

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



**EVALUACIÓN DEL USO DE UN SUBPRODUCTO INDUSTRIAL A BASE DE VIDRIOS
DE BOROSILICATO COMO FILLER PARA CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES**

POR

ING. FRANCISCO DAVID ANGUIANO PÉREZ

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

NOVIEMBRE, 2015

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



**EVALUACIÓN DEL USO DE UN SUBPRODUCTO INDUSTRIAL A BASE DE VIDRIOS
DE BOROSILICATO COMO FILLER PARA CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES**

**POR
ING. FRANCISCO DAVID ANGUIANO PÉREZ**

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

**DIRECTOR DE TESIS
DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. PEDRO LEOBARDO VÁLDEZ TAMEZ
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**ASESOR EXTERNO
DR. FRANCISCO VÁZQUEZ**

NOVIEMBRE, 2015

CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	6
1.1	Generalidades	6
1.2	Importancia del Proyecto	7
1.3	Alcance del Proyecto	7
2	CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES	8
2.1	Problemática en la Construcción con Concreto de Cemento Portland ..	8
2.2	Uso de polvos minerales en el concreto:.....	10
2.2.1	Utilización como filler.....	10
2.2.2	Utilización como cementante hidráulico	11
2.2.3	Utilización como material puzolánico	11
2.3	Aprovechamiento de subproductos de vidrio en la construcción con concreto.....	11
2.3.1	Subproductos industriales en México: situación actual	11
2.3.2	Reciclaje de subproductos de vidrio.....	13
2.3.3	Subproductos de vidrio para la producción de concreto.....	15
2.4	Efecto de la inclusión de partículas de vidrio en el concreto.....	16
2.4.1	Reacciones por la inclusión de partículas de vidrio en el concreto	17
2.4.2	Efecto de la inclusión del vidrio en las propiedades del concreto .	23
2.5	Incorporación de vidrio en mezclas de concreto auto-compactable	24
2.5.1	Concreto Auto-Compactable: Orígenes y Consideraciones Generales.....	24
2.5.2	Requerimientos de Desempeño del Concreto Autocompactable ..	26
2.5.3	Influencia de las inclusión de vidrio en las propiedades de concreto autocompactable.....	28

3	CAPÍTULO 3: OBJETIVOS	29
3.1	OBJETIVO GENERAL	29
3.2	OBJETIVOS PARTICULARES	30
4	CAPÍTULO 4: HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN	30
4.1	HIPÓTESIS.....	30
4.2	JUSTIFICACIÓN.....	31
5	CAPÍTULO 5: MATERIALES Y CARACTERIZACIÓN	32
5.1	DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES:	32
5.1.1	Cemento Portland	32
5.1.2	Vidrio de Borosilicatos.....	33
5.1.3	Agregados.....	34
5.1.4	Aditivos químicos	35
5.2	Caracterización de Materiales	36
5.2.1	Cemento Portland	36
5.2.2	Vidrio de Borosilicatos.....	38
5.2.3	Agregados.....	39
5.2.4	Aditivo químico.....	40
6	CAPÍTULO 6: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	41
6.1	DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA ÓPTIMO PARA SU USO EN MEZCLAS BASE CEMENTO PORTLAND	41
6.1.1	Tratamiento preliminar del vidrio de BS para su uso.....	41
6.1.2	Expansiones debido a la RAS y resistencia a la compresión de morteros con distintos tamaños máximos de vidrio de BS:	44
6.1.3	Caracterización microestructural mediante SEM y EDS	45

6.2	DEFINICIÓN DE LAS PROPORCIONES ÓPTIMAS PARA LA MEZCLA DE CONCRETO DE REFERENCIA:	46
6.3	MATRIZ EXPERIMENTAL:.....	48
6.4	PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO:.....	50
6.4.1	Extensibilidad, T_{50} , e Índice de Estabilidad Visual.....	50
6.4.2	Habilidad de Paso	52
6.4.3	Segregación estática.....	53
6.4.4	Densidad y Contenido de Aire (Método Gravimétrico)	53
6.4.5	Temperatura en Estado Fresco.....	53
6.4.6	Tiempos de Fraguado	54
6.5	PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO:.....	55
6.5.1	Resistencia a Compresión	55
6.5.2	Módulo de Elasticidad	56
6.5.3	Resistividad Eléctrica Superficial.....	57
6.5.4	Coeficiente de Migración de Cloruros	58
7	CAPÍTULO 7: RESULTADOS Y DISCUSION	58
7.1	CARACTERIZACION DE MATERIALES.....	58
7.1.1	Cemento y Vidrio de Borosilicatos.....	58
7.1.2	Agregados.....	64
7.1.3	Aditivo reductor de agua de alto rango.....	66
7.2	DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA ÓPTIMO PARA SU USO EN MEZCLAS BASE CEMENTO PORTLAND.....	66
7.2.1	Tratamiento Preliminar del vidrio de BS	66
7.2.2	Expansiones potenciales por RAS	67
7.2.3	Efecto de la RAS en la resistencia a compresión de morteros.....	68

7.2.4	Caracterización microestructural mediante SEM y EDS	70
7.3	MEZCLA DE CAC DE REFERENCIA.....	73
7.3.1	Contenido de cementante y contenido total de polvos	73
7.3.2	Propiedades de Autocompactabilidad	73
7.4	MEZCLAS DE PRUEBA	74
7.4.1	Propiedades en Estado Fresco	74
7.4.2	Propiedades en Estado Endurecido	77
8	CAPITULO 8: CONCLUSIONES.....	87
8.1	DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA ÓPTIMO PARA SU USO EN MEZCLAS BASE CEMENTO PORTLAND	87
8.2	MEZCLAS DE PRUEBA PARA EL PROYECTO	88
8.2.1	Propiedades en Estado Fresco	88
8.2.2	Propiedades en Estado Endurecido	88
9	CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

En la actualidad las tecnologías en el diseño y la producción de concreto ha permitido el desarrollo de diversas categorías de Concretos de Alto Desempeño (CAD), para satisfacer numerosas demandas de la industria de la construcción con concreto actual.

El Concreto Autocompactable (CAC) es una clase de CAD que se caracteriza por una alta fluidez en estado fresco, capaz de consolidarse por su propio peso y cubrir en su totalidad el encofrado a través de secciones esbeltas y configuraciones de acero de refuerzo muy congestionadas, manteniendo su homogeneidad y sin presentar segregación.

Además de las ventajas y desventajas que conlleva el uso del CAC, su diseño involucra las siguientes consideraciones: menores contenidos y tamaño máximo del agregado grueso, uso de aditivos para proveerle fluidez y estabilidad a la mezcla, y mayores contenidos de finos (partículas menores que 150 μm).

El uso de mayores contenidos de finos para la producción de CAC puede involucrar, entre otros problemas, un mayor impacto ambiental, si al satisfacer la mayor demanda de finos únicamente se hace uso de Cemento Portland (CP). Para evitar lo anterior, en el CAC es común introducir materiales finamente molidos, tales como puzolanas, polvo de caliza, subproductos industriales, entre otros.

En numerosos trabajos, para satisfacer la necesidad de finos con el fin de proveer la estabilidad reológica del concreto, así como disminuir los consumos de cemento, se ha evaluado el uso de vidrio finamente molido en el CAC, como sustitución del CP, para satisfacer la demanda de materiales finos en el cemento; sin embargo, se ha observado que al estar compuesto por sílice amorfa, presenta potencial de causar daños al concreto por efecto de expansiones producto de la reacción álcali-sílice (RAS), principalmente cuando el vidrio se utiliza con tamaños de partícula en el rango de los agregados, por lo

cual es necesario su pulverización. Al incluirlo al concreto finalmente molido, se ha observado que tiene un tamaño máximo de partícula a partir del cual no se presenta una expansión dañina producto de la RAS, y el material presenta propiedades puzolánicas.

1.2 Importancia del Proyecto

Para el reciclaje del vidrio es necesaria una trituración primaria del material y una posterior fusión del material a altas temperaturas, y el producto final puede no tener las mismas calidades que el material original.

Una alternativa de reciclaje de los subproductos de vidrio es en la producción de concreto a base de CP, donde se ha tenido éxito al utilizarlo como sustitución del agregado fino y/o el material cementante; y si bien existe una gran cantidad de estudios al respecto, en su mayoría hacen referencia al uso de vidrios sódico-cálcicos, por ser éstos los más comunes y de mayor disponibilidad.

En el presente trabajo se evalúa el efecto del aprovechamiento de subproductos industriales a base de vidrios de Borosilicatos (BS), los cuales se han reportado en general, más propensos a presentar la expansión dañina producto de la RAS, y para los cuales es necesario utilizar menores tamaños de partícula a fin de evitar la expansión dañina producto de la RAS.

1.3 Alcance del Proyecto

En el presente estudio se evalúa el efecto del uso de un subproducto de la industria local a base de vidrios de BS como filler para mezclas de CAC a base de CP.

Con el fin de descartar la presencia de expansiones dañinas producto de la RAS, una primera etapa del proyecto tuvo como objetivo realizar mediciones de la expansión producto de la RAS, por medio de pruebas en morteros en

condiciones que aceleren la ocurrencia de la RAS. En esta etapa se pudo determinar el tamaño máximo de partícula de vidrio de BS que es posible utilizar sin que se tenga riesgo de que se presenten expansiones dañinas producto de la RAS.

Una vez determinado el tamaño de partícula a partir del cual no existía riesgo potencial de daño producto de la RAS, la siguiente etapa del proyecto consistió en realizar sustituciones de CP por polvo de vidrio de BS, en distintos contenidos y con distintos tiempos de pulverización, conformando así la matriz experimental de mezclas. A cada una de estas mezclas se les evaluaron sus propiedades en estado fresco, incluyendo mediciones de su autocompactabilidad; y en estado endurecido, con mediciones de su desempeño mecánico así como de indicadores de su durabilidad.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

2.1 Problemática en la Construcción con Concreto de Cemento Portland

Como es bien sabido, el concreto a base de cemento Portland es el material de construcción más utilizado en el mundo por su versatilidad, durabilidad y economía. En el mundo, el consumo actual de concreto es de alrededor de 1 tonelada al año/per cápita. Debido a su gran consumo, aún pequeñas reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a sus procesos pueden tener un efecto significativo en el medio ambiente [1].

De los materiales utilizados para la producción de concreto, el mayor contribuyente con las emisiones de gases de efecto invernadero es el cemento Portland, con respecto a los demás materiales. Esto es porque la producción del cemento Portland requiere grandes cantidades de energía para la calcinación de la materia prima, así como combustibles necesarios para mantener el Horno de Clinker a las temperaturas requeridas para la producción de las fases presentes en el cemento; lo anterior conlleva a que la producción

de 1 tonelada de cemento Portland libera aproximadamente 1 tonelada de CO₂ a la atmosfera [2]. Como se muestra en la Fig. 1 [3], a nivel global, el cemento Portland por sí solo contribuye con alrededor del 5% de las emisiones totales de CO₂, atribuibles a actividades antropogénicas.

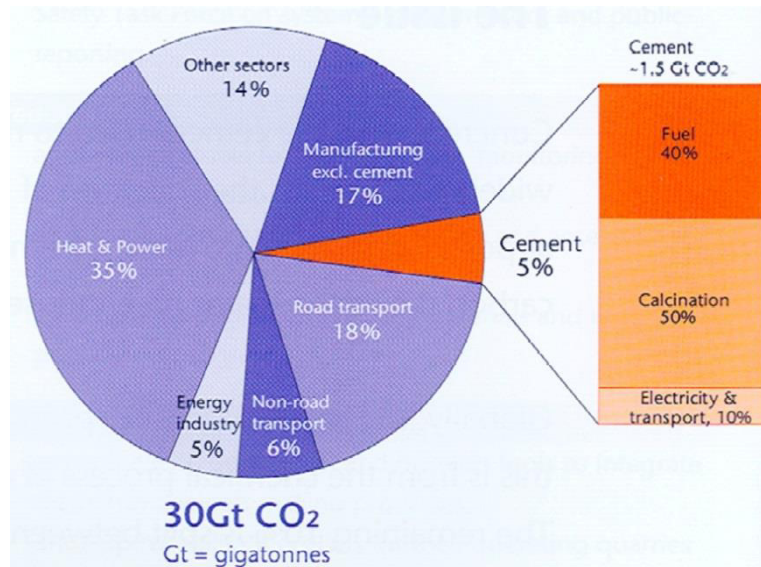


Fig. 1. Producción Global de CO₂. [3]

El problema anterior se acentúa con el incremento en el desarrollo de obras de infraestructura; por ejemplo, a nivel mundial, la producción de cemento se incrementó de 597 MM Ton en 1970, a 2,284 MM Ton en el 2005, y 4,180 MM Ton para 2014 [4][5].

A nivel nacional, en 2012 se tuvo una producción de 36 MM Ton (1.6% de la producción global). De acuerdo a estudios, para la producción de cemento Portland, en México se consumen 118 kWh de energía eléctrica y 4.20 GJ de energía térmica para producir una tonelada de cemento Portland [4].

Para reducir el impacto ambiental debido a la producción de concreto, a la par del desarrollo de tecnologías y materiales, se han tomado medidas basadas en los siguientes enfoques [6]:

- Reducir los consumos de cemento Portland necesarios para la producción de concreto.
- Utilizar polvos minerales en sustitución de cemento Portland.

- Producir concretos con mayor durabilidad, independientemente del tipo de ambiente en el que se encuentre.

2.2 Uso de polvos minerales en el concreto:

En las mezclas de concreto es común el utilizar materiales finamente molidos, como polvos, con tamaños de partícula menores a 125 μm . [7], en sustitución del clinker de cemento Portland, o del cemento Portland como tal. Estos polvos pueden ser de origen natural, como cenizas volcánicas, o artificial, como las cenizas volantes de carbón mineral, los cuales están disponibles a menudo como subproductos de algún otro proceso industrial [8].

Actualmente existe una gran área de oportunidad para sustituir al cemento Portland por polvos de subproductos industriales, ya que esto le permite a la industria del concreto utilizar materiales que de otra forma serían vertidos en el terreno como desechos. Por otro lado, su utilización reduce el consumo de cemento portland por unidad de volumen de concreto, lo que conlleva a una reducción en la energía, y en el consumo de materias primas, así como una reducción en las emisiones de CO_2 asociadas con la producción del cemento Portland [9].

Dependiendo de su tamaño y composición química, al adicionarse en mezclas base cemento Portland éstos pueden utilizarse para tener una o varias de las siguientes funciones: como filler, como cementante hidráulico, o como material puzolánico.

2.2.1 Utilización como filler.

Este uso se le da a los polvos en general, independientemente de su composición química, y consiste en que las partículas de polvo finamente molidas sustituyen o complementan a una fracción de las partículas de cemento Portland en la pasta, mejorando el empaquetamiento y permitiendo conservar o mejorar sus propiedades reológicas, a la par que se reduce el impacto ambiental del concreto disminuyendo el consumo de cemento Portland.

Además de lo anterior, algunos polvos utilizados como filler pueden aumentar la durabilidad y la resistencia del concreto al actuar como centros de nucleación heterogénea, favoreciendo el desarrollo de productos hidratados en su periferia. Un ejemplo de este tipo de materiales, comúnmente utilizados como filler, es el caso de polvos de carbonato de calcio.

2.2.2 Utilización como cementante hidráulico

Este uso se les da a aquellos polvos que contienen calcio en su composición, los cuales en presencia de humedad tienen el potencial de cementar y generar silicatos cálcicos hidratados por sí solos. Algunos de ellos tienen una baja reactividad por lo que requieren alguna clase de activación alcalina. Las cenizas volantes clase C [10] y algunas clases de escorias de alto horno presentan este tipo de comportamiento.

2.2.3 Utilización como material puzolánico

Este uso se les da a materiales silíceo o silíceo aluminoso y consiste en que, cuando éstos polvos se encuentran finamente molidos y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar silicatos cálcicos hidratados, con una reacción que puede continuar por varios meses.

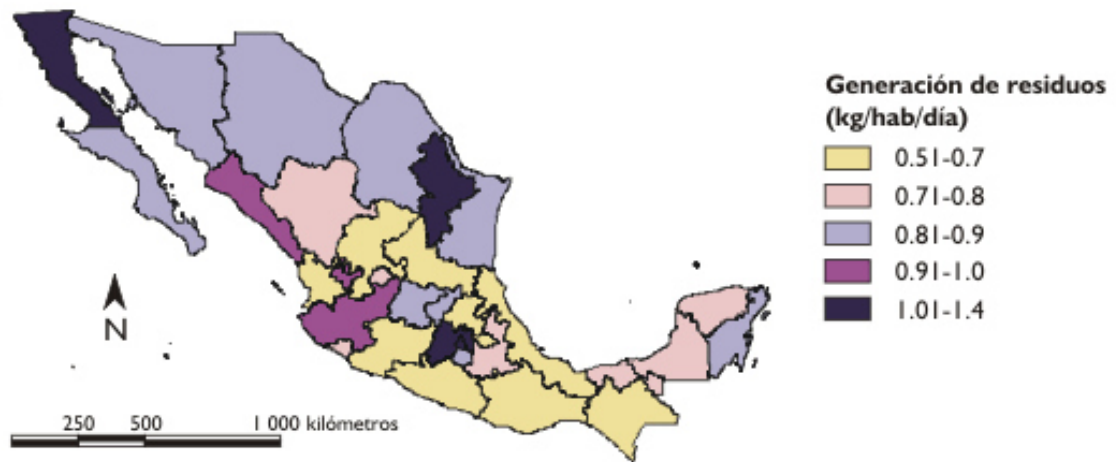
Actualmente existe una gran variedad de materiales ricos en sílice amorfa que presentan este comportamiento en mayor o menor medida. Las cenizas volantes clase F [10], polvos de vidrio reciclado, cenizas de cáscara de arroz, humo de sílice, entre otros, presentan este tipo de comportamiento [8].

2.3 Aprovechamiento de subproductos de vidrio en la construcción con concreto

2.3.1 Subproductos industriales en México: situación actual

Para cuantificar la cantidad de subproductos industriales con potencial de aprovechamiento en el concreto hidráulico, a continuación se presentarán algunas estadísticas. En México, de acuerdo con datos de la SEMARNAT, la generación de residuos sólidos municipales está en un continuo incremento, de

1992 a 2004, la generación total de residuos sólidos municipales se incrementó en un 57%, alcanzando 34.6 millones de toneladas anuales. Este incremento está relacionado con el crecimiento demográfico del país, pero también se debe a que la generación de residuos por habitante se ha incrementado [11]. En general, en las entidades federativas con un mayor desarrollo e industrialización, su población genera una mayor cantidad de residuos, como se observa en la Fig. 2.



Fuente:
Elaboración propia con datos de: Sedesol. Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. México. 2004.

Fig. 2. Generación de residuos sólidos municipales per cápita diaria por entidad federativa [11].

De los residuos sólidos previamente mencionados, a nivel nacional, poco más de la mitad de los residuos son de naturaleza orgánica, y el 49% restante corresponde a residuos inorgánicos, con las proporciones que se muestran en la Fig. 3. Del total de residuos sólidos urbanos, un 6% es vidrio, un material rico en sílice, y con potencial de reciclaje en distintas áreas.

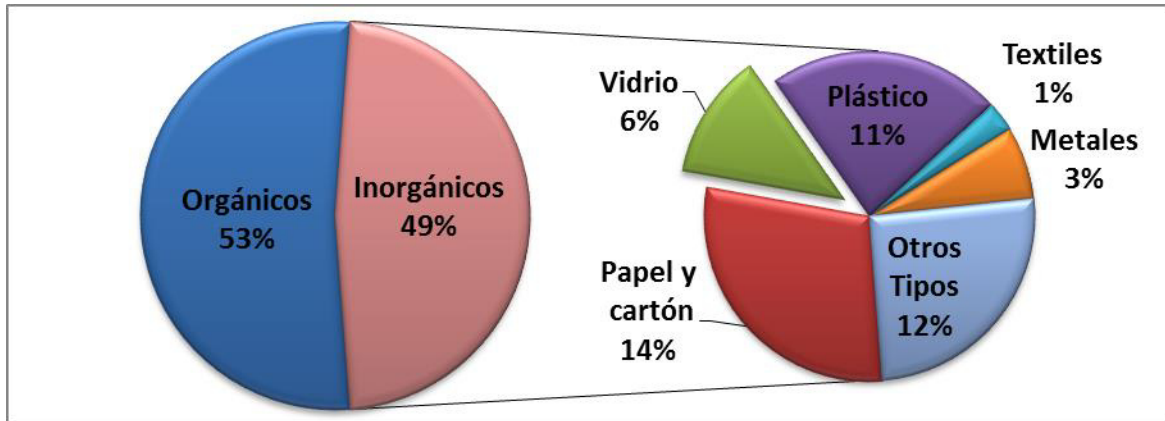


Fig. 3. Proporción de los residuos sólidos en México[11]

2.3.2 Reciclaje de subproductos de vidrio

Para producir vidrio, se requiere básicamente arena (SiO_2) y otros componentes, dependiendo de la clase de vidrio que se produzca y las propiedades que se pretendan obtener del mismo. La mezcla de vidrio y otros óxidos se calienta en un horno a una temperatura mayor a 1200°C , pudiendo llegar hasta alrededor de 1500°C o mayor para sílice pura. Posteriormente, el compuesto fundido se conforma mediante colado, inyección, extrusión, etcétera, para finalmente producir los elementos comerciales de vidrio [12]. El proceso típico de producción se muestra en la Fig. 4.

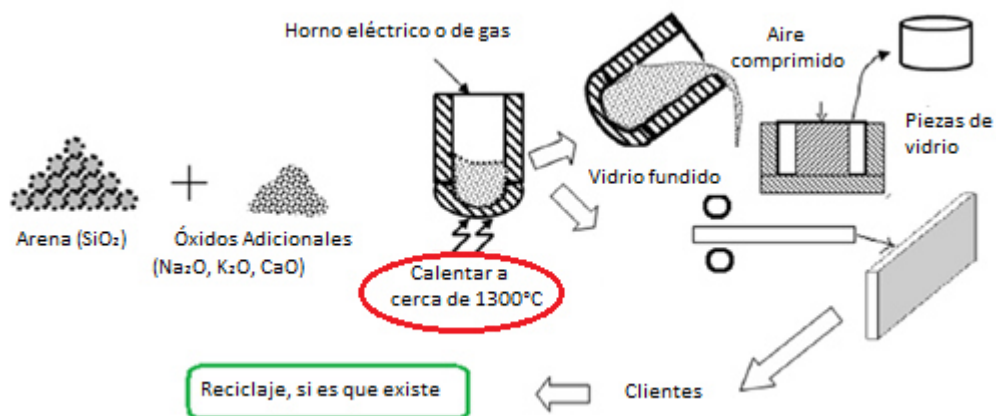


Fig. 4. Tecnología básica para la fabricación de vidrio [12].

Una vez que los productos de vidrio son desechados por los consumidores, es posible reciclarlos, como se muestra en la Fig. 5:

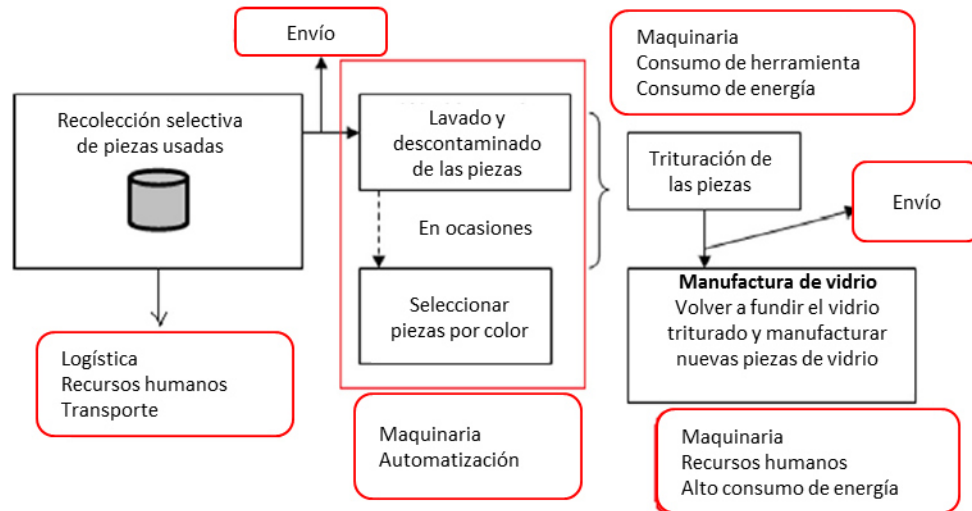


Fig. 5. Algoritmo típico para reciclaje de subproductos de vidrio [12].

Al contemplar los costos involucrados en estos procesos, es de esperarse que el costo de un producto reciclado pueda ser mayor que el costo para producir un material nuevo.

A pesar de que reciclar un producto a menudo requiere menos energía que producirlo a partir de materias primas, en muchos países en vías de desarrollo no se tiene la cultura de reciclaje entre su población ni la infraestructura o reglamentaciones que contemplen el reciclaje de los desechos. De acuerdo con datos de la OCDE, entre los 34 países que componen la Organización, para 2012 un promedio de 24% de los residuos producidos se someten a algún tipo de reciclaje; por otro lado, en México únicamente alrededor del 5% de los residuos se someten a un proceso de reciclaje [13].

En lo que respecta al vidrio a nivel nacional, de acuerdo con datos de la INEGI, en 2009 se recicló alrededor del 19 % del desecho de vidrio producido; para 2012, el porcentaje de vidrio de desecho que fue reciclado se estima entre 10% y 13%; el restante normalmente termina en sitios de disposición final como rellenos sanitarios [14].

En la industria actual existe el potencial de aprovechar los subproductos de un proceso determinado en otro sector productivo, con el beneficio de reducir los costos de reciclaje y/o consumos de energía al integrar el proceso de reciclaje a procesos de producción ya establecidos [12].

2.3.3 Subproductos de vidrio para la producción de concreto

Actualmente, a la par del desarrollo sustentable, se han analizado distintas alternativas de reciclaje y aprovechamiento de subproductos de vidrio en otros sectores productivos, aprovechando sus propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión, relacionadas con el transporte, y ópticas. Entre estas se considera el uso de vidrio para la producción de cemento Portland y concreto hidráulico [12][15].

De acuerdo a su origen, se pueden diferenciar algunas clases de vidrio de desecho, con distintas composiciones químicas, como se muestra a continuación:

Tabla 1 Clases de Vidrio según su Composición Química

Vidrios y usos	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	PbO	Otros
Vidrios sódico-cálcicos										
Contenedores	66-75	0.7-7		12-16	0.1-3	0.1-5	6-12			
Vidrio flotado	73-74			13.5-15	0.2	3.6-3.8	8.7-8.9			
Bombillas	73	1		17		4	5			
Vidrio templado	75	1.5		14			9.5			
Borosilicatos										
Aparatos químicos	81	2	13	4						
Farmacéuticos	72	6	11	7	1					
Sello de tungsteno	74	1	15	4						
Vidrios de plomo										
Tubos de TV a color	54	2		4	9				23	
Tubos de neón	63	1		8	6				22	
Partes electrónicas	56	2		4	9				29	
Pedernal óptico	32			1	2				65	
Cristales de bario										
Paneles de TV	65	2		7	9	2	2	2	2	10% SrO
Vidrio de bario	36	4	10						41	9% ZnO
Vidrios de aluminosilicatos										
Tubos de combustión	62	17	5	1		7	8			
Fibra de vidrio	64.5	24.5		0.5		10.5				
Sustratos de resistencia	57	16	4			7	10	6		

En trabajos previos se ha evaluado ampliamente el uso de subproductos industriales de vidrio para la producción de cemento y concreto [16]. Básicamente, es posible distinguir los siguientes usos posibles para los subproductos de vidrio y sus efectos:

- A. Como agregados en el concreto, con un efecto negativo en la trabajabilidad, resistencia mecánica y durabilidad a ciclos de hielo-deshielo. Esto es debido al agrietamiento por la reacción álcali-sílice producida por el agregado de vidrio en el concreto. El uso de materiales puzolánicos, tales como ceniza volante, sílica fume y metacaolín, ayuda a controlar el pH del concreto menor a 12, previniendo la reacción álcali-sílice del concreto.
- B. Como sustitución parcial de materia prima para la producción de cemento al incorporarse a la materia prima como fuente de sílice. Esto aumentará el contenido de álcalis (Na) en el cemento.
- C. Como polvo con actividad puzolánica y pueden utilizarse como sustitución parcial del cemento, aumentando su efectividad a mayor finura.

Independientemente de la clase de vidrio que se trate, es un material rico en sílice amorfa, por lo cual es factible el considerar su uso como material puzolánico en el concreto, para lo cual es necesario incorporarlo como un material fino. Como se puede observar en la Tabla 1, de las distintas clases de vidrio existentes, los vidrios de borosilicato son los más ricos en sílice, por lo cual se espera que tengan una mayor reactividad potencial puzolánica, considerando que el boro, en su estado elemental, no tiene efectos sobre la hidratación del cemento, al ser insoluble en agua, y la solubilidad del boro no se ve afectada por cambios en el pH o en la temperatura [17].

2.4 Efecto de la inclusión de partículas de vidrio en el concreto.

Al utilizar partículas grandes de vidrio en el concreto, se ha observado que producen expansiones dañinas en el concreto, dependiendo la reactividad de la naturaleza química del vidrio [16][18]. Para los subproductos de vidrio en el

concreto, la sílice disuelta en la mezcla se va a repolimerizar en silicatos de calcio hidratados (C-S-H), un gel expansivo producto de la RAS, o una combinación de ambos, dependiendo de varios factores, tales como el contenido de calcio, el tamaño de partícula y la alcalinidad [18].

2.4.1 Reacciones por la inclusión de partículas de vidrio en el concreto

Al utilizar un material como agregado para concreto, en teoría éste debe ser resistente, estable volumétricamente e inerte. Sin embargo, existen algunos agregados minerales, que por su composición química, en el ambiente alcalino del concreto, reaccionan químicamente, originando las reacciones álcali-agregado [8][19], que se clasifican de la siguiente manera:

- Reacción álcali-sílice (RAS).
- Reacción álcali-carbonato.

Al presentarse cualquiera de estas reacciones en el concreto, se manifiesta con agrietamientos severos y exudación distribuida a lo largo de la mayor parte del elemento. Dependiendo de su reactividad, puede presentarse en pocas semanas, o incluso años después, y una vez que se manifiestan los agrietamientos, el deterioro es progresivo y la integridad estructural del elemento queda comprometida.

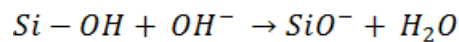
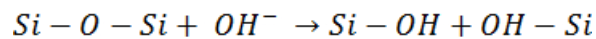
En el presente estudio se hará referencia a la RAS, por ser ésta la que tiene potencial de presentarse con el uso de partículas de vidrio en el concreto.

2.4.1.1 Reacción Álcali-Sílice en el Concreto: Orígenes y Mecanismo

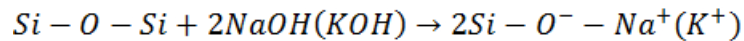
La RAS es un fenómeno que se produce cuando en el ambiente alcalino del concreto hidratado, la sílice amorfa presente en el agregado reacciona con los álcalis del cemento hidratado, generando como principal elemento de deterioro, un gel expansivo en presencia de humedad. Este fenómeno fue identificado en la década de los 40's por Stanton [20] quien lo denominó como "Reactividad álcali-sílice".

El mecanismo para la RAS se lleva a cabo de la siguiente manera [21][22][23]:

1. La sílice reactiva presente en el área superficial del agregado reacciona en una solución alcalina.
2. Los iones OH⁻ atacan al puente Si – O – Si mientras forman una red silícea pobremente cristalina.
3. Los enlaces silanol (Si – O – H) reemplazan a los enlaces siloxano rotos, como se muestra a continuación.



4. Los iones alcalinos con carga positiva, como Na⁺ o K⁺, balancean la carga negativa como se muestra a continuación.



Dentro del concreto, la RAS produce principalmente los dos siguientes productos, en forma de gel:

- Silicatos de calcio alcalinos hidratados no-expansivos [C-N(K)-S-H], los cuales no producen un deterioro, y su presencia no necesariamente indica RAS dañina en el concreto.
- Silicatos alcalinos hidratados expansivos [N(K)-S-H], los cuales absorben agua de su entorno e incrementan su volumen, causando agrietamientos internos. La expansión depende de la composición química del agregado y el contenido de álcalis disponibles en la pasta.

Básicamente, para que se presente la RAS en una estructura de concreto es necesario que se presenten en conjunto las siguientes condiciones:

1. Presencia de sílice reactiva en los agregados: la RAS es susceptible de presentarse cuando en el concreto se utilizan agregados ricos en sílice amorfa, como algunas rocas volcánicas o vidrios.
2. Disponibilidad de álcalis en la pasta: para la formación del gel RAS, se requiere de una fuente de álcalis (Na₂Oe), ya sea interna o externa al

concreto. Una vez agotados los álcalis disponibles en el concreto, la RAS se suspende.

3. Presencia de humedad: una vez formado el gel de RAS, para que se desarrollen expansiones destructivas en el concreto, es necesario la presencia de humedad, ya que el gel de RAS tiene una alta capacidad de absorción de humedad.

2.4.1.2 Medidas para controlar la RAS

Tomando en cuenta que la RAS, una vez que se presenta, es un proceso progresivo y severo cuya reparación es complicada, costosa y temporal, las investigaciones al respecto han estado enfocadas a prevenir su ocurrencia.

Considerando los factores necesarios para que se desarrolle el gel con potencial expansivo producto de la RAS, en numerosos trabajos previos se han analizado distintas alternativas de prevenir y mitigar el daño producido por la RAS, los cuales pueden sintetizarse de la siguiente manera [19][24][25][26][27]:

- Limitar el contenido de álcalis en el concreto: el contenido máximo de álcalis que puede contener el concreto sin presentar expansiones dañinas depende de los materiales utilizados. En este aspecto, es importante considerar los álcalis presentes en el agua de mezclado, el material cementante, los agregados, las adiciones, así como la presencia de fuentes externas de álcalis.
- Uso de aditivos con litio: el litio inhibe la expansión con la mayoría de los agregados reactivos, y su efectividad depende del agregado reactivo utilizado y la composición química del aditivo con litio.
- Uso de materiales cementantes suplementarios (MCS): en general, la mayoría de los MCS son efectivos para reducir la expansión producto de la RAS: en este aspecto es importante considerar que los MCS pueden contener en su composición álcalis adicionales. Además, materiales con potencial de presentar la RAS para grandes tamaños de partícula, al adicionarse finamente molidos en el concreto, reducen la expansión producto de la RAS de agregados reactivos.

Adicional a lo anterior, algunos estudios han analizado el uso de bajas relaciones agua/cementante (a/c), selladores superficiales, entre otros, con el fin de limitar la humedad disponible para la expansión del gel producto de la RAS.

Para la evaluación de la RAS, por ser un proceso que en la práctica se presenta después de años o décadas, en las pruebas de laboratorio se aceleran las condiciones para que se presente la RAS, ya sea incrementando la temperatura de curado, exponiendo a soluciones alcalinas, especificando granulometrías o contenidos de cementante, entre otras.

Lo anterior conlleva a que sea muy difícil el realizar con precisión modelos de vida útil cuando se utilizan materiales con potencial de presentar RAS, porque las condiciones de ensaye a menudo no representan las condiciones reales a las que será sometida la estructura; por lo cual estas pruebas deben utilizarse en conjunto para determinar si un material puede ser utilizado en la práctica.

En la Tabla 2 se muestran los requisitos que en teoría, debería cumplir una prueba para la medición de la reactividad álcali-agregado de un material, donde se observa que ninguna prueba actualmente cumple con todos los requisitos [26][28]. Para fines de este proyecto, se utilizará la prueba acelerada en morteros según ASTM C1260, por su rapidez para obtener resultados, además de que se ha observado que tiene un criterio conservador con respecto a los resultados reales obtenidos a largo plazo [29].

Tabla 2. Requisitos de una prueba ideal para evaluación de la RAS [26]

Prueba	Ideal	Desempeño Real	Prismas de Concreto (C 1293)	Barras de mortero aceleradas (C1260)	Barras de mortero (C227)	Barras de mortero con Pyrex (C 441)
Confiable	✓	✓	✓	?	✗	✗
Agregado del Proyecto	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Agregado sin Procesar	✓	✓	✓	✗	✗	✗
Cemento de proyecto	✓	✓	✗	✗	✗	?
Aplicable para todos los MCS	✓	✓	✓	✗	?	✓
Rápida	✓	✗	✗	✓	?	✓

2.4.1.3 RAS y puzolanicidad de las partículas de vidrio en el concreto

La expansión y el subsecuente daño producto de la RAS en el concreto que contiene partículas de vidrio depende de la reactividad del vidrio y la permeabilidad de la pasta, pudiendo tener variados resultados para distintas clases de vidrio. En la Fig. 6 se muestran los resultados de un estudio de Jin et. al [30] en barras de mortero, donde se pudo observar lo siguiente:

- La expansión producto de la RAS para distintos tamaños de partícula tiene un valor máximo, a partir del cual se reduce la expansión y el material presenta un comportamiento puzolánico.
- El vidrio de borosilicatos presenta mayor reactividad que el vidrio sódico-cálcico y es necesario utilizar menores tamaños de partícula.

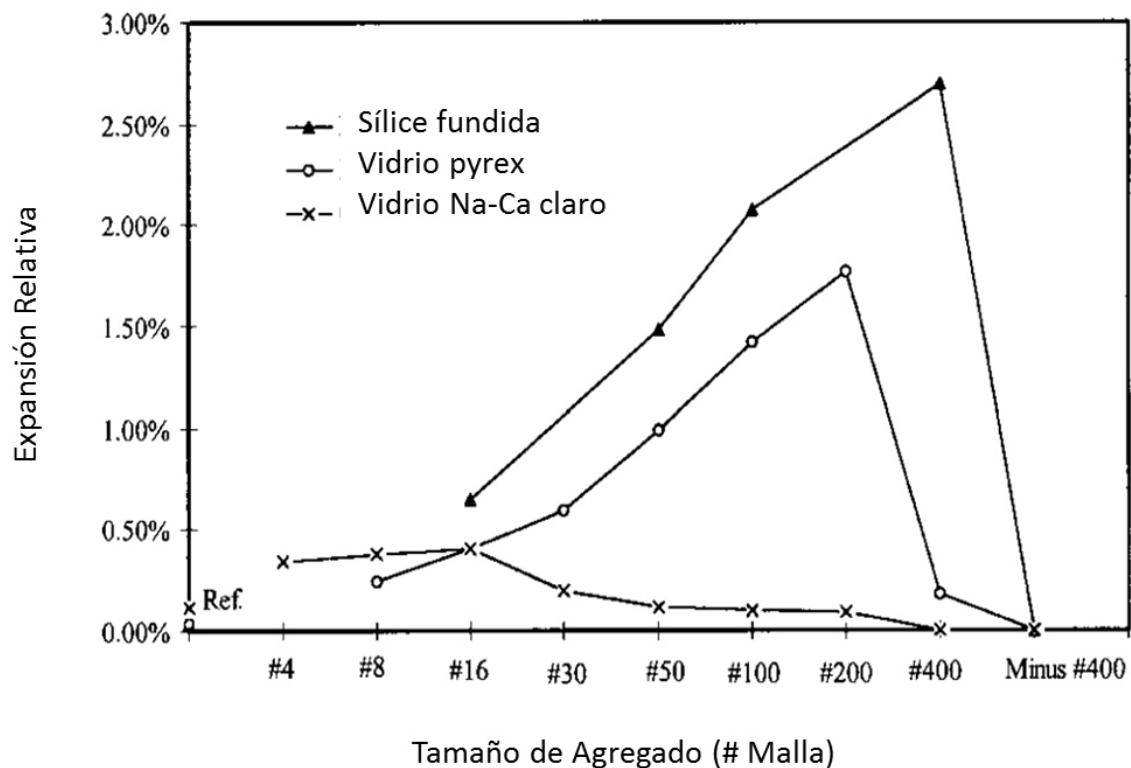


Fig. 6. Expansiones por RAS para distintos tamaños máximos de partícula y clases de vidrio[30]

Rajabipour et.al [31], determinaron que la expansión producto de la RAS iniciaba en microgrietas presentes dentro de las partículas de vidrio, producto

de la trituración, y de ahí se extendía el gel producto de la RAS a la pasta; por otro lado, para los tamaños de partícula de vidrio más finos, se observó que no se producía expansión debido a que se impide la penetración de iones hidroxilo en las pequeñas grietas en el vidrio, así como la absorción de humedad subsecuente, y por lo tanto no se desarrolla ni progresa la RAS. Además en el exterior de las partículas de vidrio, la presencia de portlandita (CH) inhibía la reacción, produciendo una conversión gradual del vidrio a C-S-H, como se muestra en la microscopía SEM de la Fig. 7.

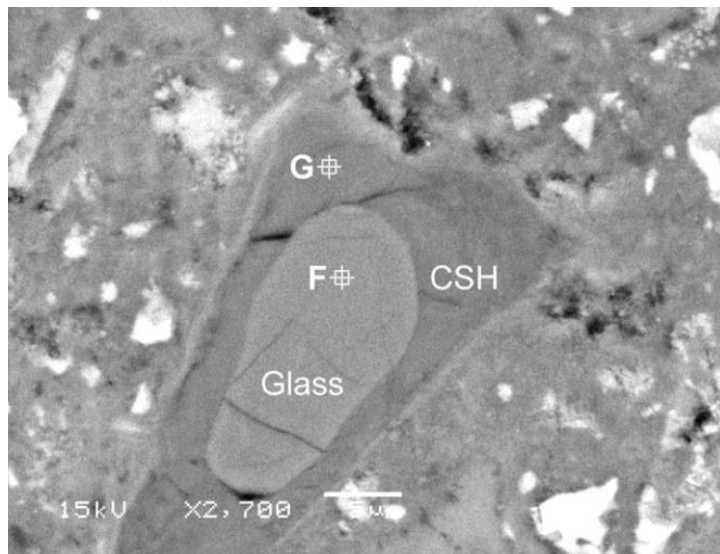


Fig. 7. Conversión gradual de una partícula de vidrio a CSH [31]

El comportamiento puzolánico para los polvos de vidrio mencionado anteriormente, ha sido observado en una gran cantidad de trabajos [27]-[39], con mejores propiedades puzolánicas para menores tamaños de partícula del vidrio, y a mayor edad, teniendo propiedades mecánicas y de durabilidad similares a otras puzolanas, como las cenizas volantes o microsílíce, dependiendo de la reactividad y finura del polvo de vidrio.

En el sector industrial inclusive se han desarrollado patentes para concretos con vidrio de reciclaje triturado, con un desempeño convencional [40], así como para el desarrollo de concretos de ultra alto desempeño [41].

2.4.2 Efecto de la inclusión del vidrio en las propiedades del concreto

2.4.2.1 Propiedades en estado fresco

A continuación se enlistan los efectos que se han observado en las propiedades en estado fresco del concreto producto de la incorporación de partículas de vidrio:

- Consistencia: al utilizarse como arena, se ha reportado menor revenimiento del concreto debido principalmente a su menor densidad y forma de partícula angulosa [42][43]. Por otro lado, al utilizarse como polvo, no se afecta de manera significativa la consistencia, aunque el resultado depende en gran medida de la finura del material [44].
- Contenido de aire y peso unitario: en general es de esperarse que al utilizar el vidrio se incluya un poco más de aire en el concreto; además, por su menor densidad se tendrá un concreto con un peso unitario ligeramente menor[43].
- Tiempos de fraguado: al utilizarse como agregado, puede retrasar el fraguado si se presenta un sangrado excesivo del concreto. Al utilizarse como polvo, por tratarse de un material puzolánico, presentará retrasos en los tiempos de fraguado, dependiendo también de la finura del material [44][45][46].

2.4.2.2 Propiedades en estado endurecido

A continuación se enlistan los efectos que se han observado en las propiedades en estado endurecido del concreto producto de la incorporación de partículas de vidrio:

- Resistencia a compresión: si se evita o controla la RAS, el vidrio en general exhibe buenos resultados como material puzolánico, como se mencionó previamente, con mejores resultados a mayor edad (típicamente mayor a 90 días) y mayor finura del vidrio [47]. Para tamaños mayores, con riesgo de presentar RAS, se puede presentar una

reducción considerable en la resistencia a compresión, particularmente a edades tempranas [42][43].

- Módulo de elasticidad: al utilizarse como agregado, se obtuvieron menores valores debido a una menor resistencia del concreto[43]. Como polvo, se obtuvieron menores valores que la referencia a edades tempranas y mayores valores a edades avanzadas. En general se mantuvo la proporción resistencia a compresión: módulo de elasticidad para el concreto con la incorporación de vidrio [47].
- Durabilidad: en general se obtienen mejores resultados con polvo de vidrio, ya que se producen concretos más impermeables y matrices más densas, lo que reduce la migración de iones agresivos en el interior del concreto [27][45]. Este efecto se ve más acentuado en edades avanzadas. Otros autores han reportado mejoras en la resistencia a penetración de cloruros y sulfatos con el incremento en el contenido de polvo de vidrio[43][48][49].

2.5 Incorporación de vidrio en mezclas de concreto auto-compactable

2.5.1 Concreto Auto-Compactable: Orígenes y Consideraciones Generales

El CAC es una clase especial de CAD que no requiere de vibración para su colocación y compactación. Fue originado con la finalidad de minimizar la necesidad de mano de obra necesaria para su colocación. Tiene la capacidad de fluir bajo su propio peso, el llenado completo del encofrado y el logro de superficies niveladas, incluso en presencia de refuerzo congestionado. El concepto de “concreto autocompactable” fue introducido en 1986 por el profesor Okamura de la Universidad de Tokio en Japón [50].

El CAC presenta numerosas ventajas, algunas de las cuales se mencionan a continuación [7]:

- Mayor velocidad de colocación del concreto.
- Menores tiempos de construcción.

- Facilidad de flujo a través de refuerzo congestionado.
- Alto nivel de homogeneidad.
- Calidad superior de acabado.
- Resistencia uniforme del concreto.
- Mejor ambiente laboral en la construcción al no utilizar equipo de vibrado.

Al ser un CAD, el CAC involucra las siguientes consideraciones, las cuales deben tomarse en cuenta para su adecuado uso:

- Uso de encofrados de alta calidad, perfectamente sellados para evitar fugas de material.
- Mayor control de calidad en su producción para mantener sus propiedades de autocompactabilidad.
- Menores contenidos y tamaño máximo del agregado grueso, como se observa en la Fig. 8.
- Uso de aditivos reductores de agua de alto rango para proveerle fluidez y aditivos modificadores de la viscosidad para otorgarle estabilidad a la mezcla de CAC
- Mayores contenidos de finos (partículas menores que 150 μm) que en el concreto convencional, como se observa en la Fig. 8.
- Mayor costo de producción, debido al uso de mayores volúmenes de materiales finos, así como aditivos especiales.
- Potencial retraso en el tiempo de fraguado debido a dosificaciones elevadas de aditivos reductores de agua de alto rango.
- Uso de relaciones agua/cementante bajas (menores a 0.5), con el fin de proveerle la viscosidad necesaria a la mezcla de CAC para mantener su homogeneidad y evitar la segregación.

La Fig. 8 presenta un comparativo de las proporciones típicas para un concreto convencional y para un concreto autocompactable.

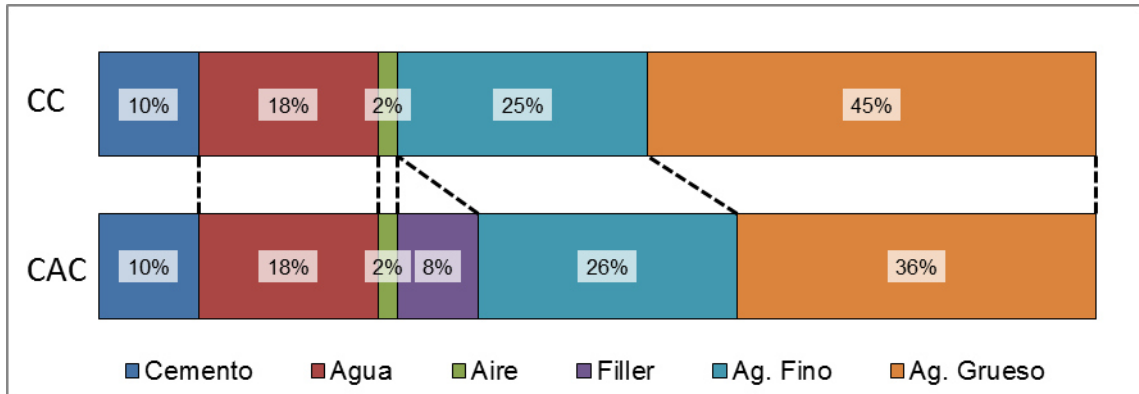


Fig. 8. Ejemplo de las proporciones en volumen típicas para un CAC comparadas con las de un Concreto Convencional (CC) [8]

2.5.2 Requerimientos de Desempeño del Concreto Autocompactable

Al referirnos al desempeño del CAC, además de sus propiedades en estado endurecido, existen algunas propiedades que definen su autocompactabilidad, mismas que deben evaluarse a fin de controlar el desempeño del CAC en estado fresco. La European Federation of National Associations Representing for Concrete (EFNARC) [7] caracteriza estos requerimientos de la siguiente manera:

- Fluidez.
- Viscosidad.
- Habilidad de Paso
- Resistencia a la Segregación

Cada uno de los requerimientos anteriormente mencionados involucra una o más métodos de prueba estándar para su control. Éstos métodos de prueba se detallan en la sección de Metodología Experimental del presente estudio.

2.5.2.1 Fluidez

La fluidez del CAC se refiere a su habilidad de fluir en condiciones no confinadas. Para su control se usa la prueba de extensibilidad [52], y en función del valor obtenido en mm, la EFNARC [7] permite clasificarlo como se muestra a continuación:

- SF1 (550 – 650 mm): Apropriado para estructuras de concreto con poco o nulo acero de refuerzo que son coladas desde su parte superior, concretos colados mediante bombeo, elementos con pequeñas secciones transversales al flujo.
- SF2 (660 – 750 mm): Apropriado para la mayoría de las aplicaciones.
- SF3 (760 – 850 mm): para aplicaciones verticales con armados de acero de refuerzo altamente congestionados, estructuras con formas complejas o para llenado de cimbras desde la parte inferior.

2.5.2.2 Viscosidad

Para la medición de la viscosidad, es necesario el uso de un reómetro; sin embargo, es posible relacionar la viscosidad del CAC con parámetros que miden el tiempo de vaciado del CAC, tales como el T50 según la ASTM C1611[52].

Si bien la viscosidad de un CAC no es un parámetro usualmente especificado, ocasionalmente es necesario controlarla, y en función del T50 la EFNARC [7] clasifica al CAC como se muestra a continuación:

- VS1/VF1: se refiere a CAC con buena habilidad de llenado incluso a través de refuerzo congestionado. Puede auto-nivelarse y presenta las superficies de mayor calidad. Es más propenso a presentar sangrado y segregación
- VS2/VF2: se refiere a CAC con mayor viscosidad, y mayores valores de T50, tiene más probabilidades de presentar tixotropía. Como efectos negativos se puede experimentar acabados deficientes, y menores tiempos de trabajabilidad.

2.5.2.3 Habilidad de Paso

Esta característica describe la capacidad de la mezcla en estado fresco de fluir a través de espacios confinados y refuerzo congestionado sin segregación, pérdida de homogeneidad o bloqueo.

De acuerdo al más pequeño espaciamiento a través del cual se requiera que el CAC fluya continuamente para llenar el encofrado, la EFNARC [7] clasifica la habilidad de paso del CAC como se muestra a continuación:

- PA1: Para estructuras con espaciamientos mínimos de 80 a 100 mm.
- PA2: Para estructuras con espaciamientos mínimos de 60 a 80 mm.

2.5.2.4 Resistencia a la segregación

Esta característica es clave para la homogeneidad y calidad del CAC, ya que de no controlarse puede conducir a acabados deficientes o agrietamientos. El EFNARC [7] clasifica al CAC, de acuerdo a su resistencia a la segregación, medida de acuerdo a la ASTM C[53], de la siguiente manera:

- SR1: CAC aplicable para el colado de losas delgadas y aplicaciones verticales con una distancia de flujo menor a 5 metros y un espaciamiento mínimo mayor a 80 mm.
- SR2: CAC aplicable para el colado de losas delgadas y aplicaciones verticales con una distancia de flujo mayor a 5 metros y un espaciamiento mínimo mayor a 80 mm.

2.5.3 Influencia de la inclusión de vidrio en las propiedades de concreto autocompactable.

A continuación se enlistan los efectos que se han observado en las propiedades del CAC producto de la incorporación de partículas de vidrio:

- Extensibilidad: al utilizar el vidrio como agregado, se han obtenido mayores valores de extensibilidad con mayores contenidos de vidrio, hasta un punto máximo alrededor de 30%.

- Habilidad de paso y habilidad de llenado: con la inclusión de partículas de vidrio como agregado y polvo, se ha observado una reducción tanto en la habilidad de paso como en la habilidad de llenado; esto puede deberse a la geometría del material [54][55][56][57][58].
- Resistencia a compresión, tensión y módulo elástico: en general, para edades tempranas, se ha observado que a mayor contenido de vidrio se obtienen menores valores de resistencia y módulo de elasticidad. Sin embargo, a partir de 90 días, las mezclas con inclusión de vidrio tienen un desempeño mecánico igual o mejor a las mezclas de referencia [54][56][57][58].
- Durabilidad: en general se han obtenido mejores resultados con la inclusión de partículas de vidrio, obteniendo un incremento en la velocidad de pulso ultrasónico, así como menores penetraciones de iones cloruro. [54][56][57].

Adicional a lo anterior, en 2013 fue publicado un estudio de Nunes et al. [59] donde se presentan ayudas de diseño para mezclas de concreto autocompactable con el uso de vidrio, optimizándola para maximizar la durabilidad y minimizar el costo. Lo anterior es debido a que en la mayoría de los trabajos de CAC con incorporación de vidrio triturado, se pretende una mejora en la durabilidad y mantener las propiedades de autocompactabilidad del concreto, pasando a ser la resistencia mecánica un requisito secundario.

CAPÍTULO 3: OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer la proporción y tamaño de partícula máximo de vidrio de borosilicatos para incorporarlo como filler en un concreto auto-consolidante sin demérito de sus propiedades reológicas y de durabilidad.

3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Establecer el tamaño óptimo de partícula del subproducto industrial a base de vidrios de borosilicatos para su incorporación a sistemas de cemento Portland sin que se demeriten sus propiedades en estado endurecido.
- Producir una mezcla de concreto Autocompactable que cumpla con los parámetros de autocompactabilidad especificadas por el EFNARC para una clase SF2, PA1 y SR2.
- Establecer el tiempo óptimo de pulverización del subproducto industrial a base de vidrios de borosilicatos para obtener el tamaño de partícula necesario para su incorporación a sistemas a base de cemento Portland.
- Reducir el consumo de cemento Portland en concretos autocompactables mediante la incorporación de un filler a base de vidrio de borosilicatos como sustitución de cemento Portland en mezclas de concreto autocompactable.
- Evaluar el efecto de la sustitución óptima de cemento portland por polvo de vidrio a base de borosilicatos en propiedades del concreto endurecido, tanto mecánicas como de durabilidad.

CAPÍTULO 4: HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN

4.1 HIPÓTESIS

De acuerdo a el concentrado de antecedentes que se consultaron para esta investigación se considera que es posible aprovechar el subproducto industrial a base de vidrios de borosilicato finamente triturado como un filler en el concreto autocompactable, que nos permita reducir el consumo de cemento de la mezcla y mejorar sus características reológicas, sin demeritar sus propiedades en estado endurecido, e incluso mejorando su durabilidad.

4.2 JUSTIFICACIÓN

La tendencia actual para reducir el impacto ambiental en la producción con concreto está muy orientada a reducir la cantidad de clinker, o bien de cemento Portland, necesaria para producir concreto. En este sentido hay una amplia disponibilidad de materiales finamente molidos que pueden adicionarse al concreto como sustitución del cemento Portland, tales como cenizas volantes, microsílica, polvo de caliza, escoria, y en general, polvos finos a base de sílice reactiva.

Investigaciones previas [27]-[39], han mostrado que el vidrio tiene potencial como material puzolánico en el concreto cuando se utiliza como partículas finamente molidas, con tamaños de partícula menores de 30-75 μm , estas investigaciones han mostrado que entre más fino, el vidrio pasa de ser un material con potencial de expansión por RAS a un material con propiedades puzolánicas.

Los concretos autocompactables son una clase de concretos especialmente diseñados para colocarse sin la necesidad de compactación o vibrado, reduciendo la mano de obra y energía necesaria para su colocación. Sin embargo estos concretos, para mantener sus propiedades reológicas y de autocompactabilidad, requieren contenidos de finos mayores que el concreto convencional. Esto último aumenta el costo de producción de dichos concretos e incrementa su huella de carbono por la mayor cantidad de cemento necesaria para su producción.

El objetivo de este estudio es aprovechar un subproducto de la industria local, a base de vidrio de borosilicato, finamente triturado, como un filler que nos permita reducir el consumo de cemento en mezclas de concreto autocompactable. Para su aprovechamiento se determinará el contenido óptimo de vidrio que pueda sustituir al cemento Portland, así como un tiempo de molienda idóneo para el mismo material, que nos permita aprovechar el vidrio en el concreto sin producir un impacto negativo en sus propiedades,

minimizando a la vez el consumo de energía necesario para la habilitación del subproducto industrial.

CAPÍTULO 5: MATERIALES Y CARACTERIZACIÓN

Para el presente proyecto, los materiales que se utilizarán serán caracterizados por medios físico-químicos con la finalidad de verificar su cumplimiento con especificaciones, y como control posterior para el análisis de las variables a investigar en el desarrollo del proyecto de tesis.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES:

5.1.1 Cemento Portland

Es el cementante hidráulico más comúnmente utilizado en construcción, definido por la ASTM como “un cemento Portland producido por la pulverización del Clinker, consistiendo esencialmente de silicatos cálcicos cristalinos, y usualmente conteniendo uno o más de los siguientes: agua, sulfato de calcio, hasta 5% de caliza, y adiciones minerales” [60].

El cemento Portland utilizado para este proyecto fue un CPO 40 de la marca Moctezuma, de acuerdo a la norma NMX-C-414 [61] y ASTM C-150 [62]. En la Fig. 9 se presenta una muestra de este cemento.



Fig. 9. Cemento Portland CPO 40

5.1.2 Vidrio de Borosilicatos

Es una clase de vidrio que en su composición incluyen cantidades considerables de Boro, y en menor medida, aluminio y sodio; además esta clase de vidrio tiene los mayores contenidos de sílice. Se conocen comúnmente bajo el nombre comercial de “Pyrex”, una marca originalmente introducida por Corning Incorporated en 1915, como un vidrio claro, de baja expansión térmica, que se utiliza para la fabricación de instrumentos de laboratorio y cocina.

Para el presente proyecto se utilizará un subproducto de una industria local con una disponibilidad de alrededor de 6000 toneladas. Este residuo actualmente sólo se encuentra almacenado, como se muestra en la Fig. 10 y no se reintegra al proceso de producción.



Fig. 10. Banco local de subproductos de vidrio de borosilicatos

En el presente proyecto, para poder utilizar este material fue necesario someterlo a un proceso que involucra procesos de lavado y molienda. Al material obtenido después de estos procesos se le puede clasificar de la siguiente manera:

En una primera etapa de trituración y separación por tamaños para definir el tamaño óptimo para su utilización en mezclas base cemento Portland (ver sección 6.1 de la metodología experimental):

- Vidrio BS200: corresponde a polvo de vidrio que pasa la malla # 100 y retenido en la malla #200 obtenido selectivamente mediante cribado posterior a la trituración primaria.
- Vidrio BS400: corresponde a polvo de vidrio que pasa la malla # 200, obtenido selectivamente mediante cribado posterior a la trituración primaria.

En la sección 6.3 de la metodología experimental:

- Vidrio V20: corresponde a polvo de vidrio que fue obtenido sometiendo el material a 20 minutos de trituración secundaria según lo indicado en 6.1.1.3, posterior a la trituración primaria según lo indicado en 6.1.1.2.
- Vidrio V40: corresponde a polvo de vidrio que fue obtenido sometiendo el material a 40 minutos de trituración secundaria según lo indicado en 6.1.1.3, posterior a la trituración primaria según lo indicado en 6.1.1.2.
- Vidrio V60: corresponde a polvo de vidrio que fue obtenido sometiendo el material a 60 minutos de trituración secundaria según lo indicado en 6.1.1.3, posterior a la trituración primaria según lo indicado en 6.1.1.2.

5.1.3 Agregados

Se definen por la ASTM como “un material granular, tal como arena grava, roca triturada, o escoria granulada de alto horno, que se usa en conjunto con un material cementante para formar concreto o mortero de cemento hidráulico” [63]. Constituyen típicamente entre el 60% y el 75% del volumen del concreto [8], y tienen una gran influencia sobre el desempeño y propiedades del concreto. De acuerdo a su tamaño, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Agregado grueso: se refiere a las porciones de agregado retenidas en la malla con abertura de 4.75 mm (No. 4) [64].
- Agregado fino: se refiere a las porciones de agregado que pasan a través de la malla con abertura de 4.75 mm (No. 4) [64] y se retienen en la malla con abertura de 75 μ m (No. 200) [64].

Para el proyecto, los agregados utilizados son a base de caliza triturada de la región, con un tamaño máximo de agregado de 19 mm (malla de $\frac{3}{4}$ " [64]. En la Fig. 11 se pueden observar muestras de los agregados utilizados.



Fig. 11. Agregados Grueso (Izquierda) y Fino (Derecha) utilizados en el proyecto

5.1.4 Aditivos químicos

Se definen por la ASTM como “un material distinto del agua, agregados, materiales cementantes hidráulicos, y fibras de refuerzo que se utiliza como un ingrediente de una mezcla cementante para modificar sus propiedades en estado fresco o endurecido, y que se adiciona a la mezcla antes o durante el mezclado” [63]. Estos materiales se encuentran disponibles en estado sólido o líquido, y pueden adicionarse a la mezcla de concreto antes, durante o después del mezclado, para conferirle propiedades específicas al concreto.

Para el presente proyecto se utilizó el aditivo Glenium 3400 NV de la compañía BASF, que es un aditivo reductor de agua de alto rango, diseñado específicamente para la fabricación de mezclas autocompactables reodinámicas, con una dosificación recomendada por el fabricante en el rango de 1.3 a 7.8 ml/kgC. Este aditivo cumple con la norma ASTM C-494 como reductor de agua de alto grado tipos A y F [65].

5.2 Caracterización de Materiales

5.2.1 Cemento Portland

Se realizó la caracterización del CPO 40 para obtener las propiedades físicas y químicas necesarias para el diseño de las mezclas de concreto, así como para respaldar el análisis y la discusión de los resultados.

5.2.1.1 Densidad

La densidad del cemento se obtuvo mediante el procedimiento descrito por la norma ASTM C-188 [66], utilizando el frasco de *Le Chatelier* de la Fig. 12.



Fig. 12. Frasco de Le Chatelier para determinación de la densidad de polvos

5.2.1.2 Distribución de tamaño de partículas

Se obtuvo la distribución del tamaño de partículas (DTP) utilizando el equipo analizador de difracción láser de la marca MICROTRAC (Fig. 13). La prueba se realizó utilizando una solución de cemento y alcohol iso-propílico, con una pureza de 99.5%; dispersando la solución a una dispersión con ultrasonido, para eliminar posibles aglomeraciones en el material.



Fig. 13. Analizador de difracción láser MICROTRAC para la obtención del DTP

5.2.1.3 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 en cada uno de los polvos.

5.2.1.4 Fases minerales

Se determinó la presencia de fases minerales en el CPO 40 mediante la técnica de Difracción de Rayos “X” (DRX) utilizando un difractómetro de rayos “X” Bruker D8 Advance con radiación de CuK_α de 1.5418 \AA , equipado con un detector Vantec de alta velocidad y filtros de Níquel. Para los tres polvos se ejecutó la prueba de 10 a $70^\circ 2\theta$, con una velocidad de rotación de 15rpm y un tamaño de paso (step size) de $0.05^\circ 2\theta$. El equipo se muestra en la Fig. 14.



Fig. 14. Difractómetro de rayos "X" Bruker D8 Advance

5.2.2 Vidrio de Borosilicatos

Se realizó la caracterización del vidrio de borosilicatos para obtener las propiedades físicas y químicas necesarias para el diseño de las mezclas de concreto, así como para respaldar el análisis y la discusión de los resultados.

En este aspecto cabe destacar que las propiedades del vidrio, fueron obtenidas del material una vez triturado, como se incorporaría en las mezclas de concreto autocompactable en el presente proyecto.

5.2.2.1 Densidad

La densidad del vidrio de borosilicatos se obtuvo mediante el procedimiento descrito por la norma ASTM C-188 [66], utilizando el frasco de *Le Chatelier* de la Fig. 12.

5.2.2.2 Distribución de tamaño de partículas

Se obtuvo la distribución del tamaño de partículas (DTP) utilizando el equipo analizador de difracción láser de la marca MICROTRAC (Fig. 13). La prueba se realizó utilizando una solución de material en polvo y alcohol iso-propílico, con una pureza de 99.5%; dispersando la solución a una dispersión con ultrasonido, para eliminar posibles aglomeraciones en el material y determinar efectivamente su tamaño de partícula.

5.2.2.3 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 en cada uno de los polvos.

5.2.2.4 Fases minerales

Se determinó la presencia de fases minerales en el CPO 40 mediante la técnica de Difracción de Rayos “X” (DRX) utilizando un difractor de rayos “X” Bruker D8 Advance (Fig. 14) con radiación de CuK_α de 1.5418 Å, equipado con un detector Vantec de alta velocidad y filtros de Níquel. Para los tres polvos se ejecutó la prueba de 10 a 70° 2 θ , con una velocidad de rotación de 15rpm y un tamaño de paso (step size) de 0.05° 2 θ .

5.2.2.5 Morfología

Se observó mediante microscopía óptica el polvo de vidrio de BS posterior a la trituración secundaria, con la finalidad de observar la morfología de las partículas de vidrio obtenido posterior a la trituración.

5.2.3 Agregados

Se realizó la caracterización de los agregados fino y grueso principalmente para obtener las propiedades necesarias para el diseño y control de las mezclas de concreto, así como para respaldar el análisis y la discusión de los resultados.

5.2.3.1 Densidad y Absorción

La densidad y absorción de los agregados fino y grueso fue obtenida mediante los procedimientos descritos en las normas AASHTO T84 [67] y AASHTO T85 [68], respectivamente, utilizando el método del picnómetro volumétrico, y el picnómetro tipo sifón, como se indica en la Fig. 15.



Fig. 15. Picnómetro Volumétrico para AF (Izquierda), y Picnómetro tipo Sifón para AG (Derecha)

5.2.3.2 Granulometría

Se determinó la distribución granulométrica de los agregados fino y grueso mediante los procedimientos descritos en las norma AASHTO T27[69].

5.2.4 Aditivo químico

Se realizó la caracterización del aditivo reductor de agua de alto rango a base de polycarboxilatos para obtener las propiedades necesarias para el diseño y control de las mezclas de concreto.

5.2.4.1 Densidad y Contenido de Sólidos

La densidad y el contenido de sólidos del aditivo reductor de agua de alto rango Glenium 3400 NV, fueron determinados usando los procedimientos descritos en la norma ASTM C-494 [65]. Para obtener el contenido de sólidos, se determinó la pérdida de material evaporable a $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

CAPÍTULO 6: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1 DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA ÓPTIMO PARA SU USO EN MEZCLAS BASE CEMENTO PORTLAND

Esta etapa del proyecto involucra realizar mezclas de prueba con la finalidad de definir el tamaño de partícula óptimo a partir del cual se puede utilizar el residuo de vidrios de borosilicatos en mezclas a base de cemento Portland sin tener la preocupación de que se presenten daños por reactividad álcali-sílice.

Primeramente fue necesario un tratamiento al residuo de vidrio de borosilicatos para su uso, y posteriormente se evaluó el tamaño máximo de partícula que no presentara una expansión dañina producto de la RAS, mediante pruebas aceleradas.

6.1.1 Tratamiento preliminar del vidrio de BS para su uso

Esta etapa del proyecto comprende la habilitación del vidrio de borosilicato para su uso como filler en concreto autocompactable.

Tal y como sale del proceso industrial, el vidrio de borosilicatos está en tamaños de hasta 800 mm, por lo cual debemos reducir su tamaño de partícula hasta tamaños menores de 74 μm para limitar la presencia de expansiones dañinas producto de la RAS [30]. Para esto se llevaron a cabo los siguientes procedimientos:

1. Lavado del material para eliminar residuos orgánicos y partículas de arcilla.
2. Secado del material para su molienda.
3. Trituración primaria en molinos de quijadas.
4. Trituración secundaria en molino de disco.

6.1.1.1 Lavado y Secado

En el banco donde se encuentra el material, éste se encuentra almacenado en una pila, expuesto a la intemperie, donde es susceptible que se le depositen impurezas, así como materia orgánica.

Primeramente se lleva a cabo un lavado del material con agua para eliminar las impurezas que pueda contener el material, siguiendo el procedimiento descrito en la norma AASHTO T11-05 [70].

Finalmente, el material fue secado a 110°C por 24 horas para proceder a su molienda.

6.1.1.2 Trituración Primaria

Posteriormente se llevó a cabo una trituración primaria del material en dos molinos de quijadas como se explica a continuación:

1. Primero se llevó a cabo una trituración en un molino de quijadas, con una capacidad de molienda de 8 kg/minuto. Con este equipo se obtuvo un tamaño máximo de partícula de alrededor de 50 mm.
2. A continuación se llevó a cabo una trituración en un molino de quijadas de la marca Bico Chipmunk Jaw Crusher LC-33, que se muestra en la Fig. 16 con una capacidad de molienda de 8 kg/minuto. Con este equipo se obtuvo un tamaño máximo de partícula de alrededor de 10 mm.



Fig. 16. Molino de Quijadas "Bico Chipmunk Jaw Crusher LC-33"

6.1.1.3 Trituración Secundaria

Posteriormente se llevó a cabo una trituración secundaria en un molino de disco 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. 17 Molino de Disco "Bico Pulverizer LC-53"

Después de estos procesos, el vidrio está en un tamaño de partícula menor a 0.6 mm, el cual pudiera considerarse un tamaño adecuado para su incorporación a mezclas de concreto a base de cemento Portland, sin embargo, es necesario hacer pruebas adicionales para evaluar el daño potencial a

mezclas de cemento Portland producido por la expansión RAS al incorporar el vidrio triturado de borosilicatos.

6.1.2 Expansiones debido a la RAS y resistencia a la compresión de morteros con distintos tamaños máximos de vidrio de BS:

Para esta etapa, se llevó a cabo el procedimiento descrito en las norma ASTM C1260 [71] y ASTM C109 [72]. Partiendo de las proporciones indicadas en la norma ASTM C1260 [71], se hicieron sustituciones de agregado fino no reactivo (caliza), por vidrio de borosilicatos, y de cemento por polvo de vidrio de borosilicatos.

6.1.2.1 Programa preliminar de mezclas de mortero

Para esta etapa se realizó un el programa de mezclas de mortero que se desglosa en la Tabla 3. Sus proporciones fueron definidas de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM C1260 [71] bajo los siguientes criterios:

- Una granulometría controlada para los agregados.
- Una relación A/C fija.
- Una proporción constante de cemento:agregado fino.

Tabla 3. Programa de Mezclas Preliminar para Definir el Tamaño Máximo de Vidrio BS para Incorporación a Concreto base Cemento Portland

Clave	Cementante, % en masa	Agregado Fino, % en masa, tamaños de agregado
REF	100% CPO 40	100% AF no reactivo, #4 a #100 (4760 µm a 150 µm)
M1	100% CPO 40	AF no reactivo, #4 a #8 (4760 µm a 2360 µm) AF vidrio BS, #16 a #100 (1180 µm a 150 µm)
M2	100% CPO 40	AF no reactivo, #4 a #16 (4760 µm a 1180 µm) AF vidrio BS, #30 a #100 (600 µm a 150 µm)
M3	100% CPO 40	AF no reactivo, #4 a #30 (4760 µm a 600 µm) AF vidrio BS, #50 a #100 (300 µm a 150 µm)
M4	90% CPO 40, 10% polvo BS400*	AF no reactivo, #4 a #8 (4760 µm a 2360 µm) AF vidrio BS, #16 a #100 (1180 µm a 150 µm)
M5	90% CPO 40, 10% polvo BS400*	AF no reactivo, #4 a #16 (4760 µm a 1180 µm) AF vidrio BS, #30 a #100 (4760 µm a 150 µm)

M6	90% CPO 40, 10% polvo BS400*	AF no reactivo, #4 a #30 (4760 μm a 600 μm) AF vidrio BS, #50 a #100 (300 μm a 150 μm)
M7	90% CPO 40, 10% polvo BS200*	AF no reactivo, #4 a #100 (4760 μm a 150 μm)
M8	90% CPO 40, 10% polvo BS400*	AF no reactivo, #4 a #100 (4760 μm a 150 μm)

*El polvo BS200, significa polvo de vidrio retenido en la malla #200; a su vez el polvo BS400, significa polvo de vidrio que pasa la malla #200.

6.1.2.2 Métodos de prueba para morteros

Para cada una de las mezclas previamente definidas, se les realizaron las siguientes pruebas:

- Expansión potencial por reacción álcali sílice, según ASTM C1260-07 [71], comparando el valor de expansión obtenido para las distintas mezclas a 14 días con el límite máximo recomendado por esta norma para considerarse un agregado como no reactivo (0.1%).
- Resistencia a la compresión de morteros, según ASCTM C-109-08 [72], para especímenes cúbicos de mortero sometidos a las mismas condiciones de curado que las barras, con la finalidad de determinar el impacto de la reacción álcali sílice sobre la resistencia a compresión. Los especímenes fueron ensayados a 7 y 14 días de exposición a la solución alcalina especificada en ASTM C1260 [71].

6.1.3 Caracterización microestructural mediante SEM y EDS

Adicionalmente, para evaluar la interacción del vidrio de BS sobre la matriz a base de cemento Portland, una vez concluidas las mediciones, se tomaron muestras para evaluar mediante microscopía SEM y EDS. Para esto se evaluó una sección de la serie M1 (con el mayor tamaño de partícula de vidrio) y M8 (con el menor tamaño de partícula de vidrio).

6.2 DEFINICIÓN DE LAS PROPORCIONES ÓPTIMAS PARA LA MEZCLA DE CONCRETO DE REFERENCIA:

Esta etapa del proyecto involucra realizar mezclas de prueba con la finalidad de definir las proporciones óptimas para la mezcla de concreto autocompactable que se utilizará como referencia para el proyecto.

Para definir las proporciones de esta mezcla, se realizarán mezclas de prueba modificando las siguientes variables para obtener una mezcla de concreto autocompactable con un desempeño de acuerdo a la EFNARC [7], como se muestra a continuación:

Tabla 4. Parámetros objetivo de la mezcla de referencia

Parámetro objetivo	Prueba para su control	Variable a controlar
Fluidez clase SF2	Extensibilidad (ASTM C 1611)= 660 – 750 mm	Contenido de aditivo superfluidificante y cementante
Resistencia a la segregación clase SR2	Resistencia a la segregación estática (ASTM C 1610) \leq 15 %	Contenido de Aditivo superfluidificante
Homogeneidad / Acabado	Índice de Estabilidad Visual (ASTM C 1611) = 0-1	Contenido de Cementante y aditivo superfluidificante

Para el diseño de la mezcla de CAC de referencia, se consideraron las recomendaciones del comité 237 del ACI [51], así como el EFNARC[7]. Se fijó la relación a/cm en 0.40, para que la mezcla cumpliera con todas las clases de exposición mencionadas en el ACI 318S-11 [73]. Se realizaron ajustes de la relación AG/AF en volumen, el contenido de cementante, así como la

dosificación del aditivo superfluidificante, para lograr una mezcla de CAC con características aceptables. Las proporciones de la mezcla de CAC de referencia se muestran a continuación:

Tabla 5. Proporciones de la mezcla de Referencia

Material	Materiales secos sin agua de absorción en Kg para producir 1 m³ de concreto
Agua de reacción	175.00
Glenium 3400 NV	1.539
Cemento Portland	440.00
Ag. Grueso	531.00
Ag. Fino	1207.00
Aire (2.5 %)	-

En la Tabla 6 se comparan los parámetros de diseño de la mezcla de CAC de referencia con los valores recomendados en el ACI 237, así como la EFNARC. Aquí se puede observar que hay diversos valores que están fuera de los rangos recomendados, lo cual se debe principalmente, a una mala graduación de los agregados. El agregado grueso tiene un alto contenido de partículas elongadas por lo que fue necesario reducir su contenido para evitar demeritar la habilidad de paso del CAC; por otra parte, el AF tiene un alto contenido de materiales más finos que la malla # 100, lo que incrementó el contenido de polvos.

Tabla 6. Cumplimiento de la mezcla de referencia con los valores recomendados por el ACI 237 y la EFNARC [7][51]

Parámetro	Mezcla de referencia	Valores recomendados	
		ACI 237	EFNARC
a/cm	0.40	0.32 – 0.45	
V_w/V_p	1.26		0.85 - 1.10
Polvos (kg/m^3)	622		350 - 650
Agua (L/m^3)	175.09		150 -210
Pasta ($\%/ \text{m}^3$)	34.21%	34 – 40%	30 – 38
Arena (% del peso del agregado)	70%		48 – 55
Mortero ($\%/ \text{m}^3$)	80.26%	68 – 72	
Grava ($\%/ \text{m}^3$)	19.74%	28 – 32	27 – 36

6.3 MATRIZ EXPERIMENTAL:

Para incorporar el vidrio en el concreto, se llevará a cabo una pulverización del material en un molino de bolas de alta energía, que se muestra en la fig.

Posteriormente se llevó a cabo una pulverización en un molino planetario de vibroenergía de la marca SWECO, donde se pulverizaron muestras de 5 kg de vidrio posterior a la trituración secundaria, por tiempos de molienda de 20, 40 y 60 minutos.

Una vez obtenida una mezcla de concreto autocompactable con las características objetivo definidas en la Tabla 4, sobre las proporciones fijas de esta mezcla se realizarán sustituciones de cemento Portland por polvo de vidrio de borosilicatos, como se muestra a continuación:

Tabla 7. Matriz Experimental para Mezclas de Concreto Autocompactable

SERIE	NOMENCLATURA	MATERIAL CEMENTANTE, EN % EN MASA			
		CPO 40	POLVO DE VIDRIO DE BOROSILICATOS, TIEMPO DE PULVERIZACIÓN		
			20 minutos	40 minutos	60 minutos
REF	REFERENCIA	100	0	0	0
V20	V20-10M	90	10	0	0
	V20-20M	80	20	0	0
	V20-30M	70	30	0	0
V40	V40-10M	90	0	10	0
	V40-20M	80	0	20	0
	V40-30M	70	0	30	0
V60	V60-10M	90	0	0	10
	V60-20M	80	0	0	20
	V60-30M	70	0	0	30

En la Fig. 18 se muestran las proporciones en volumen absoluto, para la mezcla de referencia, así como para las mezclas de CAC con sustitución de cemento portland por polvo de vidrio. Para cada contenido de polvo de vidrio en sustitución, se utilizaron las mismas proporciones para los 3 tiempos de molienda.

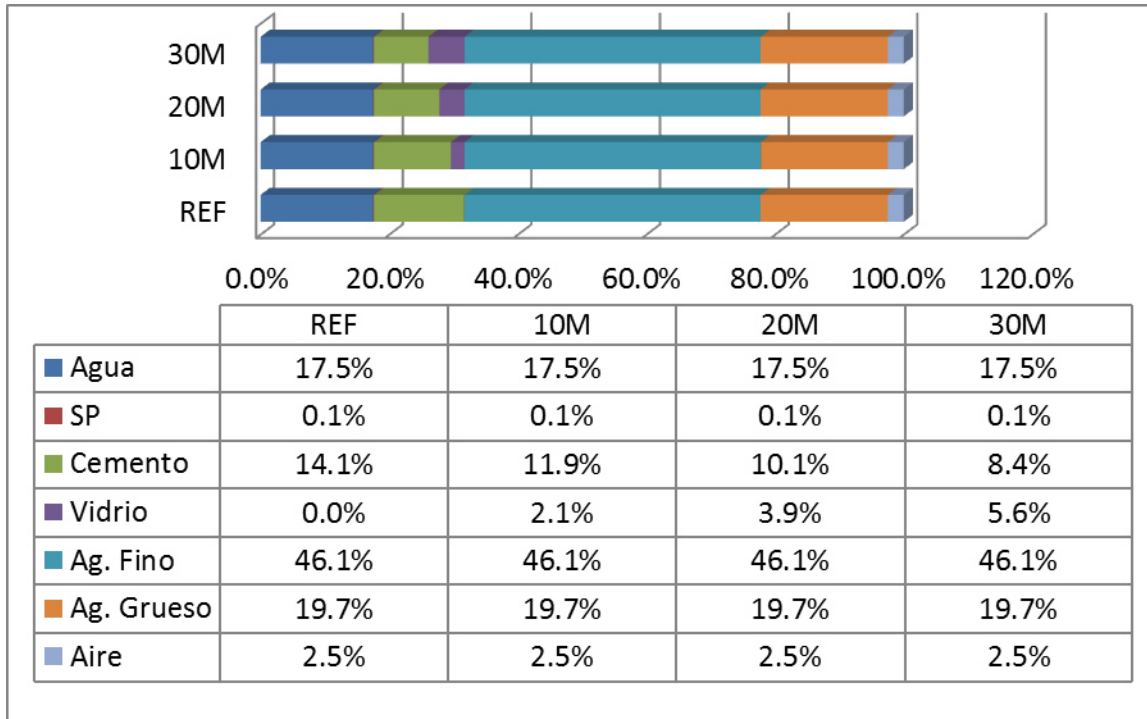


Fig. 18. Proporciones en volumen de las distintas mezclas del proyecto

6.4 PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO:

Para cada una de las mezclas de concreto que se definen en la Tabla 7, se caracterizarán sus propiedades en estado fresco con el fin de evaluar el efecto de la sustitución de cemento portland por polvo de vidrio de borosilicatos cuando el concreto se encuentra en estado fresco, realizando las pruebas que se definen a continuación:

6.4.1 Extensibilidad, T_{50} , e Índice de Estabilidad Visual

La extensibilidad, el tiempo necesario para alcanzar una extensibilidad de 500 mm (T_{50}), así como el índice de estabilidad visual, se determinaron de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM C 1611 [52]. Estos parámetros se definen a continuación:

6.4.1.1 Extensibilidad

El parámetro de la extensibilidad representa el diámetro promedio de una muestra de concreto sin compactar en el cono de revenimiento, después de

levantarla en un tiempo de 3 ± 1 s. Este parámetro permite determinar la capacidad del concreto autocompactable de fluir libremente por su propio peso.

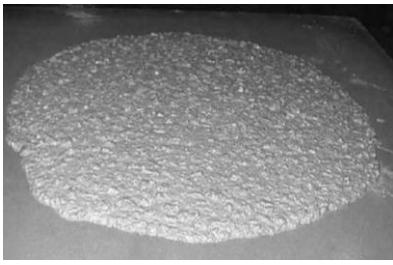

6.4.1.2 T_{50}


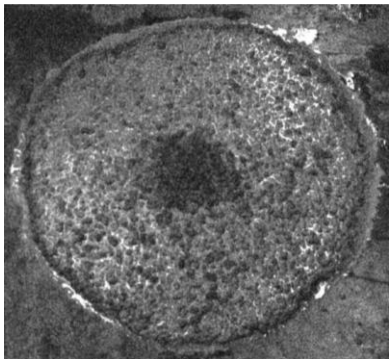
El parámetro de T_{50} representa el tiempo en el cual, después de levantar el cono de revenimiento, la muestra de concreto extendida alcanza un diámetro de 500 mm, y es un valor directamente proporcional a la viscosidad, donde las mezclas de concreto con mayor viscosidad tienen mayores valores de T_{50} , y viceversa.

6.4.1.3 Índice de Estabilidad Visual (VSI)

El VSI es un parámetro cualitativo con respecto a la segregación que exhibe la muestra de concreto, después de haber realizado las otras mediciones de esta norma. De acuerdo a las clases que se muestran en la Tabla 8, se pueden utilizar concretos autocompactables que tengan valores de VSI de 0 y 1, mientras que para valores mayores puede ser necesario ajustar el diseño de mezcla para reducir la segregación.

Tabla 8. Clasificación de acuerdo al VSI [52]

Valor de VSI	Criterio	Representación Gráfica
VSI = 0 Altamente estable	Sin evidencia de segregación o sangrado	
VSI = 1 Estable	Sin evidencia de segregación y con un ligero sangrado observado como un brillo en la superficie de la masa del concreto	

<p>VSI = 2 Inestable</p>	<p>Presenta un ligero halo de mortero (≤ 10 mm) y/o una pila de agregados en el centro de la masa de concreto</p>	
<p>VSI = 3 Altamente inestable</p>	<p>Presenta segregación evidente con un gran halo de mortero > 10 mm y/o una pila grande de agregados en el centro de la masa de concreto</p>	

6.4.2 Habilidad de Paso

Para determinar la habilidad de paso del concreto autocompactable se realizó el procedimiento descrito en la norma ASTM C1621/1621M [74]. Para esta prueba se realiza un procedimiento similar al descrito en la norma ASTM C1611 [52], colocando un anillo de acero (Anillo J), alrededor del cono de revenimiento, y comparando la extensibilidad obtenida con, y sin el anillo J. La diferencia entre la extensibilidad con y sin Anillo “J” está directamente relacionado con la habilidad de paso del concreto autocompactable, como se define en la Tabla 9, de acuerdo a la norma ASTM C1621/C1621M [74].

Tabla 9 Determinación del bloqueo

Diferencia entre extensibilidad con y sin anillo “J”	Determinación del bloqueo
0 a 25 mm	Sin bloqueo visible
>25 a 50 mm	Bloqueo mínimo a notable
>50 mm	Bloqueo mínimo a extremo

6.4.3 Segregación estática

Para determinar la presencia y cantidad de segregación estática en las mezclas de concreto autocompactable, se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM C1610/C1610M [53], utilizando el equipo que se muestra en la Fig. 19.



Fig. 19 Columna de Segregación

6.4.4 Densidad y Contenido de Aire (Método Gravimétrico)

La densidad y el contenido de aire del concreto en estado fresco se determinaron de acuerdo al procedimiento descrito en ASTM C138/C138M-09 [75], con un recipiente calibrado de volumen conocido, y conociendo las cantidades de material para cada mezcla.

6.4.5 Temperatura en Estado Fresco

Se determinó la temperatura en estado fresco del concreto de acuerdo al procedimiento descrito en ASTM C1064/C1064M-08 [76], con la muestra que se utilizó para determinar la densidad, haciendo uso de un termómetro bimetálico para concreto.

6.4.6 Tiempos de Fraguado

Se determinaron los tiempos de fraguado final e inicial para cada serie, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C403-08 [77], que determina al tiempo de fraguado en función de la resistencia a la penetración de un espécimen elaborado con la fracción de mortero del concreto. Debido a que esta prueba requiere la elaboración de probetas de mortero, se realizó un cribado en húmedo del concreto en estado fresco a través de una malla #4, con una abertura de 4.76 mm, y con el material obtenido se elaboraron las probetas.

Tabla 3. Pruebas en Estado Fresco a las Mezclas de Concreto

Estándar / Norma / Prueba	Definición de la Prueba
ASTM C 1611	Método de prueba estándar para determinar la extensibilidad del concreto autocompactable
ASTM C 1621	Método de prueba estándar para determinar la extensibilidad en concreto autocompactable por medio del anillo J.
ASTM C 1610	Método de prueba estándar para determinar segregación estática en concreto autocompactable empleando la técnica de la columna.
ASTM C 138	Peso unitario, volumen producido y contenido de aire del concreto por el método gravimétrico
ASTM C 403	Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado de mezclas de concreto mediante la resistencia a la penetración.

6.5 PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO:

Además de las pruebas en estado fresco, para cada una de las mezclas de concreto que se definen en la Tabla 4, se elaborarán especímenes con el fin de evaluar algunas propiedades del concreto en estado endurecido, las pruebas que se realizarán a los especímenes se describen a continuación:

Tabla 4. Pruebas en Estado Endurecido a las Mezclas de Concreto Autocompactable

Estándar / Norma / Prueba	Definición de la Prueba	Edad de ensaye
ASTM C 39	Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la compresión para especímenes cilíndricos de concreto	3, 7, 14, 21, 28 y 56 días
ASTM C 469	Método de prueba estándar para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en el concreto	28 días
Resistividad eléctrica	Medición de la resistividad eléctrica del concreto.	28, 56 y 90 días.
Permeabilidad a los iones cloro	Medición de la permeabilidad de especímenes de concreto al ingreso de iones cloro.	28, 56 y 90 días.

6.5.1 Resistencia a Compresión

Para cada serie, se determinó su resistencia a la compresión, ensayando para cada edad de prueba 3 especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C39 [78]. Para el ensaye de los especímenes, fue necesario cabecear las superficies

donde se aplicaría la carga con mortero de azufre de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C617 [79].

6.5.2 Módulo de Elasticidad

Para cada serie, se determinó su módulo de elasticidad estático a compresión, ensayando para cada edad de prueba 3 especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C469 [80], que define al módulo de elasticidad como la pendiente de una secante en la curva de deformación unitaria vs. esfuerzo. Para el ensaye de los especímenes, fue necesario cabecear las superficies donde se aplicaría la carga con mortero de azufre de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C617 [79]. En la Fig. 20 se muestra el espécimen habilitado durante el ensaye.



Fig. 20. Prueba para determinación del módulo de elasticidad estático del concreto

6.5.3 Resistividad Eléctrica Superficial

Para cada serie, se determinó su resistividad eléctrica superficial, con un medidor de resistividad de cuatro puntos de tipo Werner, de la marca Resipod, de la compañía PROCEQ, que se muestra en la Fig. 21. Para cada edad de prueba se midieron 3 especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma AASHTO TP95-11[81]. Esta norma permite determinar la resistividad eléctrica superficial del concreto, y adicionalmente, clasificar cualitativamente la penetración de iones cloruro en el concreto de acuerdo a lo indicado en la Tabla 10.



Fig. 21. Medidor de resistividad Superficial Resipod

Tabla 10. Penetración de Cloruros de acuerdo a la AASHTO TP95-11

Penetración de cloruros	Resistividad Superficial en especímenes de 100 mm x 200 mm (kΩ.cm)
Alta	< 12
Moderada	12 – 21
Baja	21 – 37
Muy Baja	37 – 254
Despreciable	> 254

6.5.4 Coeficiente de Migración de Cloruros

Para cada serie, se determinó el coeficiente de migración de cloruros en el concreto, mediante experimentos de migración en un estado de no-equilibrio, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma NT BUILD 492 [82]. Para esta norma se utilizó como fuente de poder el equipo de la marca Proove'it, de la compañía Germann Instruments, que se muestra en la Fig. 22.

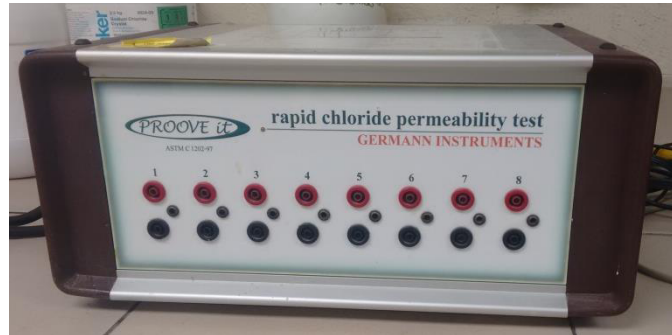


Fig. 22. Fuente de Poder

CAPÍTULO 7: RESULTADOS Y DISCUSION

7.1 CARACTERIZACION DE MATERIALES

Se realizó la caracterización de los materiales para obtener las propiedades físicas y químicas necesarias para el diseño de las mezclas de concreto, así como para respaldar el análisis y la discusión de los resultados.

7.1.1 Cemento y Vidrio de Borosilicatos

En el capítulo 5 se especifican los polvos minerales utilizados en el presente proyecto, los cuales son: el cemento Portland y polvo de vidrio de borosilicatos, con distintos tiempos de molienda.

7.1.1.1 Densidad

Para la determinación de la densidad del cemento Portland y los polvos de vidrio se realizaron dos pruebas simultáneas, y se verificó que se cumpliera con la sección 6.1 de la norma ASTM C188 [66], la cual especifica que el resultado

de la prueba efectuada por un solo operador a un mismo material, no debe presentar una variación mayor a ± 0.03 . En la Tabla 11 se muestran los resultados promedio obtenidos.

Tabla 11 Densidad del Cemento Portland y los Vidrios de Borosilicato

Material	Densidad (g/cm³)
CPO 40	3.13
Vidrio BS200	2.26
Vidrio BS400	2.27
Vidrio V20	2.27
Vidrio V40	2.28
Vidrio V60	2.28

De la Tabla 11, se puede observar que la densidad del vidrio no cambia de manera significativa con el tiempo de molienda.

7.1.1.2 Distribución de tamaño de partícula

De acuerdo con la distribución de tamaño de partículas de los polvos minerales utilizados en la matriz experimental, los cuales se ilustran en la Fig. 23, puede observarse que entre los polvos de vidrio con 40 y 60 minutos de pulverización no existe una diferencia considerable y si se llegasen a requerir partículas más finas, sería necesario emplear un método de trituración distinto. Además se puede observar que los polvos de vidrio utilizados son más gruesos que el cemento Portland.

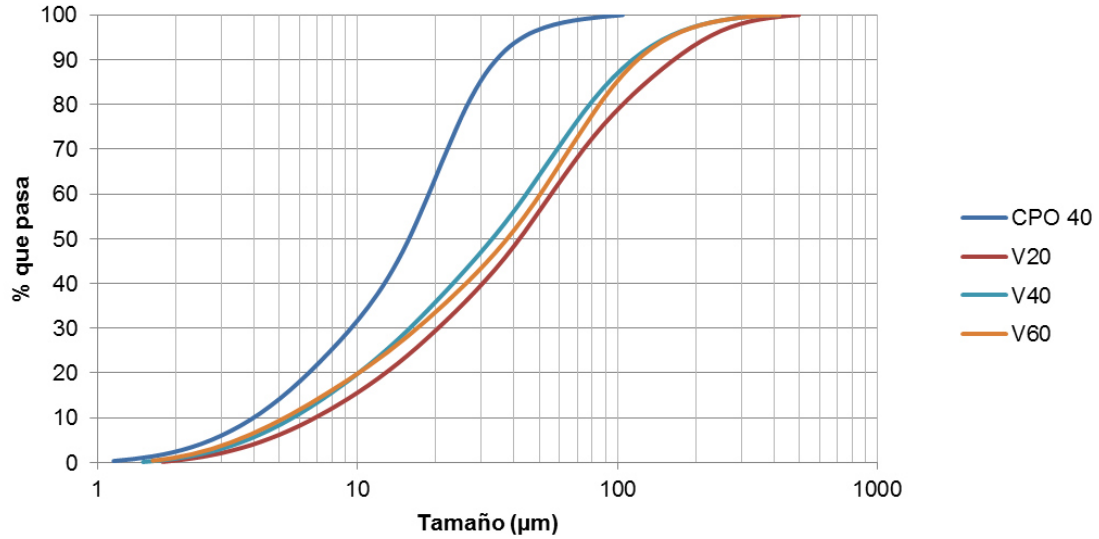


Fig. 23. Distribución de tamaño de partículas para los polvos minerales

Para el presente proyecto se utilizaron los polvos de vidrio V20, V40 y V60, a pesar de tener un contenido de partículas de entre 20% y 30 % mayores a 74 µm, considerando que se ha observado en trabajos previos que el polvo de vidrio reduce las expansiones producto de la RAS de partículas mayores [23-26], para ese tamaño de partícula el efecto es predominantemente puzolánico [29], y el criterio de la ASTM C1260 es conservador en su interpretación [28].

Además de la distribución de tamaño de partícula, el analizador MICROTRAC nos permite obtener un valor de área superficial en m^2/cm^3 , y al dividir este valor entre su densidad, podemos obtener su área superficial en m^2/g . En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos para los polvos de vidrio, donde se observa que la finura aumenta muy poco entre los polvos de vidrio con 40 y 60 minutos de pulverización.

Tabla 12 Área Superficial de los polvos minerales

Material	Área Superficial (m^2/cm^3)	Área Superficial (m^2/g)
V20	3.34×10^{-1}	1.47×10^{-1}
V40	4.09×10^{-1}	1.79×10^{-1}
V60	4.15×10^{-1}	1.82×10^{-1}

7.1.1.3 Composición química

Mediante la técnica de Fluorescencia de rayos X (FRX), se determinó la composición química del vidrio de borosilicatos, así como del cemento Portland utilizado. En la Tabla 13 se muestra la composición química de ambos materiales, donde se comprueba que el vidrio es altamente rico en boro y sílice, con contenidos considerables de álcalis.

Tabla 13 Composición química de los polvos minerales utilizados

Material	Contenido de óxido, en %											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	B ₂ O ₃
CPO 40	17.665	4.718	2.263	63.678	1.202	5.116	0.659	0.743	0.235	0.092	0.078	-
Vidrio BS	80.25	2.25	0.02	0.18	0.01	-	5.3	0.19	-	-	-	11.80

7.1.1.4 Presencia de Fases Minerales

En la Fig. 24 se muestra el difractograma del CPO 40, donde se observa que destaca la presencia de silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A), ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) y, yeso en sus fases hemihidrato (CaSO₄·½H₂O) y anhidrita (CaSO₄·½H₂O), fases típicas del cemento Portland.

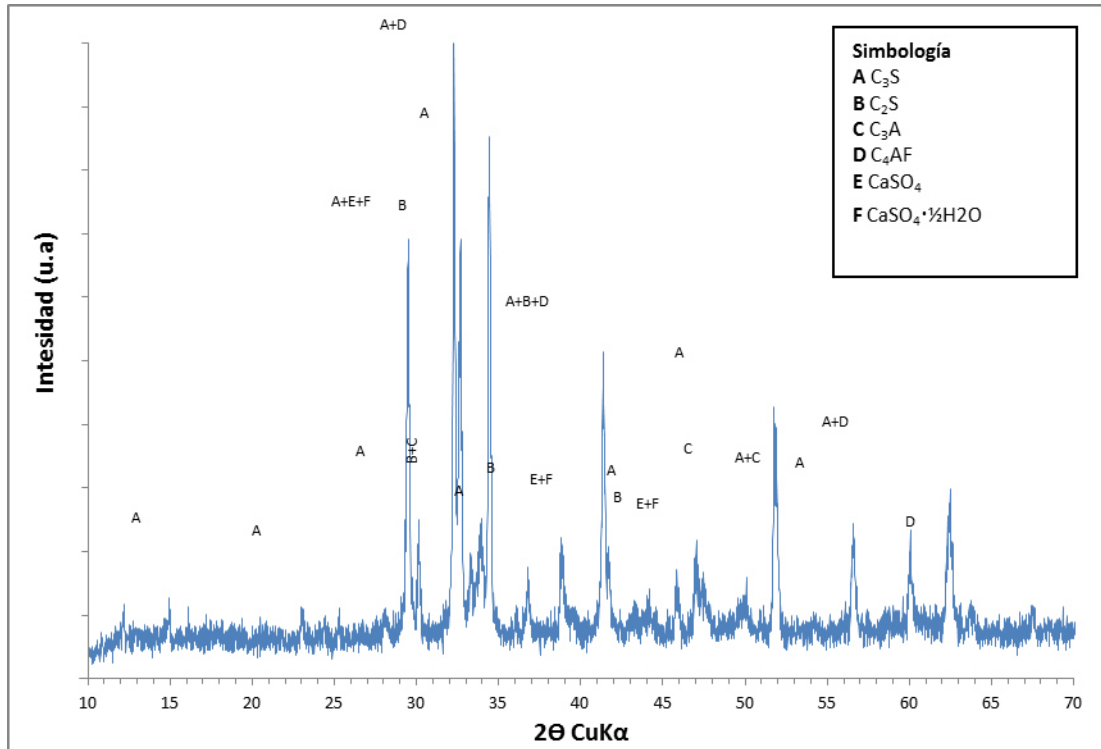


Fig. 24 Difractograma del CPO 40

En el difractograma del vidrio de BS, que se muestra en la Fig. 25, se puede observar que el material es altamente amorfo, sin presencia evidente de alguna fase mineral.

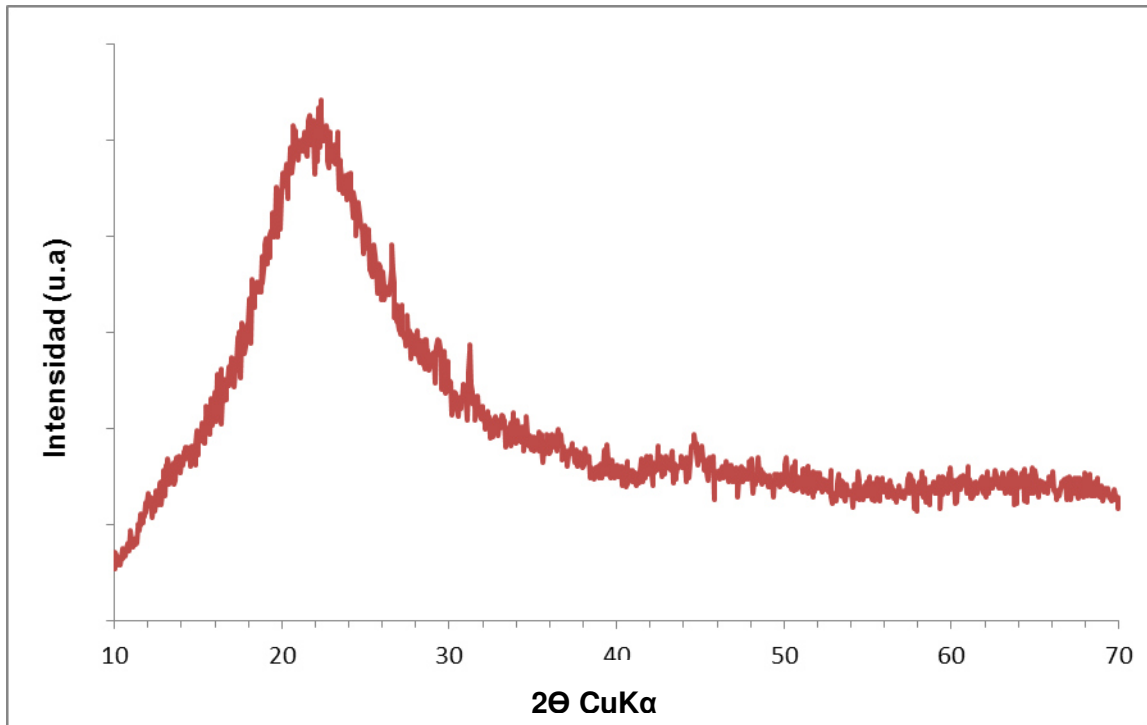


Fig. 25 Diffractograma del vidrio de BS

7.1.1.5 Morfología del vidrio de BS

Para el vidrio de BS, se puede observar en la microscopía óptica de la Fig. 26 que la morfología de las partículas que componen el polvo de vidrio de BS, posterior a la trituration secundaria, consiste de partículas angulosas con superficies lisas.

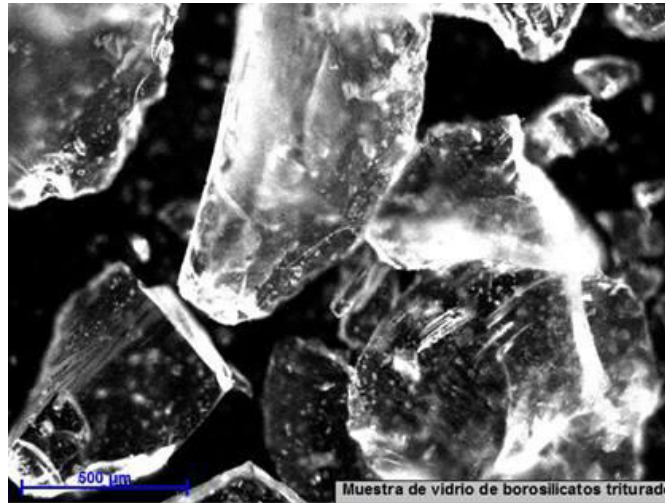


Fig. 26. Muestra de vidrio de BS vista con microscopio óptico

7.1.2 Agregados

7.1.2.1 Densidad y Absorción

En la Tabla 14 se muestran los valores determinados para la densidad y la absorción de los agregados fino y grueso utilizados en el proyecto. Estos valores son típicos para agregados calizos de la región.

Tabla 14 Densidad y Absorción de los agregados utilizados

Material	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)
Agregado Fino	2.62	1.58
Agregado Grueso	2.69	0.4

7.1.2.2 Granulometría

En la Fig. 27 se ilustra la distribución del agregado fino, así como los límites según la ASTM C 33. Con los datos de la distribución granulométrica se determinó que un 15.085% presenta un tamaño de partícula menor a 125 μm, por lo que esta fracción se considerará como parte de los polvos del CAC en el diseño de mezclas.

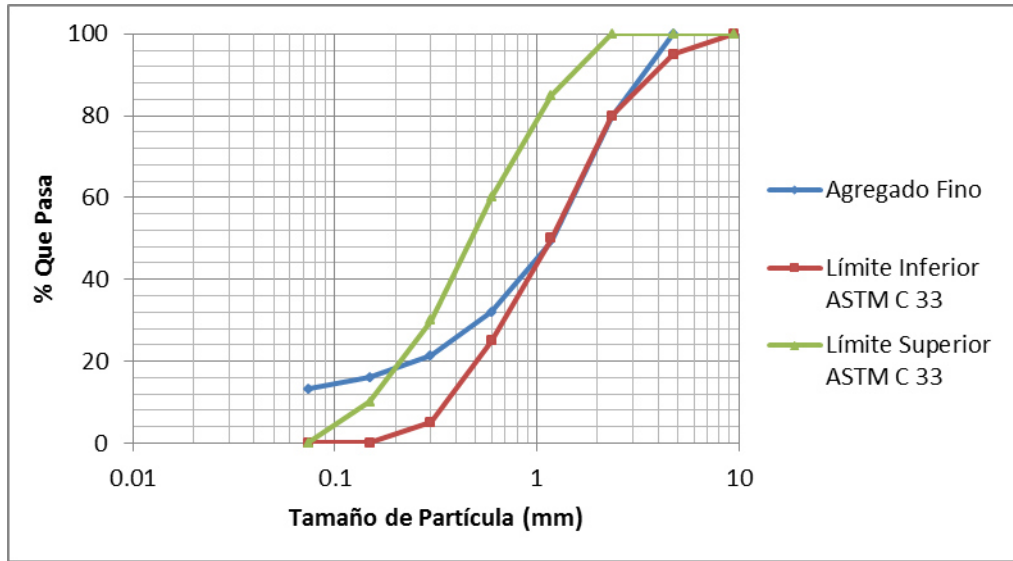


Fig. 27 Distribución granulométrica del agregado fino

En la Fig. 28 se ilustra la distribución del agregado grueso, así como los límites según la ASTM C 33.

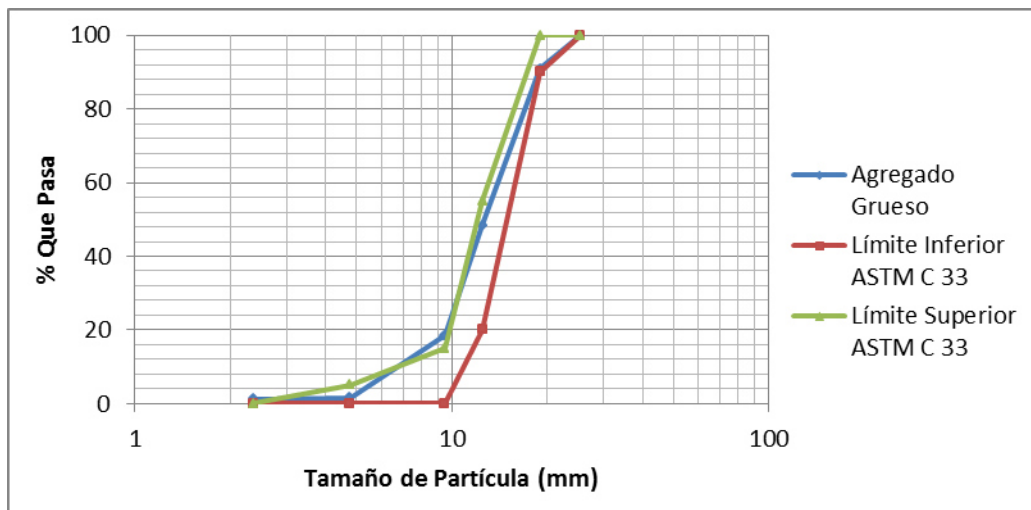


Fig. 28 Distribución granulométrica del agregado grueso

El que los agregados estén fuera de los límites recomendados por ASTM, sobre todo en el caso del agregado fino, considerablemente excedido en su contenido de finos, afectará mayormente en las propiedades en estado fresco

del CAC, lo cual se vio reflejado al diseñar la mezcla de CAC de referencia para el proyecto.

7.1.3 Aditivo reductor de agua de alto rango

7.1.3.1 Densidad y contenido de sólidos

Para el aditivo reductor de agua de alto rango utilizado en el presente proyecto se obtuvo experimentalmente una densidad de 1.09 g/cm^3 y un contenido de sólidos de 43%.

7.2 DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA ÓPTIMO PARA SU USO EN MEZCLAS BASE CEMENTO PORTLAND

7.2.1 Tratamiento Preliminar del vidrio de BS

En esta etapa preliminar de la experimentación, se incorporaron selectivamente partículas de vidrio tamaños específicos cribando el material a través de mallas con el fin de evaluar el tamaño máximo de partícula de vidrio de BS aprovechable en mezclas de CAC sin potencial riesgo de expansiones producto de la RAS.

Es esta etapa fue necesario determinar la distribución de tamaño de partícula del polvo de vidrio identificado como BS400, ya que correspondía a polvo de vidrio que pasa la malla #200, pero no indica de manera efectiva su tamaño promedio de partícula.

En la Fig. 29 se muestra la distribución granulométrica del polvo de vidrio BS400, y de acuerdo con los datos medidos del equipo, su tamaño promedio de partícula es de $41.56 \mu\text{m}$.

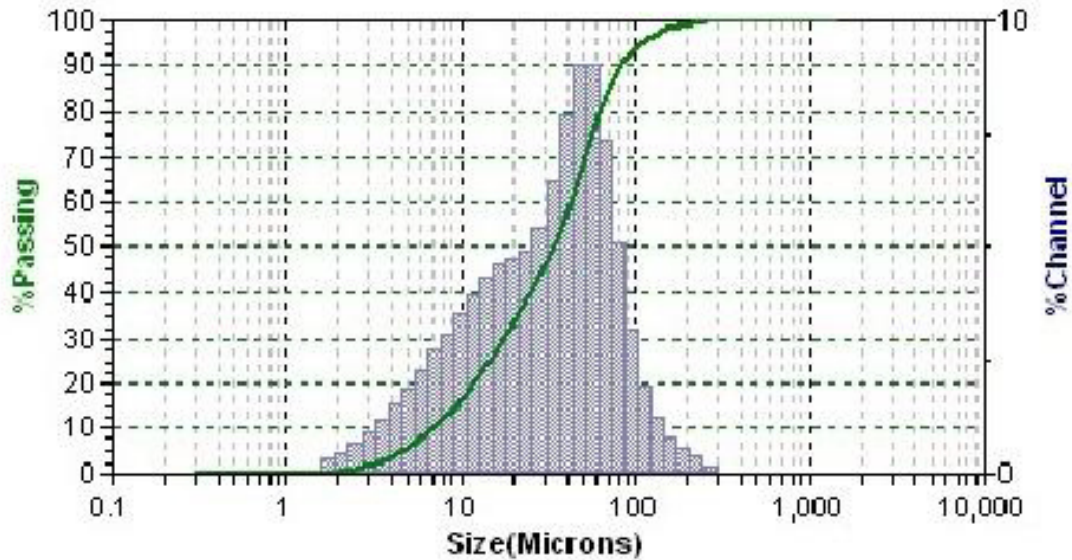


Fig. 29. Distribución de tamaño de partícula del polvo de vidrio BS400

7.2.2 Expansiones potenciales por RAS

Para las diferentes series de prueba se determinó su expansión potencial por RAS, según el procedimiento descrito en ASTM C1260-07 [71], comparando el valor de expansión obtenido para las distintas mezclas a 14 días con el límite máximo recomendado por ASTM para considerarse un agregado como no reactivo (0.1%).

En la Fig. 30 se muestran las expansiones potenciales producto de la RAS para distintos tamaños máximos de partícula de vidrio; además se delimitan las zonas de expansión definidas por ASTM como: no reactivo (verde), no concluyente (amarillo) y potencialmente dañinos (rojo).

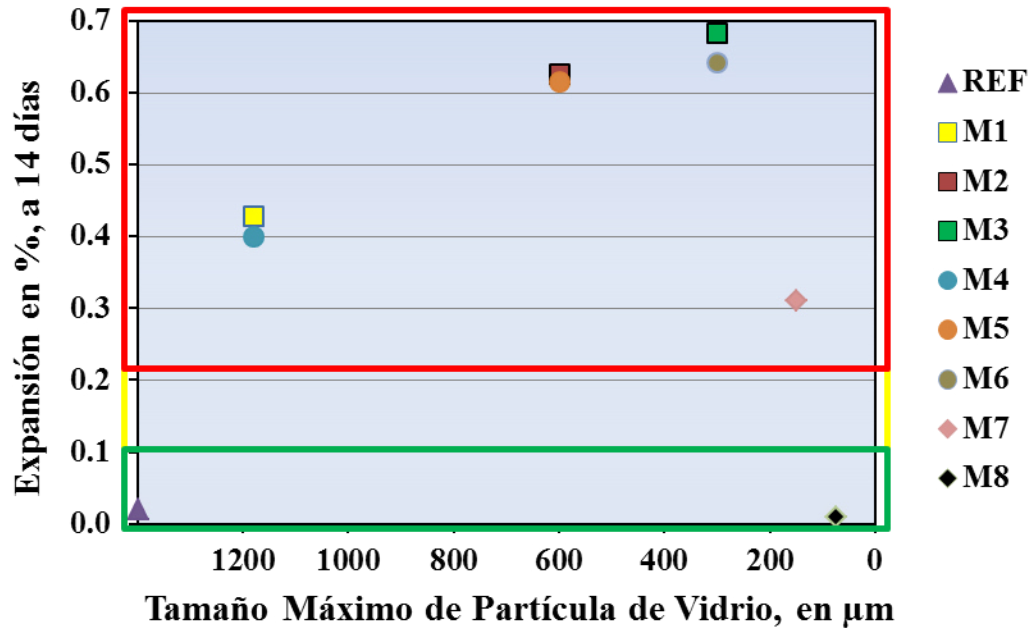


Fig. 30 Mediciones de expansión a 14 días según ASTM C1260

De acuerdo a la Fig. 30 se pueden observar dos efectos: (1) el uso de polvo de vidrio BS contribuye a mitigar la expansión producida por la reacción álcali-sílice de las partículas de vidrio BS con tamaño de agregado fino; y (2) a menor tamaño de partícula de vidrio de BS, se tiene cada vez más una mayor expansión por la reacción álcali-sílice, hasta llegar a un punto máximo, a partir del cual se tienen menores expansiones al reducir el tamaño máximo de partícula de vidrio de BS, lo cual es congruente con el efecto observado por Jin et. al [30]. Finalmente, de acuerdo a las expansiones medidas, se considera que es posible utilizar polvo de vidrio con un tamaño máximo de partícula menor a $74 \mu\text{m}$, sin un riesgo potencial de que se presenten expansiones dañinas producto de la RAS.

7.2.3 Efecto de la RAS en la resistencia a compresión de morteros.

En la Fig. 31 y la Fig. 32 se grafica el % de resistencia a compresión obtenida para cada una de las mezclas de prueba con respecto a la resistencia de la mezcla de referencia a dicha edad, a edades de ensaye de 7 y 14 días de exposición a las condiciones de curado de la ASTM C1260. De aquí se puede observar que en general, para ambas edades, entre mayor sea el tamaño de

partícula, menor será la resistencia a la compresión del elemento una vez que se presente la reacción álcali-sílice, y el efecto negativo de la reacción álcali-sílice es más marcado en edades tempranas.

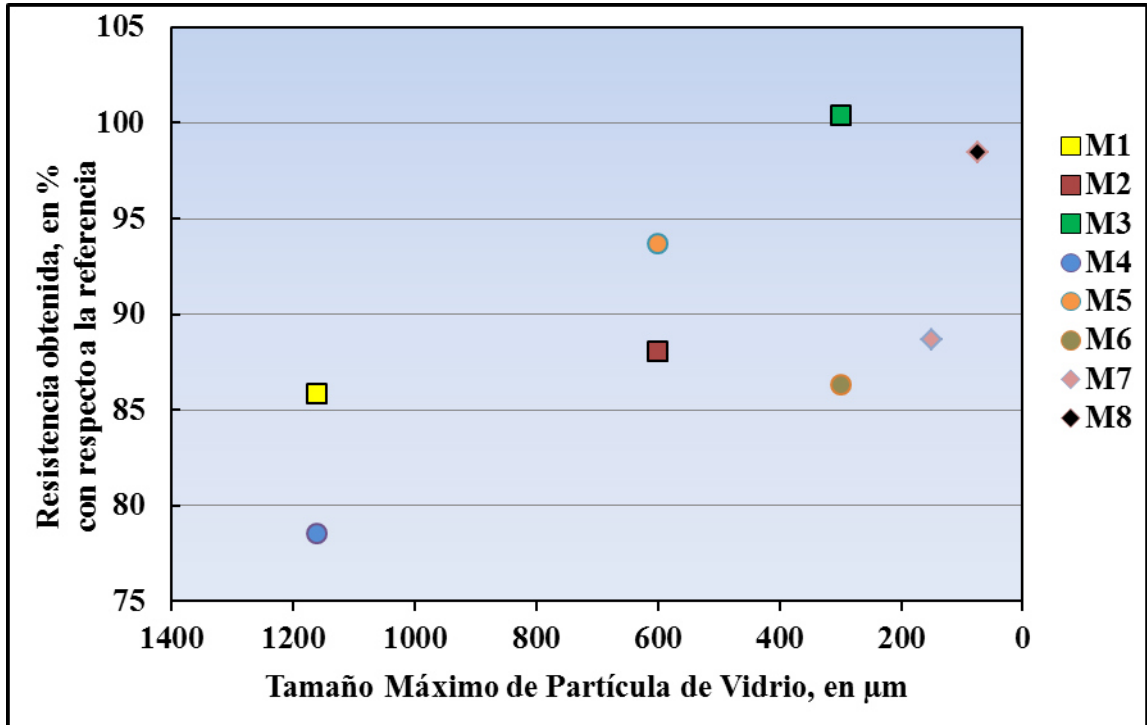


Fig. 31 Resistencia a la compresión a 7 días de exposición

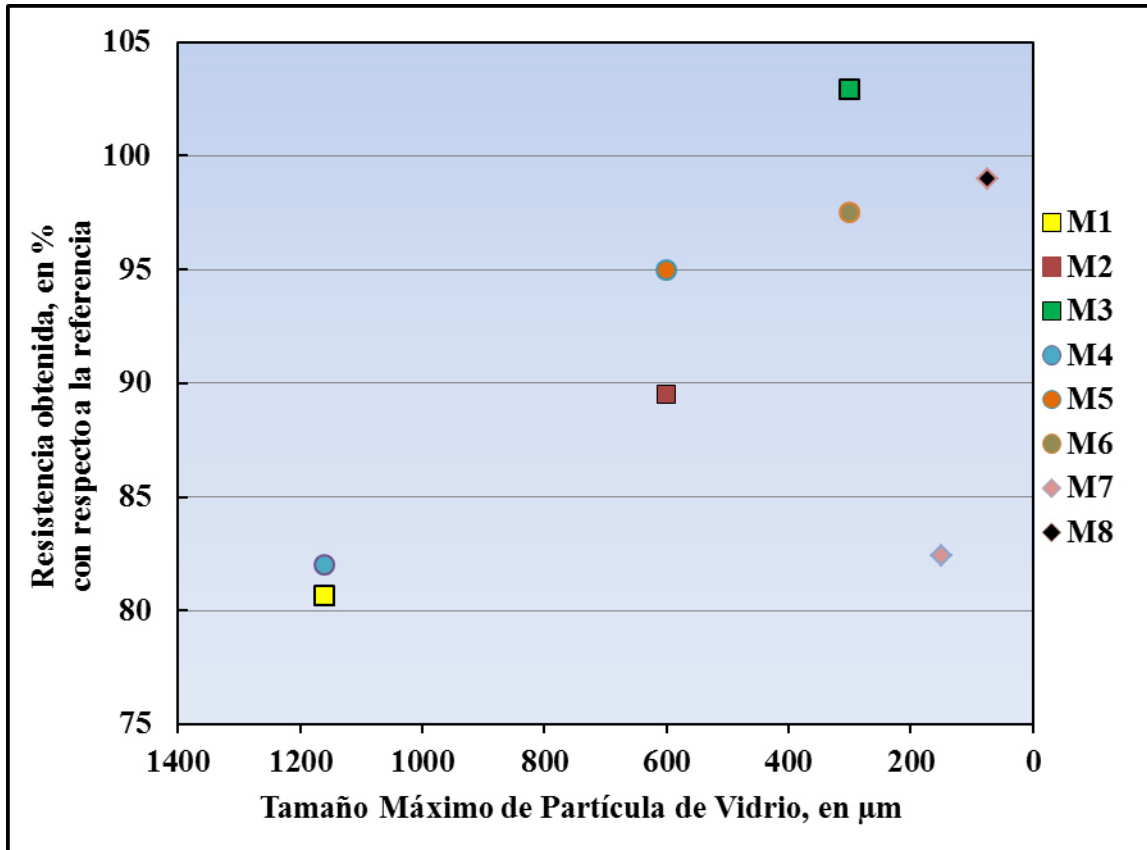


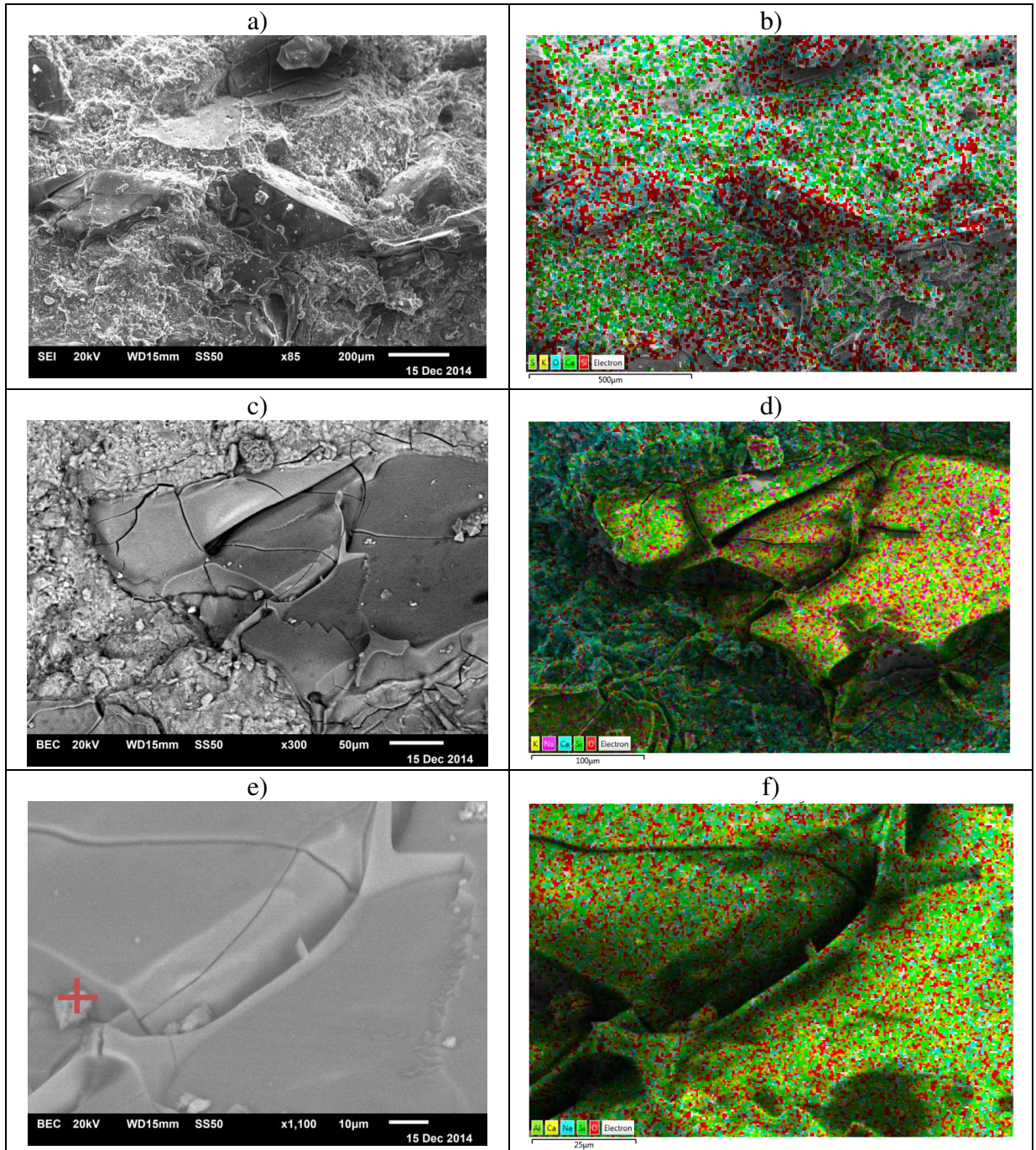
Fig. 32 Resistencia a la compresión a 14 días de exposición

7.2.4 Caracterización microestructural mediante SEM y EDS

En la Tabla 15, se puede observar, la matriz del mortero con el mayor tamaño de partículas de vidrio BS. De la imagen en a), y su correspondiente EDS en b), podemos observar que los álcalis (potasio), se depositan en la periferia de las partículas de vidrio, produciendo la reacción álcali-sílice. Además, en la imagen c) y su correspondiente EDS en d), podemos observar que en general toda la partícula de vidrio se encuentra levemente cubierta por álcalis. Además en esta imagen podemos apreciar las grietas en la partícula de vidrio, que se extienden hasta la pasta provocando las grietas nocivas. Finalmente, en la imagen e) y su EDS en f), se muestra un acercamiento a una grieta en una partícula de vidrio, donde vemos que se depositan compuestos, principalmente producto de la reacción álcali-sílice, sin embargo, en la superficie, indicado con

una cruz roja, se muestra que crecen cristales cuya composición química semeja al C-S-H.

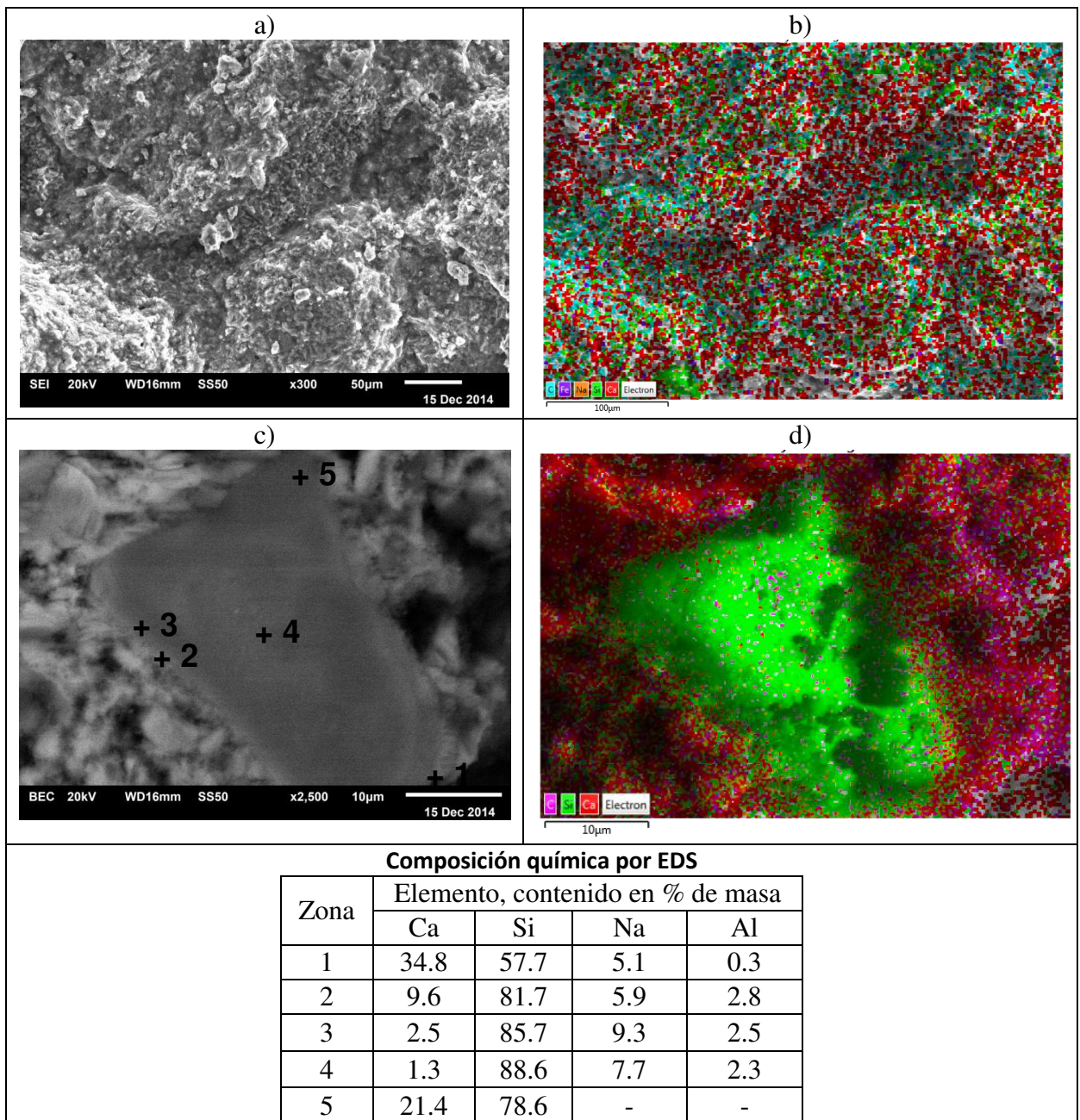
Tabla 15 Imágenes SEM de muestras de la serie M1.



Con base a lo observado en la Tabla 16, para la muestra con el polvo de vidrio que pasa la malla #200, podemos observar una matriz mucho más homogénea,

y la ausencia de agrietamientos por retracción álcali-sílice, lo cual es congruente con las expansiones reportadas en la prueba; además, en las imágenes c) y d) podemos observar una partícula de vidrio BS, la cual de acuerdo con las lecturas del EDS, está llevando a cabo una conversión gradual a C-S-H, al observarse que el contenido de calcio es mayor en la zona exterior de la partícula de vidrio, y disminuye hacia el centro de la partícula.

Tabla 16 Imágenes SEM de muestras de la serie M400.



7.3 MEZCLA DE CAC DE REFERENCIA

7.3.1 Contenido de cementante y contenido total de polvos

A pesar de que para la extensibilidad objetivo es sugerido un contenido de polvos cercano a los 450 kg/m^3 de concreto [51], en las mezcla de referencia se tiene un contenido de polvos de 622 kg/m^3 de concreto, debido a los siguiente:

- El agregado grueso calizo de la región, el más típicamente utilizado para la elaboración de concreto, presenta una cantidad considerable de partículas angulosas, las cuales en general reducen la habilidad de paso de las mezclas de CAC, por lo que fue necesario reducir el contenido de agregado grueso en el diseño de mezcla, aumentando el contenido de agregado fino.
- El agregado fino calizo de la región, tiene una gran cantidad de materiales finos, por lo que al aumentar el contenido de agregado fino de la mezcla de CAC, invariablemente se aumentó el contenido de polvos del CAC.

Se espera que debido a lo anterior, las mezclas del proyecto puedan ser de una viscosidad considerable, así como tener problemas en su habilidad de paso y acabado.

7.3.2 Propiedades de Autocompactabilidad

En la Tabla 17 se muestran los valores de las propiedades de autocompactabilidad obtenidos para la mezcla de referencia, en comparación con los valores objetivo definidos en 6.2. En este aspecto es importante mencionar que para la mezcla de referencia se trabajó con el valor en el límite inferior del rango objetivo para evitar la segregación en las mezclas de prueba, debido a que en los antecedentes se mencionaba que la inclusión de vidrio tiende a aumentar la extensibilidad.

Tabla 17. Propiedades de Autocompactabilidad obtenidas para la Mezcla de Referencia

Clase Objetivo	Prueba y valor objetivo	Valor Obtenido
Fluidez clase SF2	Extensibilidad (ASTM C 1611) = 660 – 750 mm	662.5 mm
Resistencia a la segregación clase SR2	Resistencia a la segregación estática (ASTM C 1610) ≤ 15 %	0 %
Homogeneidad / Acabado	Índice de Estabilidad Visual (ASTM C 1611) = 0-1	0

7.4 MEZCLAS DE PRUEBA

7.4.1 Propiedades en Estado Fresco

Al momento de elaborar las mezclas de prueba del proyecto, se observó que la sustitución en volumen de cemento por el polvo de vidrio aumentaba en gran medida la extensibilidad, y se tenían mezclas de CAC de muy mala calidad, con alta segregación. Para evitar lo anterior, se redujeron las dosificaciones de aditivo reductor de agua de alto rango en las mezclas de prueba.

Las propiedades en estado fresco de las mezclas de prueba, así como la dosificación de aditivo utilizada, se muestran en la Tabla 18 y Tabla 19.

Tabla 18. Propiedades en estado fresco de las mezclas de prueba (Parte 1)

Serie	Extensibilidad (cm)	T50 (seg)	VSI	Ext. Anillo J (cm)	Segregación (%)
REF	66.25	2.2	0	59.5	0
V20-10M	55	10.6	0	45	0
V20-20M	70	2.45	1	60.25	0

V20-30M	69	4.15	1	66.25	0
V40-10M	72	2	0	64.5	0
V40-20M	61	5.2	0	52.5	0
V40-30M	71.5	4.86	1	70	0
V60-10M	52.5	10	0	44.5	0
V60-20M	72.5	6	1	64.5	1.65
V60-30M	63.5	3.2	1	61.5	0

Tabla 19. Propiedades en estado fresco de las mezclas de prueba (Parte 2)

Serie	Peso Volumétrico (kg/m³)	Contenido de Aire (%)	Temperatura (°C)	Dosificación Aditivo (ml/kg C)
REF	2370	4.2	21	3.1
V20-10M	2363	4.7	19	2.85
V20-20M	2362	2.8	19	2.65
V20-30M	2354	4.5	18	2.5
V40-10M	2346	4.0	17	2.85
V40-20M	2345	2.9	17	2.65
V40-30M	2357	2.0	17	2.55
V60-10M	2360	3.3	17	2.85
V60-20M	2358	3.0	17	2.65
V60-30M	2360	2.3	17	2.55

Comó se mencionó previamente, fue necesario modificar en el proporcionamiento las dosificaciones de aditivo, para que las mezclas de prueba mantuvieran su condición de CAC, sin embargo, esta modificación repercutió en algunas de las otras propiedades en estado fresco.

A continuación se sintetiza lo que se pudo observar en esta etapa:

- En general, la adición de polvo de vidrio aumentó la consistencia y viscosidad de las mezclas de prueba y redujo la habilidad de paso.
- En particular, el polvo de vidrio V40 fue el que más aumentó la consistencia en las mezclas de prueba. Por otro lado, el polvo de vidrio V60, con la mayor finura, fue el que aumentó la consistencia en menor medida.
- El polvo de vidrio reduce la cantidad de aire en el concreto, con mayores reducciones a mayor finura y contenido del vidrio.
- El polvo de vidrio reduce ligeramente la temperatura del concreto en estado fresco, debido a que al incluir el polvo de vidrio, se reduce la cantidad de cemento hidratándose por unidad de concreto.
- El polvo de vidrio, al ser más ligero que el cemento portland, reduce ligeramente el peso volumétrico del concreto en estado fresco, sin embargo, esto último no es tan notorio debido a la reducción del contenido de aire con el incremento en el contenido de vidrio.
- En general se observó que para las mezclas con más altas extensibilidades, se tuvieron índices de estabilidad visual de 1, lo que indicaría una leve segregación; sin embargo, la mayoría de las mezclas presentaron una nula o muy poca segregación. Este efecto puede explicarse considerando que las mezclas tenían una alta viscosidad y una deficiente habilidad de paso.
- La sustitución de cemento por polvo de vidrio, en general redujo la demanda de aditivo reductor de agua de alto rango, lo que puede interpretarse como un incremento en la consistencia del concreto.

7.4.2 Propiedades en Estado Endurecido

7.4.2.1 Resistencia a la Compresión

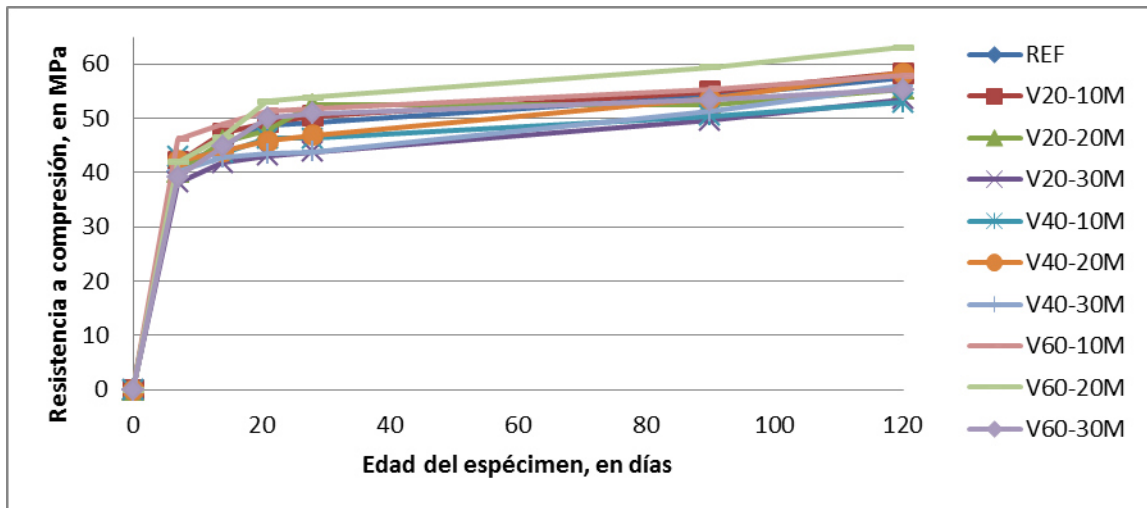


Fig. 33. Desarrollo de Resistencia a Compresión

En la Fig. 33 se ilustra el desarrollo de la resistencia a compresión para las distintas mezclas del proyecto, y en general se observa lo siguiente:

- En su mayoría, las mezclas estuvieron dentro de un rango de $\pm 10\%$ con respecto a la resistencia de referencia, lo que indica que la sustitución de cemento por polvo de vidrio en CAC, para los contenidos manejados en el presente proyecto, no tuvo un impacto significativo.
- En las mezclas con sustitución de cemento por polvo de vidrio, en general se tuvo un mayor desarrollo de resistencia con una mayor finura del vidrio, particularmente a edades avanzadas, debido al efecto puzolánico del mismo.
- En general, las mezclas con 30% de contenido de vidrio en sustitución en masa tuvieron resistencias menores a la de referencia, lo que indica que para maximizar las propiedades mecánicas del concreto, la sustitución de cemento por polvo de vidrio es de alrededor de 20-30% en masa.

7.4.2.2 Módulo de Elasticidad

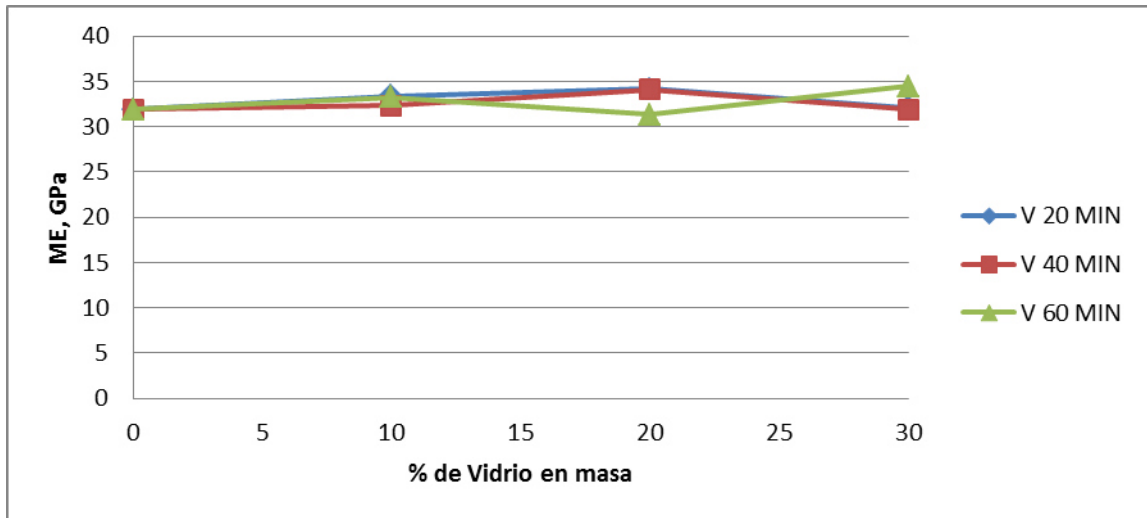


Fig. 34. Módulo de elasticidad estático según ASTM C496 a 28 días

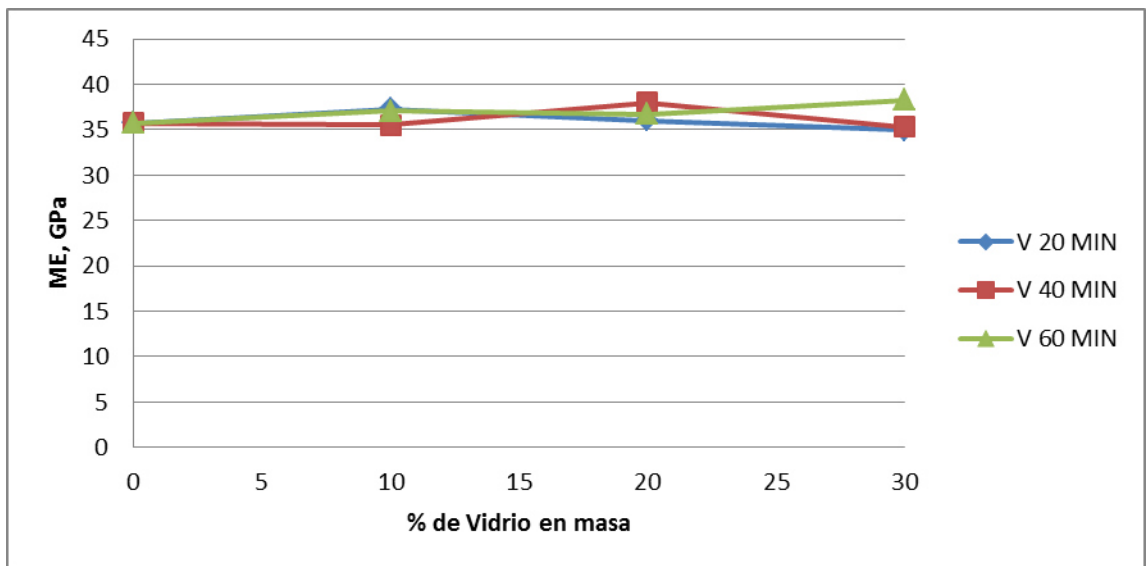


Fig. 35. Módulo de elasticidad estático según ASTM C496 a 90 días

En las Figuras 34 y 35, respectivamente, se ilustra el módulo de elasticidad estático obtenido para las mezclas del proyecto, a 28 y 90 días de curado, y se puede observar que en general, el módulo elástico del concreto no se ve afectado significativamente por la sustitución de cemento por polvo de vidrio. Se observa una muy ligera tendencia del módulo elástico a aumentar con el contenido de vidrio a 90 días de curado, la cual puede deberse al mayor

desarrollo de resistencia mecánica de algunas series en esas edades con respecto a la referencia.

7.4.2.3 Resistividad Eléctrica Superficial

En la Tabla 20 a continuación, se enlista la resistividad eléctrica superficial obtenida para las distintas series del proyecto, en k Ω .cm, las cuales fueron medidas a las edades de 28, 90 y 120 días de curado.

Tabla 20. Resistividad eléctrica superficial para las distintas series del proyecto, en k Ω .cm

Serie	28 días	90 días	120 días
REF	9.83	9.85	11.06
V20-10M	12.99	14.45	17.96
V20-20M	20.98	22.53	34.82
V20-30M	26.14	31.71	47.26
V40-10M	13.28	15.14	20.98
V40-20M	22.29	27.79	41.16
V40-30M	43.25	50.95	70.29
V60-10M	15.15	17.23	23.04
V60-20M	28.60	38.58	48.38
V60-30M	34.53	46.16	67.56

Estos resultados, para facilitar su interpretación y análisis, se presentan como se describe a continuación:

- En las Fig. 36, 37 y 38, se ilustra la resistividad eléctrica superficial, en % con respecto al valor obtenido para la mezcla de referencia, por edad de ensaye, para las mezclas de las series V20, V40 y V60 respectivamente.
- En las Fig. 39, 40 y 41, se ilustra la resistividad eléctrica superficial, en % con respecto al valor obtenido para la mezcla de referencia, por mezcla de prueba, para las mezclas de las series V20, V40 y V60 respectivamente.

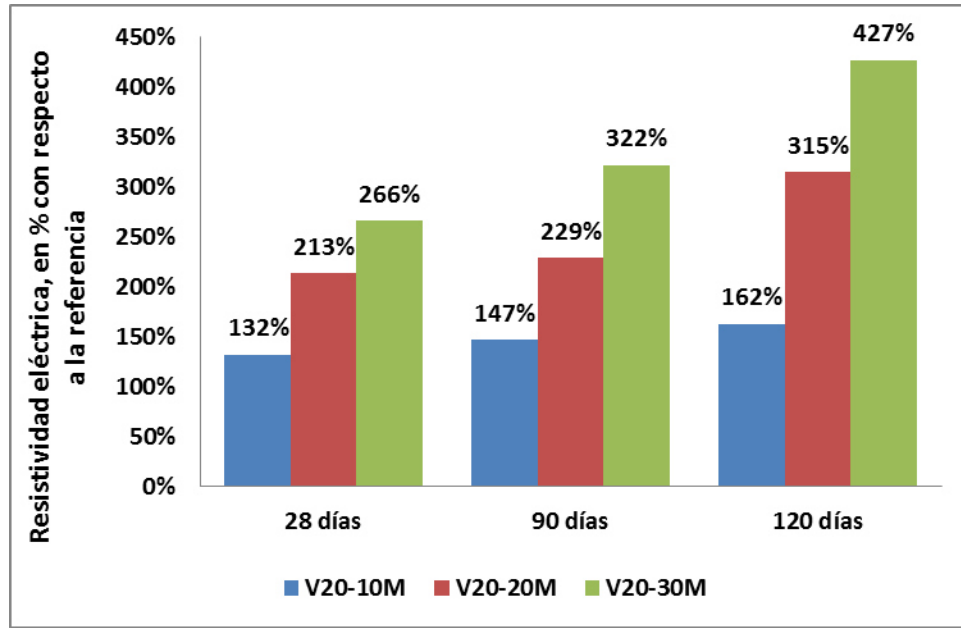


Fig. 36. Desarrollo de la Resistividad Eléctrica Superficial, para las mezclas de la serie V20, por edad de ensaye, en % con respecto a la referencia (REF)

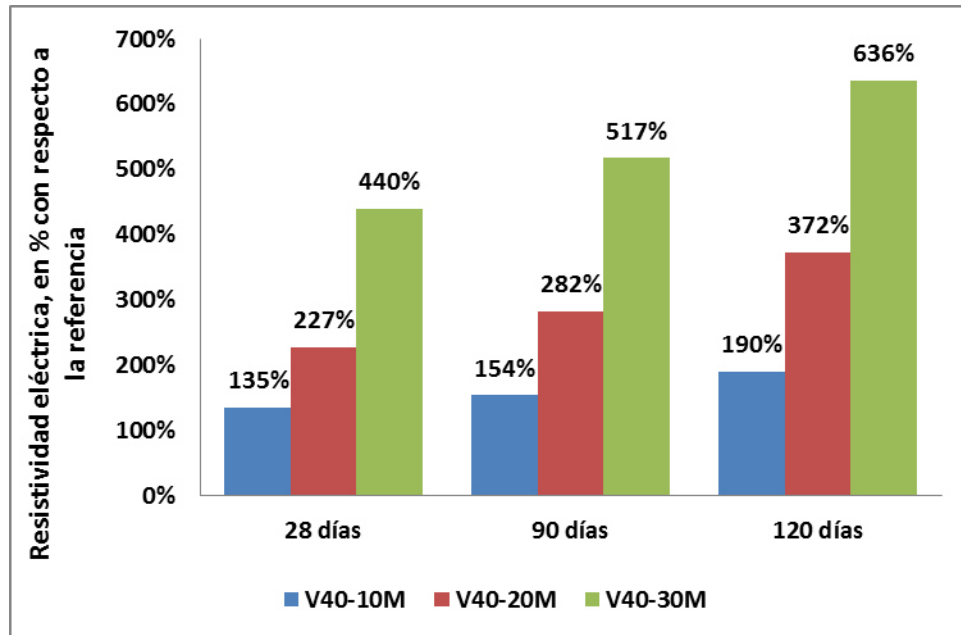


Fig. 37. Desarrollo de la Resistividad Eléctrica Superficial, para las mezclas de la serie V40, por edad de ensaye, en % con respecto a la referencia (REF)

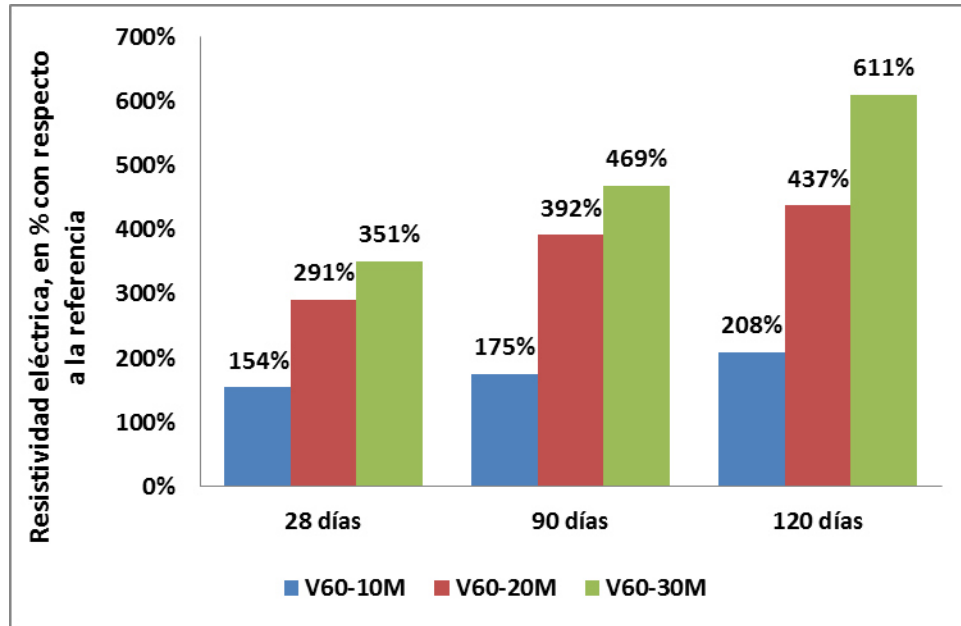


Fig. 38. Desarrollo de la Resistividad Eléctrica Superficial, para las mezclas de la serie V60, por edad de ensaye, en % con respecto a la referencia (REF)

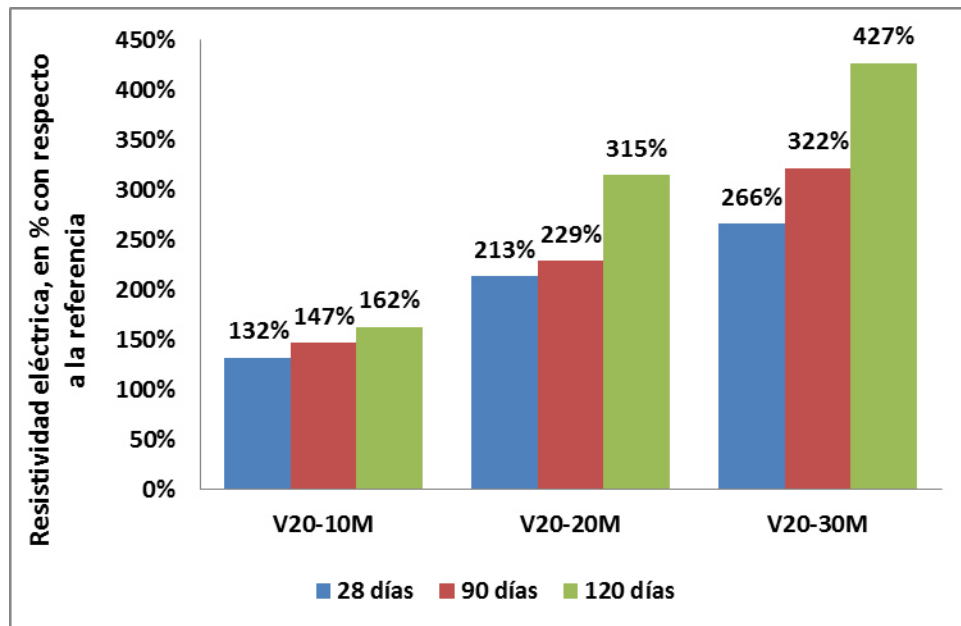


Fig. 39. Desarrollo de la Resistividad Eléctrica Superficial, para las mezclas de la serie V20, por serie, en % con respecto a la referencia (REF)

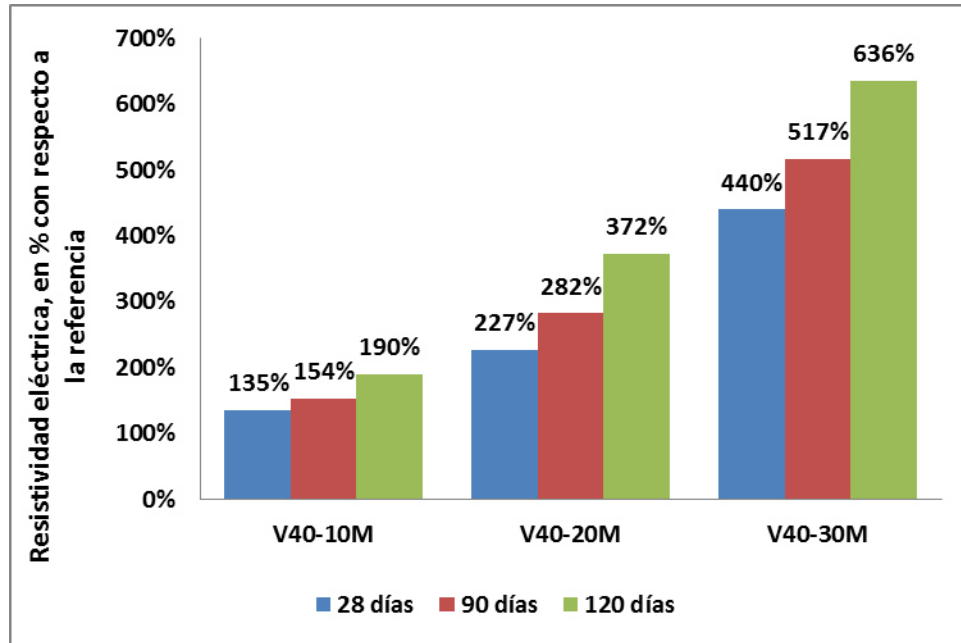


Fig. 40. Desarrollo de la Resistividad Eléctrica Superficial, para las mezclas de la serie V40, por serie, en % con respecto a la referencia (REF)

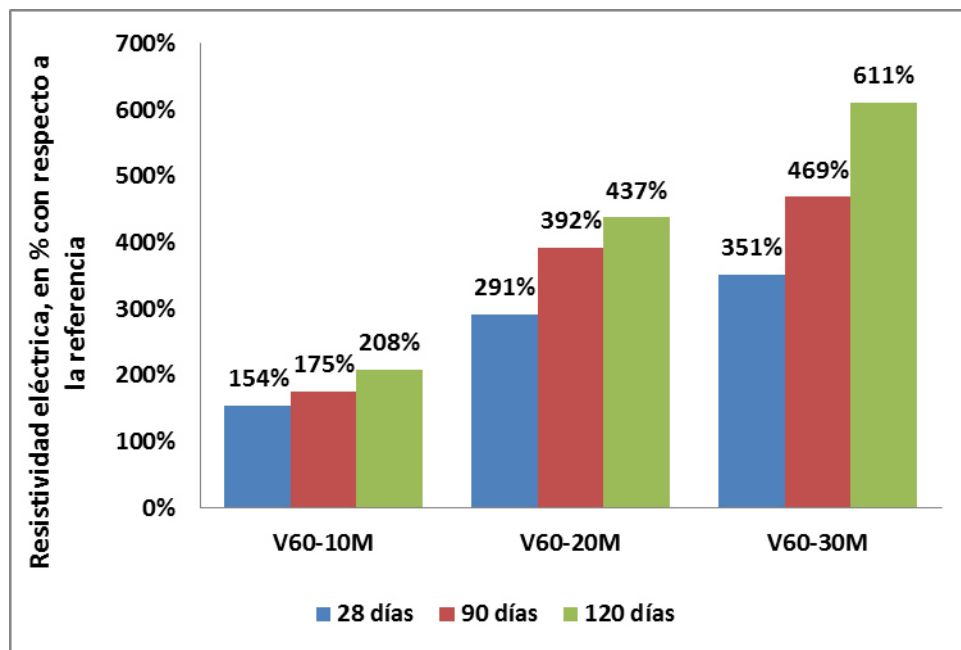


Fig. 41. Desarrollo de la Resistividad Eléctrica Superficial, para las mezclas de la serie V60, por serie, en % con respecto a la referencia (REF)

Con base a los resultados, se observa lo siguiente:

- La sustitución de cemento por polvo de vidrio, aumenta la resistividad y aumenta la durabilidad del concreto, para todos los tiempos de pulverización, consumos de polvo de vidrio y edades de ensaye.
- A mayor finura del vidrio se tuvieron mejores resultados de resistividad, con valores muy similares para las mezclas con polvo de vidrio con 40 y 60 minutos de pulverización.
- De las mezclas de prueba, las que tuvieron la mayor mejora con respecto a su resistividad fueron las mezclas con 30% de sustitución de cemento por polvo de vidrio en masa, seguidas por las mezclas con 20% de sustitución; este efecto, aunado a que los mejores resultados se obtuvieron a edades avanzadas, se debe al efecto puzolánico y como filler de las partículas de vidrio en la matriz de cemento.

7.4.2.4 Coeficiente de Migración de Iones Cloro

En la Tabla 21 a continuación, se enlistan los coeficiente de migración de iones cloro D_{nssm} , según NT BUILD 492, para las distintas mezclas del proyecto, x $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, las cuales fueron medidas a las edades de 28 y 90 días de curado.

Tabla 21. Coeficiente de migración de iones cloro D_{nssm} , según NT BUILD 492, para las distintas mezclas del proyecto, x $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

Serie	28 días	90 días
REF	6.97	9.08
V20-10M	11.05	7.13
V20-20M	10.28	6
V20-30M	5.6	4.01
V40-10M	11.12	7.27
V40-20M	8.47	5.71
V40-30M	6.72	1.64
V60-10M	9.88	6.66
V60-20M	6.69	2.47
V60-30M	5.62	1.46

Estos resultados, para facilitar su interpretación y análisis, se presentan como se describe a continuación:

- En las Fig. 42, 43 y 44, se ilustra el coeficiente de migración de iones cloro, en % con respecto al valor obtenido para la mezcla de referencia, por edad de ensaye, para las mezclas de las series V20, V40 y V60 respectivamente. En estas gráficas, el valor para la mezcla de referencia (100%) se marca con una línea roja, para ilustrar que las mezclas con valores superiores a éste, tendrán una mayor migración de iones cloro, y por ende, menor durabilidad, y viceversa.
- En la Fig. 45, se ilustra el coeficiente de migración de iones cloro, en % con respecto al valor obtenido para la mezcla de referencia, para las mezclas de prueba del proyecto a las edades de ensaye. Nuevamente, en la gráfica, mezclas con valores superiores al 100% de la referencia, tendrán una mayor migración de iones cloro, y por ende, menor durabilidad, y viceversa.

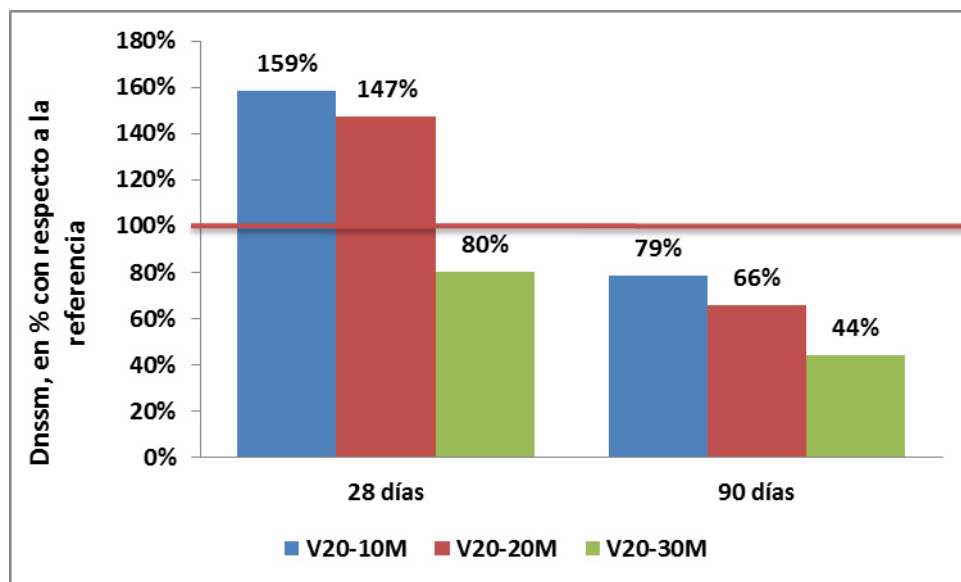


Fig. 42. Coeficiente de migración de iones cloro Dnssm, según NT BUILD 492, para las mezclas de la serie V20, por edad de ensaye, en % con respecto a la referencia (REF)

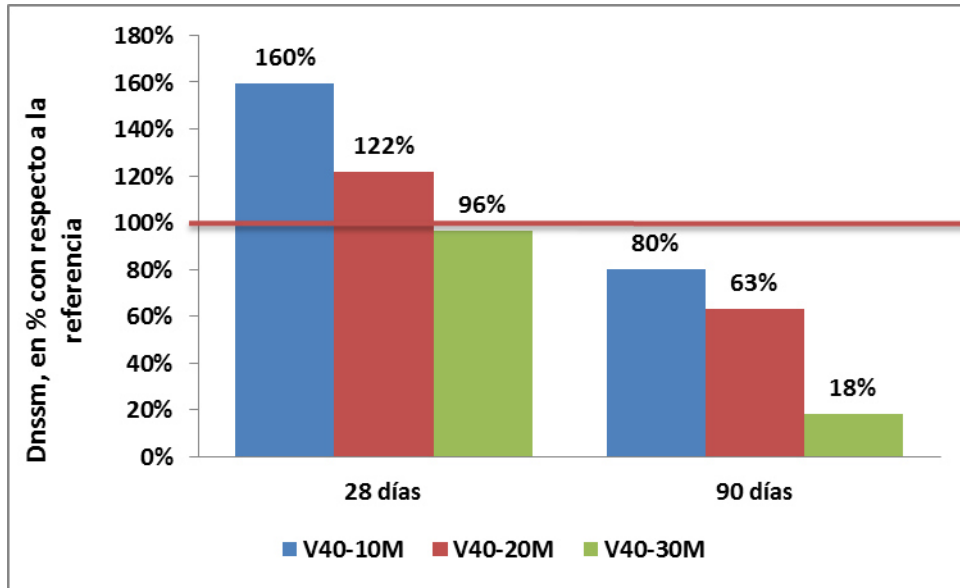


Fig. 43. Coeficiente de migración de iones cloro Dnssm, según NT BUILD 492, para las mezclas de la serie V40, por edad de ensaye, en % con respecto a la referencia (REF)

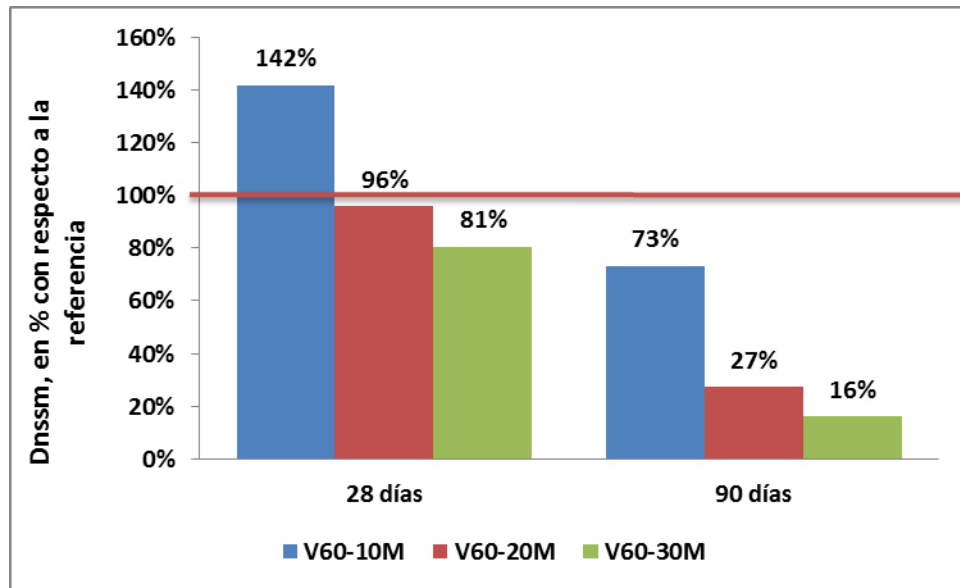


Fig. 44. Coeficiente de migración de iones cloro Dnssm, según NT BUILD 492, para las mezclas de la serie V60, por edad de ensaye, en % con respecto a la referencia (REF)

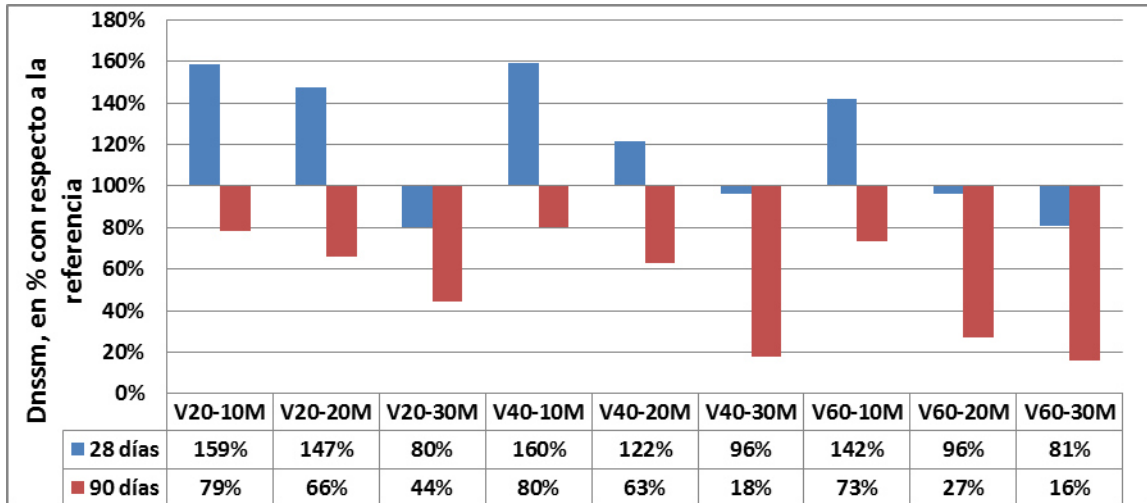


Fig. 45. Coeficiente de migración de iones cloro Dnssm, según NT BUILD 492, para las mezclas del proyecto, en % con respecto a la referencia (REF)

Con base a los resultados, se observa lo siguiente:

- A 28 días, las mezclas con 10% y 20% de sustitución (excepto la mezcla V60-20M), dieron valores de coeficientes de migración de cloruros mayores a la referencia, sin embargo, a 90 días, todas las mezclas con polvo de vidrio dieron mejores resultados que la referencia.
- Se observó que se obtienen mejores resultados en lo que respecta a la migración de iones cloro a mayor finura y contenido del vidrio, así como a mayores edades de ensaye. Los mejores resultados se obtuvieron para las mezclas V40-30M y V60-30M, reduciendo el coeficiente de migración de iones cloro hasta en un 18% y 16%, respectivamente.

Lo anterior sugiere que a la edad de 28 días la incorporación de vidrio conduce a una matriz cementante más abierta o de menor densificación, lo que puede deberse al mayor tamaño de partícula del polvo de vidrio, así como que para esa edad aún no se desarrollaba en su totalidad la reacción puzolánica del polvo de vidrio. Por otro lado, a 90 días, se puede considerar que las matrices cementantes con la incorporación de polvo de vidrio han desarrollado mejores niveles de densificación e impermeabilidad a los iones cloro que la mezcla de referencia

CAPITULO 8: CONCLUSIONES

Con base a los resultados experimentales obtenidos durante el desarrollo del presente proyecto de investigación, y considerando la investigación bibliográfica realizada, las hipótesis, así como los objetivos propuestos; es posible llegar a las siguientes conclusiones en las etapas desarrolladas:

8.1 DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA ÓPTIMO PARA SU USO EN MEZCLAS BASE CEMENTO PORTLAND

- Para aprovechar el subproducto industrial local a base de vidrios de borosilicato en mezclas base cemento Portland, es necesario pulverizarlo hasta un tamaño máximo menor a $74\ \mu\text{m}$ (malla # 200), a fin de evitar el riesgo de que se presenten expansiones dañinas producto de la RAS, que se presentan en partículas de vidrio mayores.
- En las partículas de vidrio de menor tamaño, se lleva a cabo una conversión gradual a C-S-H con potencial de ligar álcalis en su estructura.
- El uso de polvo de vidrio de borosilicatos menor a $74\ \mu\text{m}$ reduce la expansión producto de la RAS de partículas de vidrio mayores.
- La RAS tiene su principal impacto en la estabilidad volumétrica del elemento, manifestándose con severas expansiones y agrietamientos; sin embargo, la resistencia a compresión del elemento no sufre un impacto severo, por lo que no debe considerarse como un indicador del daño producto de la RAS.

8.2 MEZCLAS DE PRUEBA PARA EL PROYECTO

8.2.1 Propiedades en Estado Fresco

- En general, la adición de polvo de vidrio aumentó: la consistencia y viscosidad de las mezclas de prueba; y redujo: la habilidad de paso, la temperatura, el peso volumétrico y el contenido de aire del CAC.

8.2.2 Propiedades en Estado Endurecido

8.2.2.1 Resistencia a Compresión

- La sustitución de cemento por polvo de vidrio en CAC, para los contenidos manejados en el presente proyecto, no tuvo un impacto mayor a $\pm 10\%$ de la resistencia a la compresión de las mezclas del proyecto.
- En general se tiene un mayor desarrollo de resistencia a mayor finura del vidrio y con 20% de sustitución en masa de cemento por polvo de vidrio, con mejores resultados en edades avanzadas.

8.2.2.2 Módulo de Elasticidad

- En general, el módulo elástico del CAC no se ve afectado significativamente por la sustitución de cemento por polvo de vidrio.

8.2.2.3 Resistividad Eléctrica Superficial

- La sustitución de cemento por polvo de vidrio, aumenta la resistividad eléctrica superficial del CAC, con mejores resultados a mayor finura y contenido del vidrio, así como a mayores edades de ensaye.

8.2.2.4 Coeficiente de Migración de Iones Cloro

- La sustitución de cemento por polvo de vidrio, a edades menores a 28 días y consumos menores a 20% de polvo de vidrio en sustitución de la masa del cemento Portland, aumenta la migración de iones cloro del CAC, sin embargo, a edades posteriores de ensaye y/o consumos mayores de polvo de vidrio, se reduce en gran medida el coeficiente de

migración de iones cloro en el CAC, con mejores resultados a mayor contenido y finura del polvo de vidrio y edad de ensaye.

8.2.2.5 Conclusión General del Proyecto

Es posible aprovechar el subproducto de la industria local a base de vidrios de borosilicato, con un tamaño de partícula menor a 74 μm , como un filler en el concreto autocompactable, reduciendo el consumo de cemento de la mezcla e incrementando la consistencia del CAC, sin un impacto significativo en sus propiedades mecánicas, y mejorando su durabilidad en gran medida, con mejores resultados a mayor finura del vidrio, y hasta un 30% en sustitución de la masa del cemento Portland.

CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Flower David J. M., Sanjayan Jay G. Green House Gas Emissions due to Concrete Manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 12, Issue 5. Pages 282-288. July 2007.
- [2] Mehta P. Kumar, Reducing the Environmental Impact of Concrete, *Concrete International*, Vol. 23, Issue 10. October 2001.
- [3] Sunderland, Charlie, et. Al, The Cement Sustainability Initiative Progress Report, World Business Council for Sustainable Development, June 2005.
- [4] Taylor Michael, Tam Cecilia, Gielen Dolf; Energy Efficiency and CO₂ Emissions from the Global Cement Industry. International Energy Agency-World Business Council for Sustainable *Development*. September 2006.
- [5] <http://www.statista.com/statistics/219343/cement-production-worldwide/>
- [6] Malhotra, V. Mohan, Reducing CO₂ Emissions, *Concrete International*, September 2006.
- [7] BIBM, CEMBUREAU, ERMCO, EFCA, and EFNARC (2005) “European Guidelines for Self Consolidating Concrete: Specification, Production and Use” <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>.
- [8] Kosmatka et. al, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Primera Edición, 2004.
- [9] Revista: Hormigón, El concreto en la Práctica, ¿Qué, Por qué y cómo? – National Ready Mixed Concrete Association.
- [10] ASTM C618-08a. (2008). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [11] Informe de la Situación del Medio ambiente en Mexico, Capítulo 8. Residuos, SEMARNAT, 2005.
- [12] Edwards, Kevin L. et al, A critical study of the emergence of glass and glassy metals as “green” materials, *Materials and Design*, Vol. 50, pages 713–723, September 2013.
- [13] Oecd.org, (2015). *La OCDE - OECD*. [online] Available at: <http://www.oecd.org/centrodemexico/laocde/> [Accessed 18 Nov. 2015].
- [14] Elsiglodetorreon.com.mx, (2015). Reciclaje de vidrio, una actividad frágil. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/705633.reciclaje-de-vidrio-una-actividad-fragil.html>. [Accessed 18 Nov. 2015]
- [15] Brow, Richard K. y Schmitt, Melodie, A survey of energy and environmental applications of glass, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 29, Issue 7, pages 1193-1201, April 2009.
- [16] Shi, Caijun y Zheng, Keren, A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete, *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 52, Issue 2, Pages 234–247, December 2007.
- [17] Kratochvíl, Jirí, et. al, The effect of boron and its compounds on setting of Portland cement, *Advanced Materials Research*, Vol. 1000, pages 16-19, Aug. 2014.

- [18] Federico, L.M. y Chidiac, S.E., Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete-Critical review of treatment methods, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 31, Issue 8, pages 606–610, September 2009.
- [19] ACI comité 221. (1998).Reporte en la Reactividad Álcali-Agregado. Farmington Hills, MI: ACI 221.1R-98.
- [20] D.E. Stanton, The expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, *American Society of Civil Engineers*, Vol. 66, pages 1781–1811, 1940.
- [21] Islam, Mohammad y Akhtar, Sazed, A critical Assesment to the Performance of Alkali-Silica Reaction (ASR) in Concrete, *Canadian Chemical Transactions*, Vol. 1, Issue 4, pages 253-266, 2013.
- [22] Touma, Wissam Elias, “Alkali-Silica Reaction in Portland Cement Concrete: Testing Methods and Mitigation Alternatives”, Research Report ICAR – 301 – 1f, International Center for Aggregates Research, Austin, Texas, 2001.
- [23] Sacani, Andrea & Bignozzi, M.C. “ASR expansion behavior of recycled glass fine aggregates in concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pages 531-536, 2010.
- [24] Topçu, I. B., et. al, “Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3 ”, *Waste management*, Vol. 28, pages 878-884, 2008.
- [25] Idir, Rachida, et. al, “Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars”, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pages 1309-1312, January 2010
- [26] Thomas, Michael et. al, “Test Methods for evaluating preventing measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete”, *Cement and Concrete Research*, Volume 36, pages 1842-1856, 2006.
- [27] Shayan, Ahmad y Xu, A., “Value-added utilization of waste glass in concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, Issue 1, pages 81–89, Jan. 2004
- [28] Lindgard, Jan, et. al, “Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, pages 223-243, 2012.
- [29] Hooton, R. D., et. al, “Twenty-year Field Evaluation of Alkali-Silica Reaction Mitigation”, *ACI Materials Journal*, Vol. 110, Issue No. 5, pages 539-549, September-October 2013.
- [30] Jin, Weihua, et. Al, “Glasscrete” – Concrete with Glass Aggregate, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, Issue 2, pages 208-213, March-April 2000.
- [31] Rajabipour, Farshad, et. al, “Investigating the alkali-silica reaction of recycled glass aggregates in concrete materials”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 22, Issue 12, pages 1201-1334, December 2010.
- [32] Carsana, Maddalena, et. al., “Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 45, pages 39-45, 2014.

- [33] Khmiri A., et. al., “Chemical behavior of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars”, *Construction and Building Materials*, Volume 44, pages 74-80, April 2013.
- [34] Shi, Caijun et al., Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Issue 5, Pages 987–993, May 2005.
- [35] Korjakins, Aleksandrs, et. al, “Utilisation of Borosilicate Glass Waste as a Micro-Filler for Concrete”, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol. 6, Issue No. 6, pages 876-883, July 2012.
- [36] Pereira-de-Oliveira, Luiz A., et. al, “The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components”, *Construction and Building Materials*, Vol. 31, pages 197-203, January 2012.
- [37] Shao, Yixin, et. al, “Studies on concrete containing ground waste glass”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pages 91-100, 2000.
- [38] Shayan, Ahmad y Xu, Aimin, Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, Issue 3, Pages 457–468, March 2006.
- [39] Schwarz, Nathan & Neithalath, Narayanan, “Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pages 429-436, 2008.
- [40] Pelot, James y Baxter, Stephen, Patente US 6,699,321 B2, Marzo 2, 2004
- [41] Korjakins, Aleksandrs, et. al, Patente EP 2 837 609 A1, February 2015.
- [42] Topçu, I. B., Canbaz, Mehmet, “Properties of concrete containing waste glass”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pages 267-274, 2004.
- [43] Tan, Kiang Hwee, Du, Hongjian, “Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 35, pages 109-117, 2013.
- [44] Taha, Bashar, & Nounu, Ghassan, “Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, pages 709-721, December 2009.
- [45] Taha, Bashar, & Nounu, Ghassan, “Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement”, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pages 713-720, 2008.
- [46] Terro, Mohamad J., “Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures”, *Building and Environment*, Vol. 41, pages 633-639, 2006.
- [47] Madandoust, Rahmat, & Ghavidel, Reza, “Mechanical properties of concrete containing waste glass powder and rice husk ash”, *Biosystems Engineering*,
- [48] Matos, Ana Mafalda, Sousa-Coutinho, Joana, “Durability of mortar using waste glass as a cement replacement”, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pages 205-215, June 2012.
- [49] Schwarz, Nathan, et. al, “Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash”, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 30, pages 486-496, February 2008.

- [50] Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, 1(1), 5-15
- [51] ACI Committee 237 (2007). "Self-Consolidating Concrete". ACI 237-07, ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, MI, USA.
- [52] ASTM C1611/C1611M – 09b (2009). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, West Conshohocken, PA.
- [53] ASTM C1610/C1610M (2010), Standard Test Method for Static Segregation of Self-Consolidating Concrete Using Column Technique, West Conshohocken, PA.
- [54] Liu, Miao, Incorporating ground glass in self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, Issue 2, Pages 919-925, February 2011.
- [55] Wang, Her-Yung y Huang, Wen-Liang, A study on the properties of fresh self-consolidating glass concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 4, pages 619–624, April 2010.
- [56] Wang, Her-Yung y Huang, Wen-Liang, Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass, *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 6, pages 1008-1013, June 2010.
- [57] Kou, S. C. & Poon, C. S., "Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 31, pages 107-113, 2009.
- [58] Ali, Esraa Emam & Al-Tersawy, Sherif H., "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 35, pages 785-791, 2012.
- [59] Nunes, Sandra et. al, Mixture design of self-compacting glass mortar, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 43, pages 1-11, October 2013.
- [60] ASTM C219-07a. (2007). Standard Terminology Relating to Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [61] NMX-C-414-ONNCCE-1999 (1999) "Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especiaciones y métodos de prueba"
- [62] ASTM C150 / C150M-09, (2009) Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [63] ASTM C125-09a. (2009). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [64] ASTM E11-15. (2015). Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [65] ASTM C494/C494M-10 (2010). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [66] ASTM C188-09 (2009). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [67] AASHTO T84-10 (2010), Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, AASHTO, Washington DC.
- [68] AASHTO T85-10 (2010), Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, AASHTO, Washington DC.
- [69] AASHTO T27-11 (2011), Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, AASHTO, Washington DC.

- [70] AASHTO T11-05 (2005), Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, AASHTO, Washington DC.
- [71] ASTM C1260-07 (2007). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [72] ASTM C109/C109M-08 (2008). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [73] ACI comité 318. (2011). Requisitos de reglamento para concreto estructural, Farmington Hills, MI. ACI 318S-11.
- [74] ASTM C1621/C1621M – 09b (2009). Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring, West Conshohocken, PA.
- [75] ASTM C138/C138M-09 (2009). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, West Conshohocken, PA
- [76] ASTM C1064/C1064M-08 (2008), Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete, West Conshohocken, PA.
- [77] ASTM C403/C403M-08 (2008), Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, West Conshohocken, PA.
- [78] ASTM C39/C39M-09a (2009), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA.
- [79] ASTM C617-09a (2009), Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, PA.
- [80] ASTM C469-02e1 (2002), Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, West Conshohocken, PA.
- [81] AASHTO TP95-11 (2011), Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, AASHTO, Washington DC.
- [82] NT BUILD 492 (2011), Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, Nordtest Method, Finland.