad del CH, usando la pérdida de masa en el rango de temperatura y el método donde se calcula el área de la derivada de la masa, dependiendo de la manera como se calcula el área varia la cantidad de CH o Portlandita. Donde se puede observar que usar el método A se calcula la diferencia de masas donde se inicia la perdida de agua del CH y el método C, donde se calcula el área bajo la curva usando una recta tangente en los puntos inicial y final, de la descomposición del CH.

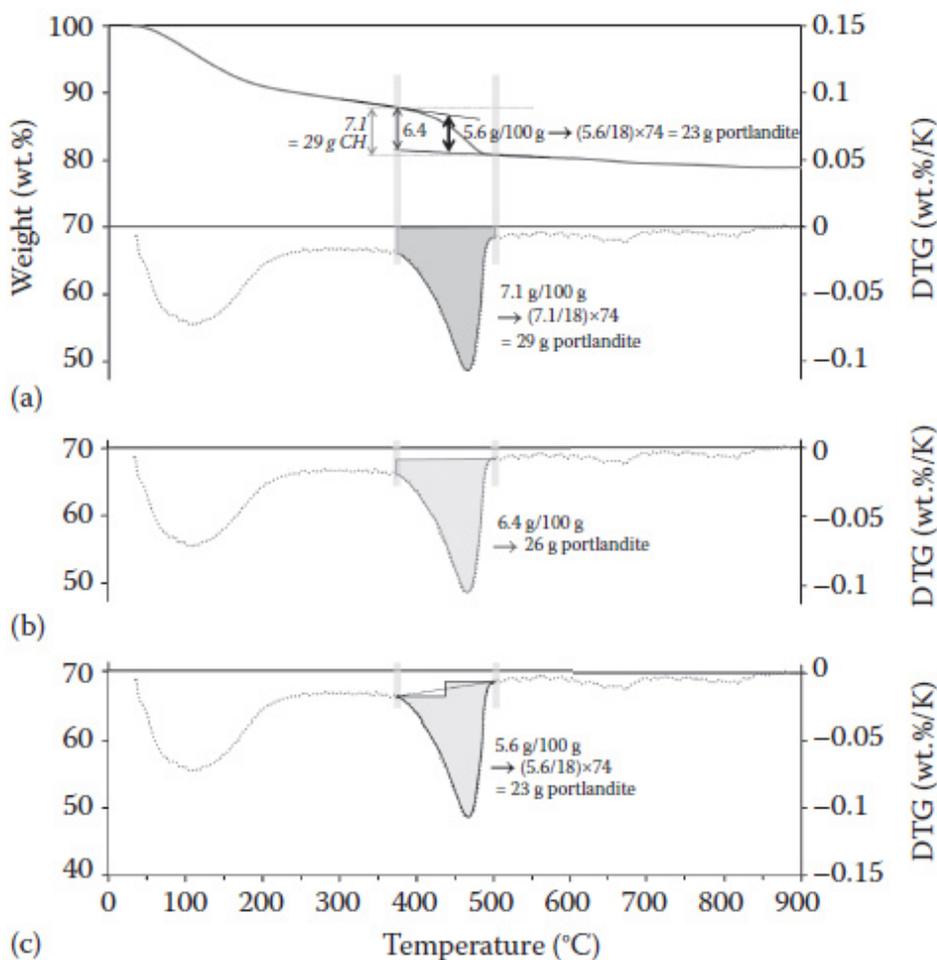


Fig. 5.- 18 Determinación de la cantidad de hidróxido de calcio, por un método gráfico y por un método analítico.

Para el análisis de los resultados obtenidos de TGA en esta tesis, se utilizó el método C, para realizar dichos cálculos se utilizó un programa llamado orgin 8.0. El cual nos permitió calcular el Área del pico que caracteriza la descomposición del CH.

- **Muestra**

Para la caracterización de la RP del polvo de vidrio de borosilicato, se utilizó el PVB-1 y PBV-2, se hicieron dos pastas utilizando hidróxido de calcio de grado reactivo para laboratorio. El mezclado se realizó de acuerdo al procedimiento descrito en la ASTM C 305, las cantidades utilizadas son:

- Polvo de vidrio de Borosilicato: 42.2 gramos.
- Hidróxido de calcio grado reactivo: 79.2 gramos.
- Agua: 145.39 gramos.
- Se tiene una relación Calcio/Sílice >1.5

Después del mezclado la pasta fue colocado en frasco de vidrio, sellados herméticamente. El cual, fue colocado en un desecador dentro del laboratorio a una temperatura ambiente de 23°C hasta el momento de realizar el ensaye.

- **Preparación de la muestra**

Las muestras se detuvieron a las edades de 28, 56, 90 días y 1 año, la metodología utilizada es la siguiente:

1. Moler la muestra utilizando un mortero de alúmina para obtener un polvo que pase la malla No. 100, como se muestra en las imágenes.



*Fig. 5.- 19 Describe el proceso a seguir para obtener el material con el tamaño adecuado para la prueba de TGA. **A)** Molienda de pastas usando el Mortero de Alúmina, **B)** Cribar el material por la malla No.100 y **C)** Material que se pasa por malla No. 100.*

## 2. Detener la hidratación de la muestra

- Pesar 5 gramos de la pasta que pasa la malla No.100.
- Colocar el polvo en 50 ml de alcohol isopropilico, el alcohol va a reemplazar el agua libre en la muestra.
- Agitar vigorosamente y dejar la muestra de polvo de 10 a 15 min.
- Filtrar la suspensión, utilizando una bomba de vacío para remover el exceso del alcohol isopropilico.
- Después, sin detener el vacío colocar de 5 a 10 ml de Éter etílico para remover el alcohol isopropilico, detener la bomba hasta que el polvo tenga un color claro.
- Secar la muestra en un vidrio de reloj durante un periodo de 8 a 10 min.
- Finalmente, la muestra se almacena en bolsas con cierre para mantenerlas selladas herméticamente para el momento del ensaye.

Le procedimiento escrito anteriormente se resumen en la figura xx.



*Fig. 5.- 20 Procedimiento para detener la hidratación en muestras de polvo. **A)** Cantidad de material, **B)** Suspensión del polvo en alcohol isopropilico **C)** y **D)** Filtrado de la suspensión mediante el uso de una bomba de vacío.*

### • Condiciones para realizar la prueba de TGA

Como se indica el manual de Karen Scrivener, en su guía el análisis de la microestructura, desde las condiciones de la preparación de la muestra, que solvente se utilizó para detener

la hidratación, el tamaño de la muestra, el tipo de atmosfera, las velocidades de calentamiento influyen en el resultado. Debido a todo esto, las condiciones que se usaron para realizar los ensayos de TGA son las siguientes:

<p><b>Tamaño de la muestra</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Masa de 10 mg, mínimo.</li> </ul>
<p><b>Tipo Atmosfera:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas de Nitrógeno se utilizó 20 ml por minuto, es una comúnmente utilizado este gas como una atmosfera inerte.</li> </ul>
<p><b>Isoterma 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantuvo la Temperatura de 28°C por un periodo de tiempo de 10 minutos, con la final de tener una masa de temperatura inicial constante.</li> </ul>
<p><b>Rampa de Calentamiento 1:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se calentó la muestra de 28°C a 105°C, usando una rampa de calentamiento de 10°C por minuto.</li> </ul>
<p><b>Isoterma 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se mantuvo constante la temperatura de 105°C por un periodo de tiempo de 10 min.</li> </ul>
<p><b>Rampa de Calentamiento 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se calentó la muestra de 105°C a 990°C utilizando una rampa de calentamiento de 10°C por minuto.</li> </ul>

Fig. 5.- 21 Condiciones para la prueba de Análisis Termogravimétrico.

- Ecuaciones utilizadas para las pastas que contienen hidróxido de calcio y Polvo de vidrio de Borosilicato.

El consumo de hidróxido de calcio  $Consumo_{CH}$  del polvo de vidrio de borosilicato determinó mediante la ecuación 4 (ecu.4)

$$Consumo_{CH} = \frac{CH_{pasta} - M_{CH}}{MPVB_{pasta}} \text{ (ecu.4)}$$

Donde:

CH<sub>pasta</sub>= Es la cantidad de CH en la pasta original; M<sub>CH</sub>= es la cantidad de masa de CH en la muestra; M<sub>PVB<sub>pasta</sub></sub>= es la cantidad de masa del vidrio de borosilicato en la pasta original, se calcula en la siguiente ecuación 5 (ecu.5).

$$M_{PVBpasta} = \frac{M_{1000C}}{(1-P.I. + \frac{C}{S} - \frac{C}{S} * \frac{MH_2O}{M_{Ca}})} \text{ (ecu.5).}$$

Donde:

M<sub>1000°C</sub>= es la cantidad de masa a los 1000°C; P.I.= Perdida por ignición; C/S=relación calcio/sílice. M<sub>H<sub>2</sub>O</sub> es el peso molecular del agua; M<sub>Ca</sub> es el peso molecular del Ca.

La cantidad de CH pasta se determinó usando la ecuación 6 (ecu.6):

$$CH_{pasta} = (M_{PVBpasta}) * \left(\frac{C}{S}\right) \text{ (ecu.6)}$$

- Para el análisis de las pastas de las mezclas de concreto se usaron las siguientes ecuaciones:

Cantidad de CH por gramo de cemento se calculó con la siguiente ecuación 7 (ecu.7):

$$Cantidad\ CH = \frac{M_{CH}}{M_{Cemento}} \text{ (ecu.7)}$$

El consumo de CH por gramo de material Cementa Suplementario (Consumo CH por MCS) se determinó de acuerdo a lo establecido en la ecuación 8 (ecu.8)

$$Consumo\ de\ CH = \frac{(CH_{28} - CH_{90})}{\frac{M_{microsilice}}{M_{cemento}} + \frac{MPVB - 1}{M_{cemento}} + \frac{MPVB - 2}{M_{cemento}}}$$

Donde:

CH<sub>28</sub> es la cantidad de CH que se tiene en la pasta a los 28 días; CH<sub>90</sub> es la cantidad de CH que se tiene la pasta a los 90 días;

La cantidad de Cemento original(M<sub>cemento</sub>) en la pasta; el cual se calculó usando la ecuación 9 (ecu.9):

$$M_{cemento} = \frac{M_{1000C}}{(1-P.I.c.)} * (R_{C/CM}) \text{ (ecu.9)}$$

Dónde:  $R_{C/CM}$  = es la relación entre la masa del Cemento y la suma de total de materiales cementantes en la pasta.

La cantidad de microsílíce ( $M_{\text{microsilice}}$ ) original en la pasta de concreto se calcula de acuerdo a la ecuación 10. (ecu.10):

$$M_{\text{microsilice}} = \frac{M1000C}{(1 - P.I.m)} * (R_{C/CM})$$

Dónde:  $R_{M/CM}$  = es la relación entre la masa de la microsílíce y la suma total de los materiales cementantes en la pasta; P.I.M= pérdida por ignición de la microsílíce.

La cantidad de PVB-1 original ( $M_{\text{PVB-1}}$ ) en la pasta de concreto se determina usando la ecuación 11 (ecu.11)

$$MPVB - 1 = \frac{M1000C}{(1 - P.I.PVB-1)} * (R_{\text{PVB-1}}) \text{ (ecu.11)}$$

Dónde:  $R_{\text{PVB-1}}$  = es la relación entre la masa del PVB-1 y la suma total de los materiales cementantes en la pasta; P.I.PVB-1 o P.I.PVB-e = es la perdida por ignición del Polvo de vidrio de borosilicato PVB-1 o PVB-2, según sea el caso.

La cantidad de PVB-2 original ( $M_{\text{PVB-2}}$ ) en la pasta de concreto se determinó con la ecuación 12:

$$MPVB - 2 = \frac{M1000C}{(1 - P.I.PVB-2)} * (R_{\text{PVB-2}}) \text{ (ecu.12)}$$

Dónde:  $R_{\text{PVB-2}}$  = es la relación entre la masa del PVB-2 y la suma total de los materiales cementantes en la pasta; P.I.c= pérdida por ignición del cemento;  $M_{\text{H}_2\text{OdeCH}}$  = es la cantidad masa de agua ligada al CH.

### 5.6.2. Contracción química

La contracción química se determinó para los polvos de vidrio PVB-1 y PVB-2, utilizando hidróxido de calcio de grado reactivo, con la finalidad de medir únicamente el cambio de volumen producido por los productos de hidratación formados por la RP del polvo de vidrio de borosilicato y el hidróxido de calcio. Se midieron 5 probetas por cada uno de los polvos de vidrio durante un periodo de tiempo de 28 días, siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C 1608.



*Fig. 14.- Ensayes de contracción química del PVB-1 y PVB-2 de acuerdo a la ASTM C 1608.*

## **6. Resultados y discusión**

### **6.1. Evaluación de moliendas**

Las moliendas se realizaron en un molino de vibro energía, utilizando diferentes cargas de bolas metálicas y cilindros de alúmina por periodo de tiempo de 2.5 horas, a cada molienda se le determinó el área superficial por el método de permeabilidad al aire “Blaine” cada 30 minutos. En la tabla 6.6 se describen las 5 moliendas evaluadas, en las moliendas 1, 2 y 3 se mantuvo constante la carga de bolas metálicas (B. metálicas) de 65 kg por molienda, la cantidad de material utilizada por molienda fue de 5 kg, 4 kg y 3.5 kg, respectivamente. En la molienda 4, se utilizó una carga de bolas metálicas durante los primeros 30 minutos, posteriormente fue retirada y se colocó una carga de 63.5 de cilindros de alúmina continuando con la molienda por un periodo de tiempo de 120 minutos. En la molienda 5 se utilizó la misma carga de cilindro de alúmina que la molienda 4 por un periodo de tiempo de 150 minutos sin utilizar las bolas metálicas. La cantidad de carga dividida entre la cantidad de material utilizado se calculó la relación carga/material para las moliendas 1, 2, 3, 4 y 5, obteniéndose una relación carga material de 13.0, 16.3, 18.6 y 18.1 kg, respectivamente.

Tabla.6. 1 Moliendas del vidrio de Borosilicato con carga de bolas Metálicas (B. Metálicas) y Molienda con Cilindros de Alúmina (C. Alúmina). \*Molienda 5 (30 min de B. Metálicas y 120 Min C. Alúmina)

Molienda (#)	Vidrio (kg)	Carga		Rel. Carga/Material		Tiempo (min)
		B. Metálicas (kg)	C. Alúmina (kg)	(kg/kg)		
1	5	65	0	13.0	-	150
2	4	65	0	16.3	-	150
3	3.5	65	0	18.6	-	150
4	3.5	65	63.4	18.6	/ 18.1	30/120
5	3.5	-	63.4	-	18.1	150

#### 6.1.1. Determinación de la Fineza por la malla #325 para las moliendas 1,3 y 4.

Las moliendas 1, 3 y 4, se les determinó la finura mediante el método estándar descrito en la ASTM C 430. En la tabla 6.7 se muestran los resultados de las mediciones de finura que se obtuvieron por duplicado, acuerdo a lo especificado por el método de prueba se requiere una desviación estándar menor 1.4%, lo cual se cumple para considerar como válido el método de prueba.

Tabla.6. 2. Finura de las moliendas 1, 3 y 5.

		Tiempo		Finura (%)		Finura	D.E.
(min)				(%)	(%)		
<b>Molienda</b>		30	41.9	43.8	42.8	1.37	
60	74.9	75.8	75.4	0.65			
		90	89.8	89.5	89.6	0.19	
150	94.8	94.7	94.8	0.12			
<b>Molienda</b>		30	60.9	60.6	60.8	0.23	
60	96.7	96.3	96.5	0.30			
		90	97.0	98.7	97.8	1.20	
150	99.5	97.2	98.3	1.61			
<b>Molienda</b>		30	82.6	81.3	82.1	0.71	
60	99.1	98.0	98.6	0.78			

			90	98.9	100.0	99.5	0.78
	150	99.1	100.0	99.6	0.64		

Al analizar los resultados de finura de las moliendas 1, 3 y 4 que se muestran en la fig.6.-4, se observa que la molienda 1 tiene un nivel de finura del 94.8% a los 150 min de molienda. Las moliendas 3 y 4, tienen un nivel de finura del 96.5% y 98.6%, respectivamente. Las moliendas después de los 90 min comenzaron a tener básicamente el mismo nivel de finura, se puede concluir que la prueba de finura no proporciona información suficiente para seleccionar cual molienda, es la más adecuada para obtener la mayor fineza ya que esta prueba solo indica el porcentaje que pasa a través de la malla # 325, lo que indica que más del 95% de las partículas del polvo de vidrio tienen un tamaño menor a 45  $\mu\text{m}$ .

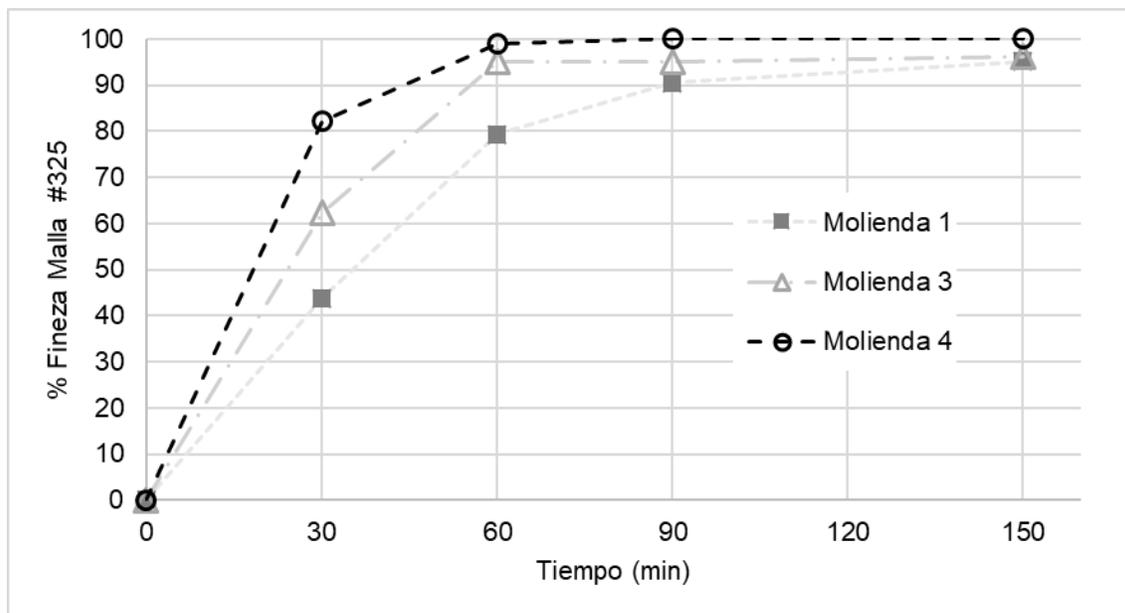


Fig.6.- 1 Finura por la malla # 325 de las moliendas 1, 3 y 4.

Debido a que la fineza no proporciono suficiente información para determinar cuál molienda es mejor, se determinó el área superficial de las cinco moliendas. Los resultados medidos de Blaine de las diferentes moliendas se muestran en las tablas 6. 8, 6.9 y 6.10, de acuerdo a las especificaciones de la ASTM C 204, se permite un coeficiente de variación de hasta un 3.4%, los resultados medidos cumplen con dicha especificación.

Tabla.6. 3. Determinación del área específica por el método Blaine de las moliendas 1 y 2.

Tiempo (min)	Molienda 1						Molienda 2					
	Individual			Blaine	D.E	C.V.	Individual			Blaine	D.E	C.V.
	(m <sup>2</sup> /kg)	(%)	(m <sup>2</sup> /kg)	(%)								
30	157	158	159	158	1.1	0.7	191	194	194	193	1.9	1.0
60	254	256	256	255	1.4	0.5	314	314	315	315	0.5	0.2
90	319	322	320	320	1.6	0.5	407	408	410	408	1.5	0.4
120	382	380	378	380	1.9	0.5	460	460	460	460	0.3	0.1
150	415	416	416	416	0.8	0.2	524	527	527	526	1.7	0.3

Tabla.6. 4. Determinación del área específica por el método Blaine de las moliendas 3 y 4.

Tiempo (min)	Molienda 3						Molienda 4					
	Individual			Blaine	D.E	C.V.	Individual			Blaine	D.E	C.V.
	(m <sup>2</sup> /kg)	(%)	(m <sup>2</sup> /kg)	(%)								
30	216	217	216	216	0.4	0.2	220	220	221	220	0.1	0.0
60	345	347	347	346	0.9	0.3	424	424	425	424	0.3	0.1
90	444	446	444	445	0.9	0.2	574	571	571	572	1.9	0.3
120	518	517	518	518	0.2	0.0	705	703	702	703	1.6	0.2
150	583	581	583	582	1.3	0.2	779	780	780	779	0.4	0.1

Tabla.6. 5 Determinación del área específica por el método Blaine de la Molienda 5.

Tiempo (min)	Molienda 5					
	Individual			Blaine	D.E	C.V.
	(m <sup>2</sup> /kg)	(%)				
30	201	201	202	201	0.3	0.1
60	414	415	414	414	0.9	0.2
90	477	469	476	474	4.7	1.0
120	653	655	654	654	1.0	0.2
150	768	769	770	769	1.0	0.1

La molienda 1, cuando se usó una carga de 65 kg bolas metálicas y una cantidad de material de 5 kilos de vidrio como arena, se obtiene un área específica máxima de 416 m<sup>2</sup>/kg. Cuando se disminuyó la cantidad de vidrio a 4 kg manteniendo la carga de 65 kg de bolas metálicas, en un tiempo de 150 min de molienda es posible alcanzar un área específica de 526 m<sup>2</sup>/kg. Con la molienda 3 es posible alcanzar un área específica de 582 m<sup>2</sup>/kg a los 150 min después de estar moliendo el vidrio. Las moliendas 4 y 5 desde de los 150 min es posible alcanzar un área específica de 779 m<sup>2</sup>/kg y 769 m<sup>2</sup>/kg, respectivamente.

Se puede observar en la fig.6.-5 la tendencia en las moliendas 1, 2 y 3, cuando se disminuye la cantidad de material para moler, se incrementa el área superficial hasta en un 40%. Entre la molienda 1 y 2, se tiene un incremento de solamente del 26% en el área específica a los 150 min y entre las moliendas 2 y 3, se tiene un incremento del 10%. Estos resultados nos indican que seguir disminuyendo la cantidad de material y seguir usando las bolas metálicas para moler el vidrio no es factible.

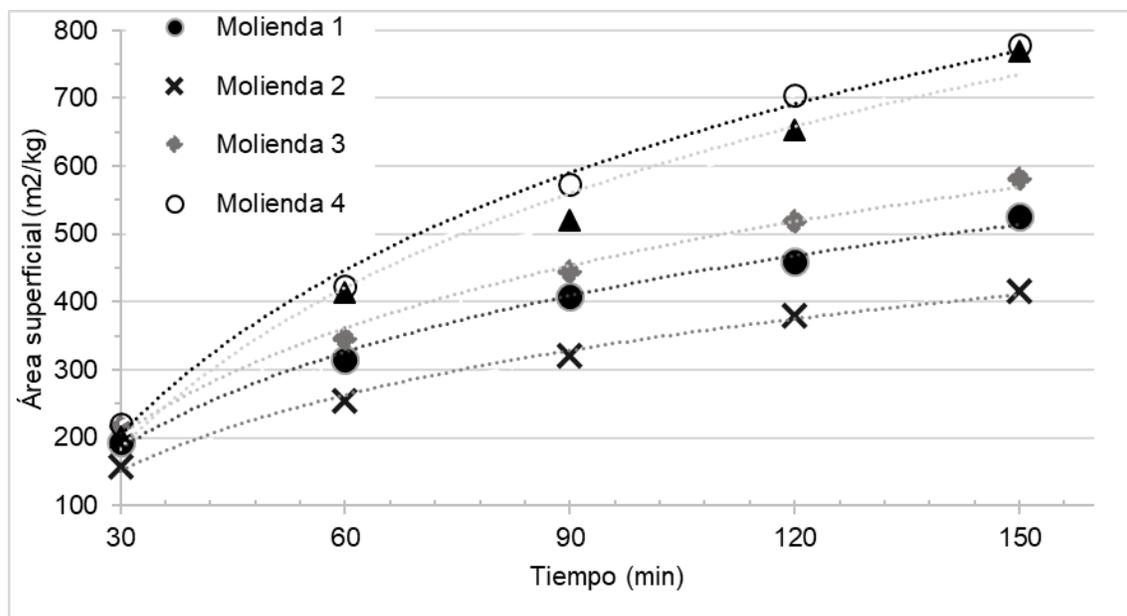


Fig.6.- 2 Determinación del área específica por el método de permeabilidad (Blaine ASTM C 204) para los tiempos de molienda de 150 min (2.5 horas).

Al analizar las moliendas 1 a 5, se puede determinar que la molienda 5 se obtiene el mejor desempeño de molienda, para buscar el mayor blaine posible para el polvo de vidrio usando el molino de vibro energía. Para evaluar la factibilidad de incrementar el tiempo a la molienda 5 hasta 14 horas, lo que se obtuvo que a las 3.5 horas (210 min) de molienda se tiene un blaine de 940 m<sup>2</sup>/kg, después de 14 horas (840 min) de molienda se obtuvo un blaine 1250

m<sup>2</sup>/kg. El área específica se incrementó en un 32%, y el tiempo de molienda se incrementó en un 400%, cual con el molino que se tiene de vibro energía y los cilindros de alamina, incrementar el tiempo más del 3.5 horas (210 min) no es factible. Los resultados se pueden observar en la fig.6.-6.

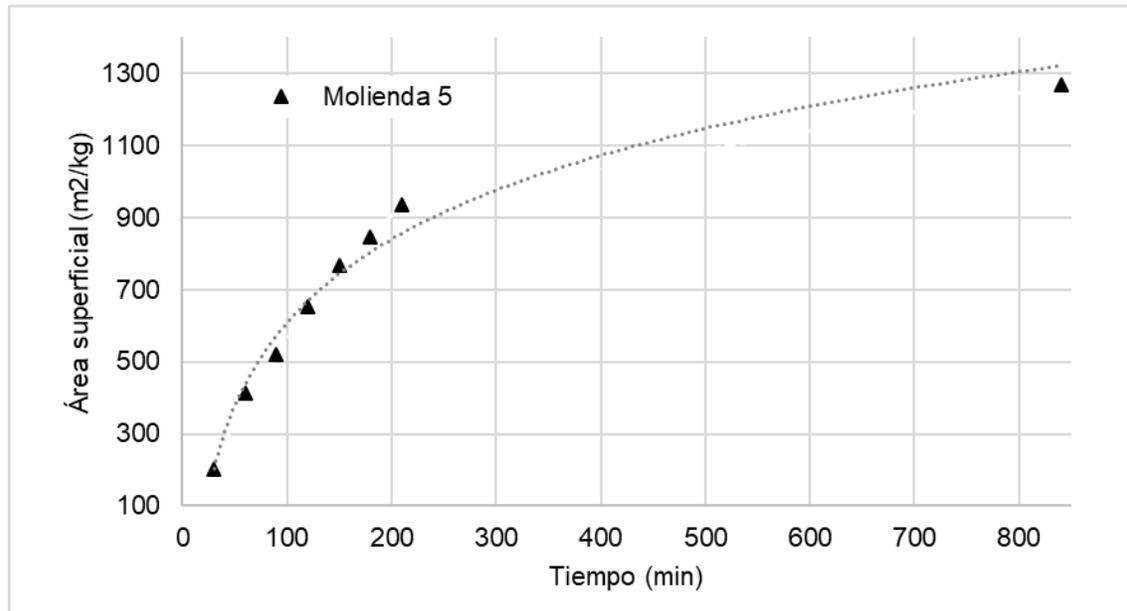


Fig.6.- 3 Evaluación de la factibilidad de incrementar el tiempo de la molienda hasta 14 horas para la molienda.

Con los resultados obtenidos de las 5 moliendas se determinó que para obtener el polvo de vidrio borosilicato 1 (P-B-V) se usó la “Molienda 2”, 4 kg de vidrio y 65 kg de bolas metálicas, por un periodo de tiempo de 80 min (1 hora y 20 min), para obtener un blaine de 380 m<sup>2</sup>/kg. La Molienda 5 con un tiempo de molienda de 3.5 horas se utilizó para obtener el polvo de vidrio de borosilicato 2 (PVB-2), el cual se usó para reemplazar la microsílíce.

Para evaluar la contribución del PVB-1, cuando fue usado para sustituir parcialmente parte de la arena caliza. Se realizó una sexta molienda (Molienda P.A.S), donde se molió arena estándar, la cual es comúnmente utilizada para evaluar la resistencia a compresión de del cemento. La finalidad de la Molienda P.A.S, fue determinar el tiempo que se necesita moler la arena estándar para obtener un área superficial similar a la del PVB-1, un blaine de 380 m<sup>2</sup>/kg. La Molienda P.A.S consistió en utilizar 3.5 kg de arena estándar (Arena de sílice) y 65 kg de bolas metálicas. Con los resultados que se muestran en la Tabla 6.11 y en la Fig.6.- 7, se determinó que se necesita un tiempo de 80 min, para obtener un blaine similar a la del PBV-2.

Tabla.6. 6. Determinación del Blaine de la Molienda P.A.S.

Tiempo (min)	Molienda P.A.S.					
	Individual			Blaine	D.E	C.V.
	(m <sup>2</sup> /kg)	(%)				
30	167	169	169	168	1.2	0.7
60	311	311	311	311	0.3	0.1
90	443	443	444	443	0.2	0.0
120	448	448	447	448	0.6	0.1

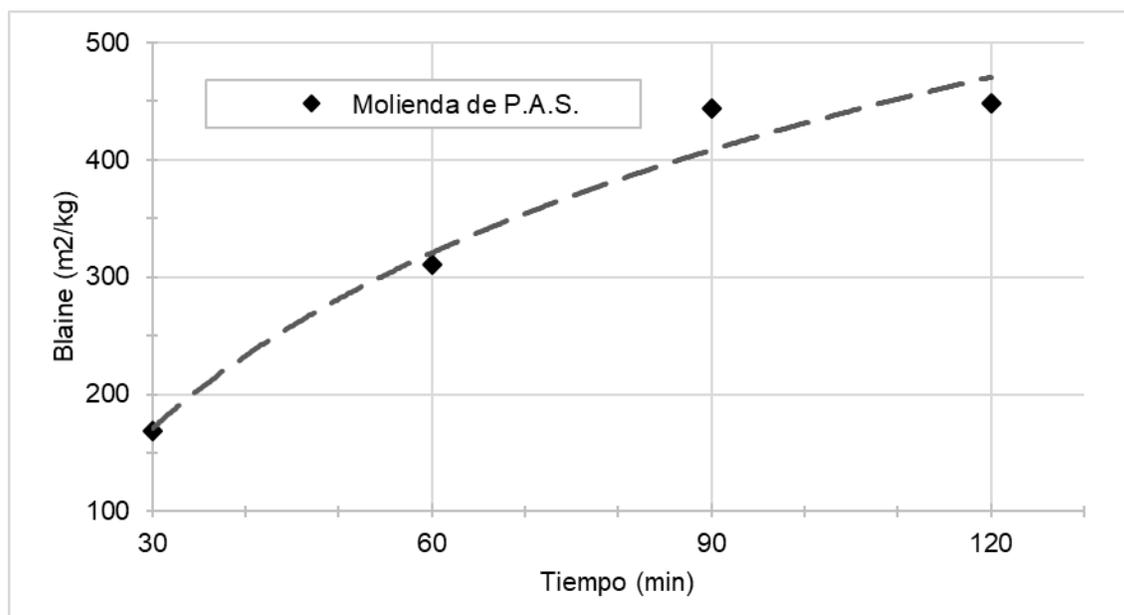


Fig.6.- 4 Evaluación de la Molienda de P.A.S. para obtener un Blaine de similar al del PBV-1 (380 m<sup>2</sup>/kg)

## 6.2. Caracterización de materiales Cementantes

### 6.2.1. Morfología de los tamaños de vidrio.

Los polvos de vidrio borosilicato PVB-1 y PVB-2 fueron observados a través de un Microscopio electrónico de barrido, donde se puede observar que el PVB-1 y PBV-2 tienen una forma angulosa. En la literatura se reporta que el vidrio al ser procesado para usarlo como cemento

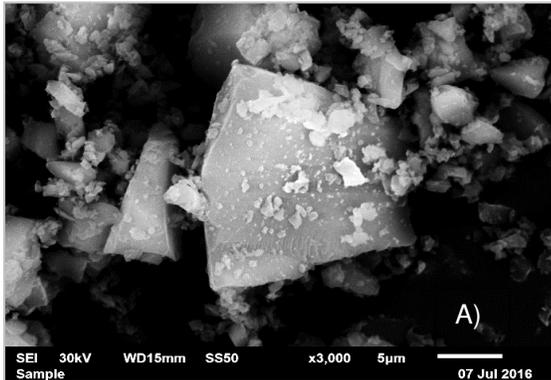


Fig.6.- 5 A) Polvo de vidrio de Borosilicato 1 (PVB-1) y B) Polvo de vidrio de Borosilicato 2.

### 6.2.2. Densidad

Las densidades de los diferentes polvos utilizados fueron determinadas por duplicado de acuerdo a la norma ASTM C 188-09, la cual especifica que el resultado obtenido de la prueba realizada por un solo operador a un mismo material, no debe ser mayor a  $\pm 0.03$ . En la tabla 6.1 se muestran los resultados obtenidos con su desviación (D.E.) y coeficiente de variación (%).

Tabla.6. 7 Densidades de los diferentes materiales cementantes.

Material	Medición 1 (g/cm <sup>3</sup> )	Medición 2 (g/cm <sup>3</sup> )	Promedio (g/cm <sup>3</sup> )	D.E. (g/cm <sup>3</sup> )	C.V. (g/cm <sup>3</sup> )
Cemento	3.17	3.19	3.18	0.018	0.556
PVB-1	2.26	2.3	2.28	0.028	1.241
PVB-2	2.27	2.29	2.28	0.014	0.620
Microsílice	2.19	2.21	2.20	0.014	0.643
P.A.S.	2.60	2.66	2.63	0.042	1.613

### 6.2.3. Distribución de tamaño de partículas

A los diferentes materiales cementantes (Cemento, PVB-1, PVB-2, Microsílice, P.A.S) se les determinó la distribución de tamaño de partícula mediante la difracción de rayo láser, donde se obtuvo que de tamaño promedio ( $d_{50}$ ) fueron: Cemento  $d_{50}=22.3 \mu\text{m}$ , PVB-1  $d_{50}=16.6 \mu\text{m}$ , PVB-2  $d_{50}=5.6 \mu\text{m}$ , Microsílice  $d_{50}=30.4 \mu\text{m}$ , P.A.S.  $d_{50}=10.2 \mu\text{m}$ . Los que se puede observar el cemento es más grueso en comparación con los demás polvos. La microsíllice por su  $d_{50}$  se puede observar que viene densificada comercialmente, ya que el  $d_{50}$  comúnmente reportado de este material es menor a  $1 \mu\text{m}$ . Si comparamos el  $d_{50}$  del PVB-1 es aproximadamente 3 veces mayor el  $d_{50}$  del PVB-2.

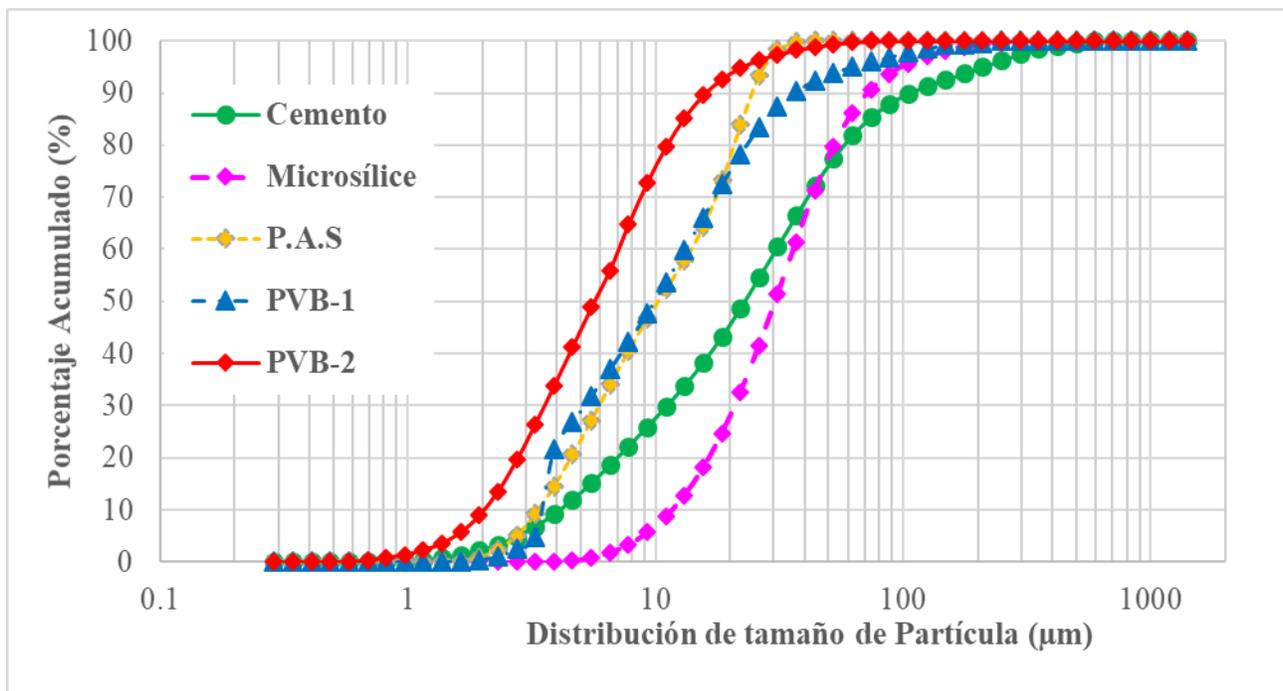


Fig.6.- 6 Distribución de tamaño de partícula de los materiales cementantes.

### 6.2.4. Área superficial específica

El área superficial de los materiales cementantes fue determinada usando el método de permeabilidad al aire blaine que es descrito en la norma ASTM C 204. El cemento se puede considerar como un cemento grueso debido a su área superficial. El área del PVB-1 es aproximadamente de  $380\text{m}^2/\text{kg}$  y la del PVB-2 es aproximadamente 2.5 veces mayor que la del PVB-1. El área de polvo de arena sílice es muy similar al área superficial del PVB-1.

Tabla.6. 8 Área específica de los diferentes materiales cementantes por el método de permeabilidad al aire "Blaine"

<b>Material</b>	<b>Blaine 1 (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Blaine 2 (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Blaine 3 (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>Blaine (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>D.E. (m<sup>2</sup>/kg)</b>	<b>C.V. (m<sup>2</sup>/kg)</b>
<b>Cemento</b>	310	308	309	309	0.97	0.3
<b>PVB-1</b>	377	384	375	379	4.56	1.2
<b>PVB-2</b>	930	935	940	935	4.90	0.5
<b>P.A.S.</b>	396	404	400	400	4.00	1.0

#### 6.2.5. Fases minerales

Por medio del análisis de DRX se obtuvieron los compuestos cristalinos en el cemento portland de manera cualitativa (Ver figura 41). Se observó en la gráfica la presencia de silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A), ferroaluminato tetracálcico (C4AF) y, yeso en sus fases hemihidrato (CaSO<sub>4</sub>·½H<sub>2</sub>O) y dihidrato (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O). Compuestos comunes de los cementos portland. Como se puede observar en la fig.6.7.

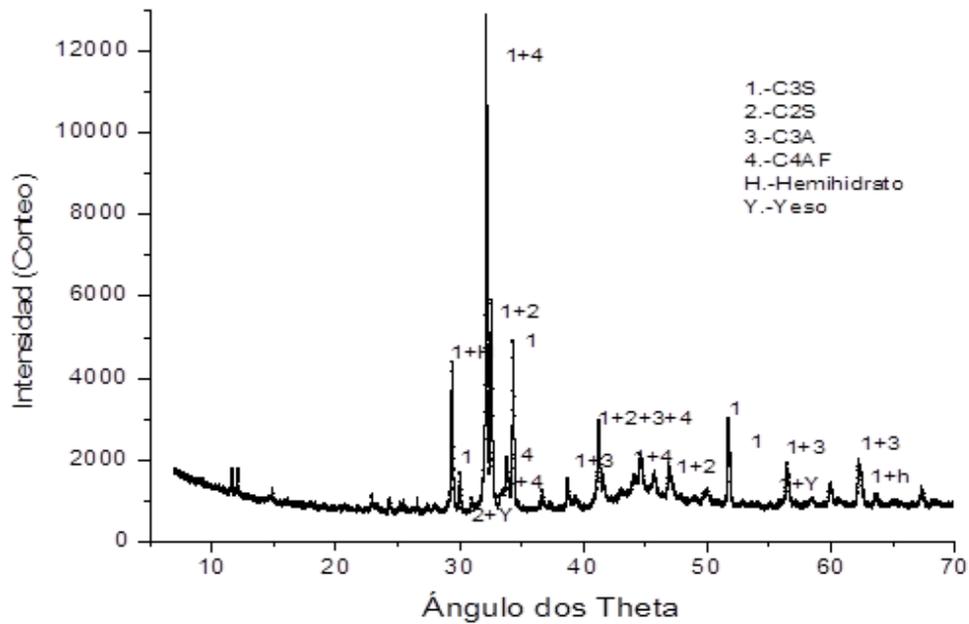


Fig.6.- 7 Análisis de Difracción de rayos X del Cemento.

A los materiales cementantes se les realizó el Análisis de difracción de rayos X, con la finalidad de demostrar que estos materiales su estructura es básicamente no cristalina o amorfa. Esto se demuestra en las Fig.6.-8 y Fig.6.-9, donde es claro que no se pueden observar picos definidos como en el Difractograma del cemento.

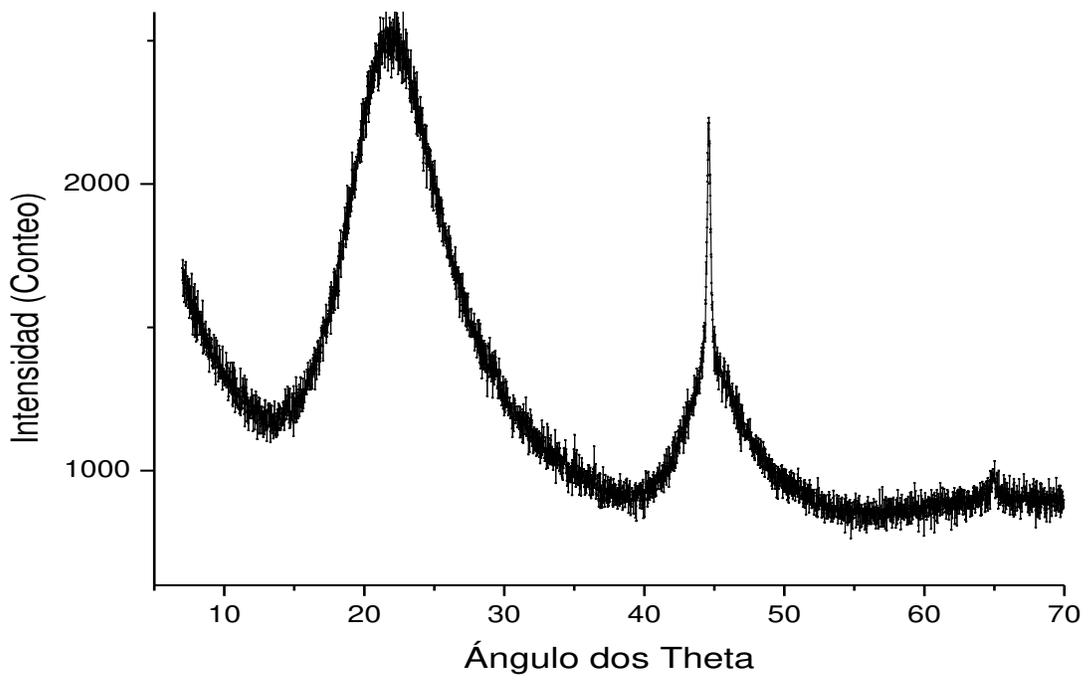


Fig.6.- 8 Análisis de Difracción de rayos X del Polvo de Vidrio de Borosilicato.

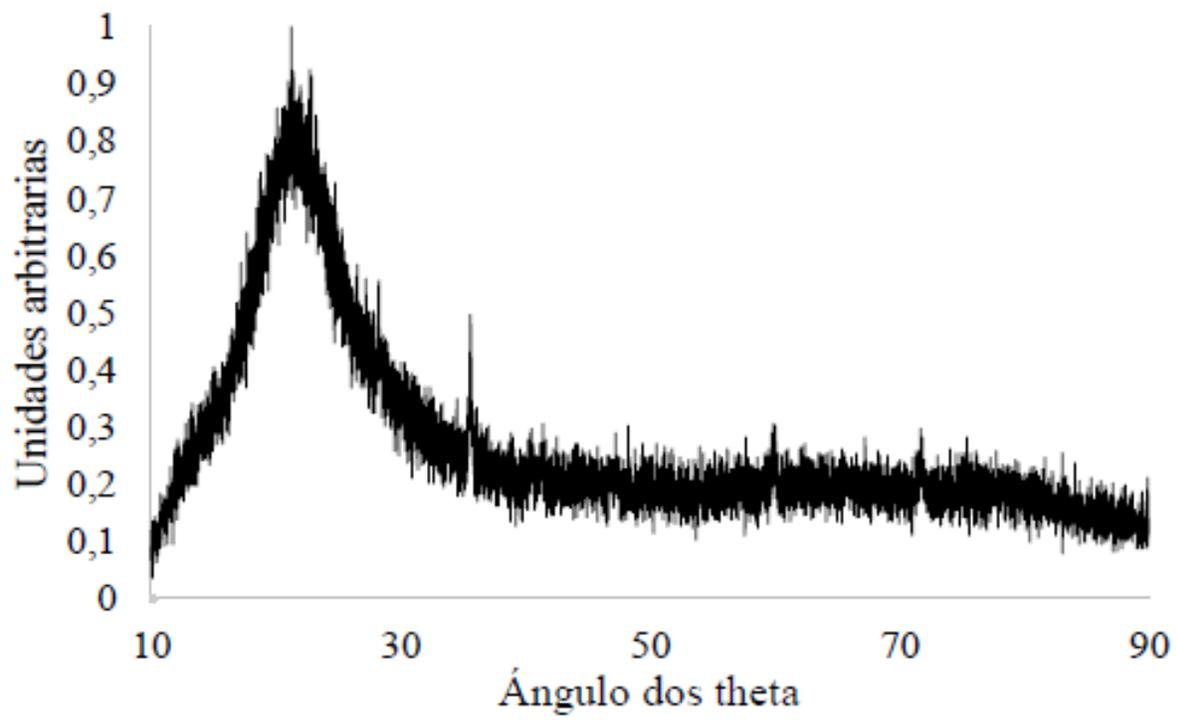


Fig.6.- 9 Análisis de Difracción de rayos X de la microsílíce.

### 6.2.6. Composición química

La composición química del Cemento, Microsílice y vidrio de borosilicato fue determinada usando la técnica de fluorescencia de rayos X, donde cabe mencionar que el cemento contiene 0.4% de álcalis equivalentes, la cantidad de álcalis en cementos petroleros está limitada a un 0.75%. La cantidad de óxido de magnesio (MgO) está limitada a un 6%, en la tabla 6.3 se puede observar que el cemento contiene un 1.4%. El contenido de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) de este cemento es de 3.4%, para un cemento de este tipo está limitada a un 3%.

La composición química de la microsíllice presenta un 95% de SiO<sub>2</sub> y una pérdida por ignición del 2.63%, de acuerdo a especificaciones descritas en la ASTM C 1240 para la microsíllice, debe contener mínimo un 85% de SiO<sub>2</sub> y una pérdida por ignición máxima del 6%.

El polvo de vidrio de borosilicato contiene un 78% de SiO<sub>2</sub>, un 11.5% de boro y 5.3% de álcalis equivalentes. Su pérdida por ignición corresponde a un 2.8%.

*Tabla.6. 9.-Composición química de los materiales cementantes y polvo de arena sílice*

Identificación	Cemento (%)	Microsílice (%)	Vidrio de Borosilicato (%)	Polvo de Arena de Sílice
<b>Dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>)</b>	16.2	95.0	78.0	99.1
<b>Óxido de Hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	5.3	0.1	0.0	0.8
<b>Óxido de Aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	3.3	0.8	2.2	-
<b>Óxido de Calcio (CaO)</b>	66.3	0.4	0.2	0.05
<b>Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>)</b>	0.3	-	-	0.01
<b>Trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>)</b>	3.4	-	-	-
<b>Óxido de Magnesio (MgO)</b>	1.4	0.4	0.0	-
<b>Óxido de manganeso (MnO)</b>	-	-	-	0.01
<b>Óxido de Boro (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	-	-	11.5	-
<b>Óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O)</b>	-	-	5.2	-
<b>Óxido de Potasio (K<sub>2</sub>O)</b>	0.5	0.8	0.2	0.04

Óxido de Zinc (ZnO)	0.04	-	0.0	-
Equivalente Álcalis (Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	0.4	0.5	5.3	-
perdida por Ignición (PPI)	3.0	2.63	2.8	-

6.3.

### 6.3. Caracterización del Agregado fino

#### 6.3.1. Densidad y Absorción de los agregados finos de caliza

Las densidades y absorción de los agregados (AF1, AF2 y AF3) se determinaron de acuerdo al procedimiento descrito en el método de ensayo en la ASTM C 128. Se especifica que, para dos ensayos realizados por duplicado de densidad superficialmente seca, debe cumplir con una desviación estándar menor a  $\pm 0.027$ . Para la prueba de absorción debe tener una desviación estándar menor a  $\pm 0.31$ . Se cumple con los criterios especificados en la norma ASTM C 128 para considerar como válidos los ensayos ejecutados de densidad y Absorción.

Tabla.6. 10 Densidades y Absorción de los Agregados: A.F.1., A.F.2. y A.F.3.

Agregado	Individual Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	D.E. (g/cm <sup>3</sup> )	Individual Absorción (%)	D.E. (%)
A.F.1.	2.58 2.61	2.59 0.018	2.0 1.8	1.9 0.14
A.F.2.	2.71 2.69	2.70 0.014	1.9 2.0	1.9 0.11
A.F.3.	2.58 2.61	2.59 0.020	1.8 2.0	1.90 0.14

#### 6.3.2. Granulometría

Se determinaron las granulometrías de los agregados: A.F.1., A.F.2. y A.F.3 de acuerdo a lo especificado en la norma ASTM C 33. El A.F.1 contiene un 19% de polvos que pasan la malla #100 (150  $\mu$ m), lo cual se puede decir que tiene un exceso de polvos ya que el límite máximo de polvos es del 10%. El agregado A.F.2. presenta una granulometría fuera de los límites establecidos para agregado un fino que pueda ser utilizado en concretos convencionales, como se observa en la tabla 6.-11 y en la Fig.6.-10. El agregado A.F.3, contiene un 99% de lo que pasa la malla # 16 (1180  $\mu$ m), lo cual sale del máximo permitido del 85%.

Tabla.6. 11 Granulometría de los Agregados A.F.1., A.F.2.y A.F.3.

Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	% que pasa		
	A.F.1	A.F.2	A.F.3
4750	100	100	100
2360	87	100	100
1180	57	100	99
600	36	69	51
300	26	50	21
150	19	37	0
75	16	30	0
<b>M.F.</b>	<b>3.26</b>	<b>1.44</b>	<b>2.27</b>

La norma ASTM C 33 especifica que el módulo de finura del agregado fino para concretos convencionales debe estar en un rango de 2.3 y 3.1, de acuerdo a esto, el agregado A.F.1. puede ser considerado una arena gruesa por que presenta un módulo de finura 3.26, esto se puede comprobar en la Fig.6.-10, en la mayor parte de la granulometría se encuentra pegada al límite inferior. El A.F.2. es considerado como una arena fina ya que presenta un módulo de finura de 1.44. El agregado A.F.3. tiene un módulo de finura de 2.27, se encuentra de los límites para ser considerado como una arena de finura normal.

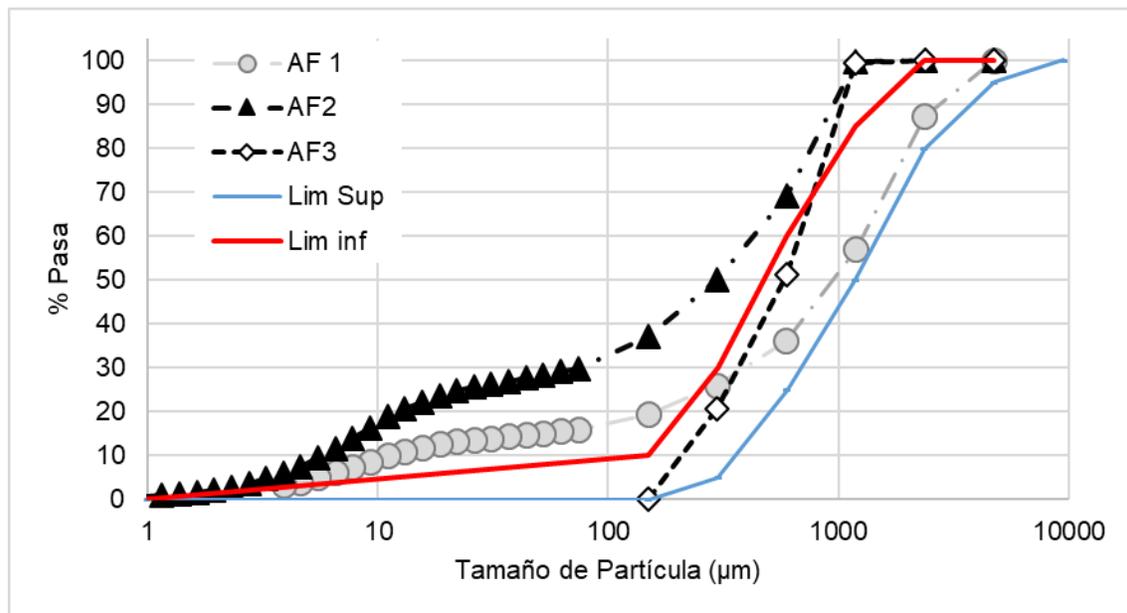


Fig.6.- 10 Granulometrías de los Agregados: AF1, AF2 y AF3.

## 6.4. Caracterización de la reacción puzolánica del vidrio de borosilicato

### 6.4.1. Índice de reactividad Puzolánica

Se determinó el índice de actividad puzolánica (I.A.P.) de la Microsílice, PVB-1 y PVB-2 de acuerdo a la ASTM C 1240. Para el mortero de Control se encontró la cantidad de agua necesaria para una fluidez de  $110\% \pm 5\%$ . Para los demás morteros se mantuvo constante la cantidad de agua, cuando se usó la microsíllice fue necesario agregar 0.56 gramos de S.P. para cumplir con dicha especificación. Sin embargo, al utilizar el PBV-1 y PVB-2, se obtuvo una fluidez del 130% y 122%, respectivamente, utilizando la misma cantidad de agua que el

mortero de Control. En la Tabla 6.12 se muestran las proporciones de los morteros y la fluidez obtenidas.

Tabla.6. 12 Proporción de los morteros usado para determinar el Índice de Actividad Puzolánica para la Microsílice, PVB-1 y PVB-2.

<b>Materiales</b>	<b>Control</b>	<b>Microsílice</b>	<b>PVB-1</b>	<b>PVB-2</b>
<b>Cemento (gr)</b>	500	500	500	500
<b>M.C.S. (gr)</b>	0	50	51.8	51.8
<b>A. Estándar (gr)</b>	1375	1375	1375	1375
<b>Agua (gr)</b>	242	241.7	242	242
<b>Aditivo (gr)</b>	0	0.56	0	0
<b>Fluidez (%)</b>	109	112	130	122

Los ensayos a la resistencia a compresión determinado de acuerdo a la ASTM C 109 de acuerdo a los resultados se cumple con el criterio de 8.7%, para considerar que el ensaye llevado a cabo adecuadamente. Se ensayaron 6 cubos ya que es la cantidad que nos solicita la ASTM C para determinar el índice de actividad Puzolánico (I.A.P.).

Tabla.6. 13 Determinación de la resistencia a compresión de acuerdo a la ASTM C 109.

ID	Individual						Prom (MPa)	Max (MPa)	Min (MPa)	D.E. (MPa)	C.V. (%)
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)					
Control	27.4	27.4	30.6	27.9	30.3	29.0	28.8	31.3	26.3	1.4	4.9
Microsílice	31.6	30.7	31.9	30.7	31.8	30.1	31.1	33.8	28.4	0.7	2.4
PVB-1	22.2	21.6	26.0	24.3	24.6	24.1	23.8	25.9	21.7	1.6	6.7
PVB-2	30.3	32.2	30.5	29.3	29.8	29.5	30.3	32.9	27.6	1.0	3.5

En base a los resultados de la tabla 6.13, se calculó el índice de actividad puzolánica para la microsíllice, PVB-1 y PVB-2, que fueron de 108%, 83% y 105%, respectivamente. De acuerdo a las especificaciones de la ASTM C 1240, la microsíllice debe tener al menos un I.A.P. del 105%, lo cual se cumple con dicho requisito. De acuerdo a la ASTM C 618, para que un material pueda ser considerado como una puzolana debe tener al menos un 75% de I.A.P. y una cantidad mínima de SiO<sub>2</sub> del 70%. El Polvo de vidrio de Borosilicato (PVB-1 y PBV-2) cumple con dichas especificaciones para ser considerado como una puzolana. Se tomaron

estas normas como referencia ya que hoy en día, no se tiene una norma específica para clasificar el vidrio para ser usado como material cementante suplementario en el Concreto.

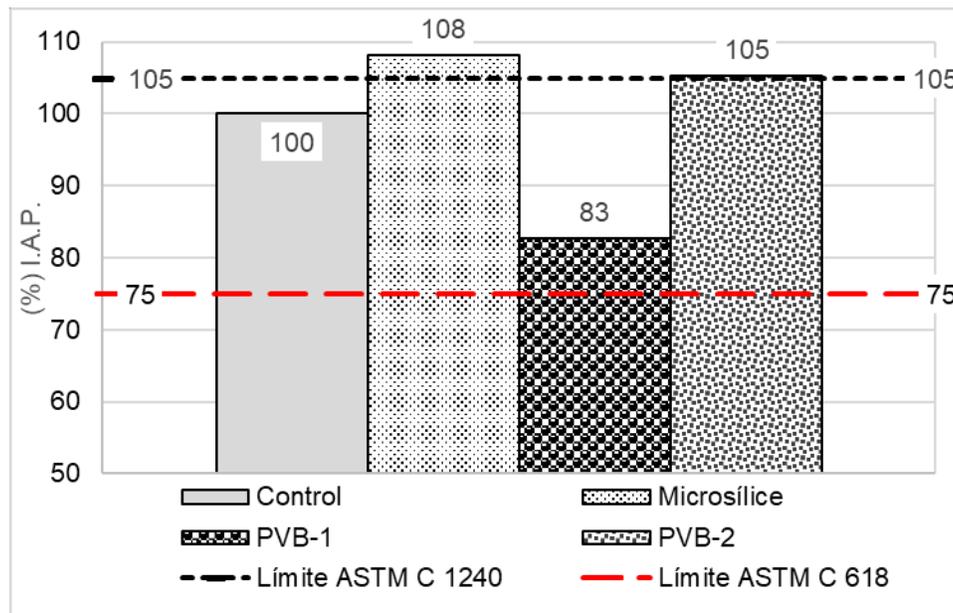


Fig.6.- 11 Índice de Actividad Puzolánica de la Microsilíce, PVB-1 y PVB-2.

#### 6.4.2. Consumo de Hidróxido de Calcio

Para determinar el consumo de hidróxido de calcio del polvo de vidrio de borosilicato como material cementante suplementario, se realizó el Análisis Termogravimétrico a las edades de 28, 56, 90 y 365 días. Donde se realizaron pastas de hidróxido de calcio grado reactivo con polvo de vidrio, con una relación calcio/Sílice  $> 1.5$ , para que se dé la reacción puzolánica. En la Fig. 6.-9, se muestra en TGA del PVB-1 a la edad de 28, días, donde se puede observar que la des composición de los diferentes hidratos (C-S-H, Etringita, Yeso, etc.) a la temperatura entre  $100^{\circ}\text{C}$  y  $200^{\circ}\text{C}$ , donde se puede observar que los picos característicos de estos hidratos son difíciles de diferenciar en el Análisis de TGA. La descomposición del Hidróxido de Calcio (CH), se dan entre  $341.9^{\circ}\text{C}$  y  $486.3^{\circ}\text{C}$ . También se logra apreciar la descomposición del carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  en el rango de temperatura entre  $550^{\circ}\text{C}$  y  $750^{\circ}$ , aunque también puede haber sido por que la muestra se pudo haber carbonatado al momento de la preparación cuando se detuvo la hidratación, que se recomienda hacerlo en una atmosfera libre de  $\text{CO}_2$ , los cual no se puedo realizar de esta manera. Sin embargo, para nuestro objetivo final es medir la cantidad de hidróxido de calcio no nos perjudica.

Para realizar en TGA a 28 días del PBV-1 se usó una masa de la muestra fue de 9.209 mg, la cantidad de agua ligada al hidróxido de calcio es de 0.995mg es la parte de color gris sombreada en la fig.6.-12 y la cantidad de muestra después de 1000°C fue de 6.13mg.

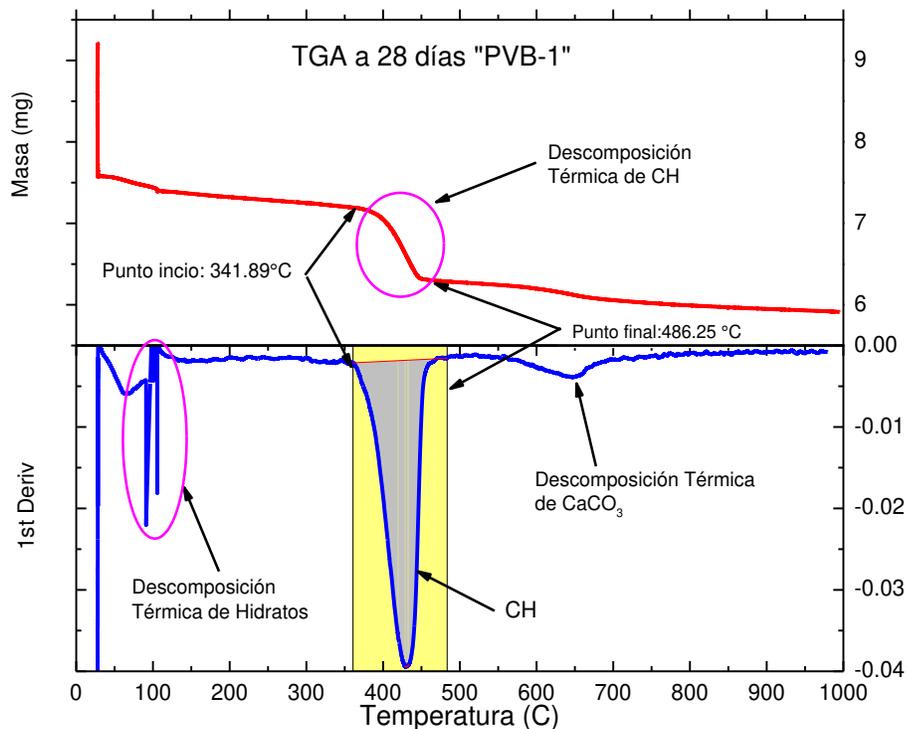


Fig.6.- 12 Análisis Termogravimétrico para evaluar la cantidad de CH consumida por el PVB-1 a la edad de 28 días.

Para el TGA a 28 días del PBV-2 se la masa de la muestra fue de 10.24 mg, en la fig.6.-10 se determinó la cantidad de agua ligada al hidróxido de calcio entre las temperaturas 379°C y 476°C fue de 0.66 mg, siendo el área sombreada de color gris, por lo que la cantidad de CH que contiene la muestra es de 2.72mg. La cantidad de agua ligada de la muestra fue de 5.85mg.

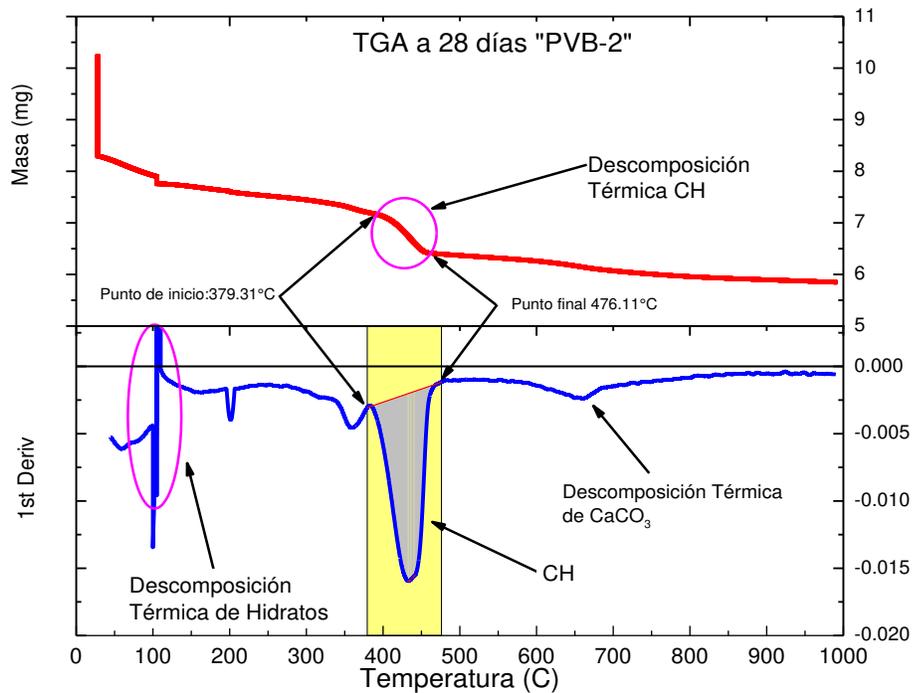


Fig.6.- 13 Análisis Termogravimétrico para evaluar la cantidad de CH consumida por el PVB-2 a la edad de 28 días.

Se realizó el TGA a la edad de 56 días a la pasta que contiene PBV-1 para determinar la cantidad de hidróxido de calcio. La masa de la muestra fue de 9.41mg, y la cantidad de agua ligada al hidróxido de calcio fue determinada en los puntos de inflexión entre las temperaturas de 367°.23 y 471.3°C, dando como resultado 0.70mg, siendo una cantidad de hidróxido de calcio de 2.88mg. La cantidad de agua ligada entre 105°C y 1000°C a los diferentes productos de hidratación fue de 1.37mg. La cantidad de muestra después de 1000°C fue de 5.01mg.

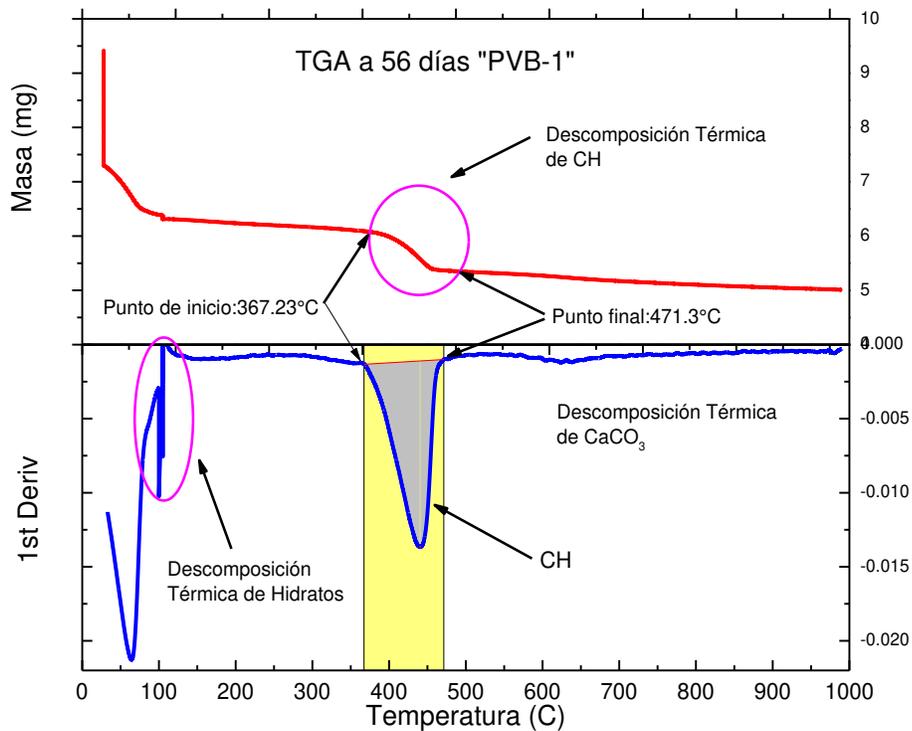


Fig.6.- 14 Análisis Termogravimétrico para evaluar la cantidad de CH consumida por el PVB-1 a la edad de 56 días.

Se usó una muestra con una masa de 9.79mg para realizar el TGA a 56 días del PBV-2, el cual se usó para determinar la cantidad de agua ligada al CH, entre las temperaturas de 377.6°C y 470.3 °C. El área sombreada de color gris que se muestra en la fig.6.-13 es la cantidad de agua ligada al CH de 0.53 mg, por lo que la una cantidad de CH en la muestra es 2.19mg y la cantidad de agua ligada entre 105°C y 1000° es de 1.34mg.

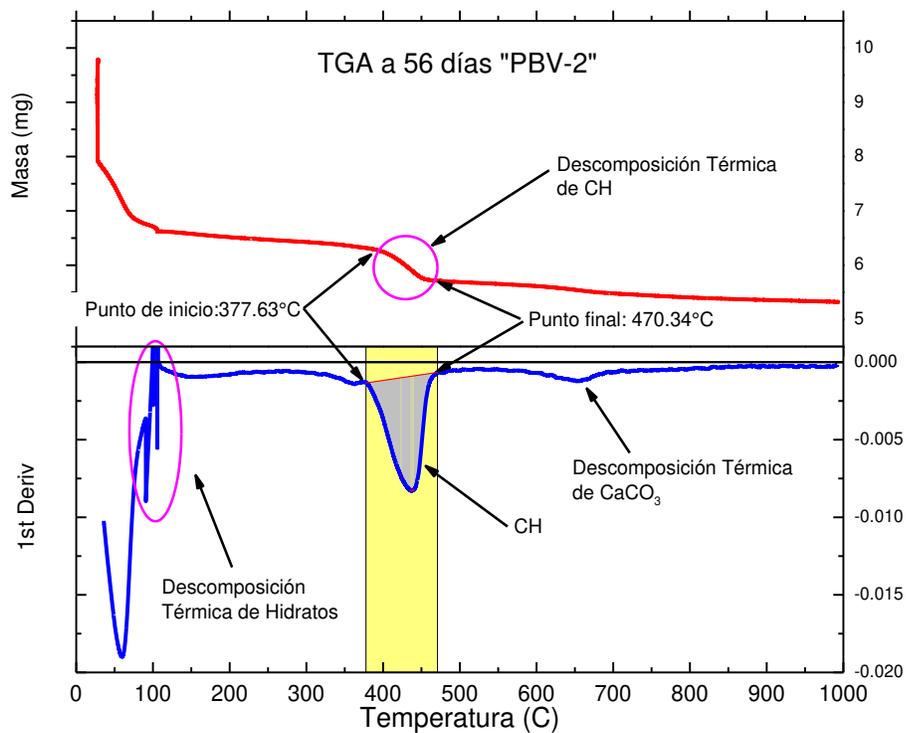


Fig.6.- 15 Análisis Termogravimétrico para evaluar la cantidad de CH consumida por el PVB-2 a la edad de 56 días.

Se usó una masa de 9.42mg de muestra de la pasta que contiene PBV-1 para realizar el TGA a 90 días. Se determinó la cantidad de agua ligada al CH entre las temperaturas de 380.9C y 488.1C, fue de 0.74, resultado una cantidad de CH en la muestra de 3.04 mg. La cantidad de muestra a los 1000°C de 5.55 mg.

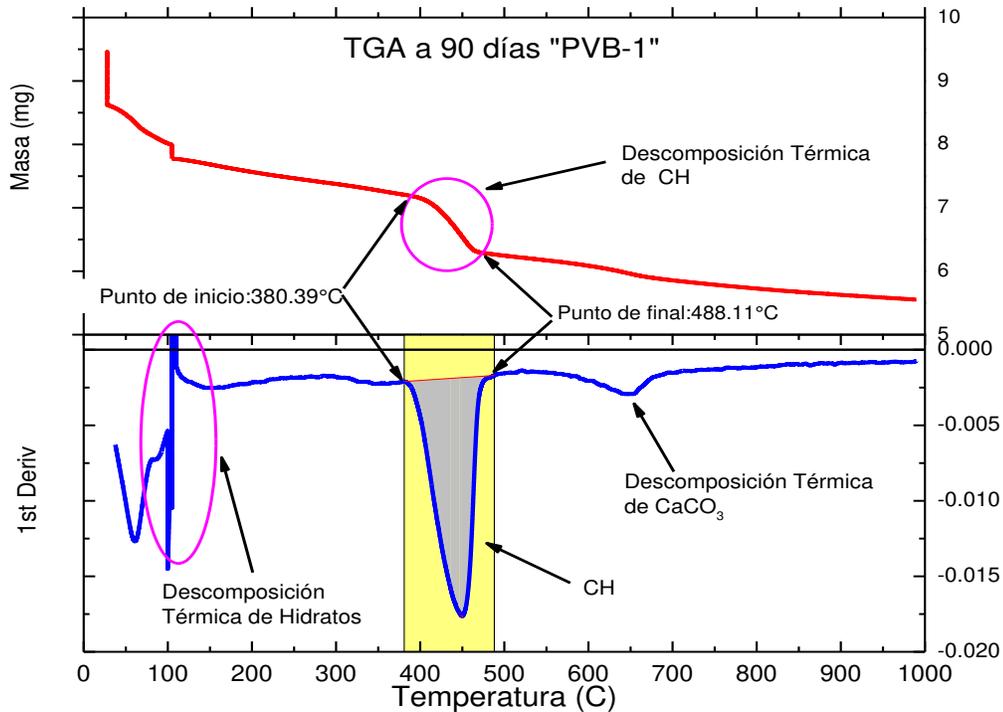


Fig.6.- 16 Análisis Termogravimétrico para evaluar la cantidad de CH consumida por el PVB-1 a la edad de 90 días.

La masa de la muestra fue 9.24 mg para llevar a cabo el TGA a la edad 90 días en la muestra que contiene el PVB-2. La cantidad de agua ligada al CH fue determinada entre las temperaturas 378.2°C y 475°C, donde como resultado 0.48 mg por lo tanto se tiene dentro de la muestra una cantidad de 2.47 mg de CH. La cantidad de agua ligada a los diferentes productos de hidratación se encuentra entre 105°C y 1000°C, es de 1.33 mg. El residuo de la muestra después de los 1000°C fue de 5.15mg.

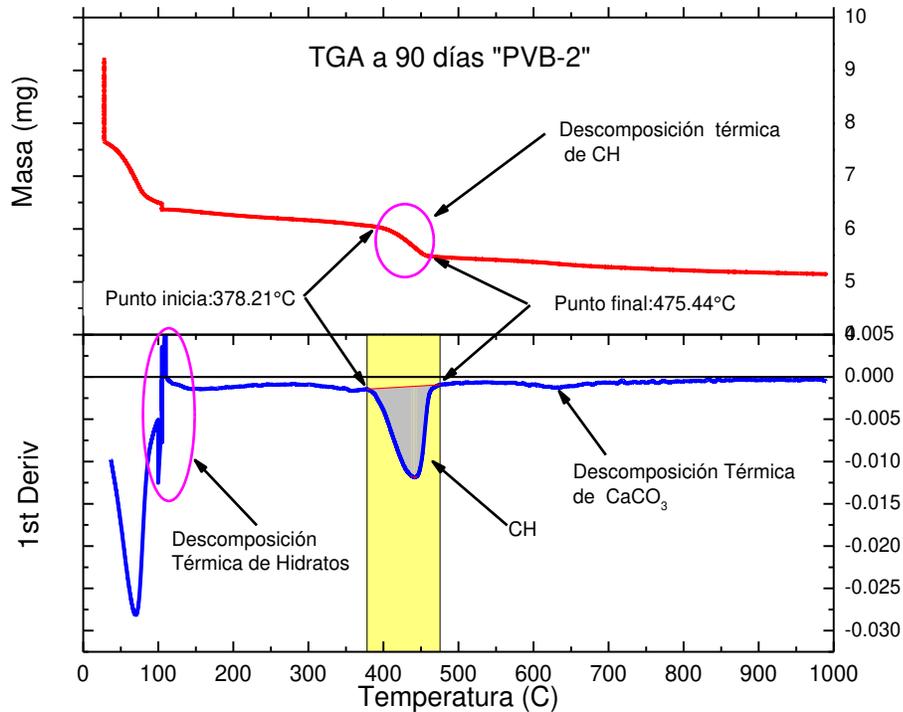


Fig.6.- 17 Análisis Termogravimétrico para evaluar la cantidad de CH consumida por el PVB-2 a la edad de 90 días.

La pasta con hidróxido de calcio y PBV-1, se mantuvo protegida dentro de un frasco de vidrio sellado herméticamente, con la finalidad que la muestra no perdiera humedad ni adquiriera humedad del medio ambiente. Después de 1 año, se realizó el TGA con una masa de muestra de 9.79mg. La cantidad de agua ligada al CH, se determinó entre las temperaturas 365.53°C y 501.9°C como se muestra en la fig.6.-16, donde el área sombreada de color gris es la cantidad de agua ligada el CH que es igual a 0.85mg, resultando la cantidad de CH de 3.51 mg. La cantidad de agua ligada en la muestra está en el rango de temperatura de 105°C a 1000°C, que es igual a 1.62mg y el residuo de la muestra después de los 1000°C fue de 7.00 mg.

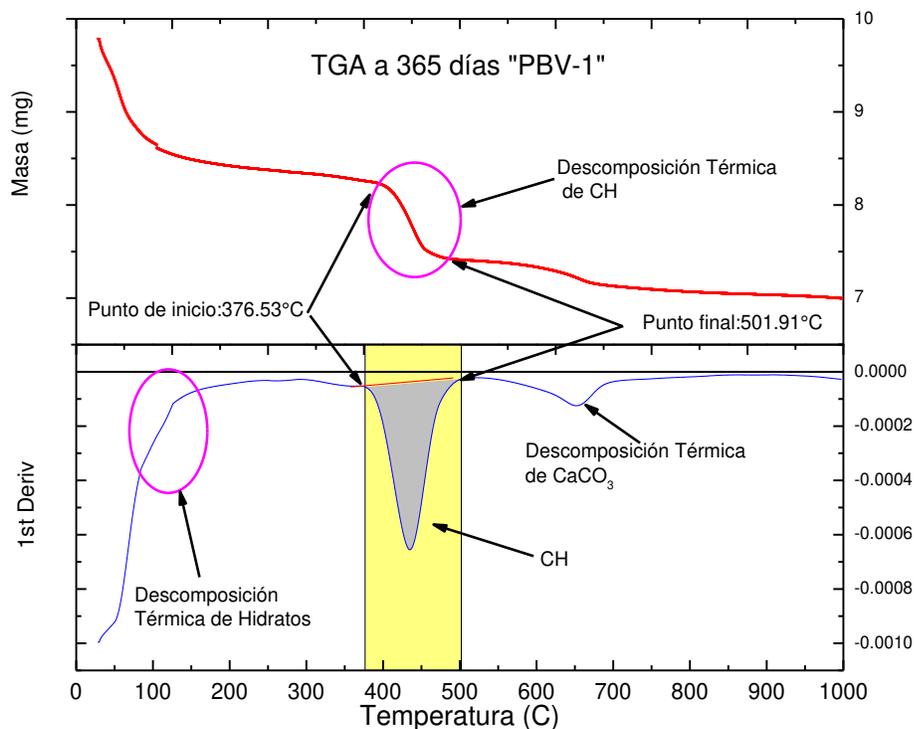


Fig.6.- 18 Análisis Termogravimétrico para evaluar la cantidad de CH consumida por el PVB-1 a la edad de 365 días.

También a la pasta que contiene hidróxido de calcio grado reactivo y PBV-2, se le realizó el TGA después de 1 año usando una masa de 10.19mg de la muestra. Se determinó la cantidad de agua ligada al CH entre las temperaturas 381.6°C y 488.3°C, como se muestra en la fig.6.-16, el área sombreada de color gris la cantidad de agua ligada al CH, es de 0.60mg y por lo tanto en la muestra se tiene 2.47mg de CH. La cantidad de agua ligada a los productos de hidratación fue de 1.64mg y el residuo de la muestra después de los 1000°C es de 6.75mg.

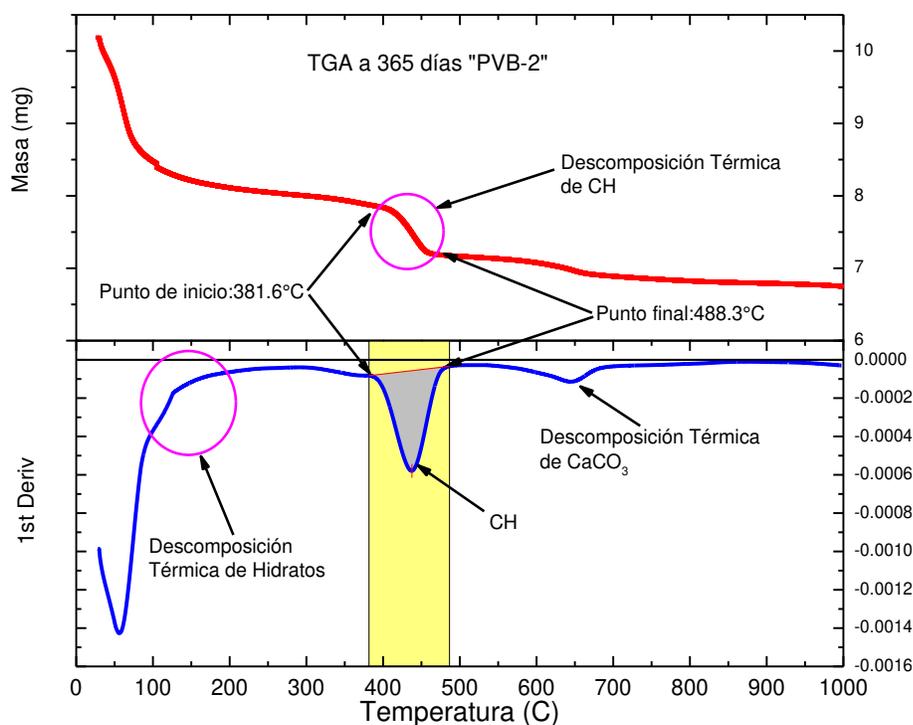


Fig.6.- 19 Análisis Termogravimétrico para evaluar la cantidad de CH consumida por el PVB-2 a la edad de 365 días.

En la tabla.6.-14 se muestran los resultados de los TGA de las pastas con hidróxido de calcio y polvo de vidrio de borosilicato (PVB-1 y PBV-2) que se usaron para evaluar el consumo de hidróxido de calcio de los PVB-1 y PVB-2 a las edades de 28, 56, 90 y 365 días.

Tabla.6. 14 Evaluación del Consumo de hidróxido de calcio del PVB-1 y PVB-2 a las edades de 28, 56, 90 y 365 días.

Edad (días)	PVB-1				PVB-2			
	28	56	90	365	28	56	90	365
H2O de CH (mg)	1.00	0.70	0.74	0.85	0.66	0.53	0.48	0.60
CH (gr)	4.10	2.88	3.04	3.51	2.72	2.19	1.98	2.47
Cantidad a 1000°C (mg)	6.13	5.01	5.55	7.00	5.85	5.32	5.15	6.75
Vidrio pasta (mg)	2.56	2.10	2.32	2.93	2.45	2.23	2.15	2.82
CH pasta (mg)	4.79	3.91	4.34	5.47	4.57	4.16	4.02	5.27
CH, consumido (gr/gr)	0.27	0.50	0.56	0.67	0.75	0.88	0.95	0.99

El PVB-1 a la edad de 28 días consume 0.27 gr de CH, para las edades de 56 días, 90 días y 365 días el consumo de CH se incrementó en 85%, 107% y 148%, respectivamente. Como se muestra en la fig.6.-17, el consumo del PVB-1 se incrementó en un 20% de la edad de 90 días a la edad de 365 días. El PVB-2 consume 0.75 gr de CH a la edad de 28 días, el

consumo de CH para las edades de 56 días, 90 días y 365 días se incrementó 17%, 27% y 32%, respectivamente. Lo interesante es que el consumo de CH de 90 días a 365 días tuvo incremento del 5%, lo cual significa que, a la edad de 90 días el PVB-2 lo máximo que alcanza a consumir es 0.95 gr de CH. A lo que es atribuido que al incrementar el Blaine de las partículas de vidrio como consecuencia se incrementó la reactividad puzolánica del PVB-2.

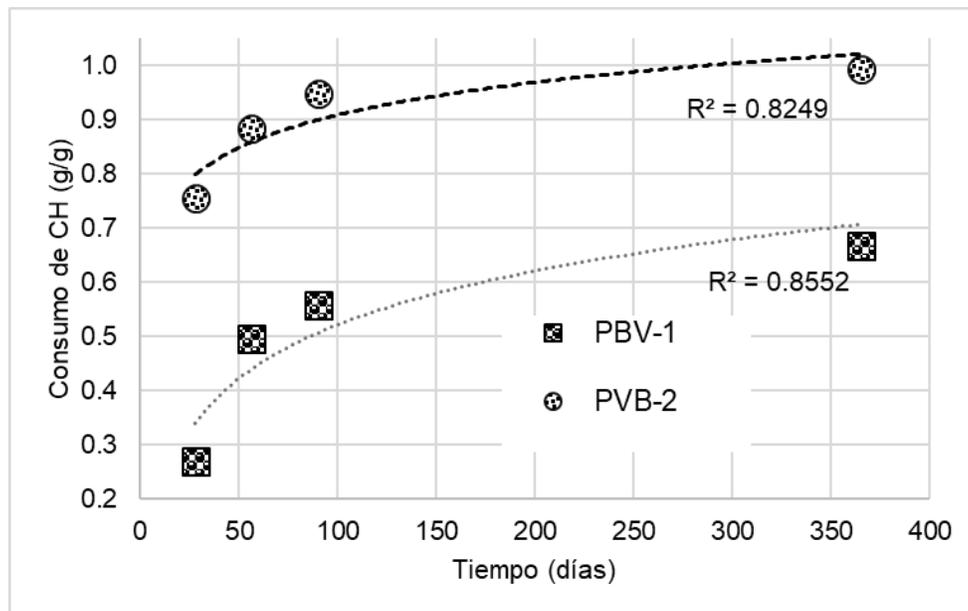


Fig.6.- 20 Evaluación del Consumo de Hidróxido de calcio del Polvo de vidrio de Borosilicato.

El consumo de hidróxido de calcio (CH) por gramo de los dos polvos de vidrio PVB-1 y PVB-2 se muestran en la fig.6-17. El PVB-1 a los 28 días consume 0.27 gramos de CH y el PVB-2 consume 0.75 gramos de CH, lo que resulta que el PVB-2 consume 2.8 veces más CH que el PVB-1. El consume de CH del PVB-2 a las edades de 56, 90 y 365 días es de 1.8, 1.7 y 1.5, veces más que el PVB-1, respectivamente. Los cual nos indica que al incrementar el área específica del polvo de vidrio borosilicato de 380 m<sup>2</sup>/kg a 940 m<sup>2</sup>/kg, se aumentó a 2.5 veces el área específica del polvo de vidrio borosilicato, por lo que se incrementó 1.5 veces el consumo de CH del PVB-2 respecto al PVB-1. Los cual concuerda con la literatura, lo que han reportado que el polvo de vidrio sódico cálcico que al incrementar el área específica de las partículas de polvo de vidrio se incrementa su reactividad puzolánica. [ref]

En las investigaciones que se ha realizado han sido básicamente de vidrio sódico cálcico, las cuales han evaluado el consumo de CH varía dependiendo del tipo de vidrio, de su composición química o color. Han reportado que el vidrio sódico calcio consume 0.20 g de

CH, otros autores han indicado que el vidrio sódico cálcico consume 5 veces menos CH que la microsílíce.

La microsílíce que se usó para esta investigación su consumo de CH fue evaluado en otra tesis anterior, donde se calculó que consume 1.7 g de CH. Por lo tanto, los PVB-1 y PVB-2, consumen un 33% y un 56%, respectivamente. Con esto podemos ver que la microsílíce es mucho más eficiente como material cementante suplementario.

#### 6.4.3. Contracción química del Polvo de vidrio de Borosilicato

La contracción química del polvo de vidrio de borosilicato fue medida hasta los 28 días, los resultados medidos se muestran en la fig.6.-18. El PVB-1 tiene una contracción química de 11.32 ml/100 g de cementante y el PVB-2 tiene una contracción química de 27.35 ml/100 g de cementante. Lo que se puede observar es los resultados obtenidos es que al incrementar el blaine del polvo de vidrio de borosilicato se incrementó su contracción química 2.4 veces más. Los cual es un indicador que reaccionado con el CH grado reactivo y formando productos de hidratación, silicatos de calcio hidratados (C-S-H). La contracción química de la microsílíce utilizada es de 19.67 ml/ 100 g de cementante, siendo mayor que la del PVB-1 y siendo menor que la PVB-2.

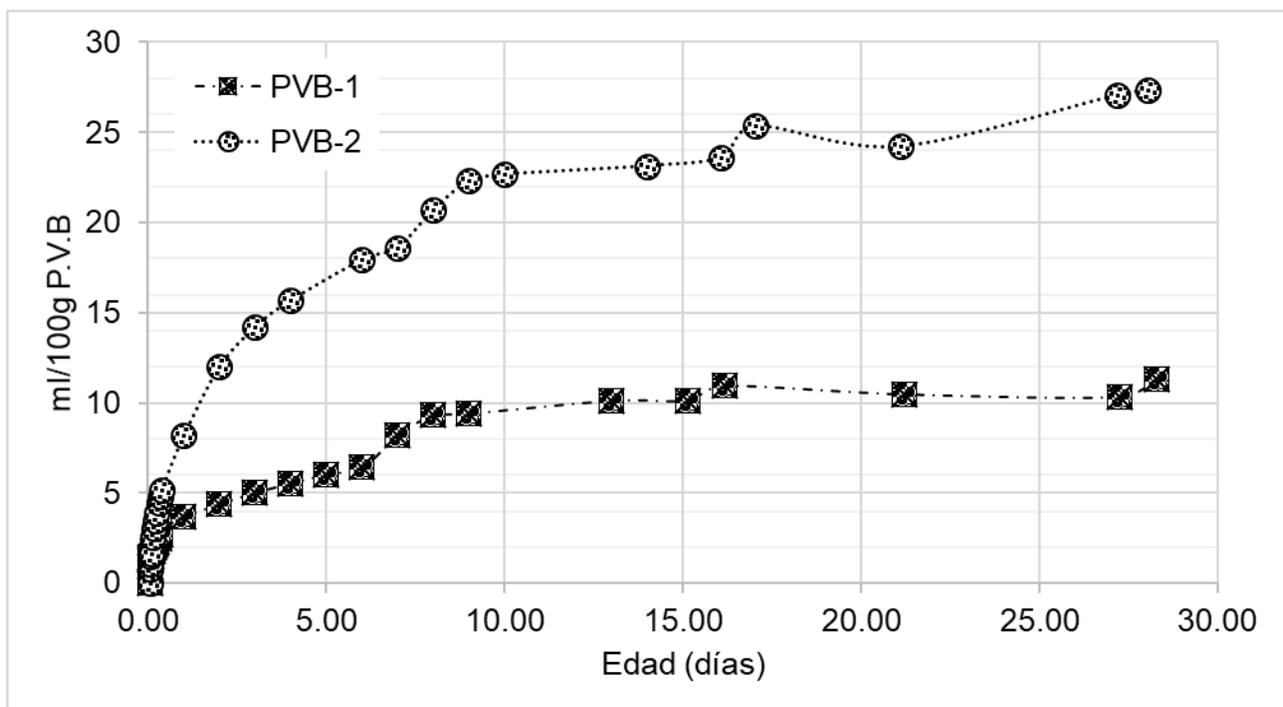


Fig.6.- 21 Contracción Química del Vidrio de Borosilicato PVB-1 y PVB-2 hasta los 28 días.

La contracción química del polvo de vidrio de borosilicato, PBV-1 y PVB-2 fue medida hasta los 28 días. En la tabla.6.- se muestra el análisis estadístico de la prueba de contracción química que se realizó a los resultados obtenidos a la edad de 28 días. La contracción química del polvo de vidrio de borosilicato puede variar hasta en un 10%, con respecto a su promedio.

Tabla.6. 15 Análisis estadístico de la contracción química del Polvo de vidrio de Borosilicato PVB-1 y PVB-2.

<b>ID</b>	<b>Promedio (ml/100g cementante)</b>	<b>D.E (ml/100g cementante)</b>	<b>C.V. %</b>
PBV-1	11.32	1.11	9.8
PBV-2	27.35	2.5	9.1

### 6.5. Desarrollo de Concretos de ultra alto desempeño utilizando 3 granulometrías

Los CUAD se caracterizan por tener altos consumos de cemento, que se encuentran en un rango de 800 kg a 1200 kg de cemento por metro cubico, el consumo de cemento utilizado en esta investigación se fijó de acuerdo a investigaciones pasadas al igual que la cantidad de microsílíce, donde se encontró que el 8% de microsílíce respecto al consumo de cemento es la cantidad mínima que se necesita para consumir totalmente el hidróxido de calcio, que se produce en la mayoría de los cementos comerciales comúnmente utilizados en la industria de la construcción.

Las proporciones de las mezclas M-1, M-2, M-3 y M-4, se muestran en la Fig.66.-22, la diferencia entre estas 4 mezclas es el tamaño máximo del agregado utilizado. Las cantidades de materiales utilizados fueron: cemento 800 kg/m<sup>3</sup> y microsílíce 64 kg/m<sup>3</sup>. La relación a/c utilizada fue de 0.25 en masa, La cantidad de agua fue corregida quitándole la cantidad de agua que tiene el SP debido que el SP tiene un contenido de solidos de 54.3% La cantidad de aditivo se ajustó para obtener una fluidez objetivo de 320 mm± 20mm.

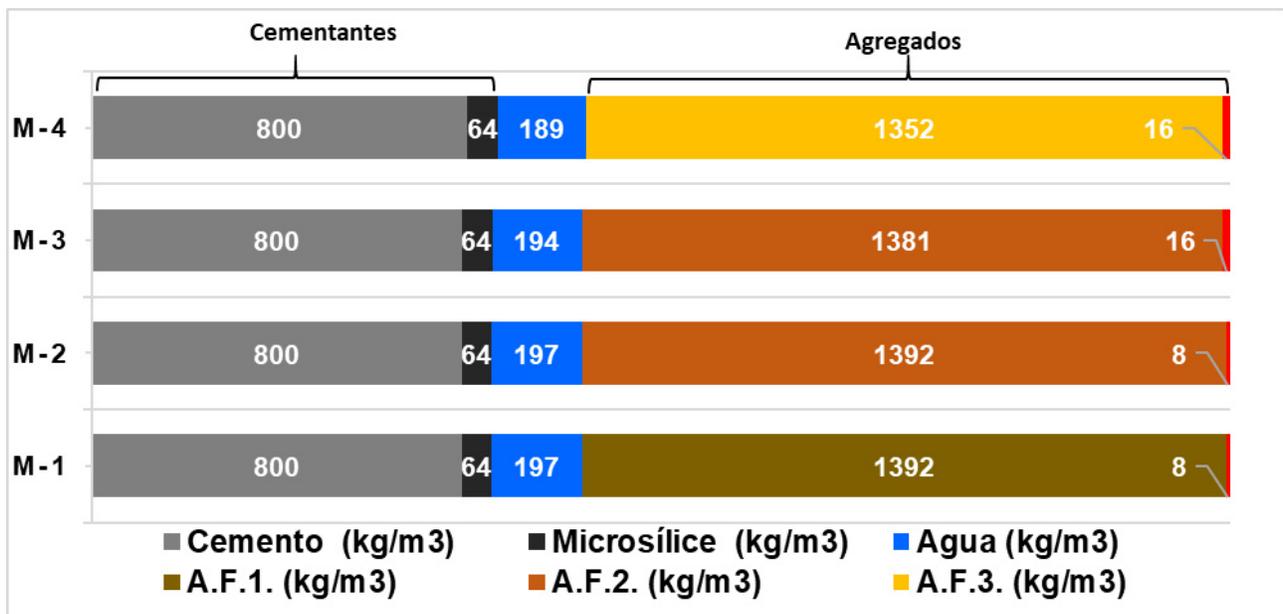


Fig.6.- 22 Proporciones de las Mezclas M-1, M-2, M-3 y M-4, kg/m<sup>3</sup>.

A las mezclas se les determinó masa unitaria (M.U.), Contenido de Aire y fluidez, con los resultados se puede observar que la mezcla-1 (M-1) tuvo un ligero incremento en su M.U. y siendo la que presentó menor contenido de aire. Las mezclas M2 y M3 son básicamente la misma mezcla, se usó el agregado A.F.2. la diferencia es el contenido de SP, que la mezcla M-2 con 8 kg/m<sup>3</sup> (7.1 L/m<sup>3</sup>) de SP no se tuvo fluidez, para dar la fluidez objetivo de 32 cm se usaron 16 kg/m<sup>3</sup> (14.2 L/m<sup>3</sup>). Las mezclas M-3 y M-4 se necesitó la misma cantidad de SP para darle a mezcla 32 cm de fluidez. Al agregado usar el A.F.2. por el exceso de finos demandó mayor SP al igual cuando se usó el agregado A.F.3 que no tiene polvos o finos que pasan la malla #100.

Tabla.6. 16 Determinación de las propiedades en estado fresco como Masa Unitaria (M.U.) Contenido de Aire (Aire) y Fluidez de las mezclas M-1, M-2, M-3 y M-4.

ID	M.U. (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido Aire (%)	Fluidez (cm)
M-1	2437	0.9	32
M-2	2393	2.8	No
M-3	2395	2.5	32
M-4	2394	1.1	32

Las mezclas M-1, M-2, M-3 y M-4, se les determinó la resistencia a compresión a las edades de 3, 7, 28 y 90 días, en la Fig.6.-23 se muestran los resultados. La mezclas M-1, M-2 y M-3 tuvieron un incremento aproximadamente del 10% en resistencia a la compresion de 28 días a 90 días, se puede observar que estas mezclas tienen el mismo nivel de resistencia a la compresión. En la literatura de CUAD comunmente recomiendan disminuir el tamaño maximo del agregado con la finalidad de incrementar la resistencia a compresión, en los resultados obtenidos de M-1, M-2, M-3 y M-4, no se tuvo un incremento significativo al llevar a cabo esta recomendación.

La M-4 tuvo una resistencia a compresión de un 20% menor respecto al promedio de las M-1, M-2 y M-3, a esto se le atribuir a la falta de finos o polvos. Es sabido que el polvo de caliza es material muy bueno como efecto filler, funcionando como puntos de nucleación, ayudando en la hidratacion del cemento, como lo mencionan varios investigadores entre ellos Barbara Lothenbach.

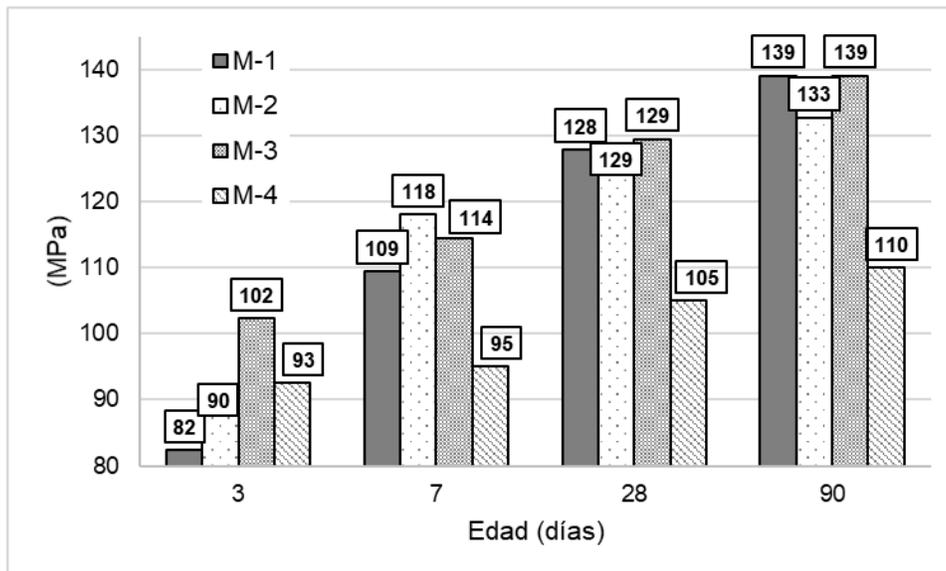


Fig.6.- 23 Evaluación de la resistencia a la compresión de las mezclas M-1, M-2, M-3 y M4.

## 6.6. Desarrollo de Concretos de ultra alto desempeño utilizando polvo de vidrio borosilicato PVB-1 como componente granular.

Debido a que, al disminuir el tamaño máximo del agregado fino, no se pueden obtener la ultra alta resistencia ( $>150$  MPa), se decidió optimizar las mezclas mejorando el empaquetamiento del agregado fino empaquetándolo con un material más fino, usando PVB-1. El programa Rene LCPC está basado en el Modelo de Empaquetamiento Compresible (MEC) diseñado por el Sedran and de Larrard. El principio de este modelo supone que se acomodan partícula por partícula de los componentes granulares hasta encontrar las proporciones que generan la menor cantidad de vacíos entre ellas, a esto es llamada Densidad de empaquetamiento ( $\Phi$ ). La porosidad ( $\epsilon$ ) es  $1-\Phi$ , es básicamente la cantidad de vacíos entre las partículas de los materiales que se estén usando para construir la curva de empaquetamiento.

En la Fig.6- 24 se muestra las curvas de densidad de empaquetamiento ( $\Phi$ ) y la porosidad ( $\epsilon$ ) de que resultan de la combinación del A.F.1. y el PVB-1; se determinó que el mejor empaquetamiento es cuando se tiene el 85% del A.F.1. y el 15% del PVB-1 en masa. Estas proporciones dan como resultado una densidad de empaquetamiento ( $\Phi$ )= 0.69 y una porosidad de ( $\epsilon$ )=0.31.

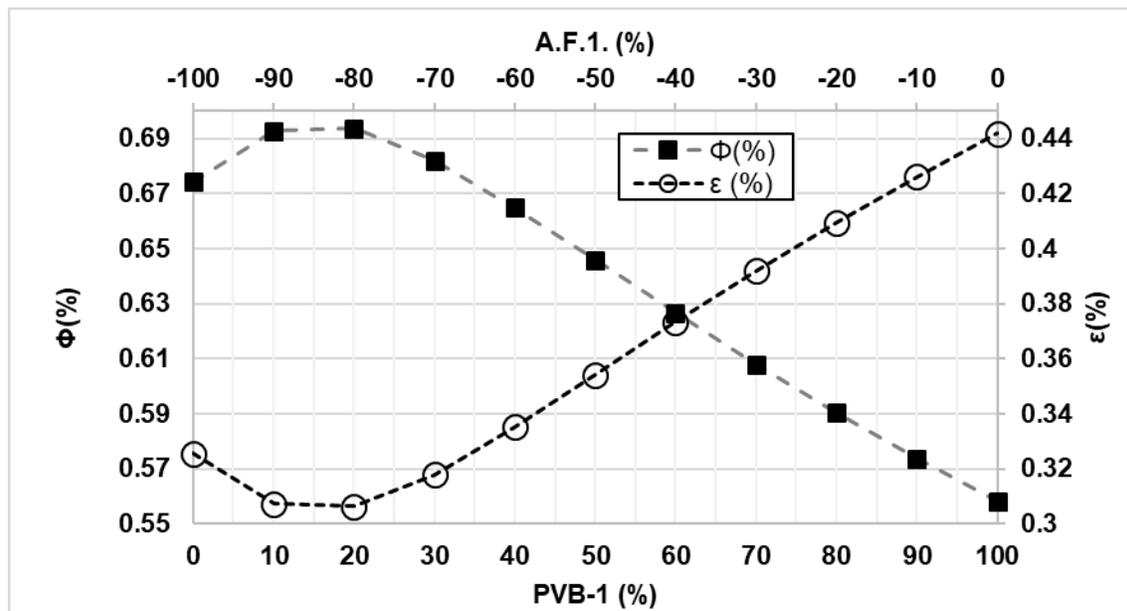


Fig.6.- 24 Curva de Densidad de empaquetamiento del A.F.1. y el PVB-1.

Las curvas de densidad de empaquetamiento ( $\Phi$ ) y porosidad ( $\epsilon$ ) obtenidas al optimizar a A.F.2. y el PVB-1 se muestran en la Fig.6.-25; se determinó que el máximo empaquetamiento ( $\Phi$ )= 0.63 y una porosidad ( $\epsilon$ )=0.37 cuando se usa el 55%A.F.2. y 45% del PVB-1 en masa.

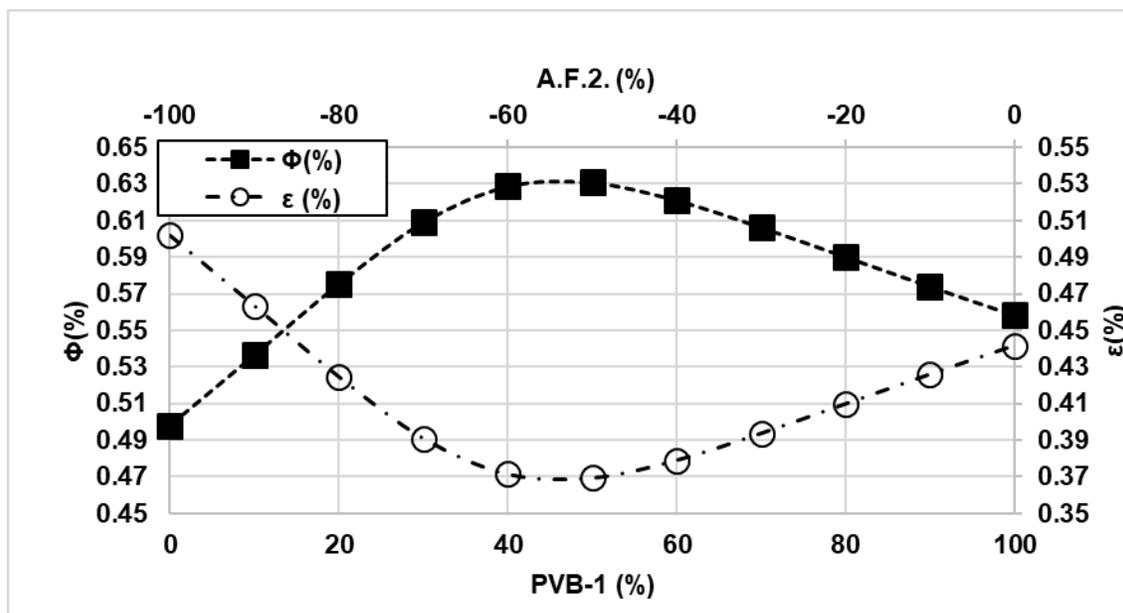


Fig.6.- 25 Curva de la Densidad de empaquetamiento del A.F.2. y el PVB-1.

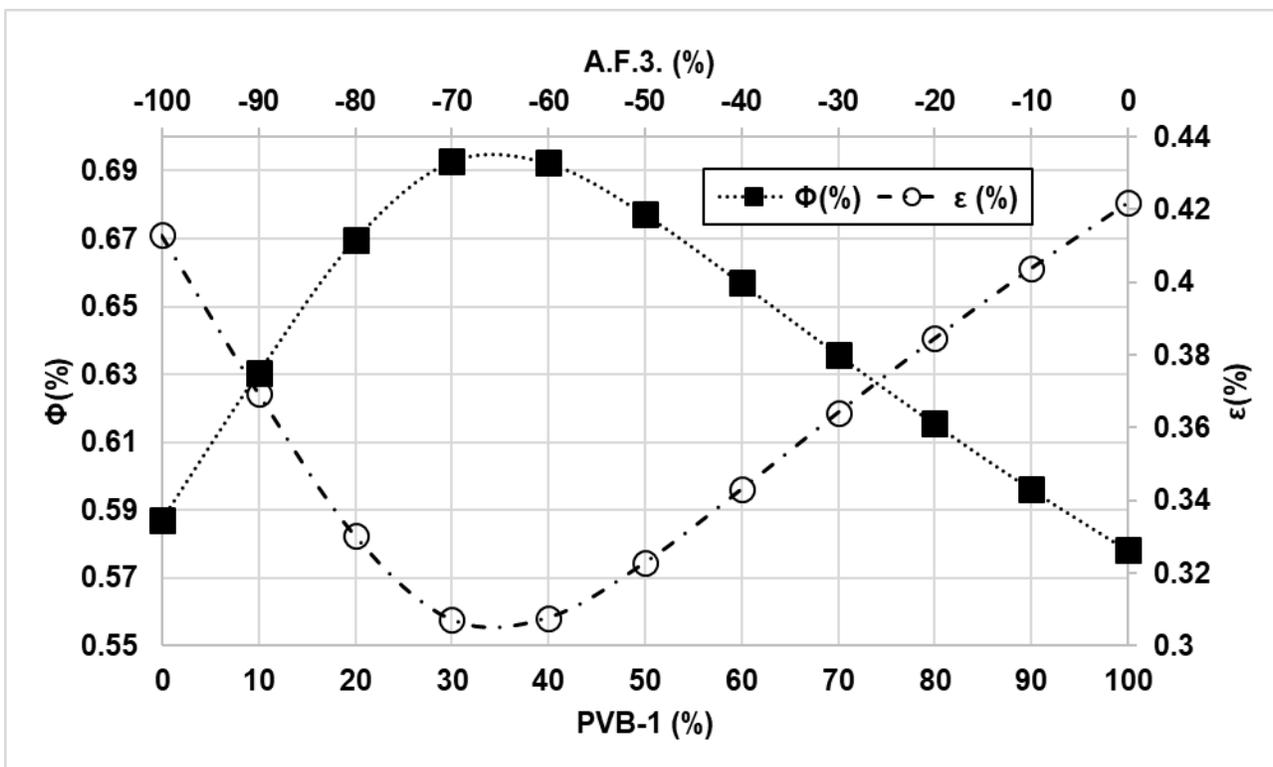


Fig.6.- 26 Curva de la Densidad de Empaquetamiento del A.F.3. y el PVB-1.

Las curvas de densidad de empaquetamiento ( $\Phi$ ) y porosidad ( $\epsilon$ ) obtenidas al optimizar a A.F.3. y el PBV-1 se muestran en la Fig.6.-26; se determinó que el máximo empaquetamiento ( $\Phi$ )= 0.695 y una porosidad ( $\epsilon$ )=0.305 cuando se usa el 67.5% A.F.2. y 32.5% del PVB-1 en masa.

Las mezclas M-5, M-6, M-7 y M-8, se fijó la cantidad de material cementante (Cemento y Microsílice) y la relación a/c=0.25, el volumen restante para un m<sup>3</sup> fue compuesto por los componentes granulares (agregado fino y PVB-1) y el SP. Para la M-5 se usó las proporciones de 85% A.F.1 y 15% PVB-1 en masa de los componentes granulares. Para la M-7 se usó 55% de A.F.2 y 55% PBV-1; en la M-8 se utilizó 67.5% de A.F.3 y 32.5% de PVB-1. Para la M-6 se usó el 85% A.F.2 y 15% PVB-1. Los proporcionamientos se muestran en la

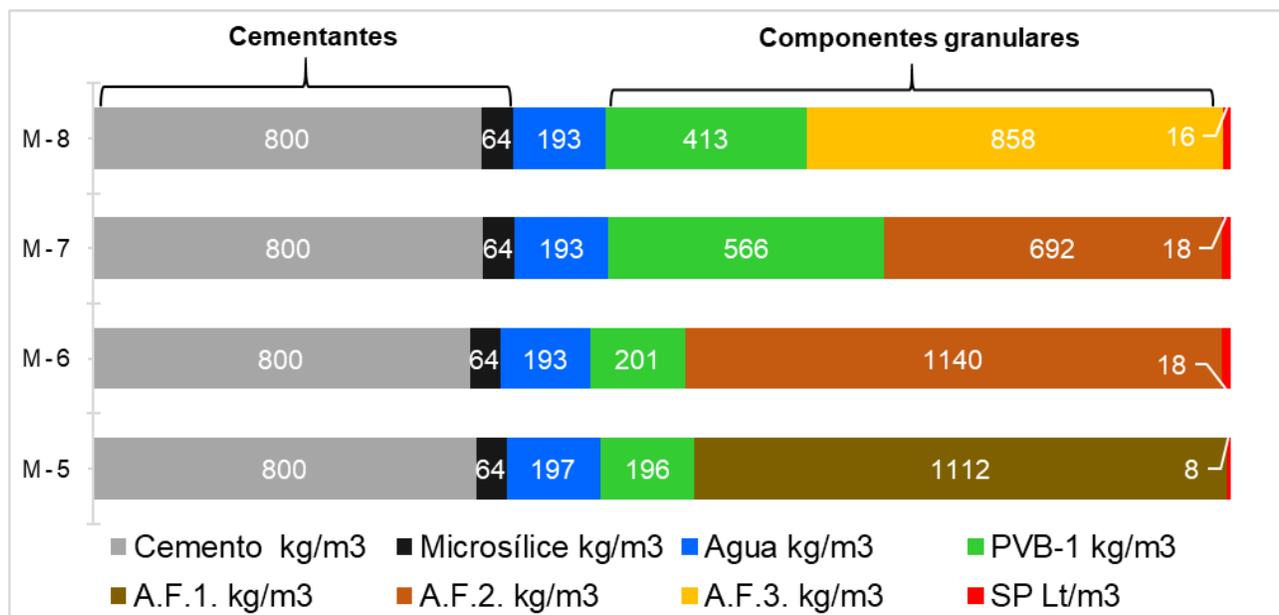


Fig.6.- 27 Proporcionamos de las mezclas M5, M6, M7 y M8, que se determinaron después de optimizarlas.

El SP de las mezclas fue ajustado para obtener una fluidez de 32 cm ± 2 cm, donde se puede observar que la mezcla que demandó menor cantidad de SP fue la M-5, es la que tiene el A.F.1 con el módulo de finura mayor. Al incrementar el reemplazo de PBV-1 por el agregado fino, disminuyó la masa unitaria o el peso volumétrico de las mezclas al igual que el contenido de aire.

Tabla.6. 17 Evaluación de las propiedades en estado fresco de las mezclas M-5, M-6, M-7 y M-8.

ID	M.U. (kg/m <sup>3</sup> )	Aire (%)	Fluidez (cm)
M-5	2354	1.0	32.0
M-6	2393	0.9	31.5
M-7	2320	0.5	32.0
M-8	2334	0.4	32.0

Las mezclas M-5, M-6, M-7 y M-8 fueron evaluadas a la resistencia a compresión a las edades de 3 días, 7 días 28 días y 90 días. Se puede apreciar que a las edades de 3 días y 7 días las mezclas presentan el mismo nivel de resistencia, la diferencia entre resistencia a compresión la mayor y la menor fue menor al 8%. A los 28 días se aprecia que la M-6 llega 173 MPa y la M-7 alcanza hasta 184 MPa; las mezclas M-6 y M-8 no alcanzan la ultra alta resistencia de 150 MPa, si no hasta los 90 días teniendo ambas mezclas una resistencia de 164MPa. Los resultados se presentan en la Fig.6-28.

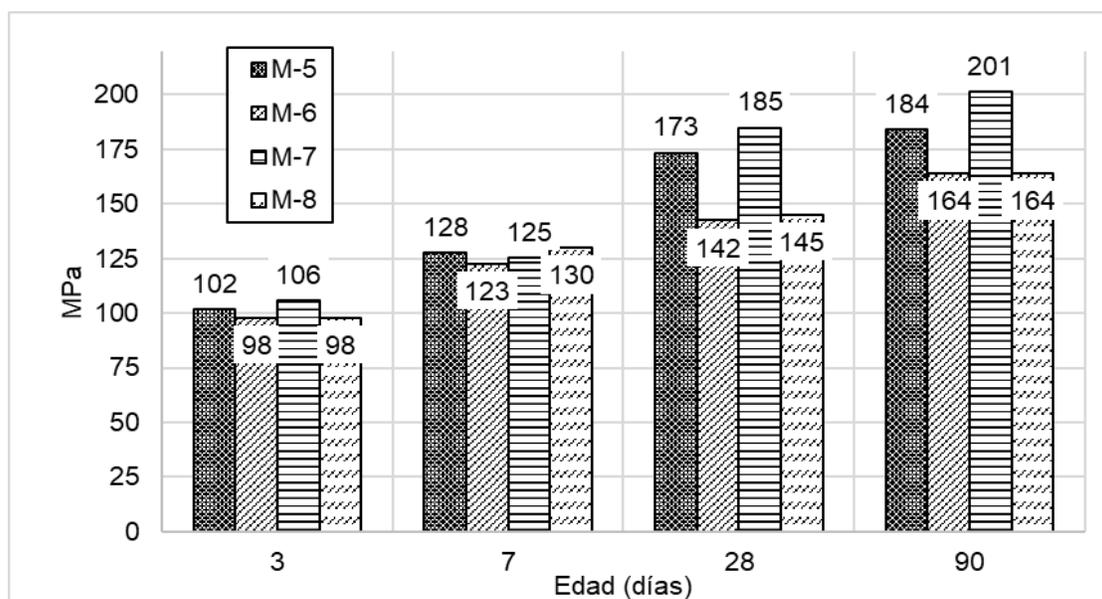


Fig.6.- 28 Evaluación del efecto del vidrio de borosilicato en la resistencia a compresión de las Mezclas M-5, M-6, M-7 y M-8.

### 6.7. Efecto de polvo de vidrio borosilicato como filler/ Cementante suplementario.

Con la finalidad de evaluar el efecto que tiene el polvo de vidrio de borosilicato en la resistencia a compresión como filler y como material cementante suplementaria se realizaron las mezclas M-9 y M10, las proporciones de las mezclas se muestran en la Fig.6.-28. La cantidad de aditivo se ajustó para tener una fluidez de  $32\text{cm} \pm 2\text{cm}$ .

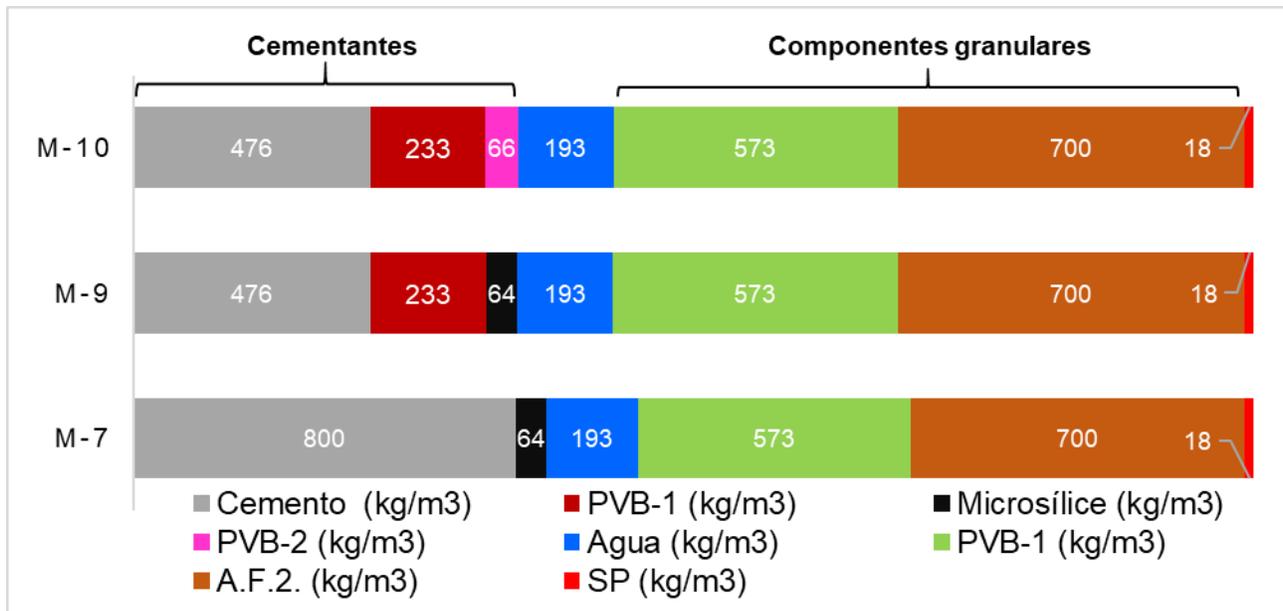


Fig.6.- 29 Proporciones de las Mezclas M-7, M-9 y M-10 en masa ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

En la M-9 se reemplazó el 40% del cemento en volumen por 233 kg de PVB-1, manteniendo constante la cantidad de microsilíce y las cantidades de los componentes granulares A.F.2 y PVB-1 usados en la M-7. En la M-10 se reemplazó el 40% del cemento por PVB-1 y el 100% de la microsilíce por el PVB-2 como se puede observar en la Fig.6.-20.

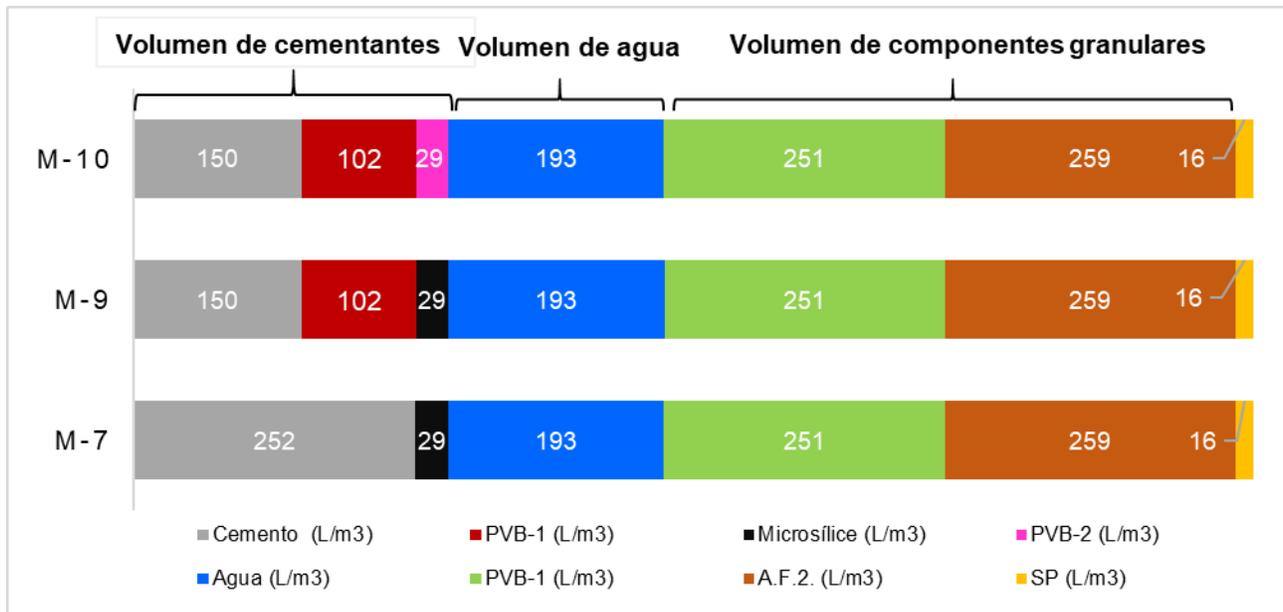


Fig.6.- 30 Proporciones de las Mezclas M-7, M-9 y M-10 en Volumen (L/m³).

Se le determinaron las propiedades en estado fresco como Masa unitaria, contenido de aire y fluidez. La Masa unitaria decreció al reemplazar el 40% del cemento debido a que el vidrio tiene una densidad menor que la del cemento. También cabe mencionar que el contenido de aire disminuyó. Cabe mencionar que al realizar los reemplazos del cemento y/o microsilíce se incrementó el tiempo de mezclado de 8.5 minutos a 30 minutos para poder hacer fluir la mezcla.

ID	M.U. (kg/m³)	Aire (%)	Fluidez (cm)
M-7	2354	1.0	32.0
M-9	2243	0.2	31.5
M-10	2244	0.6	32.0

Fig.6.- 31 Propiedades en estado fresco de las mezclas: M-7, M-9 y M-10 en kg/m³.

Tomando como referencia la resistencia a compresión de la M-7 de 201 MPa a 90 días, las mezclas M-7, M-9 y M-10 a los 3 días tenían 53%, 31% y 28% respectivamente. A los 7 días tenían 62%, 43% y 42%, a los 28 días 92%, 79% y 64%, y a los 90 días 100%, 83% y 84% respectivamente. En la Fig.6.-32 se puede observar que se decrementó la resistencia a compresión un 16% aproximadamente al reemplazar el 40% del cemento y el 100% de la microsilíce. Hay artículos que mencionan que la cantidad optima de reemplazo de polvo de

vidrio por cemento es del 30%, con la cual han logrado mantener la resistencia a compresión. En nuestro caso la finalidad era reemplazar el 40% suponiendo que es la cantidad necesaria para hidratar completamente el cemento dentro de la mezcla de concreto. En las mezclas M-9 y M-10 por haber reemplazo el 40% del cemento de tener una relación a/c de 0.25 se incrementó a aproximadamente a/c=0.42. Si analizamos la resistencia entre la cantidad de cemento podemos ver que para la M-7 tenemos una eficiencia 2.56 kg/cm<sup>2</sup> por 1 kg de cemento, para la mezcla M-9 se tiene una eficiencia de 3.5 kg/cm<sup>2</sup> por 1 kg de cemento y para la mezcla M-10 se tiene una eficiencia de 3.6 kg/cm<sup>2</sup> por 1 kg de cemento.

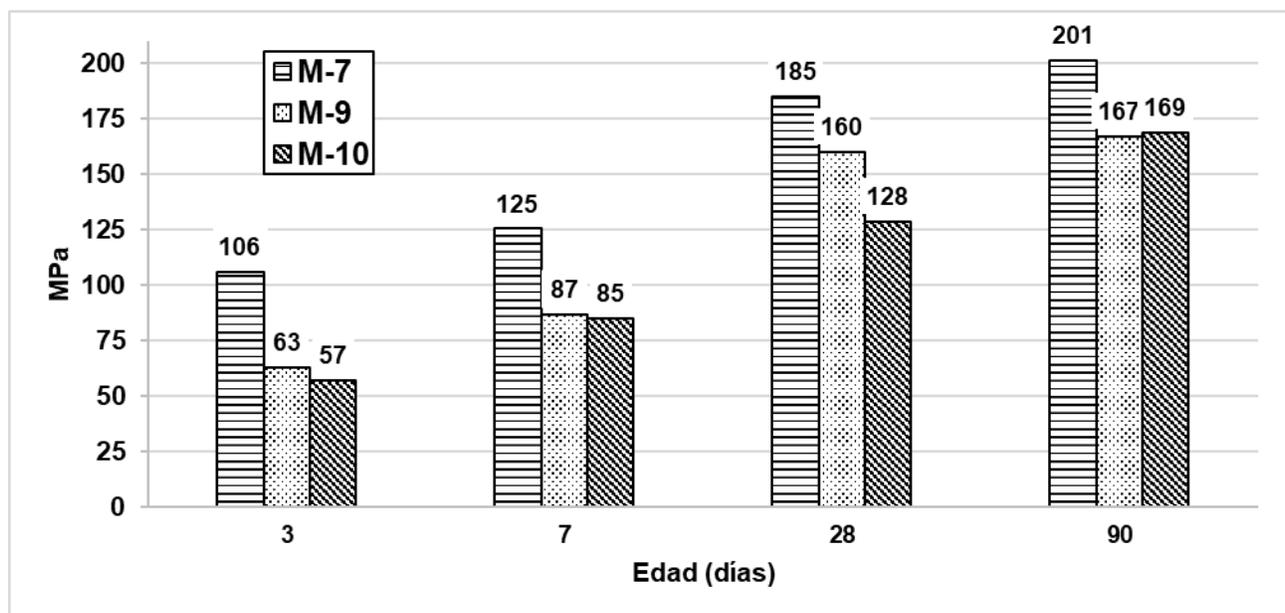


Fig.6.- 32 Evaluación de efecto del vidrio de borosilicato en la resistencia a la compresión de las mezclas M-7, M-9 y M-10 a las edades de 3 días, 7 días, 28 días y 90 días.

A partir de esta parte a la mezcla 5 se le adopto el ID de R, con la finalidad de evaluar el efecto del polvo de vidrio de borosilicato como reemplazo del cemento y/o como material cementante suplementario se diseñaron las mezclas M-A, M-B y M-C. Las proporciones de estas mezclas se muestran en la Fig.-32, las variaciones del A.F.1. es por el ajuste del SP para obtener la fluidez de 32cm ± 2cm.

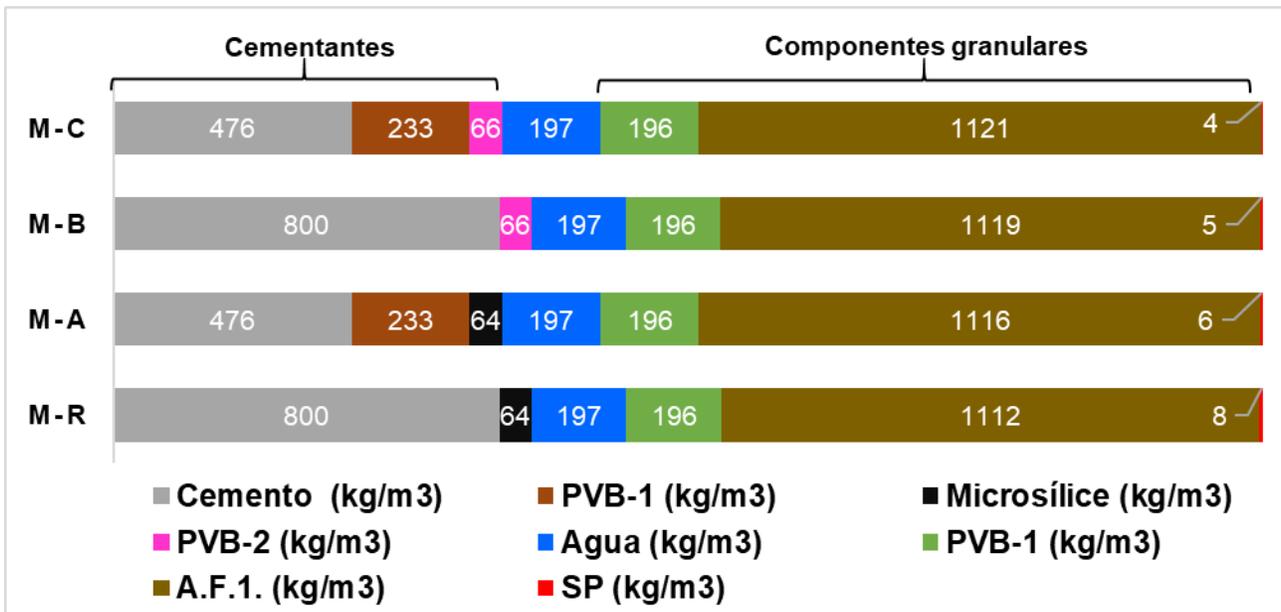


Fig.6.- 33 Proporciones de las Mezclas: M-R, M-A, M-B y M-C en kg/m<sup>3</sup>

El volumen de material cementante se mantuvo constante en las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C, como se observa en la Fig.6-33. En la M-A se reemplazaron 102 L del volumen total del cemento que es de 252 L/m<sup>3</sup> por PVB-1, equivale al 40% del cemento. En la M-B se reemplazó el 100% del volumen de la microsíllice por PVB-2, manteniendo constante la cantidad de cemento y de los componentes granulares (PVB-1). En la mezcla C se reemplazó el 40% del cemento por PVB-1 y el 100% de la microsíllice por el PVB-2.

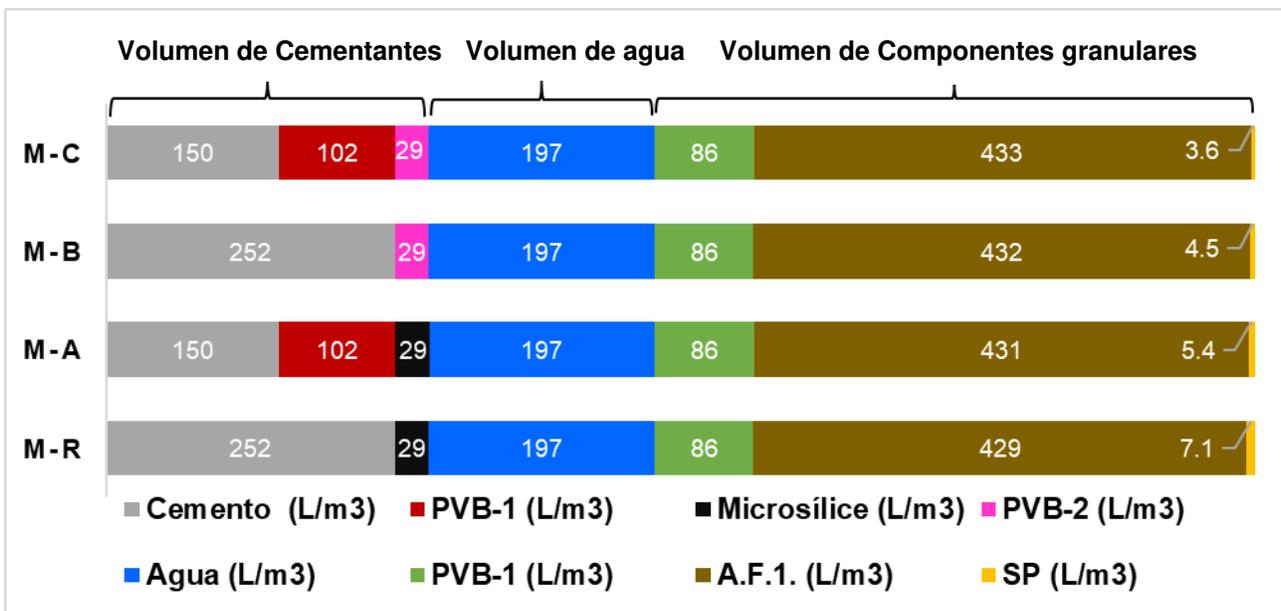


Fig.6.- 34 Proporciones de las Mezclas M-R, M-A, M-B y M-C en Volumen, L/m<sup>3</sup>.

Las propiedades en estado fresco de los concretos se presentan en la tabla.6.-18, donde las mezclas M-A y M-C, exhibieron las más bajas masas unitarias; este desempeño era el esperado debido a que la diferencia de densidades de polvo de vidrio de borosilicato y el cemento. Respecto al contenido de aire, todas las mezclas presentaron contenidos de aire similares, con excepción de la mezcla C donde su valor fue menor de 0.5%. Esto se debe a que la dosificación de superplastificante de esta mezcla resulto ser la más baja; siendo del orden del 50% con respecto a la referencia, debido al reemplazar el humo de sílice por PVB-2, permite un mayor desalojo de aire (expulsión) debido a la menor viscosidad provocada por la ausencia un material de mayor área superficial.

*Tabla.6. 18 Evaluación de las propiedades en estado fresco de las Mezclas M-R, M-A, M-B y M-C.*

<b>ID</b>	<b>M.U.</b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b>Aire</b> (%)	<b>Fluidez</b> (cm)
M-R	2354	1.0	32.0
M-A	2308	1.1	33
M-B	2402	1.5	32.0
M-C	2311	0.3	32.5

Analizando el efecto del polvo de vidrio de borosilicato como filler y/o material cementante suplementario, en la Fig.6-35 se presentan los resultados obtenidos de las resistencias a compresión de las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C. Las mezclas M-R y M-B mostraron el mismo desempeño de resistencias a edades tempranas (3 y 7 días), en cambio las mezclas M-A y M-C presentaron niveles de resistencia inferiores del orden de 40% y 25% a los 3 y 7 días respectivamente. Para 28 y 90 días la referencia (M-R) desarrolló mayores resistencias siendo de 173 MPa y 184 MPa respectivamente. Por otra parte, la mezcla B, en la cual se sustituyó el 100% de la microsílíce por PVB-2 exhibió un decremento de resistencia a la compresión del orden del 20% entre las edades de 28 y 90 días. Mientras las mezclas A y C ostentaron disminuciones de resistencias de 30% y 40% en promedio respectivamente.

El nivel de resistencia alcanzado a edades tempranas por las mezclas M-R y M-B es atribuido a la acción combinada de efecto filler y a la cantidad de álcalis (Na<sub>2</sub>O) presentes en el polvo de vidrio de borosilicato, donde se ha reportado que este compuesto contribuye a la aceleración de la hidratación. (Agregar referencias) En cambio para edades avanzadas de 28

y 90 días los resultados obtenidos de la mezcla R indican que el alto nivel de resistencia obtenido sugiere que el PVB-2 se comporta como un material puzolánico donde el C-S-H se precipita en su superficie, mejorando la zona transición entre las partículas de vidrio y la pasta. [12] [13] [17] [18] [19]

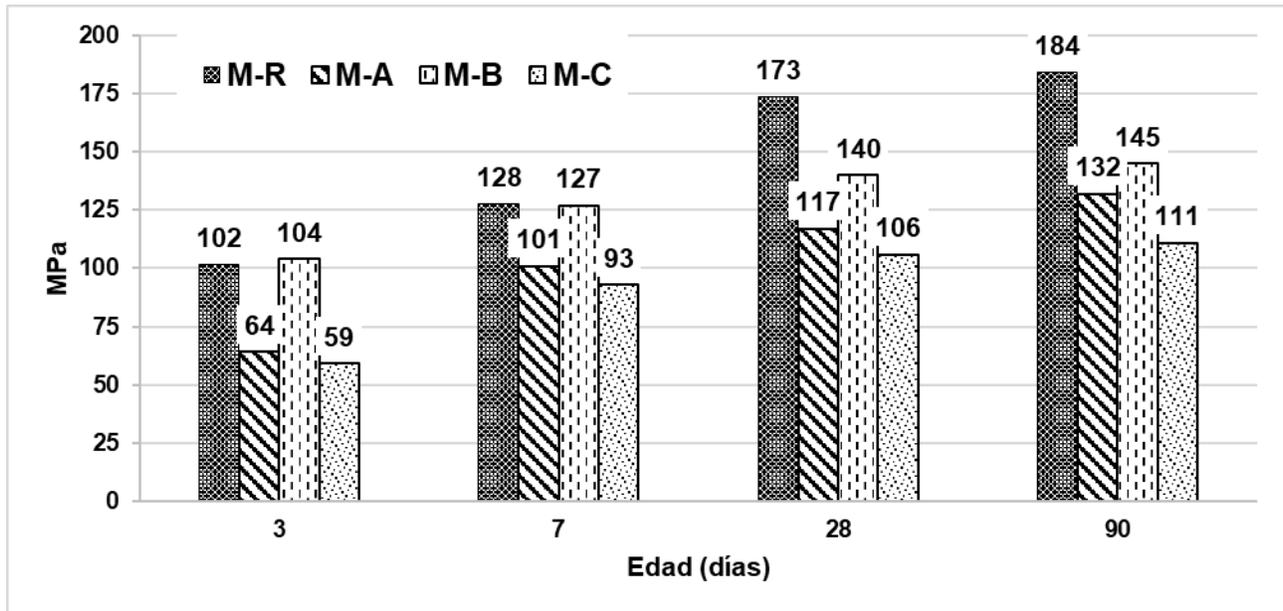


Fig.6.- 35 Evaluación del efecto del polvo del PVB-1 como sustituto parcial del cemento y el PVB-1 remplazando a la microsílíce.

Tal como se mencionó anteriormente, con la finalidad de conocer el efecto del componente granular PVB-1 en la resistencia a compresión de los concretos producidos, este material fue sustituido en su totalidad de la mezcla M-R por polvo de arena sílice (M-P.A.S.) y sus las proporciones en masa se muestran en la Fig.6.-36.

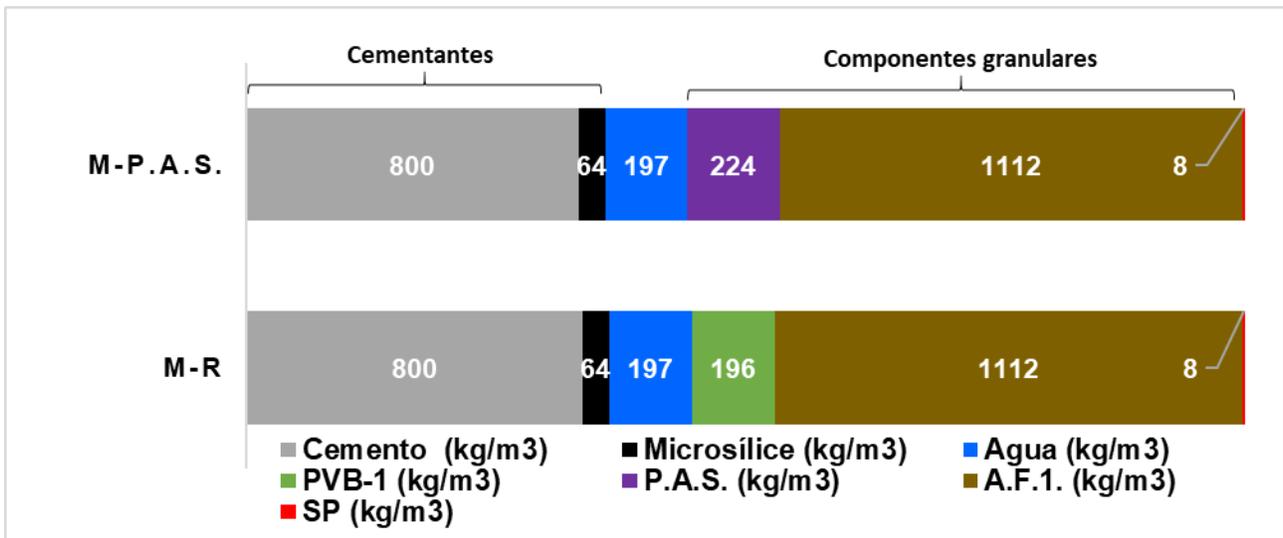


Fig.6.- 36 Proporciones de las Mezclas M-P.A.S en masa (kg/m³).

y las proporciones en volumen se y los resultados se muestran en

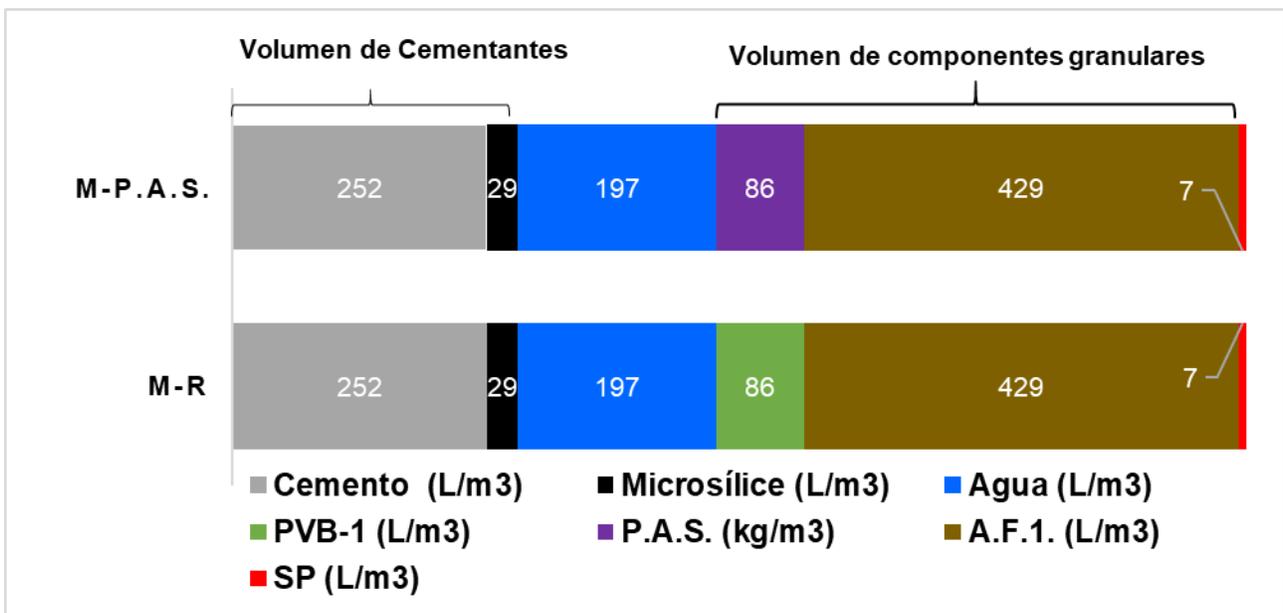


Fig.6.- 37 Proporciones de las mezclas M-R y M-P.A.S. en Volumen (L/m³).

En esta se detecta que a la edad de 3 días las mezclas R y SSP tienen prácticamente el mismo nivel de resistencia. Sin embargo, a partir de los 7 días el efecto del GBP-I en la resistencia a compresión presenta incrementos significantes los cuales son de 30%, 45% y 30% para las edades de 7, 28 y 90 días respectivamente. Esto sugiere que el PVB-1 presenta una reactividad puzolánica coincidiendo con lo reportado por Mercado-Depierre.; donde se reportó que trabajaron con polvo de vidrio de borosilicato con tamaño máximo de 100  $\mu\text{m}$ . [13]. Se ha Reportado que para polvos de vidrio de sódico cálcico son considerados como materiales cementantes

suplementarios, su tamaño de partícula debe ser menor a 80  $\mu\text{m}$  [14][15][16], donde el GBP-I cumple con esta característica.

Si comparamos los resultados de la mezcla M-P.A.S y la Mezcla M-1, tiene básicamente la misma resistencia a compresión, ninguna de las dos mezclas contiene PVB-1, como componente granular, lo que se podría evidenciar el efecto que tiene el PVB-1 en el incremento de la resistencia a compresión, lo interesante es que la mezcla B al reemplazar la microsílíce por PVB-1 se alcanzó una resistencia de 145 MPa, lo cual indica si se usa solo microsílíce o solo polvo de vidrio de borosilicato como componente granular usando el A.F.1. no es posible alcanzar la ultra alta resistencia de 150 MPa. Dicho efecto lo había reportado un investigador llamado Vitoldas, él reemplazo el 100% de la microsílíce por polvo de vidrio sódico cálcico obtenido una resistencia menor a su referencia que contenía microsílíce. Sin embargo, cuando reemplazó el 50% de la microsílíce por polvo de vidrio sódico cálcico, se generó un efecto sinérgico que incremento la resistencia de 180 MPa a 220 MPa. Este efecto sinérgico es atribuido a que el polvo de vidrio al estar en la solución de poro, se liberan los álcalis que contiene el vidrio incrementando el pH de la solución de poro, por lo tanto, se acelera la hidratación del cemento y también se incrementa la solubilidad del  $\text{SiO}_2$  de la microsílíce lo que se puede traducir al incremento de su reactividad puzolánica.

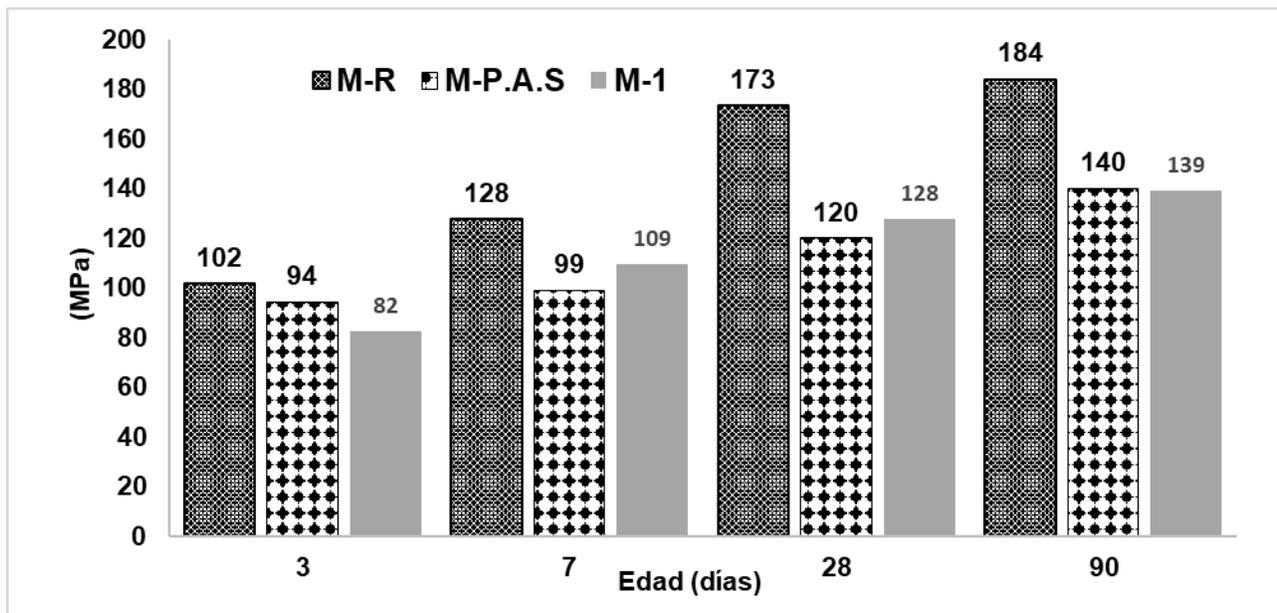


Fig.6.- 38 Evaluación del PVB-1 en su contribución en la resistencia a compresión en la mezcla R.

## 6.8. Indicadores de Durabilidad

### 6.8.1. Resistividad Eléctrica Superficial

Como un indicador de la durabilidad la prueba de resistividad superficial demostrado una buena correlación con la Resistencia a la penetración de iones cloruro, debido a que permite medir la interconexión de los poros de la matriz cementante, mediante corriente eléctrica, lo que se traduce en el nivel de permeabilidad del Concreto. Basados en los resultados que se muestran en la Fig.6.-39 y en la clasificación cualitativa de la ASSTHO TP 95, las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C, puede ser clasificadas en la categoría de alta a moderada penetraciones a los iones cloruro ( $RES \leq 21 \text{ Kohms} \cdot \text{cm}$ ) durante edades muy tempranas de 0 a 4.7 días, en la categoría de baja ( $RES$  de 21 a 37  $\text{Kohms} \cdot \text{cm}$ ) por el periodo de tiempo entre 3.9 y 5.1 días, y permanece en las categoría de muy baja ( $RES$  de 37 a 254  $\text{Kohms} \cdot \text{cm}$ ) por el periodo de tiempo de 4.3 a 56 días. (M-R de 4.3 a 16 días, M-A de 4.9 a 15 días, M-B de 5.9 a 56 días y M-C de 5.1 a 21 días) y despreciable ( $RES > 254 \text{ Kohms} \cdot \text{cm}$ ) desde las edades de 16 días, 15 días, 56 días y 21 días para las mezclas M-R, M-A, M-B y MC, respectivamente. Estos resultados se le puede atribuir a la combinación de los componentes granulares y materiales cementantes que mejoran el empaquetamiento mezcla y al efecto filler de la microsíllice. [2] [4] [12] [19][20].

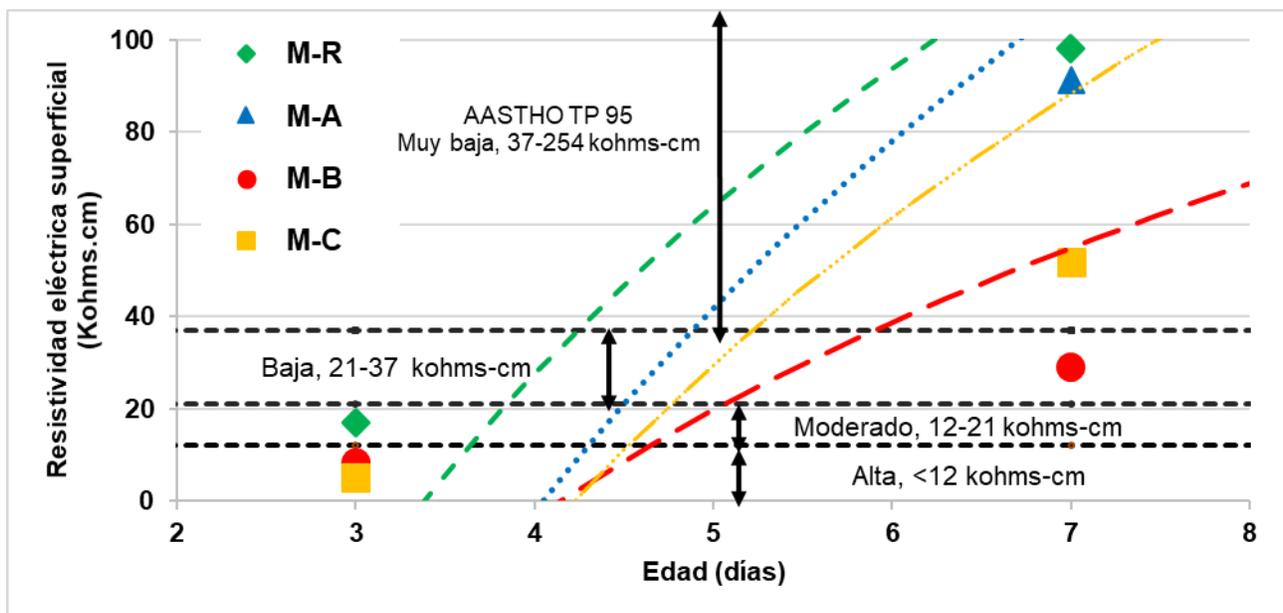


Fig.6.- 39 Resultados de Resistividad Eléctrica Superficial de las Mezclas R, A, B y C.

A partir de los 7 días se detecta (Fig.6.-3) que en la M-A, las mediciones de RES se incrementan, resultando ser las mayores, esto se debe a que al reemplazar el 40% de cemento por PVB-1, hay una mayor cantidad de agua disponible que permite que se incremente la hidratación de las partículas del cemento por lo tanto se generaría una mayor cantidad de CH por gramo de cemento, que favorece la reactividad puzolánica de PVB-1 y la microsílíce, teniendo como consecuencia un mayor refinamiento de poros. Los valores más bajos de resistividad fueron provistos por la mezcla B que se sustituyó el 100% de la microsílíce por PVB-2, lo que sugiere que el PVB-1 poseen un nivel de actividad puzolánica menor que la microsílíce produciendo menos productos de hidratados los cuales ayudan a densificar la matriz cementante [11] [20] [21].

Las mezclas M-R, M-A y M-C como se muestra en la fig.6 tuvieron resistividad superficial superior a los 254 koms-cm a la edad de 28 días, lo cual de acuerdo a la norma AASHTO TP -95, tiene una penetración al Ion Cloruro despreciable. Sin embargo, la M-B después de la edad de 56 días satisface con esta especificación. Los resultados se muestran en la Fig.6.-40, aunado a lo anterior de manera general, los concretos de las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C puede clasificarse como un material que tiene una penetración a los iones cloruro “Despreciable”.

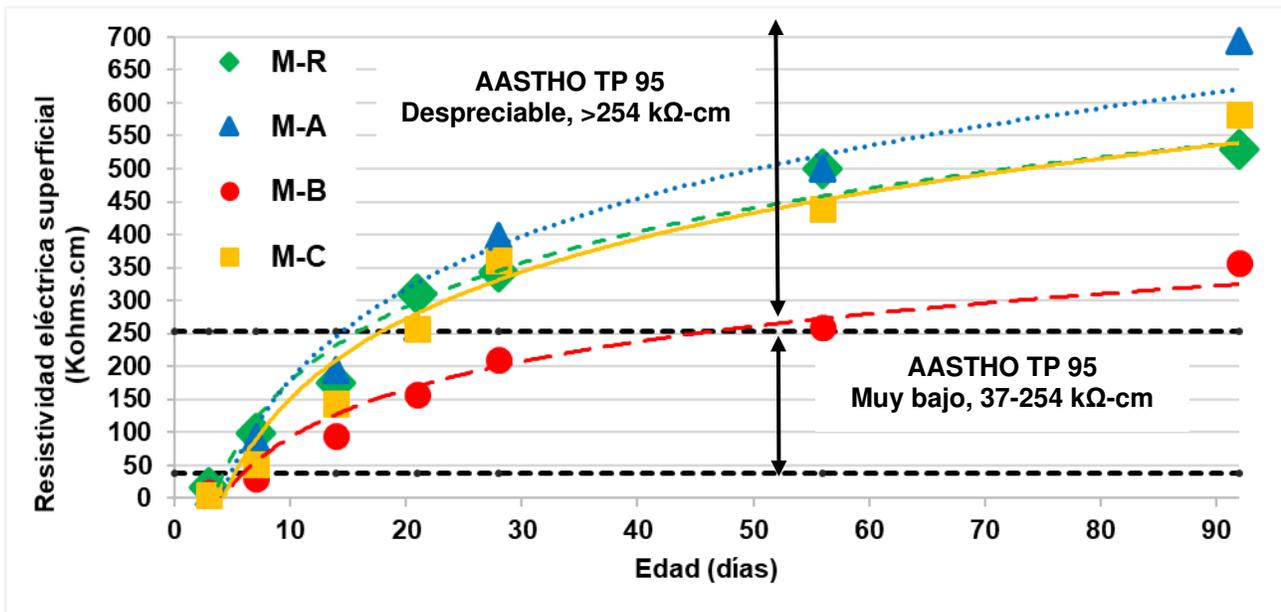


Fig.6.- 40 Evaluación de la Resistividad Electrica Superficial de las Mezclas M-R, M-A, M-B y M-C hasta 90 días,

### 6.8.2. Coeficiente de migración

Los resultados medidos del Coeficiente de Migración de Cloruros se presentan en la tabla.6. 19, donde la mezcla de referencia tiene un  $D_{nssm}$   $0.103 \times 10^{-12}$ , se puede observar que la M-A, a la cual se le reemplazó el 40% del cemento el  $D_{nssm}$  disminuyó 5.70 veces. Al reemplazar la microsílíce por PVB-2, en la M-B, el  $D_{nssm}$  se incrementó al doble y en la M-C el  $D_{nssm}$  disminuyó 3.2 veces respecto a la M-R.

Se puede concluir que se tiene el mejor desempeño a la penetración de cloruros cuando se reemplaza el 40% del cemento, como ya se mencionó anteriormente esto se le puede atribuir que se incrementó la a/c promoviéndose la posibilidad que el cemento se hidrate por completo.

Tabla.6. 19 Coeficiente de Migración de Cloruros a la edad de 90 días de las Mezclas M-R, M-A M-B y M-C.

Mezcla	Dnssm	D.E.	C.V.
	( $m^2/s \times 10^{-12}$ )	( $m^2/s \times 10^{-12}$ )	(%)
M-R	0.103	0.005	4.70
M-A	0.018	0.002	11.1
M-B	0.221	0.016	7.20
M-C	0.032	0.003	9.40

### 6.8.3. Vida útil

La ecuación de la Segunda Ley de Fick (ecuación 3), despejada para calcular el tiempo es la siguiente:

$$t = \frac{\left(\frac{x}{2 * erf}\right)^2}{\frac{Dnssm}{365 * 24 * 60 * 60}}$$

Donde:

Cs= Concentración superficial

Cx= Concentración a una distancia x

Co= Concentración inicial

Dnssm= Coeficiente de migración obtenido en la sección anterior.

t= Tiempo

El CS utilizado fue de 1.76%, acuerdo a la literatura revisada y el Cx el valor más crítico encontrado en la literatura es de 0.4%, cuando se usan cementantes. El valor de X fue asignado de acuerdo al ACI 318, que recomienda 65 mm utilizar un recubrimiento para el acero cuando se encuentra expuesto a ambientes marinos.

Los resultados obtenidos la sección se le llamo vida útil, pero en realidad lo que se está calculando en la Tabla 6.-20 es el periodo de iniciación de la vida útil, como es sabido la vida útil de una estructura está compuesta por dos periodos el periodo de iniciación y propagación de acuerdo al famoso diagrama de Tutti. Los cual es un hecho que si se construyera una estructura con un concreto de este tipo su vida útil puede ser mucho mayor.

La mezcla M-R, se tiene una vida útil de 448 años, al reemplazar el 40% del cemento (M-A), la vida útil se incrementó hasta más de 2500 años. Lo que se puede apreciar que, aunque se disminuya un cierto porcentaje a la resistencia a la compresión se tienen una gran ganancia la vida útil. Si estos resultados los comparamos con investigaciones anteriores de CUAD desarrollados con agregado calizo utilizando básicamente 800 kg de cemento (Diferentes cementos Comerciales) y 8% de microsílíce, sin vidrio la vida de estos concretos varía entre 230 años y 325 años. Se puede ver el potencial que tiene el Polvo de vidrio de

borosilicato como reemplazo parcial del cemento o de la microsílíce ya sustituyendo solo la microsílíce es posible alcanzar una vida útil de mayor a los 20 años.

Tabla.6. 20 Resultados del Cálculo de la vida útil.

Mezcla	Cs-Cx / Cs-Co	Argumento erf	Valor erf	x (mm)	Tiempo (años)
M-R	0.7647	0.85377	0.7727	65	448
M-A	0.7647	0.85377	0.7727	65	2540
M-B	0.7647	0.85377	0.7727	65	208
M-C	0.7647	0.85377	0.7727	65	1440

### 6.9. Evaluación de la hidratación de las pastas de las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C.

#### 6.9.1. Contracción química de las mezclas

A las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C, se les midió la contracción química hasta la edad de 28 días el análisis estadístico de los resultados se exhiben en la Tabla.6. 21, donde se puede apreciar que prueba puede llegar a tener hasta un C.V. del 13.5%, esto es debido a que la prueba es muy sensible a cambios de temperatura.

Tabla.6. 21 Contracción química a 28 días de las Pastas de las Mezclas M-R, M-A, M-B y M-C.

ID	Promedio (ml/100g cementante)	D.E (ml/100g cementante)	C.V. %
M-R	5.86	0.6	10.2
M-A	4.73	0.5	10.6
M-B	4.43	0.6	13.5
M-C	5.12	0.5	9.8

En la Fig.6.-41 se muestran los resultados medidos de las pastas hasta la edad de 28 días, se aprecia que la mezcla R, es la que tuvo mayor contracción química de 5.86 ml/100 g cementante, seguido de la mezcla C que tuvo 5.12 ml/100g de cementante. Las mezclas M-A y M-B, se tiene básicamente la misma contracción química. De acuerdo al principio en el que se basa la prueba, básicamente entre más volumen medido es mayor la cantidad de productos de hidratación formando, basados en esto se puede decir que la mezcla M-R es la

que tiene mayor cantidad productos hidratados y la que tiene menos productos es la M-B, lo cual es un indicador que la microsilíce es mucho más actividad puzolánica, lo cual fue comprobado al medir el consumo de CH del PBV-2.

La contracción química de las M-A, M-B y M-C, con los resultados obtenidos y el nivel de variación de la prueba se puede decir que estas tres pastas tienen básicamente el mismo nivel de contracción química, es decir, tiene básicamente la misma cantidad de productos hidratados.

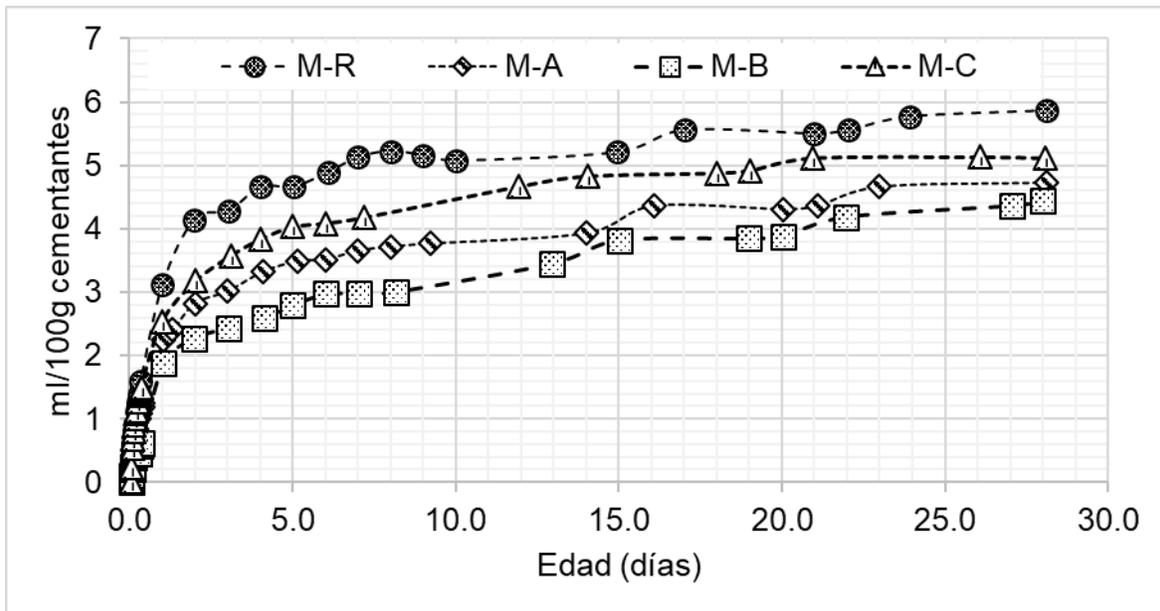


Fig.6.- 41 Contracción química de las Pastas de las Mezclas M-R, M-A, M-B y M-C.

### 6.9.2. Análisis Termogravimétrico de las mezclas M-R, M-A, M-B y M-C.

Se llevo a cabo el Análisis termogravimétrico a las Pastas de las Mezclas M-R, M-A, M-B y M-C, a las edades de 28 y 56 días. A las mezclas se determinó la cantidad de CH, en la muestra, la masa después de 1000°C de los diferentes materiales cementantes que contenía la muestra y la cantidad de CH por gramo de cemento.

Para realizar la evaluación de las Pasta de la M-R a 28 días se usó una masa de la muestra ( $M_{muestra}$ )= 11.54mg, la descomposición del CH inicio a la temperatura de 411.5° y terminó en

la temperatura de 481.11°C como se muestra en al Fig.6.-42, obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{H_2OCH}$ )=0.247mg y la masa de la muestra a 1000°C ( $m_{1000^\circ C}$ )=9.45mg.

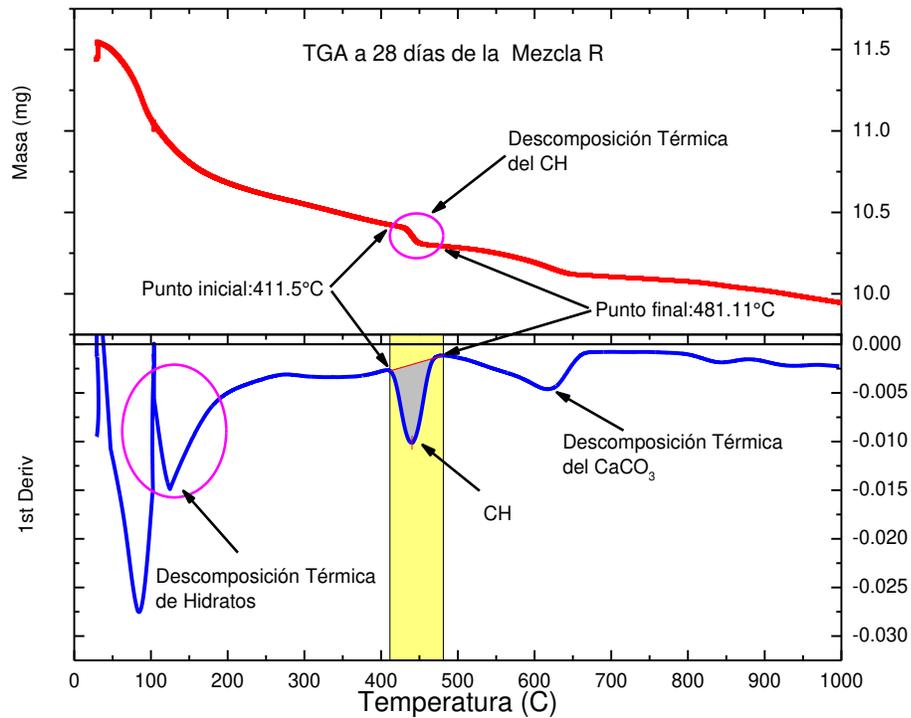


Fig.6.- 42 Análisis Termogravimétrico de la pasta de la Mezcla R a la edad de 28 días.

Para la evaluación de TGA de la Pasta de la M-R a 90 días se usó una masa de la muestra ( $M_{muestra}$ )= 14.33mg; la descomposición del CH inició a la temperatura de 406.11°C y terminó a los 475.25°C como se muestra en al Fig.6.-42, resultando una cantidad de agua ligada al CH ( $M_{H_2OCH}$ )=0.265mg y la masa de la muestra a los 1000°C ( $M_{1000^\circ C}$ )=12.91mg.

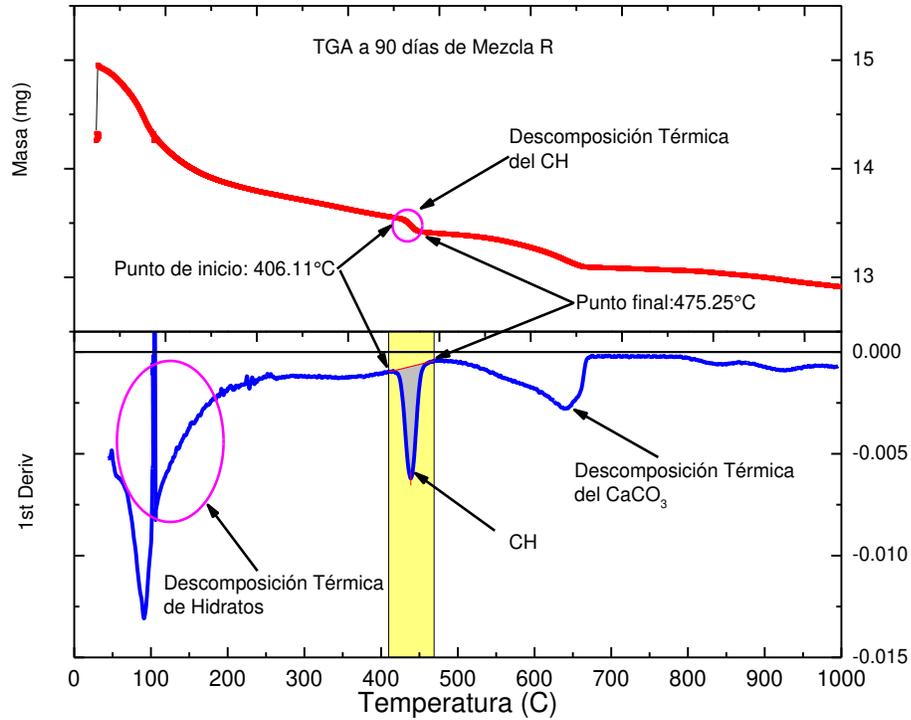


Fig.6.- 43 Análisis Termogravimétrico de la Mezcla R a la edad de 90 días.

En la tabla.6.22 se muestra los resultados obtenidos del análisis de los TGA realizados a la pasta de la mezcla M-R, la cantidad de CH por gramo de cemento fue de 0.131 gr/gr de cemento a 28 días y se redujo a 0.109 gr/gr de cemento a 90 días. Esto equivale una reducción del 17% en la cantidad de CH de 28 a 90 días; por lo tanto, los materiales cementantes suplementarios suplementarios (MCS) usados en esta pasta fueron la microsíllice y PVB-1, los cuales tuvieron un consumo de CH fue de 0.070 gr/ gr de cementantes.

Tabla.6. 22 Análisis de los Resultados de los TGA a 28 y 90 días de la Pasta de la mezcla M-R.

EDAD (día)	M <sub>H2OCH</sub> (mg)	M <sub>CH</sub> (mg)	M <sub>1000°C</sub> (mg)	M <sub>cemento</sub> (mg)	M <sub>Microsilice</sub> (mg)	M <sub>PVB-1</sub> (mg)	M <sub>totalCM</sub> (mg)	Cantidad de CH (gr/gr Cemento)	Consumo CH (gr/ gr Cementantes)
28	0.25	1.01	9.95	7.73	0.62	1.89	10.24	0.131	0.070
90	0.27	1.09	12.91	10.04	0.80	2.45	13.29	0.109	

A la Pasta de la M-A a los 28 días se le realizó el TGA, para dicho análisis se usó una muestra de pasta ( $M_{muestra}$ )= 10.45mg. Como se muestra en la Fig.-44, la descomposición del CH inició a la temperatura de 401.16° y terminó en la temperatura de 463.76°C,

obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{H_2OCH}$ )=0.455 mg y la masa de la muestra  $m_{1000^\circ C}$ =9.23mg.

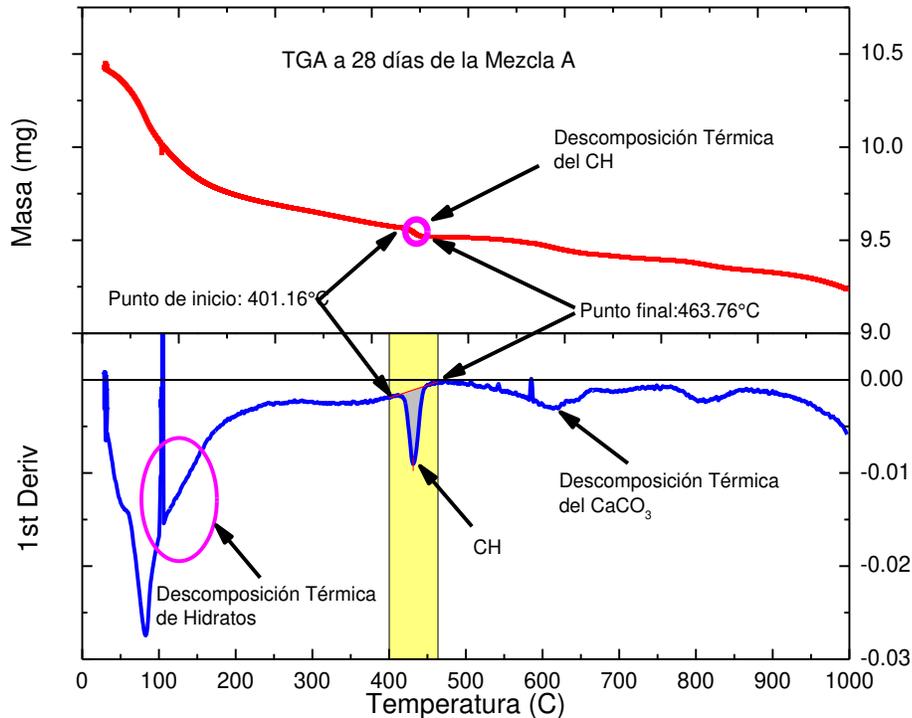


Fig.6.- 44 Análisis Termogravimétrico a 28 días de la Pasta de la Mezcla A.

También se realizó el análisis termogravimétrico a los 90 días a la pasta de la M-A, para realizar dicho análisis se usó una muestra de pasta ( $M_{muestra}$ )= 14.26mg. En la Fig.6.-45 se muestra que la descomposición del CH inició a la temperatura de 408.1° y terminó en la temperatura de 467.2°C, obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{H_2OCH}$ )=0.126mg y la masa de la muestra  $m_{1000^\circ C}$ =11.98mg.

En la tabla.6.23 se muestra los resultados obtenidos del análisis de los TGA realizados a la pasta de la mezcla M-A, la cantidad de CH por gramo de cemento fue de 0.097 gr/gr de cemento a 28 días y se redujo a 0.021gr/gr de cemento a 90 días. Esto equivale una reducción del 79% en la cantidad de CH de 28 a 90 días; por lo tanto, los materiales cementantes suplementarios (MCS) microsílíce y PVB-1 consumieron una cantidad de CH de 0.074 gr/ gr de MCS en este periodo de tiempo.

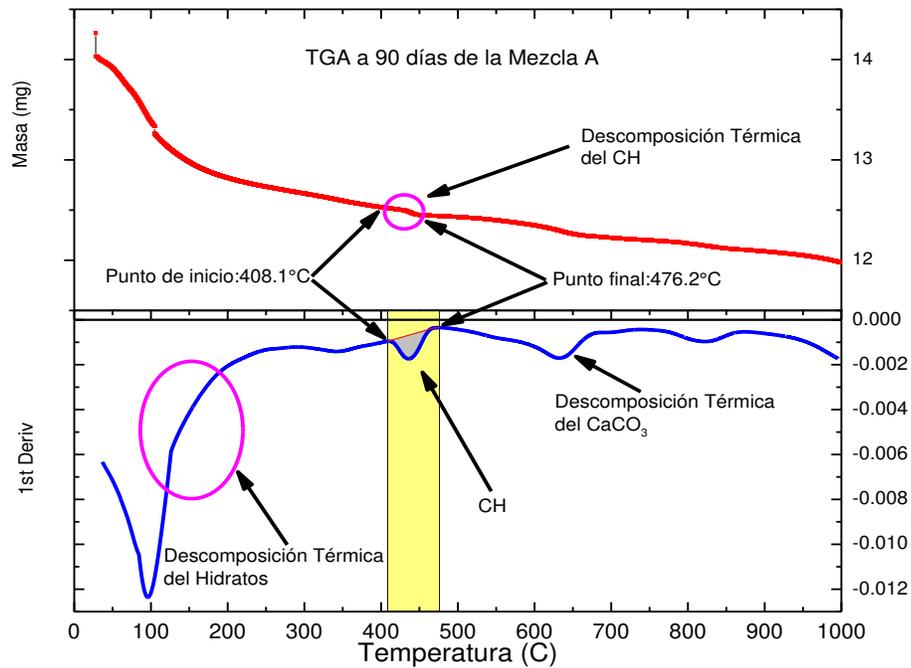


Fig.6.- 45 Análisis Termogravimétrico de la Mezcla A a la edad de 90 días.

Tabla.6. 23 Análisis de los Resultados de los TGA a 28 y 90 días de la Pasta de la mezcla M-A.

EDAD (día)	M <sub>H<sub>2</sub>OCH</sub> (mg)	M <sub>CH</sub> (mg)	M <sub>1000°C</sub> (mg)	M <sub>cemento</sub> (mg)	M <sub>Microsilice</sub> (mg)	M <sub>PVB-1</sub> (mg)	M <sub>totalCM</sub> (mg)	Cantidad de CH (gr/gr Cemento)	Consumo CH (gr/ gr MCS)
28	0.11	0.455	9.24	4.68	0.62	4.18	9.49	0.097	0.074
90	0.031	0.126	11.98	6.07	0.81	5.43	12.31	0.021	

A la Pasta de la M-B a los 28 días se le realizó el TGA, para dicho análisis se usó una muestra de pasta ( $M_{muestra}$ )= 14.15mg. Como se muestra en la Fig6.-46, la descomposición del CH inició a la temperatura de 401.41° y terminó en la temperatura de 469.8°C, obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{H_2OCH}$ )=0.760 mg y la masa de la muestra  $m_{1000°C}$ =11.14mg.

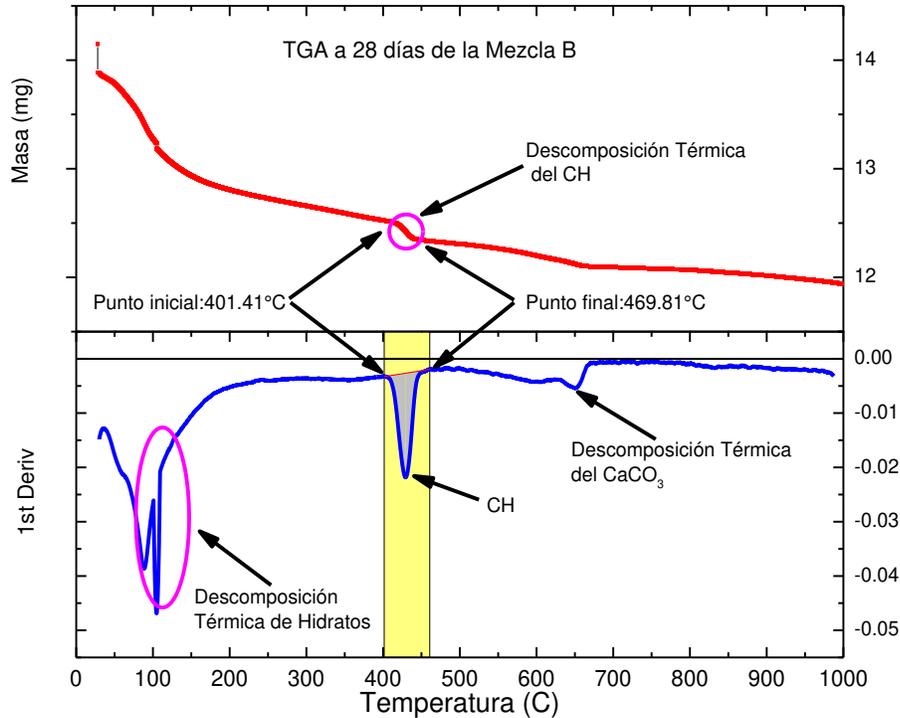


Fig.6.- 46 Análisis Termogravimétrico de la Mezcla B a la edad de 28 días.

A la Pasta de la M-B a los 90 días se le realizó el TGA, para dicho análisis se usó una muestra de pasta ( $M_{\text{muestra}}$ )= 14.82mg. Como se muestra en la Fig.6-47, la descomposición del CH inició a la temperatura de 405.51° y terminó en la temperatura de 460.3°C, obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{H_2OCH}$ )=0.780 mg y la masa de la muestra  $m_{1000^\circ C}$ =13.14mg.

En la tabla.6.24 se muestra los resultados obtenidos del análisis de los TGA realizados a la pasta de la mezcla M-B, la cantidad de CH por gramo de cemento fue de 0.082 gr/gr de cemento a 28 días y se redujo a 0.079 gr/gr de cemento a 90 días. Esto equivale a una reducción del 3.4% en la cantidad de CH de 28 a 90 días; por lo tanto, los materiales cementantes suplementarios (MCS), PVB-1 y PVB-2 consumieron una cantidad de CH de 0.008 gr/ gr de MCS en este periodo de tiempo.

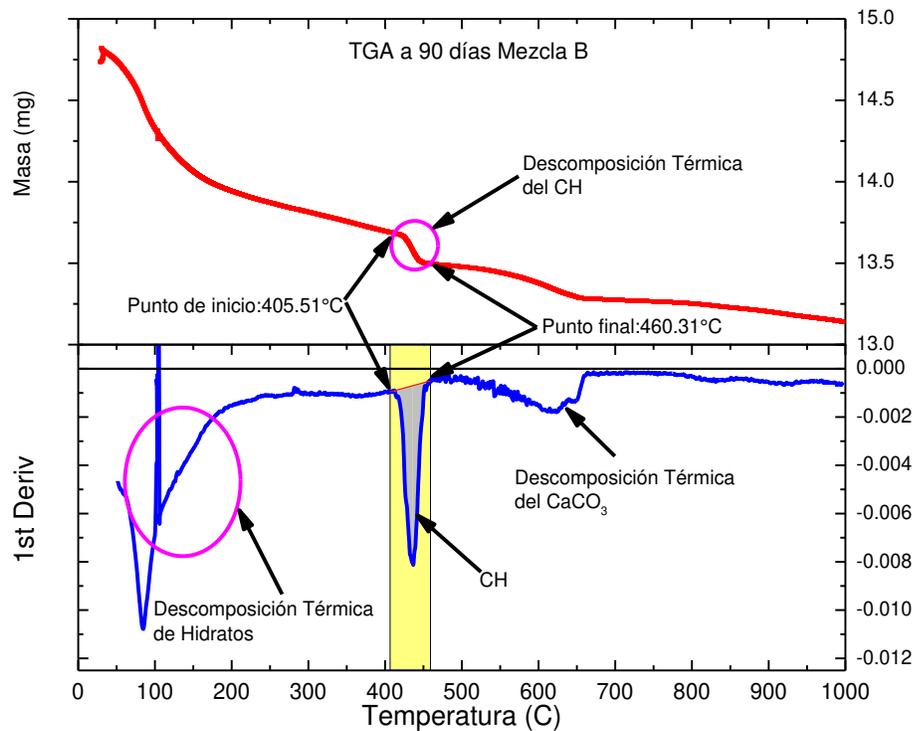


Fig.6.- 47 Análisis Termogravimétrico de la Mezcla B a la edad de 90 días.

Tabla.6. 24 Análisis de los Resultados de los TGA a 28 y 90 días de la Pasta de la mezcla M-B.

EDAD (día)	$M_{H_2OCH}$ (mg)	$M_{CH}$ (mg)	$M_{1000^\circ C}$ (mg)	$M_{muestra}$ (mg)	$M_{PVB-1}$ (mg)	$M_{PVB-2}$ (mg)	$M_{totalCM}$ (mg)	Cantidad de CH (gr/gr Cemento)	Consumo CH (gr/ gr MCS)
28	0.184	0.756	11.94	9.26	2.27	0.76	12.29	0.082	0.008
90	0.196	0.804	13.14	10.19	2.49	0.84	13.53	0.079	

A la Pasta de la M-C a los 28 días se le realizó el TGA, para dicho análisis se usó una muestra de pasta ( $M_{muestra}$ )= 12.10mg. Como se muestra en la Fig6.-48, la descomposición del CH inició a la temperatura de 403.59° y terminó en la temperatura de 467.94°C, obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{H_2OCH}$ )=0.162 mg y la masa de la muestra  $m_{1000^\circ C}$ =10.51mg.

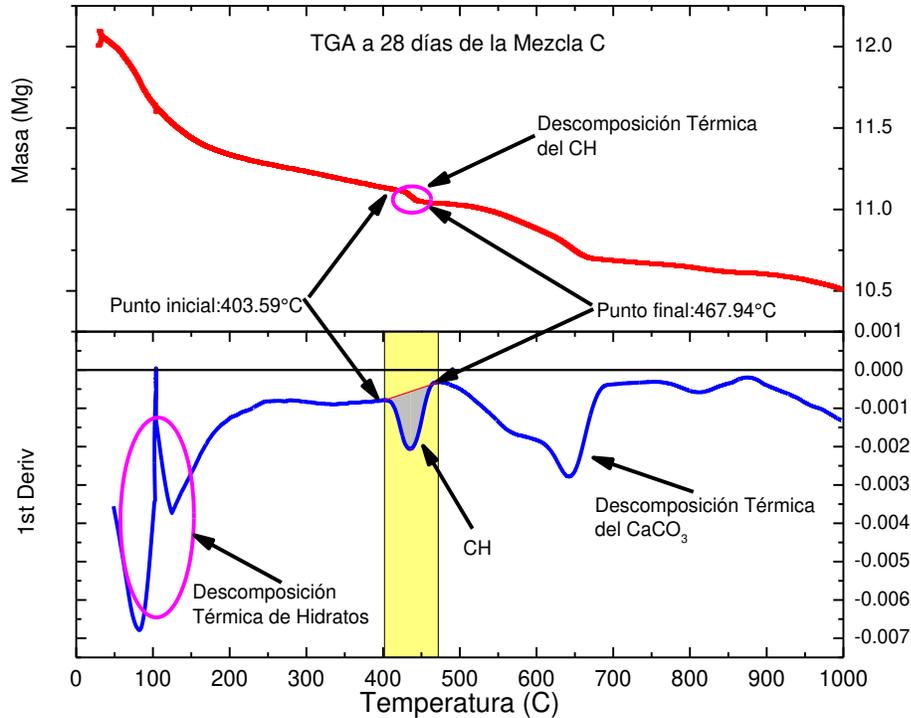


Fig.6.- 48 Análisis Termogravimétrico de la Mezcla C a 28 días.

A la Pasta de la M-C a los 90 días se le realizó el TGA, para dicho análisis se usó una muestra de pasta ( $M_{\text{muestra}}$ )= 12.14mg. Como se muestra en la Fig.6-47, la descomposición del CH inició a la temperatura de 409.97° y terminó en la temperatura de 459.51°C, obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{H_2OCH}$ )=0.105 mg y la masa de la muestra  $m_{1000^\circ C}$ =10.56mg.

En la tabla.6.25 se muestra los resultados obtenidos del análisis de los TGA realizados a la pasta de la mezcla M-C, la cantidad de CH por gramo de cemento fue de 0.125 gr/gr de cemento a 28 días y se redujo a 0.081 gr/gr de cemento a 90 días. Esto equivale a una reducción del 36% en la cantidad de CH de 28 a 90 días; por lo tanto, los materiales cementantes suplementarios (MCS), PVB-1 y PVB-2 consumieron una cantidad de CH de 0.043 gr/ gr de MCS en este periodo de tiempo.

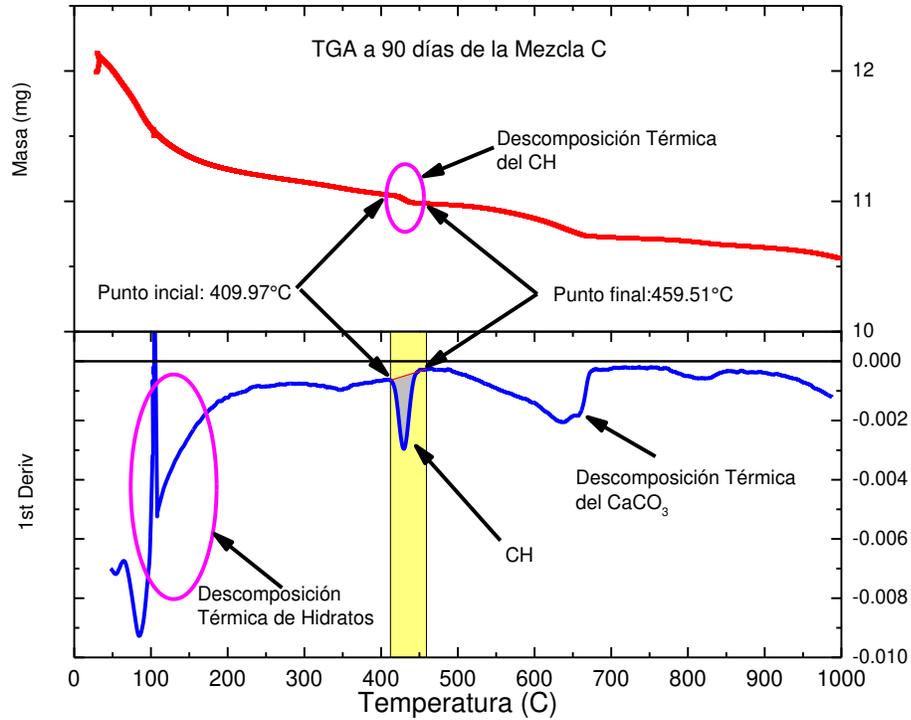


Fig.6.- 49 Análisis Termogravimétrico de la Mezcla C a 90 días.

Tabla.6. 25 Análisis de los Resultados de los TGA a 28 y 90 días de la Pasta de la mezcla M-C

EDAD (día)	M <sub>H<sub>2</sub>OCH</sub> (mg)	M <sub>CH</sub> (mg)	M <sub>1000°C</sub> (mg)	M <sub>Cemento</sub> (mg)	M <sub>PVB-1</sub> (mg)	M <sub>PVB-2</sub> (mg)	M <sub>totalCM</sub> (mg)	Cantidad de CH (gr/gr Cemento)	Consumo CH (gr/ gr MCS)
28	0.162	0.665	10.51	5.31	4.75	0.73	10.80	0.125	0.043
90	0.105	0.431	10.56	5.34	4.78	0.74	10.85	0.081	

Se realizó una pasta de cemento de una relación a/c= 0.25 ya que es la relación a/c usada en la mezcla de referencia; a los 28 días se le realizó el análisis de TGA con una muestra de pasta ( $M_{muestra}$ )= 11.85mg. Como se muestra en la Fig.6-50, la descomposición del CH inició a la temperatura de 402.26° y terminó en la temperatura de 473.04°C, obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{H_2OCH}$ )=0.275 mg y la masa de la muestra  $m_{1000°C}$ =8.55mg

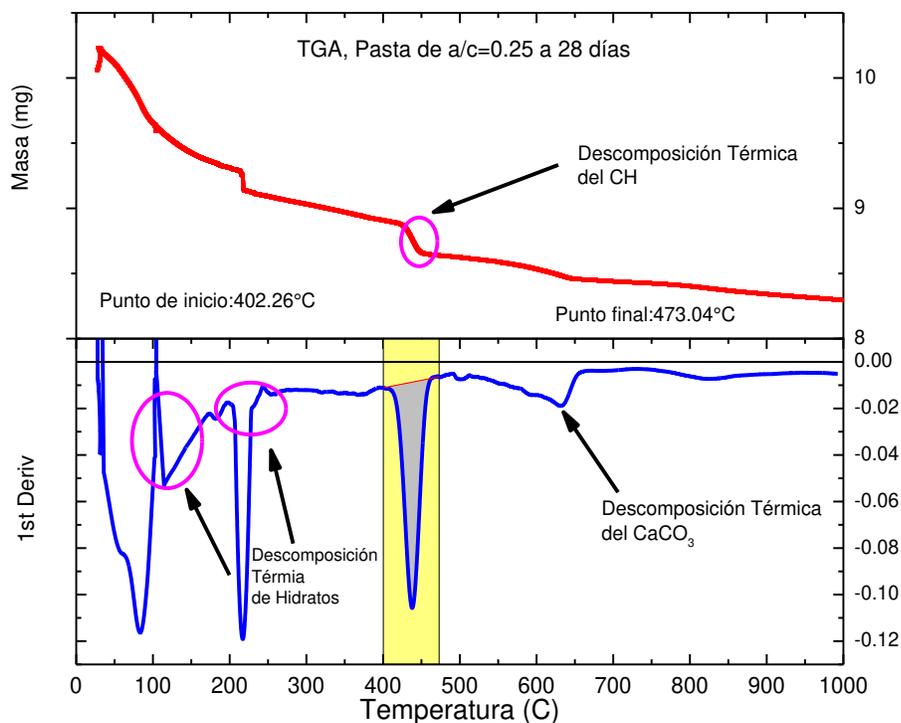


Fig.6.- 50 Análisis Termogravimétrico a 28 días de la Pasta de Cemento con una a/c=0.25.

A la Pasta de a/c=0.25 a los 90 días se le realizó el TGA, para dicho análisis se usó una muestra de pasta ( $M_{muestra}$ )= 11.85mg. Como se muestra en la Fig.6-51, la descomposición del CH inició a la temperatura de 405.88° y terminó en la temperatura de 479.39°C, obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{H_2OCH}$ )=0.315 mg y la masa de la muestra  $m_{1000^\circ C}$ =9.67mg.

En la tabla.6.26 se muestra los resultados obtenidos del análisis de los TGA realizados a la pasta de cemento con una a/c=0.25, la cantidad de CH fue de 0.132 gr/gr de cemento a 28 días y se incrementó a 0.134 gr/gr de cemento a 90 días. Esto equivale un incremento del 1.5% en la cantidad de CH de 28 a 90 días; por lo que se considera que la cantidad máxima producida es alcanza a los 28 días.

La M-R presenta a los 90 días una cantidad de 0.109 gramos de CH por gramo de cemento, resultando como la mezcla con mayor contenido de CH sin reaccionar con el los MSC. Lo interesante que esta mezcla fue la que dio mayor resistencia a la compresión. Con los resultados obtenidos de la M-A a 90 días, es la mezcla que tiene menor cantidad de CH por gramo de cemento, por lo tanto, exhibe la mayor cantidad de CH consumido por gramo de MCS. Este resultado se le puede atribuir a esta mezcla se le reemplazo el 40% del cemento

y se mantuvo la cantidad de microsilíce, lo cual favoreció a que básicamente se consumirá todo el CH disponible. En los resultados del coeficiente de migración la M-A es la que tiene el mejor desempeño o mayor Durabilidad.

En los resultados obtenidos del TGA de la pasta de M-B, donde solo se reemplazó la cantidad la cantidad de microsilíce por PVB-2, se ve reflejado que después de los 28 días solo se consume 0.008 gramos por MCS, cual indica que el Polvo de vidrio de borosilicato no consumido prácticamente nada de CH disponible dentro de la pasta. La M-C, compara con la M-A, consumió solo el 58% de CH.

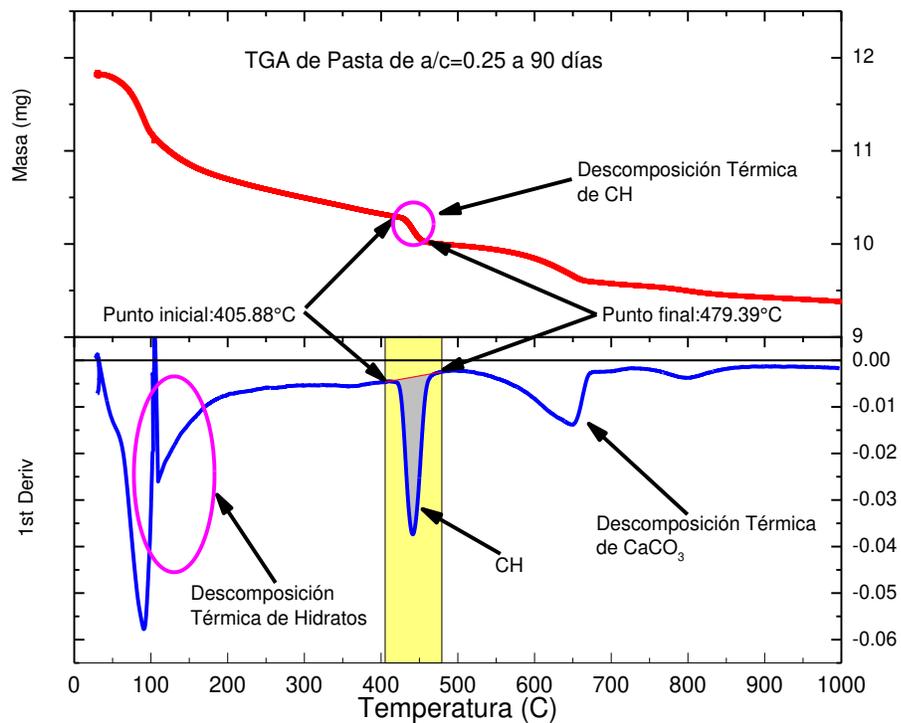


Fig.6.- 51 Análisis Termogravimétrico a 90 días de la Pasta de Cemento con una relación a/c=0.25.

Tabla.6. 26 Análisis de los Resultados de los TGA a 28 y 90 días la Pasta de Cemento con una relación a/c=0.25.

EDAD (día)	M <sub>H<sub>2</sub>OCH</sub> (mg)	M <sub>CH</sub> (mg)	M <sub>1000°C</sub> (mg)	M <sub>Cemento</sub> (mg)	Cantidad de CH (gr/gr Cemento)
28	0.275	1.132	8.2963	8.55	0.132
90	0.315	1.294	9.3821	9.67	0.134

Se realizó una pasta de cemento con una  $a/c=0.45$ , fue analizada por el análisis del TGA a la edad de 90 días donde se usó una muestra de pasta ( $M_{\text{muestra}}$ )= 10.49mg. Como se muestra en la Fig.6-52, la descomposición del CH inició a la temperatura de  $404.4^\circ$  y terminó en la temperatura de  $477.17^\circ\text{C}$ , obteniéndose una cantidad de agua ligada al CH ( $m_{\text{H}_2\text{OCH}}$ )=0.315 mg y la masa de la muestra  $m_{1000^\circ\text{C}}=9.67\text{mg}$ .

En la tabla.6.27 se muestra los resultados obtenidos del análisis del TGA realizado a la pasta de cemento con una  $a/c=0.45$ ; la cantidad de CH producida por el cemento a los 90 días fue de 0.212 gr/gr.

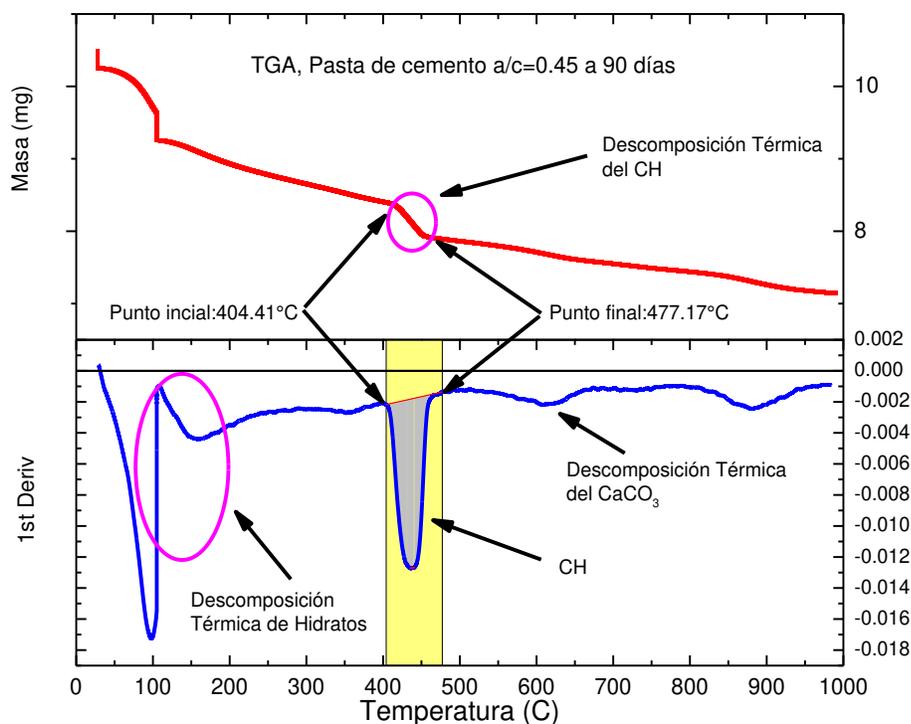


Fig.6.- 52 Análisis Termogravimétrico de la Pasta del Cemento a 90 días.

Tabla.6. 27 Análisis de los Resultados del TGA 90 días de la Pasta de cemento  $a/c=0.45$ .

EDAD (día)	$M_{\text{H}_2\text{OCH}}$ (mg)	$M_{\text{CH}}$ (mg)	$M_{1000^\circ\text{C}}$ (mg)	$M_{\text{Cemento}}$ (mg)	Cantidad de CH (gr/gr Cemento)
90	0.3794	1.560	7.142	7.36	0.212

Con los resultados obtenidos de las pastas de solo cemento a la edad de 90 días, cuando se tiene con una relación  $a/c=0.25$  se produce una cantidad de  $\text{CH}=0.134$  gr/gr de cemento y a

con una relación  $a/c=0.45$  se genera una cantidad de 0.212 gr/cemento. El grado de hidratación (GHC) de la pasta con una relación  $a/c=0.25$  es igual:

$$GHC = \left( \frac{0.134}{0.212} \right) * 100 = 63\%$$

Esto se comprueba que al usar una cantidad de  $a/c=0.25$ , aproximadamente del 60% del cemento es el que se hidrata completamente. Con este resultado se puede calcular la cantidad de microsilíce mínima que en teoría se necesita para que se consuma todo el CH producido para una relación  $a/c=0.25$ . Como se mencionó en secciones anteriores, la microsilíce consume 1.7 gr de CH por gramo de microsilíce. Se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Microsilíce Teorico} = \left( \frac{0.134}{1.7} \right) * 100 = 7.9\%$$

El contenido mínimo de microsilíce necesario cuando se usan una relación  $a/c > 0.42$  sería de 12.5%.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

Con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación se llegaron a las siguientes conclusiones.

1. Con los resultados obtenidos de las moliendas, se puede concluir para obtener el mayor blaine, aporta el mejor desempeño son los cilindros de alúmina. El incrementar el tiempo de molienda no necesariamente incrementara el Blaine. Mediante el uso de molino de vidrio energía y la carga de bolas o cilindros adecuada se pueden obtener áreas específicas superiores a lo cementos comerciales.
2. Se comprobó que el polvo de vidrio de borosilicato con un el área superficial y tamaño de partícula adecuado puede ser utilizado como material cementante suplementario, es un material que consume el hidróxido de calcio a edades tempranas.
3. Usar agregado calizo en CUAD con un consumo de cemento H de 800 kg/cm<sup>2</sup>, con un 8% de microsilíce y una  $a/c=0.25$ , aunque se disminuya el tamaño del agregado máximo como se recomienda en el diseño de CUAD, no fue posible alcanzar la ultra alta resistencia a la compresión.

4. Al utilizar polvo de vidrio de borosilicato como reemplazo del agregado fino (Arena caliza) para mejorar la densidad de empaquetamiento, es posible alcanzar resistencias entre 150 a 201 MPa.
5. Mediante el uso del polvo de vidrio de borosilicato como filler y/o material cementante suplementario, es posible desarrollar CUAD con una resistencia a la penetración de cloruros “despreciable”.
6. De las pastas de las mezclas, se puede concluir que en las pastas donde se tuvo la mayor resistencia a la compresión fue donde se tenía mayor cantidad de hidróxido de calcio, caso contrario a las mezclas que tuvieron el mejor desempeño en los indicadores de Durabilidad.

### Recomendaciones

1. Realizar reemplazos menores al 40%, para determinar cual es la cantidad máximo que se requiere para mantener la resistencia a compresión.
2. Con la finalidad de determinar el porque de la sinergia que se tiene al combinar polvo de vidrio de borosilicato y microsíllice, realizar cuantificaciones de fases mediante SEM y retro dispersados.
3. Realizar reemplazos parciales de la microsíllice para determinar cual es la cantidad optima en la cual la resistencia a compresión se mantiene, y posiblemente los indicadores de durabilidad si magnifique.
4. Usar más de dos tamaños de polvo de vidrio de Borosilicato como material cementante suplementario.

### 8. Bibliografía

- [1] P. Richard and M. H. Cheyrezy, “Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength,” pp. 507–518.
- [2] U. High and P. Concrete, *Ultra High Performance Concrete ( UHPC ) Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, no. 3. 2004.
- [3] T. Note, *Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections*. .
- [4] C. Strength, “Optimizing Ultra-High- Performance Fiber- Reinforced Concrete Mixtures with twisted fibers exhibit record performance under tensile loading,” no. september, pp. 35–41, 2011.
- [5] K. Wille and A. E. Naaman, “Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete : achieving strength and ductility without heat curing,” pp. 309–324, 2012.
- [6] J. Dils, V. Boel, and G. De Schutter, “Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 455–463, 2013.

- [7] M. Courtial, M.-N. de Noirfontaine, F. Dunstetter, M. Signes-Frehel, P. Mounanga, K. Cherkaoui, and a. Khelidj, "Effect of polycarboxylate and crushed quartz in UHPC: Microstructural investigation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 699–705, 2013.
- [8] A. Nowak-Michta, "Influence of Superplasticizer on Porosity Structures in Hardened Concretes," *Procedia Eng.*, vol. 108, pp. 262–269, 2015.
- [9] Pablo Portugal Barriga, *Tecnologia del concreto de alto desempeño*.
- [10] S. Aydin, H. Yazici, M. Y. Yardimci, and H. Yi, "Effect of Aggregate Type on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete," no. 107, pp. 441–449, 2011.
- [11] "Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete," no. August, 2006.
- [12] C. Schröfl, M. Gruber, and J. Plank, "Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC)," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 11, pp. 1401–1408, 2012.
- [13] "superplastificantes y silica fume.pdf."
- [14] T. C. Hansen, "Physical structure of hardened cement paste . A classical approach."
- [15] "THE POZZOLANIC REACTION OF SILICA FUME Ole M. Jensen 1 1 Technical University of Denmark, Brovej, Bygning 118, 2800 Kgs. Lyngby Denmark."
- [16] E.J. Sellevold, "Silica Fume -Cement Pastes: Hydration and Pore Structure," 1982.
- [17] C. Shi and K. Zheng, "A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete," vol. 52, pp. 234–247, 2007.
- [18] L. M. Federico and S. E. Chidiac, "Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 8, pp. 606–610, 2009.
- [19] M. Ruth and P. D. Anno, "An industrial ecology of the US glass industry," vol. 23, no. 3, pp. 109–124, 1997.
- [20] H. Du and K. H. Tan, "Use of waste glass as sand in mortar: Part II - Alkali-silica reaction and mitigation methods," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 109–117, 2013.
- [21] "glass concrete ACI.pdf."
- [22] H. Du and K. H. Tan, "Use of waste glass as sand in mortar: Part I - Fresh, mechanical and durability properties," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 35, no. 1, pp. 109–117, 2013.
- [23] F. Y. Wei, X. H. Lan, L. V Yinong, and Z. Z. Xu, "Effect of pozzolanic reaction products on alkali-silica reaction," *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.*, vol. 21, no. 3, pp. 168–171, 2006.
- [24] K. Afshinnia and P. R. Rangaraju, "Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali-silica reaction in mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 257–267, 2015.
- [25] A. M. Rashad, "Recycled waste glass as fine aggregate replacement in cementitious materials based on Portland cement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 340–357, 2014.
- [26] M. C. Bignozzi, a. Saccani, L. Barbieri, and I. Lancellotti, "Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 45–52, 2015.
- [27] K. Mirzahosseini, Mohammadreza, Riding, "Effect of Combined Glass Particules on Hydration in Cementitious Systems," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, no. January, pp. 864–870, 2014.
- [28] M. Mirzahosseini and K. A. Riding, "Cement & Concrete Composites Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material ( SCM )," vol. 56, pp. 95–105, 2015.
- [29] a. Khmiri, M. Chaabouni, and B. Samet, "Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 74–80, 2013.

- [30] R. Idir, M. Cyr, and a Tagnit-Hamou, "Use of Waste Glass As Powder and Aggregate in Cement-Based Materials," *SBEIDCO- 1st Int. Conf. Sustain. Built Environ. Infrastructures Dev. Counteies*, pp. 109–116, 2009.
- [31] M. Mirzahosseini and K. a. Riding, "Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM)," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 56, pp. 95–105, 2015.
- [32] H. Saeed, "Experimental investigation on the chemical and physical properties of activated glass powder pastes," vol. 25, no. 4, pp. 1–10, 2012.
- [33] H. Maraghechi, M. Maraghechi, F. Rajabipour, and C. G. Pantano, "Pozzolanic reactivity of recycled glass powder at elevated temperatures: Reaction stoichiometry, reaction products and effect of alkali activation," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 105–114, 2014.
- [34] M. T. Tognonvi, A. Zidol, P.-C. Aïtcin, and A. Tagnit-Hamou, "Aging of glass powder surface," *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 427, pp. 175–183, 2015.
- [35] M. Tohoue, A. Zidol, P. Aïtcin, and A. Tagnit-hamou, "Aging of glass powder surface," vol. 427, pp. 175–183, 2015.
- [36] U. a. Ebead, H. A. Saeed, K. W. Neale, and A. Tagnit-Hamou, "Stoichiometric study of activated glass powder hydration," *Adv. Cem. Res.*, vol. 24, no. 2, pp. 91–101, 2012.
- [37] V. Vaitkevičius, E. Šerelis, and H. Hilbig, "The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 102–109, 2014.
- [38] S. Mercado-Depierre, F. Angeli, F. Frizon, and S. Gin, "Antagonist effects of calcium on borosilicate glass alteration," *J. Nucl. Mater.*, vol. 441, no. 1–3, pp. 402–410, 2013.
- [39] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, and H. Wang, "Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders," *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 5, pp. 987–993, 2005.
- [40] S. Liu and S. Wang, "Effect of glass powder on microstructure of cement pastes," vol. 27, no. 5, 2015.
- [41] P. Chemistry, "Performance of waste glass powder ( WGP ) supplementary cementitious material ( SCM ) – Workability and compressive strength," 2013.
- [42] H. Du and K. H. Tan, "Transport Properties of Concrete with Glass Powder as Supplementary Cementitious Material," *ACI Mater. J.*, vol. 112, no. 3, pp. 429–438, 2015.
- [43] J. Pagán-ortiz, "Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community," no. June, 2013.
- [44] N. A. Soliman, A. F. Omran, and A. Tagnit-hamou, "Laboratory Characterization and Field Application of Novel Ultra-High-Performance Glass Concrete," no. 113, 2016.
- [45] A. T.-H. (University of Sherbrooke), "Green Ultra - High - Performance Glass Concrete," vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2016.