
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES CEMENTANTES UTILIZANDO
RESIDUOS VÍTREOS, MEDIANTE ACTIVACIÓN MECANO-QUÍMICA**

Por

MYRNA SINÁI GUEVARA LAUREANO

**Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con orientación en
Materiales de Construcción**

Octubre 2013

**“DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES CEMENTANTES UTILIZANDO
RESIDUOS VÍTREOS, MEDIANTE ACTIVACIÓN MECANO-QUÍMICA”**

Aprobación de la Tesis:

Dr. Isaías Juárez Ramírez

Director de Tesis

Dr. Pedro L. Valdez Tamez

Secretario

Dra. Bertha Alicia Vázquez Méndez

Vocal

Dr. Pedro L. Valdez Tamez

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación

DEDICATORIA

A mis padres, Ramón Guevara Ruiz y Rosa María Laureano Díaz. Sin ustedes me hubiese sido muy difícil llegar a este punto de mi vida, ya que sin todas y cada una de sus enseñanzas, no sería la persona que soy en este momento.

A mis hermanos, Martín Ramón Guevara Laureano y Alan Omar Guevara Laureano, por ser parte de mi vida y aunque ésta nos haya llevado por caminos diferentes, nosotros siempre volaremos juntos.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento al Dr. Isaías Juárez Ramírez, por su confianza y su completo apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

Reconozco y agradezco el apoyo de los Jefes de los Departamentos: Ecomateriales y Energía, Tecnología del Concreto y Laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción, Dra. Leticia M. Torres Guerra, Dr. Alejandro Durán Herrera y Dr. José Manuel Rangel Mendoza, respectivamente, por el apoyo técnico-científico y por las facilidades otorgadas para el uso de sus instalaciones y equipos para la ejecución de esta investigación.

Del mismo modo, agradezco el apoyo financiero del CONACYT, a través la beca No. 374882 a mi persona, para realizar los estudios de maestría. Así como también el apoyo para la realización de este proyecto de investigación a través de los proyectos: CB-84809-2007, CB-168730-2011, INFR03-2011-173625 y a la UANL, a través de los proyectos PAICYT 2010 y PAICYT 2012 otorgados a mi asesor el Dr. Isaías Juárez Ramírez.

De igual manera agradezco a José César Aguilar, Ulises De los Santos, Rogelio Isaí Soto y Francisco Javier Vázquez, estudiantes de la Maestría en

Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, quienes estuvieron conmigo como compañeros de clase y amigos. También a todo el departamento de Geohidrología y Geofísica del Instituto de Ingeniería Civil, por su amistad y apoyo incondicional, a lo largo de todo este tiempo.

Mi agradecimiento también para la Dirección de la Facultad de Ingeniería Civil, M.I. Luis Manuel Aranda Maltez, y al Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación Dr. Pedro L. Valdez Tamez de la Facultad de Ingeniería Civil, y a la Universidad Autónoma de Nuevo León por el apoyo real y decidido a mi formación académica.

Agradezco al Dr. Pedro L. Valdez Tamez y la Dra. Bertha Alicia Vázquez Méndez, por haber aceptado la revisión de este trabajo de investigación y asimismo, quiero agradecer a todas aquellas personas que contribuyeron directa o indirectamente a la realización de este proyecto.

Y por último, y no por ser menos importante, mi total gratitud a Dios por permitirme seguir disfrutando de esta hermosa aventura llamada "VIDA".

RESUMEN

Myrna Sinaí Guevara Laureano

Fecha de Graduación: Octubre 2013

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

**Título del Estudio: DESARROLLO DE NUEVOS
MATERIALES CEMENTANTES UTILIZANDO
RESIDUOS VITREOS, MEDIANTE
ACTIVACIÓN MECANO-QUÍMICA**

Número de páginas: 133

**Candidato para el grado de Maestría
en Ciencias con orientación en
Materiales de Construcción**

Área de Estudio: Materiales de Construcción

Propósito y Método del Estudio: El presente trabajo de tesis tiene como propósito desarrollar materiales cementantes alternativos utilizando como materia prima residuos industriales de desecho. Entre estos residuos industriales se encuentran los desechos de vidrio y algunos que provienen de la combustión de carbón, como la ceniza volante, los cuales se generan en gran cantidad en el país y que podrían ser aprovechados como materias primas para la obtención de materiales de construcción. El método para la activación de la materia prima incluyó la molienda mecano-química a partir de mezclas de vidrio y ceniza con solución alcalina y una proporción de yeso; este último ayudará al endurecimiento de la pasta para obtener altas resistencias de los materiales preparados, que fueron curados de forma estándar a 7, 14, 28 y 90 días. Los materiales cementantes preparados fueron ensayados mecánicamente para determinar su resistencia a la compresión, caracterizados mediante las técnicas de difracción de rayos-X y microscopía electrónica de barrido, y también las pastas elaboradas fueron analizadas térmicamente para conocer su comportamiento expansivo.

Contribuciones y Conclusiones: Con base en los resultados obtenidos en este trabajo de tesis, fue posible la activación del vidrio para su reacción con la ceniza volante y con ello fabricar materiales cementantes alternativos. Estos materiales cementantes presentan la ventaja de no requerir algún tratamiento adicional y sus valores de resistencias son de 14 MPa. De acuerdo con los resultados de caracterización por rayos-X y microscopía, se encontró la formación de un silicato de sodio o "waterglass", también se detectó una disminución en la intensidad de los picos, indicando con ello la pérdida de cristalinidad. Las micrografías no mostraron diferencias considerables en el tamaño y forma de las partículas, por lo que se concluyó que todos los

materiales preparados presentaban un comportamiento muy similar respecto a su composición y microestructura. Los materiales cementantes con mayor cantidad de ceniza volante tuvieron una reducción en su comportamiento térmico, que los de menor cantidad de ceniza volante. En particular, el desarrollo de nuevos materiales cementantes es una alternativa importante ya que con ello se podría abatir el uso excesivo del cemento tradicional, el que durante su proceso de fabricación libera una gran cantidad de CO₂, incrementando considerablemente la contaminación del medio ambiente. De esta manera, la reutilización de materiales de desecho contribuirá no sólo a la limpieza del ambiente, sino además, a disminuir los costos en el proceso de obtención de los materiales cementantes, pues implican un contenido energético menor al empleado para la fabricación del cemento portland.

FIRMA DEL ASESOR: _____

CONTENIDO

	Página
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 Generalidades.	2
1.2 Cementos alternativos.	5
1.2.1 Resistencia mecánica de cementos alcalinos.	11
1.3 La activación alcalina.	13
1.4 Puzolanas.	17
1.4.1 El vidrio como materia prima de cementantes alternativos.	20
1.4.2 La ceniza volante como materia prima de cementos alternativos.	23
1.5 El Yeso (sulfato de calcio).	27
1.6 Antecedentes.	30
Capítulo 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	35
2.1 Hipótesis.	35
2.2 Objetivos.	35
2.2.1 Objetivo general.	35
2.2.2 Objetivos específicos.	35
2.3 Justificación.	36
Capítulo 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	39
3.1 Selección del material de partida.	39
3.2 Fabricación de las pastas.	39
3.2.1 Tratamiento del material de partida.	41
3.2.2 Proceso de activación mecano-químico alcalino.	44
3.2.3 Preparación de las pastas.	46
3.2.4 Resistencia a la compresión de las pastas.	52
3.3 Caracterización estructural.	53
3.3.1 Difracción de rayos-X método de polvos.	53
3.3.2 Microscopía electrónica de barrido.	54
3.4 Propiedades térmicas.	56
3.4.1 Expansión térmica.	56

Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
4.1 Selección y caracterización de la materia prima.	59
4.1.1 Determinación del tamaño de partícula.	61
4.1.2 Difracción de rayos-X, método de polvos.	62
4.1.3 Microscopia electrónica de barrido.	64
4.2 Fabricación de materiales cementantes alternos.	66
4.2.1 Sistema de mezcla M1	69
4.2.2 Sistema de mezcla M2	71
4.2.3 Sistema de mezcla M3	73
4.2.4 Sistema de mezcla M4	75
4.2.5 Sistema de mezcla M5	76
4.3 Caracterización por rayos-X de las mezclas preparadas.	80
4.4 Caracterización por microscopia electrónica de barrido.	86
4.5 Probable mecanismo de la activación mecano-químico alcalino.	96
4.6 Pruebas de expansión térmica.	100
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
Conclusiones	106
Recomendaciones	108
BIBLIOGRAFÍA	109
APÉNDICE I	116
APÉNDICE II	119
APÉNDICE III	124
APÉNDICE IV	127
FICHA BIBLIOGRÁFICA	131
PRIMER LOGRO DE ESTA TESIS	133

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 3.1. Sistema de pastas elaboradas	47
Tabla 4.1. Composición química de la materia prima	60
Tabla 4.2. Resultados de resistencia a la compresión	78
Tabla 4.3. Valores de expansión térmica de las pastas preparadas	102

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1.1. Esquema de los procesos de activación.	14
Figura 1.2. Composición química de los principales materiales cementantes.	18
Figura 1.3. Ciclo del yeso.	29
Figura 3.1. Esquema experimental.	40
Figura 3.2. Trituradora de quijada.	41
Figura 3.3. Pulverizadora.	42
Figura 3.4. Molino de bolas vibratorio.	43
Figura 3.5. Analizador granulométrico por difracción láser.	44
Figura 3.6. Nomenclatura de las pastas a los tres tiempos de activación	48
.Figura 3.7. Orden de apisonamiento de moldeo de los cubos.	50
Figura 3.8. Prensa hidráulica.	52
Figura 3.9. Difractómetro de rayos-X.	54
Figura 3.10. Microscopio electrónico de barrido.	55
Figura 3.11. Recubridora de oro/paladio.	55
Figura 3.12. Dilatómetro.	57
Figura 4.1 Granulometría del vidrio de desecho molido.	61
Figura 4.2 Granulometría de la ceniza volante.	62
Figura 4.3 Difractograma del vidrio molido.	63
Figura 4.4 Difractograma de la ceniza volante.	63

Figura	Página
Figura 4.5 Difractograma del yeso.	64
Figura 4.6 Micrografía del vidrio molido.	65
Figura 4.7 Micrografía de la ceniza volante.	66
Figura 4.8 Micrografía del yeso.	66
Figura 4.9 Cubos de materiales alternos con propiedades cementantes.	67
Figura 4.10 Cubos de pasta bajo curado en bolsas de plástico.	68
Figura 4.11 Resistencia a la compresión de cubos de la mezcla M1.	70
Figura 4.12 Resistencia a la compresión de cubos de la mezcla M2.	72
Figura 4.13 Resistencia a la compresión de cubos de la mezcla M3.	74
Figura 4.14 Resistencia a la compresión de cubos de la mezcla M4.	75
Figura 4.15 Resistencia a la compresión de cubos de la mezcla M5.	77
Figura 4.16 Mejores resultados de resistencia a la compresión.	80
Figura 4.17 Difractograma de la mezcla 2-M1-90 días y vidrio molido.	81
Figura 4.18 Difractograma de la mezcla 4-M2 curada a 28, y 90 días.	82
Figura 4.19 Difractograma de la mezcla 6-M3 curada a 90 días.	83
Figura 4.20 Difractograma de la mezcla 6-M4 curada a 90 días.	84
Figura 4.21 Difractograma de la mezcla M5 curada a 7,14, 28 y 90 días.	85
Figura 4.22 Micrografías de la mezcla 2-M1 curada a 7, 14, 28, y 90 días.	87
Figura 4.23 Micrografías de las mezclas 4-M2 curada a 7, 14, 28, y 90 días.	89
Figura 4.24 Micrografías de las mezclas 6-M3 curada a 7, 14, 28, y 90 días.	91
Figura 4.25 Micrografías de las mezclas 6-M4 curada a 7, 14, 28, y 90 días.	94
Figura 4.26 Micrografías de la mezcla M5 curada a 7 y 14 días.	95

Figura	Página
Figura 4.26 Micrografías de la mezcla M5 curada a 28 y 90 días.	96
Figura 4.27 Mecanismo de disolución entre el vidrio y la ceniza volante.	98
Figura 4.28 Mecanismo de reacción entre el SS y el yeso.	99
Figura 4.29 Curvas de Expansión de 6-M3 curada a 7, 14, 28, y 90 días.	101

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

A/CM.- Relación agua y material cementante.

AM.- Aleados mecánicamente.

ASTM.- American Society for Testing and Materials.

CONACYT.- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

DRX.- Difracción de rayos X.

EDS.- Electroscopía de dispersión de energía.

GLP.- Vidrio en polvo.

MEB.- Microscopía electrónica de barrido.

MM.- Molienda mecánica.

MO.- Óxido de un metal.

PAICYT.- Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica.

UANL.- Universidad Autónoma de Nuevo León.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.

1.1 Generalidades.

Con el advenimiento de la Revolución Industrial se generó un incremento muy importante en la producción de bienes, con gastos crecientes de materias primas y energía, ya que en épocas pasadas el hombre ha cuidado los objetos que constituyen su patrimonio, ya sea utilizándolos mientras fuese posible, o bien, reutilizándolos con otros enfoques.

El progreso generó severo deterioro en el medio ambiente como: una erosión creciente debido a la sobreexplotación de los yacimientos de materias primas, el agotamiento de las fuentes de combustibles fósiles no renovables, la contaminación ambiental por las emisiones producidas en los procesos industriales y la acumulación de residuos en los entornos de las ciudades.

Aunque la cultura de la reutilización ha existido desde siempre, sólo algunas tecnologías de reutilización han sido bien desarrolladas; como por ejemplo, la producción de biogás, biomasa y fertilizantes orgánicos por el tratamiento de desechos orgánicos; la refundición y recuperación de metales, y reciclaje de papel, por mencionar algunos. Esta situación hizo que se

implantarán en los países más desarrollados las políticas de gestión y separación de residuos; principalmente del papel, los compuestos orgánicos, los metales ferrosos, los metales no ferrosos, además de los polímeros, los vidrios y cerámicos, entre otros [1].

Una de las áreas de aplicación de los materiales vítreos reciclados se encuentra en el sector de la construcción. Actualmente, existe un gran interés en la industria de la construcción por desarrollar nuevos materiales cementantes, cuya fabricación implique menores consumos energéticos y menores emisiones de gases contaminantes a la atmósfera; por ejemplo, cada tonelada de cemento producido genera aproximadamente una tonelada de gas de dióxido de carbono (CO₂) lo cual es perjudicial para la salud humana [2-6].

La generación excesiva de estos residuos por parte de las industrias es un síntoma que obedece a la ineficiencia de los procesos productivos, a la escasa durabilidad de los productos y al conjunto de hábitos insostenibles. Por ello, mientras que se modifican estos hábitos, se desarrollan nuevos procedimientos de producción industrial o se mejora la calidad durable de dichos productos, es importante sensibilizar a la sociedad ante la enorme pérdida de recursos y de materias primas que los residuos presentan en sí mismos [7].

El deterioro de nuestro planeta por la contaminación de la atmósfera y la no planeación o generación de productos sustentables ha impulsado a que la

INTRODUCCIÓN

industria cementera esté cambiando en la búsqueda de una mejora continua, disminuyendo los consumos de energía en sus procesos y utilizando complementos cementantes, ya sean naturales o artificiales. Los complementos cementantes reducen los consumos de clínker, ahorrando energía, produciendo menos gases de invernadero a la atmósfera y generando, por lo tanto procesos sustentables [8].

En los últimos años, las investigaciones realizadas han estado enfocadas a la obtención de nuevos materiales cementantes mediante la adición de residuos o cementos alternativos que permitan reemplazar parcial o totalmente al cemento portland [7]. Hoy en día, se cuenta con la tecnología necesarias para estudiar gran parte de los mecanismos de reacción de los nuevos materiales cementantes que diesen generar las reacciones físico-químicas en el proceso de fraguado y endurecimiento, su comportamiento mecánico bajo las cargas de servicio, así como su comportamiento en las condiciones ambientales de exposición a las cuales trabajará [8].

Por tal motivo, este proyecto pretende aprovechar materiales de desecho o subproductos industriales, como son: el vidrio sódico-cálcico y la ceniza volante, que se buscará activar mediante molienda mecano-química. Con lo anterior se busca desarrollar un material alternativo que sea capaz de alcanzar propiedades cementantes. En este sentido, lo novedoso de este trabajo es lograr la activación del vidrio sódico-cálcico mediante molienda mecánica y adicionando una solución alcalina para que al mezclarlo con diferentes

proporciones de ceniza volante y con una pequeña proporción de yeso se logre obtener materiales alternativos con propiedades cementantes.

Con la realización de este trabajo se busca contribuir a la generación del conocimiento de los cementantes alternativos, conocer sus propiedades y de esta manera desarrollar nuevos materiales cementantes constituidos por residuos vítreos. Por ello, se estará evaluando su microestructura y su comportamiento mecánico, para conocer si presentan propiedades cementantes, para poder aplicarlos en la industria de la construcción, sin necesidad del empleo adicional de energía que sería perjudicial para el medio ambiente.

1.2 Cementos Alternativos.

Actualmente, el concreto fabricado con cemento portland es el material más utilizado en la construcción. Éste presenta propiedades mecánicas resistentes y costos de producción ventajosos, por esta razón el sector de la construcción moviliza el 10% del total de la economía mundial. Sin embargo, su proceso de fabricación resulta problemático, según criterios energéticos y ecológicos. La obtención de las materias primas ocasiona la destrucción de canteras naturales, pues de éstas se obtiene el componente principal del cemento, llamado "clínker", que necesita temperaturas altas aproximadamente de 1500° C, para su fabricación. Después de esto, el clínker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado del cemento y para que se mejoren las

INTRODUCCIÓN

propiedades de contracción (retracción) y el desarrollo de resistencia. En el molino, el clínker se muele tan fino que puede pasar casi completamente a través de un tamiz de 45 μm . Este polvo gris extremadamente fino es el que se conoce como cemento portland [9].

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua, formando 4 fases cementantes conocidas como C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF , Silicato tricálcico (3CaO-SiO_2), Silicato Dicálcico (2CaO-SiO_2), Aluminato tricálcico ($3\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$) y Ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$), respectivamente. El conocimiento de la química del cemento indica que los compuestos principales del cemento tienen las siguientes propiedades [9]:

- Silicato tricálcico, C_3S ; Alita: Se hidrata y endurece rápidamente y es responsable, en gran parte, del inicio del fraguado y la resistencia temprana.
- Silicato dicálcico, C_2S ; Belita: Se hidrata y se endurece lentamente y contribuye grandemente para el aumento de resistencia en edades avanzadas.
- Aluminato tricálcico; C_3A : Libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye un poco para el desarrollo de las resistencias tempranas.

INTRODUCCIÓN

- Ferroaluminato tetracálcico; C_4AF , Ferrita: Este compuesto contribuye muy poco para la resistencia y es el responsable de los efectos de color para la producción del cemento gris.

Al combinar el cemento con el agua, se lleva a cabo el fenómeno de hidratación, que permite formar una masa similar a una piedra llamada pasta y cuando se mezcla con agregados, es capaz de producir un mortero o concreto que conserva su trabajabilidad durante un tiempo suficientemente largo y, además, es capaz de alcanzar buenos niveles de resistencia y estabilidad de volumen a largo plazo [7].

Los aspectos ambientales más importantes en la fabricación del cemento portland son el consumo energético y la emisión de gases a la atmósfera, pues emite el 7% de gases contaminantes a la atmósfera, a escala mundial, como el CO_2 producido durante la descomposición de la caliza ($CaCO_3$) [10].

En general, los concretos elaborados con cemento portland presentan algunos problemas de durabilidad (ataque por sulfato, corrosión, reacción álcali-agregado, deterioro por exposición al fuego, etc.), lo cual hace que un 40-50% del presupuesto de la industria de la construcción esté destinado a reparaciones [11].

Por lo anterior, para contribuir a un mejor equilibrio medioambiental y económico, siempre es necesaria la búsqueda de ahorros energéticos y menor

INTRODUCCIÓN

producción de residuos. En este sentido, se pueden considerar distintas soluciones, como la fabricación de cementos alternativos, entre los cuales figuran los cementos alcalinos, cementos con geo-polímeros, cementos con puzolanas, etc. [10].

Los materiales cementantes han sido objeto de investigación en los últimos años por las propiedades que presentan, ya que al estar constituidos por más de un tipo de material (cemento, residuo o cualquier otro de tipo material inerte con propiedad puzolánica), contribuye notoriamente a la reducción del factor clínker, al ahorro energético y a la conservación de las materias primas. Por ello, cada día se intenta desarrollar nuevos materiales cementantes con mejores propiedades mecánicas, incentivando el estudio y desarrollo de cementos con características especiales [7].

Particularmente, este trabajo se centra en los materiales cementantes alcalinos, sobre todo aquellos preparados a partir de mezclas con los materiales de desecho o subproductos industriales.

El uso de activadores alcalinos se remonta a los tiempos del rey persa Nabucodonosor (630-562 a.C.) [12]. Desde entonces a la fecha, se ha desarrollado una gran cantidad de trabajos experimentales relacionados con los materiales cementantes alcalinos, indicando con ello las grandes oportunidades y desafíos que éstos tienen [12-17]. En general, se han empleado materias primas como minerales formados en la corteza terrestre, aluminosilicatos

llamados “geo-polímeros”, ceniza volante, humo de sílice, escoria, metacaolín, así como otros materiales de desecho [12].

De esta manera, con base en las investigaciones realizadas en esta área, se tiene una clasificación de los cementos alcalinos que se muestra a continuación:

- 1.- Geo-cementos.
- 2.- Cementos con escoria alcalina.
- 3.- Ceniza volante alcalina.
- 4.- Cemento portland alcalino.
- 5.- Cemento de aluminato alcalino.

En particular, los cementos con escoria de alto horno y con ceniza volante han adquirido gran importancia en los últimos años, debido al interés por reutilizar estos materiales buscando beneficios para la limpieza del medio ambiente [12].

El desarrollo de materiales cementantes alternativos trae consigo un sinnúmero de beneficios, que están relacionados con los aspectos: ecológico, económico e ingenieril, como los que describen a continuación por los investigadores: Malhotra, Metha y Pera [13-15]:

Beneficios ecológicos.-

- Aplicaciones útiles de los residuos no reciclados de los vertederos, para reducir el volumen de los mismos.
- La reducción de los efectos negativos de la producción del cemento, es decir, el consumo de recursos naturales no renovables.
- La reducción del uso de energía para la producción de cemento.
- La correspondiente disminución de las emisiones de los gases de efectos de invernadero.

Beneficios económicos.-

- Menor costo del material cementante, comparado con el cemento portland.
- Menor costo de las fuentes del material alternativo.
- Ahorro en los costos de transportación.
- Ahorro en los costos del proceso.
- Ahorro en los costos de gestión de vertederos.

Beneficios ingenieriles.-

Se beneficia el aspecto de la durabilidad ya que aumenta: la impermeabilidad, la resistencia al ataque de sulfatos, la trabajabilidad, la resistencia mecánica a edades avanzadas y reduce la reacción álcali-agregado y por lo tanto, todo esto redundando en un beneficio económico y ecológico [15]. Todo ello principalmente por el uso de equipo especializado que puede ser

desarrollado en lugar del equipo que se utiliza para el concreto hecho con cemento portland ordinario.

Adicionalmente, existe la oportunidad de hacer realidad estos beneficios potenciales, incluso en las comunidades donde los programas de reciclaje ya están en su lugar.

1.2.1 Resistencia mecánica de cementos alcalinos.

Las resistencias mecánicas que desarrollan los cementos alcalinos pueden llegar a ser superiores a las desarrolladas por los morteros de cemento portland, a la edad de 28 días [16]. Estas resistencias se obtienen cuando los activadores son disoluciones de silicatos alcalinos hidratados, denominados “waterglass” [5]. El gel de aluminosilicatos sódico que se forma (N-A-S-H) presenta un gran desorden estructural a largo y a mediano alcance que lo hace amorfo a la difracción de rayos X. Se deduce que este gel es el que confiere al material las propiedades cementantes adherentes y, por supuesto, mecánico resistente [17].

Estas propiedades resistentes dependen del tipo y de la naturaleza de los productos de reacción. Un mayor contenido de este gel o “precursor zeolítico” en el material, implica mayores resistencias mecánicas. Sin embargo, un mayor contenido de zeolitas cristalinas en el material es opuesto a un mayor desarrollo mecánico [17].

INTRODUCCIÓN

Si bien, los desarrollos de este tipo de materiales se han incrementado en los últimos años, existen aún muchos aspectos a cubrir, siendo algunos de ellos el establecimiento de normas específicas para este tipo de cemento pues no pueden ser evaluados como el cemento portland tradicional. De igual manera, no existe una base de datos que incluya a estos nuevos materiales cementantes.

Además, se cuenta con escasa información sobre la reactividad y los mecanismos de reacción en los que se llevan a cabo las reacciones ocurridas y determinar con ello su eficiencia. Inclusive, es necesario realizar estudios minuciosos para determinar el efecto de las diferencias en los parámetros de procesamiento de materias primas, como son: la hidratación, las fases activas de las puzolanas y su naturaleza, la proporción de la puzolana en el cementante, la cal disponible para reaccionar, el área superficial de la puzolana, la relación agua/material cementante (A/MC) de la mezcla, el tiempo, el tipo y la temperatura de curado [15].

Finalmente, la caracterización ha sido insuficiente y, además, no es confiable, debido a la variabilidad de las composiciones de muchos cementos alcalinos activados; por ello, es necesario desarrollar nuevos métodos de caracterización.

1.3 La activación alcalina.

La amorfización es uno de los fenómenos más frecuentes reportados en mezclas de polvos aleados mecánicamente (AM). Las fases amorfas se han obtenido a partir de polvos elementales o mezclas intermetálicas o compuestos estequiométricos (pre-aleados o incluso elemento puros, referido como molienda mecánica, (MM)) [18].

Se ha investigado que cualquier aleación amorfa se puede hacer bajo las condiciones adecuadas de molienda; sin embargo, cabe señalar que la contaminación de polvo durante la molienda, en algunos casos, puede ser un factor importante que contribuye en la formación de una fase amorfa [18].

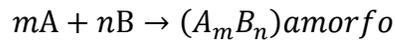
Para aumentar la reactividad de los estados estructurales predominantemente amorfos, existen diversas formas de activación de las reacciones químicas, las que deben contar con factores importantes como la composición química, la finura y el porcentaje de fracción vítrea. Además, se deben considerar algunas características físicas como son: el tamaño, la distribución y la morfología de las partículas, así como el área superficial.

Los procesos de activación buscan transferir a los sólidos propiedades especiales como catalizadores, absorbentes o puzolanas. Los procesos más usados para activar a los sólidos son: el mecánico, el químico y el térmico [18].

En la Figura 1.1 se presenta un esquema de clasificación de los diferentes tipos de activación.

La activación mecánica produce un incremento del área superficial, sin embargo, a valores muy altos se requiere más agua para obtener fluidez en los concretos y, en consecuencia, la relación agua/cemento aumenta, lo que ocasiona una disminución en la resistencia mecánica a la compresión [20].

Las fases amorfas pueden formarse a partir de mezclas de polvos elementales, ya sea directamente o a través de la formación de una fase intermetálica [18]. Por ejemplo:



ó

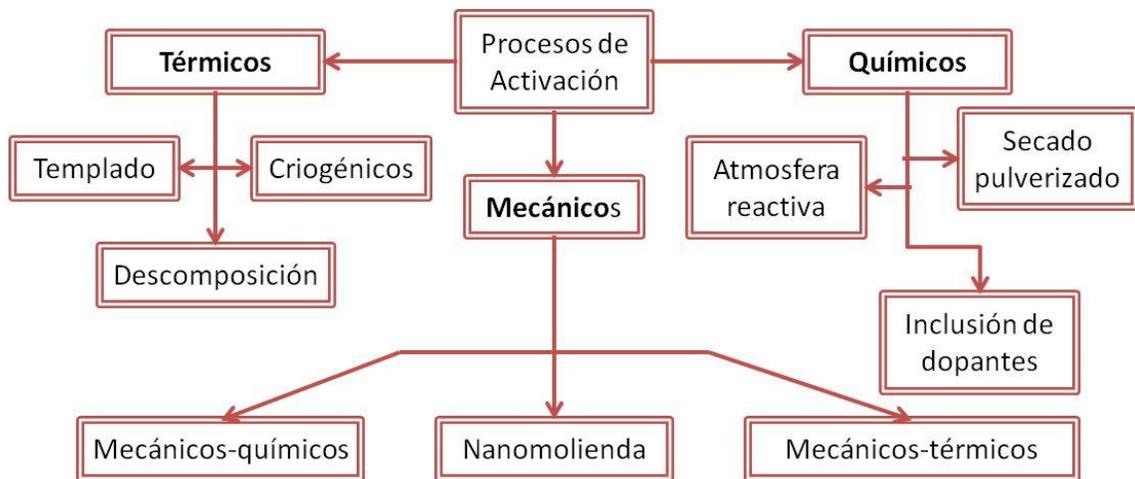


Figura 1.1. Esquema de los procesos de activación.

INTRODUCCIÓN

En la activación química se emplea una disolución como hidróxido de sodio (NaOH), silicato de sodio (Na₂SiO₃), hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), sulfato de sodio (Na₂SO₄) o una combinación de éstos, siendo la más importante la activación alcalina. Las soluciones deben tener un pH>13, el cual provocará el rompimiento de la estructura vítrea por parte de los OH⁻, estos silicatos pasan a solución o permanecen en los límites de las partículas y se forma un material amorfo transitorio [20].

La activación térmica se genera cuando se aumenta de temperatura, provocando que existan reacciones químicas que modifican la estructura cristalina del material, pudiendo así formar un material reactivo [20].

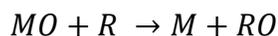
La activación alcalina es un proceso químico que permite la transformación de la estructura vítrea que conforma la mayor parte de sus partículas de un material vítreo en compactos esqueletos cementantes. El principal proceso a destacar sobre este método químico genérico es su diversidad de cinética y también su variabilidad de desarrollo microestructural. El componente alcalino actúa como un elemento formador de la estructura de estos nuevos productos cementantes. Por ejemplo en materiales vítreos, un aporte de sílice soluble hace que la microestructura desarrollada se parezca a muchos tipos de vidrio (ausencia de poros y una microestructura uniforme y compacta) [21].

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se utilizó la combinación de dos de las tres activaciones mencionadas: la activación mecánica y la activación química; esta última favorecida mediante la adición de una solución alcalina [20].

Dentro de los activadores alcalinos se pueden mencionar al hidróxido de sodio y al silicato de sodio, que son los agentes alcalinos activadores más comúnmente usados [21-23]. También se han empleado en menor proporción el hidróxido de potasio y el carbonato de sodio [23-24]. Aunque el silicato de sodio es el activador más efectivo en cementos alcalinos, éste es el más costoso, pues su producción implica la fusión de Na_2CO_3 y arena de SiO_2 por 12-16 horas en un nivel de temperatura entre 1350-1450°C.

La combinación de las activaciones mecánica y química comúnmente se denomina como activación mecano-química, que es el término que se aplica al proceso en que las reacciones químicas y las transformaciones de las fases tienen lugar debido a la aplicación de la energía mecánica. Las aplicaciones de la activación mecanoquímica incluyen reacciones de intercambio, reacciones de reducción/oxidación, la descomposición de los compuestos y las fases de transformación. Las reacciones de intercambios estudiados hasta el momento se pueden representar mediante una ecuación del tipo [18]:



Donde el óxido de un metal (MO) se reduce por un agente más reactivo (R) a un metal puro (M) [18].

1.4 Puzolanas.

La adición de materiales cementantes, cuando se fabrica en concreto, no es una idea nueva; de hecho, los primeros concretos se hicieron mucho antes del descubrimiento del cemento portland, se fabricaron con la mezcla de cal y materiales cementantes naturales o arcillas calcinadas [25-26]

En la Figura 1.2, se muestra la mayoría de los materiales cementantes que utilizan actualmente las industrias de cemento y concreto. Estos materiales cementantes han sido desarrollados de acuerdo con un diagrama de fases ternario “CaO-SiO₂-Al₂O₃”, que permite inferir una gran cantidad de productos con composiciones químicas diferentes que se pueden utilizar como materiales cementantes. Aunque el diagrama de fases refleja la posibilidad de formar una gran cantidad de productos, no todos los materiales que contienen CaO, SiO₂, y Al₂O₃, se pueden utilizar como materiales cementantes [27].

Con el fin de simplificar la presentación de los materiales alternativos más importantes que se utilizan actualmente como materiales cementantes, éstos han sido reagrupados en tres categorías: las escorias, *los materiales puzolánicos* y los materiales de relleno (fillers) [27].

Particularmente, Henri Le Chantelier, colocó a las puzolanas dentro de la segunda gran familia de los materiales cementantes utilizadas en el concreto. El

INTRODUCCIÓN

termino puzolanas se designa para productos naturales, así como subproductos industriales que contienen un cierto porcentaje de sílice vítreo reactivo [27].

La ASTM C 618 (American Society for Testing and Materials), define a los materiales puzolánicos como [28]:

“Materiales silíceo o silicoaluminosos, que por sí mismos poseen poco o nulo valor cementante, pero que en forma finamente molida y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a temperaturas ordinarias para formar compuestos que posean propiedades cementantes”

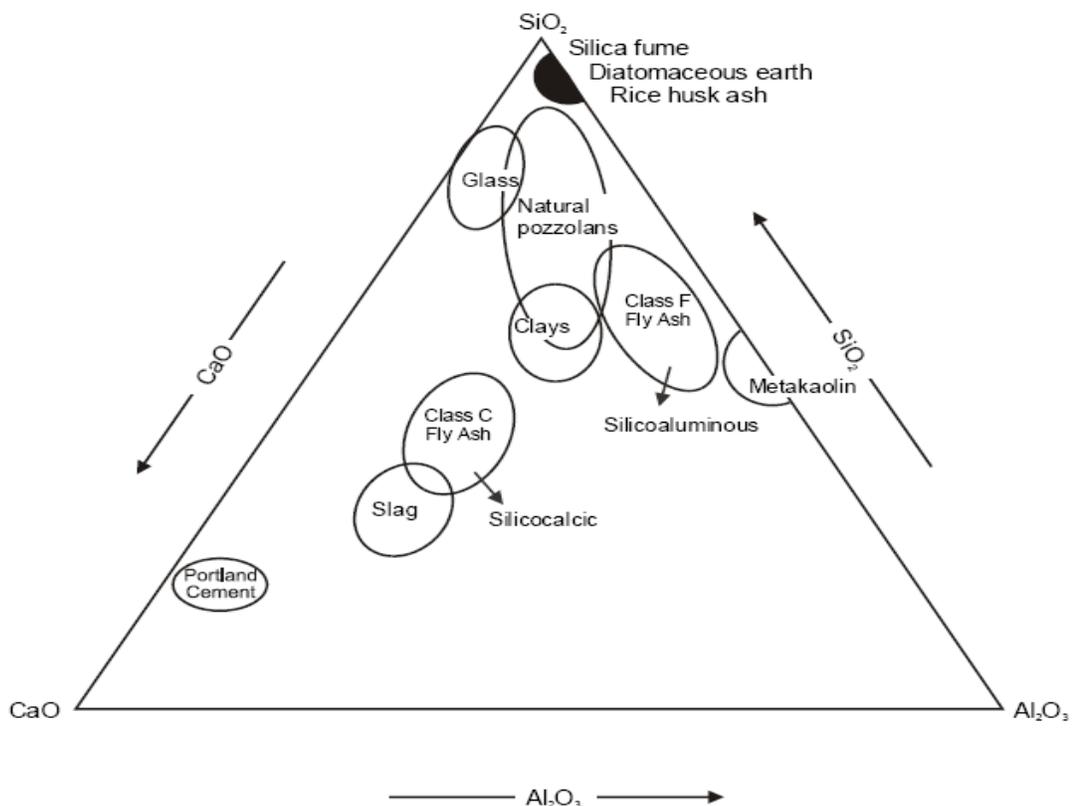
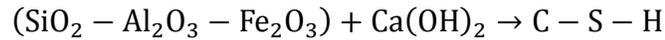


Figura 1.2. Composición química de los principales materiales cementantes.

Esquemáticamente, una reacción puzolánica se puede escribir de la siguiente manera:

INTRODUCCIÓN

Puzolana + Portlandita \rightarrow Silicato de Calcio Hidratado (C – S – H)



Por lo tanto, la hidratación de un cemento mezclado que contiene puzolana se puede escribir de la siguiente manera.

Cemento Portland + Portlandita + Agua \rightarrow C – S – H + Sulfoaluminatos

A temperatura ambiente, el desarrollo de una reacción puzolánica es mucho más lento que la velocidad de hidratación del cemento portland, pero un concreto que contiene una puzolana, curado con agua, tiene una resistencia que aumenta y una permeabilidad que disminuye con el tiempo. Se sabe que, la finura, su grado de amorficidad y la temperatura influyen significativamente en el aumento de la resistencia y la disminución de la permeabilidad del concreto [27].

Existen dos clases de puzolanas: las naturales y las artificiales. Entre las primeras se encuentran las rocas volcánicas derivadas de erupciones volcánicas que, al enfriarse bruscamente, resultan en la formación de materiales con estructura desordenada o vítrea con minerales pobremente cristalinos. Por otro lado se encuentran las rocas o suelos en los que el constituyente silíceo contiene ópalo, ya sea por precipitación de la sílice de una solución o de los residuos derivados de los esqueletos de microorganismos acuáticos, como las tierras diatomeas o arcillas calcinadas [15].

Las puzolanas artificiales son subproductos de procesos industriales y requieren, por consiguiente, un equipo especializado para su disposición. En

algunos casos se requiere un tratamiento para obtener la mayor reactividad de éstas, entre las que existe el humo de sílice, proveniente de la industria de aleaciones de ferro-silicio, las escorias de fundición, provenientes de la industria metalúrgica, ceniza de la quema de la cascarilla de arroz. Cabe mencionar que algunas de ellas pueden tener propiedades de reactividad por sí solas al tener más de un 10% de óxido de calcio (CaO); por consiguiente, se debe mencionar que son cementantes, además de puzolanas [15].

1.4.1 El vidrio como materia prima de cementantes alternativos.

El uso de vidrio reciclado en la fabricación de vidrio reduce el consumo de energía y de materias primas, además de reducir el desgaste de la maquinaria [29]. El vidrio es, sin lugar a dudas, un material frágil que, a su vez, posee cierta dureza. Éste se fabrica en un reactor de fusión, en donde se calienta una mezcla de arenas silíceas (arcillas) y óxidos metálicos secos pulverizados o granulados [30].

La reutilización de residuos vítreos en la fabricación de productos útiles está algo más que limitada. En el caso de estos residuos industriales, son materiales reciclables, ya que a partir de una botella de vidrio se produce otra botella de vidrio y este proceso puede repetirse indefinidamente conservando las propiedades y las cualidades del envase original [1]

De acuerdo con la composición química del residuo de vidrio, éste principalmente consiste en de SiO_2 y podría ser adecuado como materia prima

para la producción de cementos alternativos [31]. Sobre la base de las composiciones principales, los vidrios se pueden clasificar de la siguiente manera [31]:

- Sílice vítreo
- Silicatos alcalinos
- Vidrios sódico-cálcico
- Vidrios borosilicatos
- Vidrios de plomo
- Vidrios de bario
- Vidrios aluminosilicatos

Pequeñas cantidades de aditivos se agregan a menudo durante la producción de vidrio, para dar diferentes colores al vidrio o para mejorar algunas propiedades específicas [31].

En particular, de acuerdo con la norma ASTM C 618 y la composición química requerida, el vidrio sódico-cálcico consiste en aproximadamente el 73% de SiO_2 , un 13% de Na_2O y un 10% de CaO y puede ser clasificado como puzolana natural tipo N. El vidrio molido es un material similar a la ceniza volante, que lo hace atractivo para ser considerado como materia prima para la fabricación de materiales cementantes alternativos. En contraste con los cementos de escoria de alto horno, los cementos de ceniza volante requieren

altas concentraciones alcalinas y altas temperaturas de curado para obtener propiedades mecánicas resistentes a la compresión [32].

En los últimos años, el vidrio ha sido utilizado como agregado de concreto y en la fabricación de cemento, ayudando a la reducción de bancos de este material y a las regulaciones ambientales, además de disminuir un poco los costos de fabricación de concreto con este material [33]. De hecho, el uso combinado de otros materiales cementantes complementarios, tales como la ceniza volante, la escoria de alto horno, el meta-caolín, etc., también han sido empleados y con ello se ha logrado disminuir la expansión de la reacción álcali-agregado [31].

Aunque existe una gran preocupación por determinar el efecto que ocasionarán los álcalis del vidrio al concreto, el vidrio de residuo se ha utilizado primero como remplazo de agregado ya sea fino o grueso para la fabricación de mampostería [34]. Con ello, las propiedades del vidrio se vuelven comparables en términos de composición química, de resistencia y durabilidad y de tamaño, lo que significa tener un procesamiento de menor costo [14].

Por lo anterior, surge el interés en este trabajo de utilizar vidrio reciclado, pero no sólo como agregado de concreto, sino más bien como materia prima para la fabricación de un material cementante. Es decir, se buscará activar el vidrio mediante molienda mecánica-química alcalina para que pueda presentar

propiedades cementantes. También se buscará activar en combinación con algunos otros materiales de desecho, como la ceniza volante.

1.4.2 La ceniza volante como materia prima en cementos alternativos.

En años recientes, las investigaciones en el área de los cementos alternativos se han enfocado principalmente en el estudio de los subproductos industriales, debido a que los países desarrollados y con mayores recursos están generando cantidades importantes de estos materiales.

Por otro lado, el efecto de la ceniza volante en el concreto ha sido estudiado en numerosas investigaciones, sea como reemplazo de parte del cemento portland, o simplemente como adición en el concreto. Menos frecuentes son los estudios realizados con ceniza volante empleada en la fabricación de cementos, la que se adiciona durante el proceso de molienda. Estos materiales alternativos, al igual que las puzolanas, son más interesantes comparándolos con cementos portland sin adición. Los resultados obtenidos en la generalidad de los casos, señalan ventajas y desventajas semejantes a las mostradas por cementos con adiciones de puzolanas naturales. La razón es comprensible, puesto que las puzolanas naturales y la ceniza volante provienen de fenómenos relativamente comparables [35].

La ceniza volante se origina cuando se lleva a cabo el proceso de combustión del carbón mineral, utilizado como combustible en las centrales térmicas [36]. Su composición química y mineralógica depende principalmente

del contenido de minerales no combustibles que posee el carbón, y de las reacciones ocurridas durante el proceso de combustión [37].

La ceniza volante está compuesta por un aglomerado de micro-esferas que contienen principalmente silicio (Si) y aluminio (Al), y en cantidades menores otros elementos como hierro (Fe), sodio (Na) y potasio (K), por mencionar algunos. Las propiedades de la ceniza volante varían ampliamente según el tipo de carbón, el residuo de cenizas, el grado de pulverización y el tipo de colectores empleados. Aún cuando estas cenizas se obtengan de una misma fuente de producción, sus propiedades físicas y químicas presentan cierto grado de variación [35].

Existen algunos requisitos, en relación con las propiedades químicas y físicas de las cenizas volantes, así como requisitos de desempeño de las diferentes clases de ceniza volante. La norma estadounidense ASTM menciona que las siguientes propiedades deben ser evaluadas para definir la potencialidad de la ceniza volante que será utilizada en el concreto [38]: el tamaño de la partícula, el área superficial, el contenido de carbón o la pérdida por ignición (LOI), el contenido de humedad, los diversos parámetros químicos (sulfatos, magnesios y contenido de álcalis), así como pruebas de rendimiento como actividad puzolánica, reactividad alcalina, fineza y contracción, entre otros [38].

INTRODUCCIÓN

Además, el comportamiento hidráulico de una ceniza volante se ve influenciado por: (1) el contenido de carbón, que debe ser tan bajo como sea posible; (2) su contenido en sílice, que debe ser lo más alto posible y su (3) finura, que debe ser lo más fina posible [38].

De acuerdo con la norma ASTM C 618, la ceniza volante se clasifica en tres grupos o clases: N, F y C. La ceniza volante tipo N es aquella que tiene origen volcánico y se conoce comúnmente como puzolana natural. Mientras que las clasificadas como F y clase C son aquellas que se obtienen como subproducto de la combustión del carbón mineral. La principal diferencia entre estas dos últimas es que la suma de sus óxidos mayores (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3), para el caso de la ceniza volante tipo F debe ser mayor que el 70%, y para la ceniza volante tipo C debe contener un mínimo del 10% de CaO .

La ceniza volante obtenida como residuo de las centrales térmicas se utiliza tradicionalmente en materiales de construcción de la ingeniería civil para la elaboración de diferentes tipos de cemento y concreto, en la fabricación de ladrillos, agregados artificiales, materiales refractarios y como aditivo en algunos productos de la industria cerámica, así como en la construcción de caminos y ferrovías, como material para pavimento y material de relleno en minería [39].

Generalmente los cementos puzolánicos preparados con ceniza volante alcanzan excelentes propiedades mecánicas, mayor durabilidad por su

INTRODUCCIÓN

resistencia a los ácidos y mayor resistencia al ataque de álcalis. Por ello, se ha llevado a cabo una serie de estudios con el fin de acelerar la reacción puzolánica de la ceniza volante y obtener mayores resistencias iniciales. Básicamente, se han llevado a cabo tratamientos mecánicos (molienda de materia prima), la aceleración del tiempo de curado y la activación química, lo que permite la activación para los materiales puzolánicos [7].

El proceso de activación de la ceniza volante permite la obtención de un material con características cementantes similares a las del cemento portland ordinario [40,41]. Lo anterior debido a que el principal producto de reacción formado por la activación alcalina de la ceniza volante es un gel amorfo de aluminosilicatos [41-44].

En particular, se ha encontrado que la activación mecánico-alcalina ha sido efectiva para la activación de este tipo de materiales. Como se mencionó anteriormente, se han empleado soluciones de NaOH, Na₂CO₃, y Na₂SO₄, entre otras. En el caso de los materiales vítreos, cuando las concentraciones son altas, en relación a la mezcla activador/aglutinante, los resultados son más efectivos para su activación. De hecho, es evidente la formación de un gel, que tiene influencia directa en la resistencia del material cementante [45].

Por lo anteriormente expuesto, en el presente trabajo de investigación se llevó a cabo la preparación de materiales alternativos con propiedades cementantes. Esto se realizó a partir de la activación, en forma mecánica y

química, de la materia prima utilizada y después formando una pasta de una mezcla de vidrio y ceniza volante. Se evaluaron algunas características y propiedades como la morfología y la micro-estructura, así como el comportamiento mecánico y térmico, tanto de las materias primas, como de las mezclas elaboradas. Con la realización de este trabajo se busca contribuir a la generación de conocimiento en esta área, así como conocer sobre las propiedades y características de las mezclas. Con lo anterior, se podrán desarrollar nuevos materiales cementantes utilizando estos residuos o subproductos industriales.

1.5 El Yeso (Sulfato de Calcio).

Los materiales aglomerantes, como el yeso, tienen la propiedad de adherirse, pegarse y unirse a otros, empleándose para unir materiales generalmente pétreos, como son las gravas y las arenas, unir materiales cerámicos, etc. Para formar y construir diferentes elementos como pueden ser obras de fábrica, recubrir éstas con revestimientos y formar mezclas plásticas (pastas, morteros y concretos), que después de endurecer adquieren un estado sólido [46].

El yeso se ha empleado históricamente en la construcción, de muy diversas maneras: como mortero de junta o de revestimiento, así como bóvedas, en interiores y escaleras y en revestimientos (suelos, paredes y techos) [47]. El yeso se agrega al clínker en pequeña proporción para la

formación del cemento, ya que regula el fraguado evitando con ello su endurecimiento en etapas iniciales.

Hay abundancia geológica de este material, que se puede encontrar libremente en la naturaleza o prepararlo artificialmente. En cualquiera de los dos casos, posteriormente se realizan procesos industrializados donde se preparan estas materias primas para la elaboración de los diversos productos. Desde el punto de vista minero, el yeso es un mineral puro y de fácil extracción, transformación y distribución a la hora de explotar los depósitos naturales [46-47].

Desde el punto de vista cristalográfico y mineralógico, el yeso es una fase del complejo y dinámico sistema sulfato-calcio-agua. Este sistema fisicoquímico se empezó a estudiar en 1887 por Lavoisier; sin embargo, su complejidad hace difícil una descripción completa del mismo [47].

La importancia del uso del yeso se debe al ciclo que presenta su sistema: yeso-semihidrato-anhidrita-yeso, existiendo diferentes fases de semihidrato y de anhidrita según los rangos de presión y temperatura, como se ve en la siguiente Figura 1.3.

El ciclo del yeso se divide en dos procesos:

- a) Deshidratación: yeso-semihidrato y anhidrita
- b) Hidratación: semihidrato y anhidrita-yeso

INTRODUCCIÓN

Ambos procesos son altamente complejos y en ellos influye una gran cantidad de parámetros como las impurezas que modifican la temperatura de transformación de la fase, así como su morfología. La forma y la textura de los cristales influyen en el modo en el que se produce la deshidratación y especialmente en la forma final de los cristales de yeso fraguado, lo cual está relacionado directamente con sus propiedades físicas y mecánicas [46].

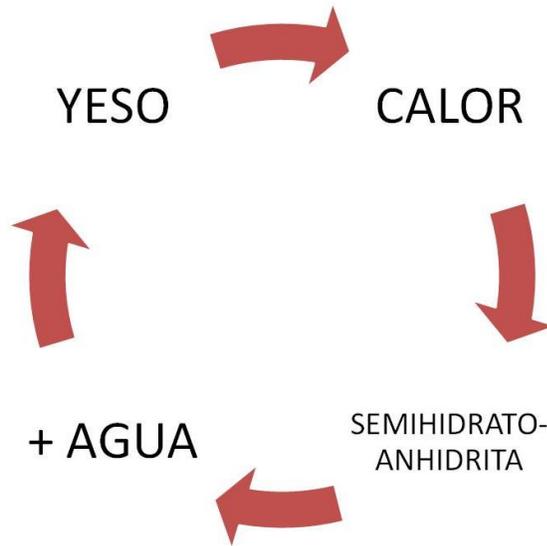
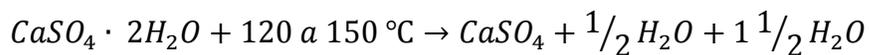
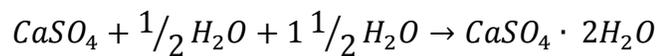


Figura 1.3. Ciclo del yeso.



YESO

SEMIHIDRATO



SEMIHIDRATO

YESO

En el presente trabajo se agregará yeso al final de la preparación de las mezclas de vidrio reciclado y ceniza volante para ayudar al proceso de fraguado.

1.6 Antecedentes.

El vidrio reciclado y la ceniza volante son materiales de desecho industrial que se han utilizado en las últimas décadas para la fabricación de cemento o concreto, ya sea en forma de agregado para concreto o dándoles un proceso de activación en la fabricación de cemento. A continuación se muestran algunos avances científicos de estos materiales:

Espinoza Pérez y Escalante García [32], investigaron los cementos compuestos con escoria de alto horno y vidrio de desecho. Este último se sometió a un tratamiento de activación mecano química alcalina para obtener así el silicato de sodio que, al mezclarlo con la escoria de alto horno, favoreció el desarrollo de resistencias a la compresión. Los morteros elaborados con un 100% de vidrio activado, un 4% Na_2O y curados a 20 y a 60°C, presentaron resistencia a la compresión de 16 MPa a los 28 días. Esta resistencia disminuyó al aumentar la dosificación del vidrio activado.

Palomo y colaboradores [42], estudiaron el mecanismo de activación de la ceniza volante con una solución alcalina. Las soluciones alcalinas utilizadas en esa investigación fueron NaOH y KOH. Se realizó una activación mecano-química por 2 min, fabricando especímenes de 1x1x6 cm. Los valores de resistencia a la compresión fueron de 60 MPa curando los especímenes a una temperatura de 85°C.

Seung Bum Park y colaboradores [48], investigaron la posibilidad de reciclar desechos de vidrio triturado (ámbar, esmeralda, flint y mezclas de vidrio), que tenían un diámetro máximo de 25 mm y se utilizó como agregado fino para concreto. Los resultados que se obtuvieron en el concreto fresco para factores como el revenimiento y compacidad disminuyeron debido a la forma angular del grano. El contenido de aire se incrementó debido al número de partículas con tamaño de partícula de 5 mm de vidrio de desecho. La resistencia a la compresión, tensión y flexión del concreto disminuyó a medida que incrementó el contenido de vidrio de desecho. En ese caso, los concretos con un 30% de vidrio de desecho tuvieron una mejor resistencia a la compresión, la tensión y la flexión, con respecto a la referencia.

Caijun Shi y colaboradores [49], investigaron la morfología, la fineza y la actividad puzolánica de cuatro tipos de vidrio en polvo (GP-fine, GP-dust, GP-4000, GP-6000) y con ceniza volante. Para ello utilizaron cemento portland tipo I y ceniza volante tipo F, de las cuales se midió la fineza y el tamaño de partícula. La actividad puzolánica de los polvos de vidrio mezclados en morteros con 20% de sustitución de cemento portland se aceleró al aumentar la temperatura de curado de 35 a 65°C. Esto incrementó la resistencia a la compresión de los morteros, en comparación con aquellos mezclados con ceniza volante. También encontraron que el reemplazo de cemento portland por vidrio en polvo reduce la reacción álcali agregado, aunque no es tan efectiva como con la ceniza volante.

Ahmad Shayan y Aimin Xu [50], investigaron el desempeño del vidrio en polvo (GLP) en concreto como material puzolánico y determinaron que de las mezclas de concreto con remplazo de vidrio en polvo (0%, 20% y 30%) con cemento portland y la mezcla M3 con 20% de vidrio en polvo, alcanzó una resistencia de 40 MPa a los 28 días. Sin embargo, a los 404 días, con 30% de remplazo de cemento por vidrio en polvo, la resistencia a la compresión fue de 55 MPa. Además, los concretos con vidrio en polvo tuvieron un desempeño satisfactorio con respecto a la contracción por secado y la reacción álcali-agregado, también se reduce la permeabilidad a los iones cloruro; por lo tanto, se beneficia la durabilidad por efecto de la corrosión del acero.

Sanjay Kumar y Rakesh Kumar [51], estudiaron la geo-polimerización de la activación mecánica de la ceniza volante a 27 y 60°C, encontrando que la activación mecánica incrementó la reactividad de la ceniza volante, la cual fue mayor cuando el tamaño de partícula se redujo a 5-7 μm y determinaron que la activación mecánica mejora las propiedades físicas y se relaciona con la estructura intrínseca debido al desarrollo de una mayor geo-polimerización.

Sekulíc Ž y colaboradores [52], investigaron la activación mecánica sobre la calidad del cemento con adición de la ceniza volante, utilizando un molino vibratorio de anillos. En esa investigación se encontró que a los 30 min de molienda, el área superficial incrementa con 20% de ceniza volante. Las reacciones endotérmicas y exotérmicas se presentaron a bajas temperaturas, incrementando la reactividad de las muestras. Las propiedades físico-

mecánicas mejoraron después de 3 min de molienda, mejorando la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días.

Puertas y colaboradores [53], investigaron la activación de la ceniza volante/escoria de alto horno con una solución de NaOH (2 M y 10 M) con diferentes proporciones (100/0, 70/30, 50/50, 30/70 y 0/100). En la relación 50/50 con 10 M y curado a 25°C, se obtuvo una resistencia a los 28 días, de 50 MPa. El principal producto de reacción que se formó en las pastas fue el silicato de calcio hidratado con grandes cantidades de Al en la estructura y iones de Na en la capa intermedia.

De esta manera, como pudo apreciarse, el empleo de vidrio, ceniza volante y escoria como sustituto del cemento ha sido considerado desde hace algunos años y se ha encontrado que permite obtener materiales cementantes con alta resistencia mecánica, así como resistencia al ataque alcalino y durabilidad ante la corrosión del acero. Por ello, en el presente trabajo se busca llevar a cabo la mezcla de vidrio y ceniza volante para el desarrollo de materiales alternativos con propiedades cementantes. Sin embargo buscando lograr la activación del vidrio molido, el vidrio será tratado mecano-químicamente mediante molienda mecánica y la adición de una solución alcalina.

CAPÍTULO 2

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

CAPÍTULO 2

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 Hipótesis.

Es posible formar un material alternativo con satisfactorias propiedades cementantes añadiendo vidrio en polvo y ceniza volante, debido al alto potencial puzolánico de estos y al proceso de activación mecano-químico alcalino inducido.

2.2 Objetivos.

2.2.1 *Objetivo General.*

Desarrollar nuevos materiales alternativos con idóneas propiedades cementantes, utilizando desechos inorgánicos, mediante un proceso alternativo de activación, como es la molienda mecano-química alcalina, para la reutilización y revalorización de residuos que pudieran resultar contaminantes como el vidrio sódico-cálcico y la ceniza volante.

2.2.2 *Objetivos Específicos.*

- Seleccionar y caracterizar los materiales de partida, basados en desechos inorgánicos.

- Desarrollar mezclas de nuevos materiales alternativos con propiedades cementantes a partir de desechos inorgánicos como el vidrio reciclado y la ceniza volante, y activarlas mediante el proceso de molienda mecano-químico alcalino.
- Determinar las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de las pastas preparadas.
- Determinar la proporción de vidrio/ceniza volante con la mejor condición, para así obtener un material con propiedades cementantes, con la finalidad de que presenten características químicas y mecánicas similares a las de un material cementante de referencia.
- Relacionar las características químicas y mecánicas de los nuevos materiales alternativos con propiedades cementantes con la proporción de vidrio y ceniza volante, así como la cantidad de solución alcalina empleada para la activación.

2.3 Justificación.

Actualmente existe en el sector de la construcción un gran interés por desarrollar nuevos materiales alternativos con propiedades cementantes. Con este trabajo se pretende utilizar dos materiales de desecho o subproductos industriales como el vidrio sódico-cálcico y la ceniza volante, como materia prima para la fabricación de nuevos materiales alternativos con propiedades cementantes convencionales. Estos subproductos serán activados con una

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

solución alcalina, mediante un proceso mecano-químico alcalino para obtener un nuevo material alternativo con propiedades cementantes útiles.

Además, la fabricación de estos materiales alternativos con buenas propiedades cementantes, contribuirá a disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Lo anterior debido a que comúnmente, durante la fabricación del cemento tradicional se genera una gran cantidad de CO₂ (1 kg de CO₂ por cada kg de cemento portland). Además, con el desarrollo de este trabajo también se contribuirá al ahorro energético, pues se requieren al menos 1500°C para la fabricación del cemento tradicional. Por ello, la importancia de este trabajo radica en el ahorro en costos de fabricación de los materiales cementantes y en un menor impacto ambiental; pues, en grandes cantidades, estos materiales de desecho o subproductos industriales, como el vidrio y la ceniza volante, sólo ocasionan ocupación de espacio y contaminación en el ambiente.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Selección del material de partida.

Los materiales de desecho o subproductos industriales utilizados como materia prima o material de partida para este trabajo fueron: a) vidrio sódico cálcico que fue obtenido de una empresa del norte del país ubicada en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, b) ceniza volante, que procedente de la central termoeléctrica “José López Portillo” del Estado de Coahuila, que utiliza carbón lignito, c) yeso (sulfato de calcio dihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

La solución activadora utilizada fue hidróxido de sodio en forma de escamas (industrial) de CTR SCIENTIFIC con una pureza mayor que el 98%.

3.2 Fabricación de las pastas.

Para dar cumplimiento a los objetivos específicos trazados en este trabajo, se llevaron a cabo cuatro etapas experimentales, tal como se muestra en el siguiente esquema:

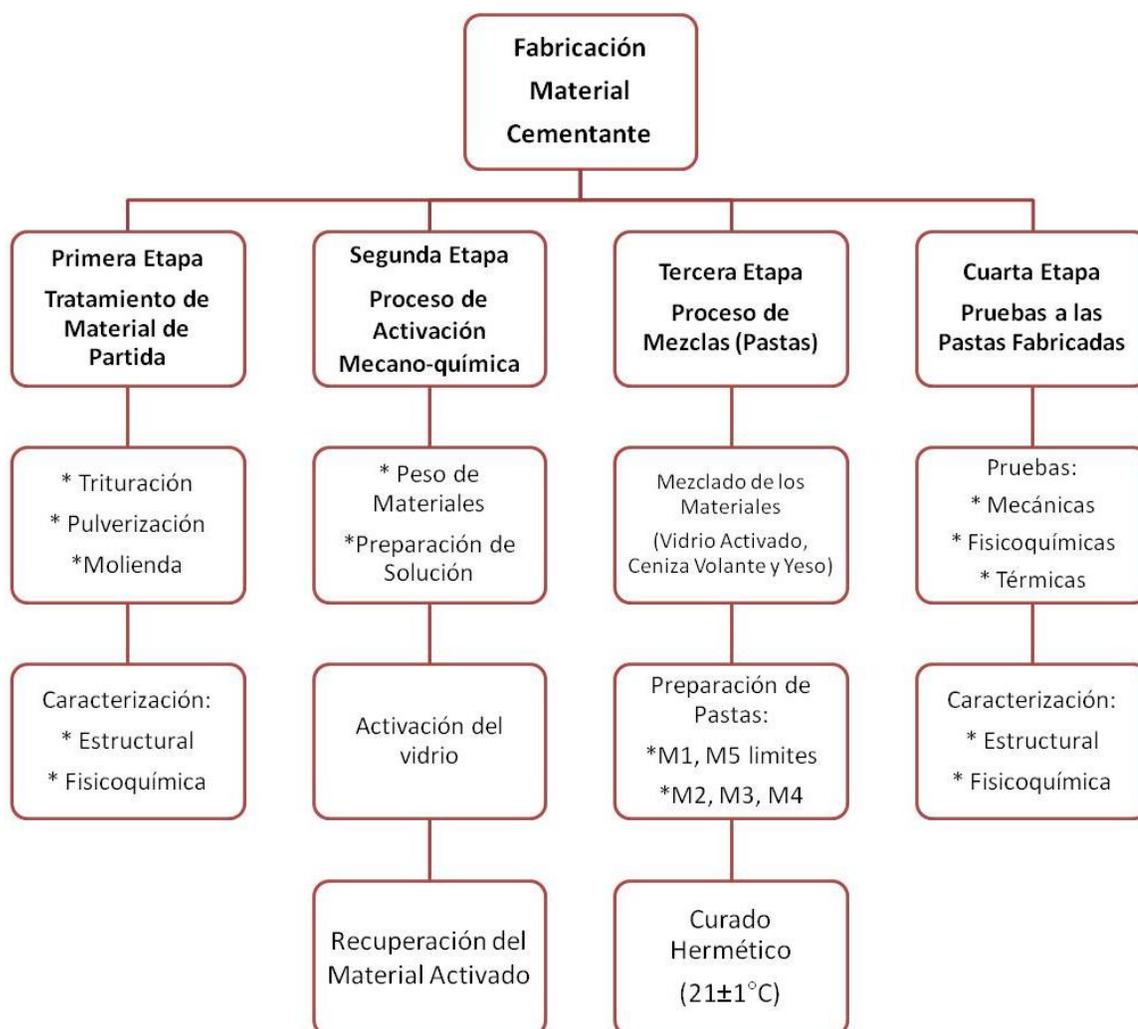


Figura 3.1. Esquema experimental: Etapas de fabricación del material cementante.

A continuación se expone de manera detallada del procedimiento utilizado en cada etapa experimental.

3.2.1. Tratamiento del material de partida.

Primeramente, se llevó a cabo el tratamiento del vidrio que se empleó en el presente estudio. Éste fue colocado en la parte superior de una trituradora, donde se encuentra la placa fija y la placa móvil, ver Figura 3.2. El material es introducido de forma continua y una vez triturado va saliendo por la parte inferior. Este procedimiento se realizó de 2 a 3 veces, con el fin de obtener un tamaño fino de partícula, entre 5 a 10 mm.



Figura 3.2. Trituradora de quijadas empleada para el tratamiento del material de partida (vidrio sódico cálcico).

Una vez triturado el material, éste fue pulverizado para obtener un polvo finamente molido con un tamaño de partícula de entre 1 a 2 mm aproximadamente. El material se introdujo entre dos discos metálicos,

pulverizando el material por el efecto de la rotación a alta velocidad. El perfil especial de los discos reduce progresivamente el material convirtiéndolo en polvo, este procedimiento se realizó dos veces para asegurar que la mayoría del vidrio tuviera tamaños de 1 a 2 mm. En la Figura 3.3 se presenta el esquema de la pulverizadora utilizada.

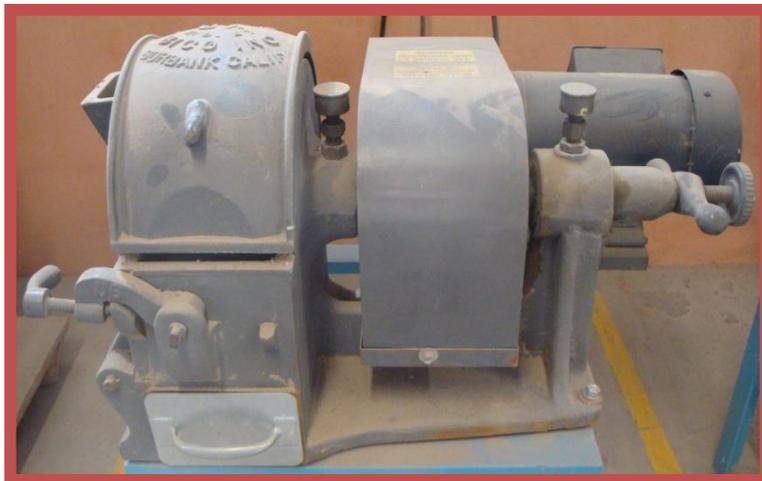


Figura 3.3. Pulverizadora empleada para obtener el vidrio en polvo.

Posteriormente a esta etapa, se llevó a cabo la molienda fina del vidrio sódico-cálcico. Para esto se utilizó un molino de bolas vibratorio con una relación bolas de acero:material de 10:1, que es la relación recomendada para una molienda efectiva, ver Figura 3.4. En este caso, se utilizó una carga de 50 kg de bolas de acero de diferentes tamaños (aproximadamente 1.5 a 2 cm de diámetro) y se añadieron 5 kg de material pulverizado. Posteriormente, se dejó moliendo por un tiempo de 2.5 horas. Una vez transcurrido este tiempo, el material fue recolectado en cubetas con tapa para que no pudieran contaminarse con otros materiales, siendo estas identificadas para su pronta

utilización, obteniendo así un material con un tamaño de partícula menor que $100\ \mu\text{m}$.

En el caso de la ceniza volante, no fue necesario realizar la trituración ni tampoco la pulverizadora ya que por su obtención de las centrales termoeléctricas, viene en forma de polvo y solamente se requiere llevar a cabo una molienda fina. De esta manera, una vez molida fue recolectada también en cubetas e identificada para su uso posterior. Por otro lado, el yeso que se utilizó para esta investigación se obtuvo de la manera comercial y no requirió de ningún tratamiento previo.



Figura 3.4. Molino de bolas vibratorio.

Como último proceso de la primera etapa, se llevó a cabo la determinación del tamaño de partícula de cada uno de los materiales previamente tratados. Para ello, se empleó un analizador granulométrico por difracción láser, MICROTRAC S3500. El material finamente molido fue colocado en una suspensión de agua-etanol para eliminar las fuerzas de Van der Waals y

las fuerza electrostáticas entre las partículas y evitar con ello la aglomeración del polvo. El equipo utilizado se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Analizador granulométrico por difracción láser.

Una vez pre-tratado el material y conociendo sus características iniciales, éste fue utilizado como materia prima para preparar las pastas cementantes tal como se describe en la segunda etapa.

3.2.2. Proceso de activación mecano-químico alcalino.

El proceso de activación mecano-químico alcalino se llevó a cabo de la siguiente forma:

Primeramente, en un vaso de precipitado se preparó una solución alcalina agregando un litro agua y posteriormente añadiéndole el NaOH en una cantidad que permitiera tener una solución con una concentración de 8 M (320 gramos de NaOH por litro de solución). La solución se mantuvo en agitación magnética constante para ayudar a la disolución de las escamas del NaOH. La

concentración de la solución alcalina propuesta se determinó en función de reportes en la bibliografía dónde se menciona que se requiere de una solución altamente alcalina para lograr destruir la capa vítrea de los materiales amorfos como es el caso del vidrio [32, 42].

Una vez preparada la solución alcalina, el siguiente paso consistió en pesar 1 kg de vidrio en polvo y proceder a su respectiva activación mecano-química alcalina. Para este proceso se utilizó un molino de bolas, en el que se colocó el material, la cantidad correspondiente de bolas de alúmina de 1 y 2 cm de diámetro y, posteriormente, se le agregó la solución alcalina. Para este trabajo se utilizó una relación de bolas:material:solución de 10:1:0.5, es decir, en un recipiente de alúmina se introdujeron 10 kg de bolas de alúmina, 1 kg de vidrio en polvo y 500 mL de solución alcalina de NaOH (8 M).

La proporción empleada se seleccionó considerando algunos estudios previos. Mientras que la cantidad de bolas utilizada fue mayor con respecto al material (vidrio), esto para que fuera más agresivo al impacto y el material pudiera tener una mayor área superficial y con ayuda de la solución alcalina asegurar la destrucción de la capa vítrea.

Posteriormente, se le colocó una tapa y se selló herméticamente para colocarse sobre los rodillos y comenzar el proceso de molienda. Se decidió llevar a cabo la activación del material por 2, 4 y 6 horas de molienda, por

considerar tiempos adecuados para permitir la solubilidad de la SiO_2 en la mezcla con NaOH.

De forma similar, se procedió a mezclar la ceniza volante con la solución alcalina; sin embargo, en este caso la molienda realizada fue simplemente para homogeneizar la mezcla, y no se realizaron moliendas por periodos de tiempo prolongados. En este caso la activación de la ceniza volante fue solamente mediante la adición de la solución alcalina. Simplemente se llevó a cabo la molienda por 1 minuto antes de mezclarla con el vidrio activado y el yeso. Este último fue agregado para activar y controlar el proceso de fraguado. La decisión de no activar la ceniza volante por molienda mecánica se hizo pensando en observar únicamente el efecto del proceso de activación mecano-química del vidrio molido, pues ya existen diversos estudios que muestran la activación de la ceniza volante mediante este proceso.

Después de finalizado el tiempo de molienda, la pasta obtenida dentro del molino fue removida de las paredes del recipiente con una espátula. Finalmente la pasta fue recolectada e identificada para su posterior uso.

3.2.3. Preparación de las pastas.

Inmediatamente después de haber realizado la activación mecano-química del vidrio, se procedió a fabricar las mezclas de pastas del vidrio activado y la ceniza volante con el yeso. Para este trabajo, se decidió a fabricar además pastas de la mezcla de los subproductos industriales, pues se

consideró que deberían estudiarse las reacciones que ocasionaran la unión de estos materiales, sin ninguna otra variable que pudiera afectar el desempeño de las mismas.

Se elaboraron probetas de pasta cúbicas de 5 cm y éstas fueron curadas en condiciones ambientales de laboratorio, manteniéndose de forma hermética y a una temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}$, por 7, 14, 28 y 90 días. En la Tabla 3.1 se muestran las proporciones de las mezclas realizadas para la preparación de las pastas. En la Figura 3.6 se muestra la nomenclatura como primer punto tenemos el tiempo de activación que se le dio al vidrio, después el nombre de la mezcla según las proporciones propuestas y por último el tiempo de curado que se le dio a dicha mezcla. De esta manera, quedaron identificadas las diferentes pastas de vidrio activado mecano-químicamente y ceniza volante activada químicamente.

**TABLA 3.1
SISTEMA DE PASTAS ELABORADAS**

Tiempo de activación del vidrio	Solución activadora	Sistemas de mezclas (% en masa)		Mezcla
6 Horas 4 Horas 2 Horas	NaOH	VA:CV:Y	99:0:1	M1
		VA:CV:Y	70:29.7:0.3	M2
		VA:CV:Y	50:49.5:0.5	M3
		VA:CV:Y	30:69.3:0.7	M4
		VA:CV:Y	0:99:1	M5

VA= Vidrio Activado Mecano-química, CV= Ceniza Volante activada químicamente, Y= Yeso



Figura 3.6. Nomenclatura de las pastas a los tres tiempos de activación.

La preparación de la pasta para la elaboración de las probetas en forma de cubos se realizó de acuerdo con las proporciones en porcentaje en peso propuestas en la Tabla 3.1. El criterio tomado de las proporciones de este trabajo se basó en el desempeño mecánico que tienen los materiales solos, ya sea vidrio activado más yeso o ceniza volante más yeso (M1 y M5) y con diferentes proporciones para observar el comportamiento al mezclar dichos materiales.

Para este trabajo se utilizó una mezcladora eléctrica, como lo indica la norma ASTM C 305 [54]. Se agregó la solución alcalina y después se le incorporó la ceniza volante, para mezclar con agitación constante por un minuto a velocidad lenta, deteniendo la mezcladora al término del tiempo. Después, se le agregó la cantidad de yeso y por último el vidrio activado mecanoquímicamente. Se dejaron reposar los materiales por 30 segundos. Transcurrido este tiempo, los materiales se mezclaron con agitación constante a velocidad lenta por 30 segundos. El proceso de mezclado se detuvo durante 15 segundos para raspar las paredes con una espátula, esto con la finalidad de poner todo el material en el centro del recipiente y se cambió la velocidad de lenta a media. Pasado este tiempo (15 seg), se mezclaron los materiales a velocidad media, por un minuto más.

Al terminar el mezclado se procedió a llenar los moldes con la pasta preparada, estos previamente engrasados con un lubricante (aceite o vaselina). Lo anterior se hizo para que el desmolde sucediera con mayor facilidad. El

vaciado de la pasta se llevó a cabo según a la norma ASTM C 109, que menciona que se debe hacer en dos capas: la primera capa a una altura de 2.5 cm, la cual fue apisonada 8 veces con una barra de polietileno de forma rectangular y se giró 90° para volver a apisonar otras 8 veces y asegurar un material compacto. Posteriormente, la segunda capa consistió en cubrir totalmente el cubo y proceder de la misma forma de compactación que la primera capa; por lo que, en total, en cada capa se realizaron 16 apisonamientos. Después de 4 rondas, se tuvieron un total de 32 apisonamientos en cada capa, ya que cada ronda estuvo en ángulo recto con respecto a la otra y consistió de 8 golpes adyacentes sobre la superficie de la muestra (Figura 3.7).

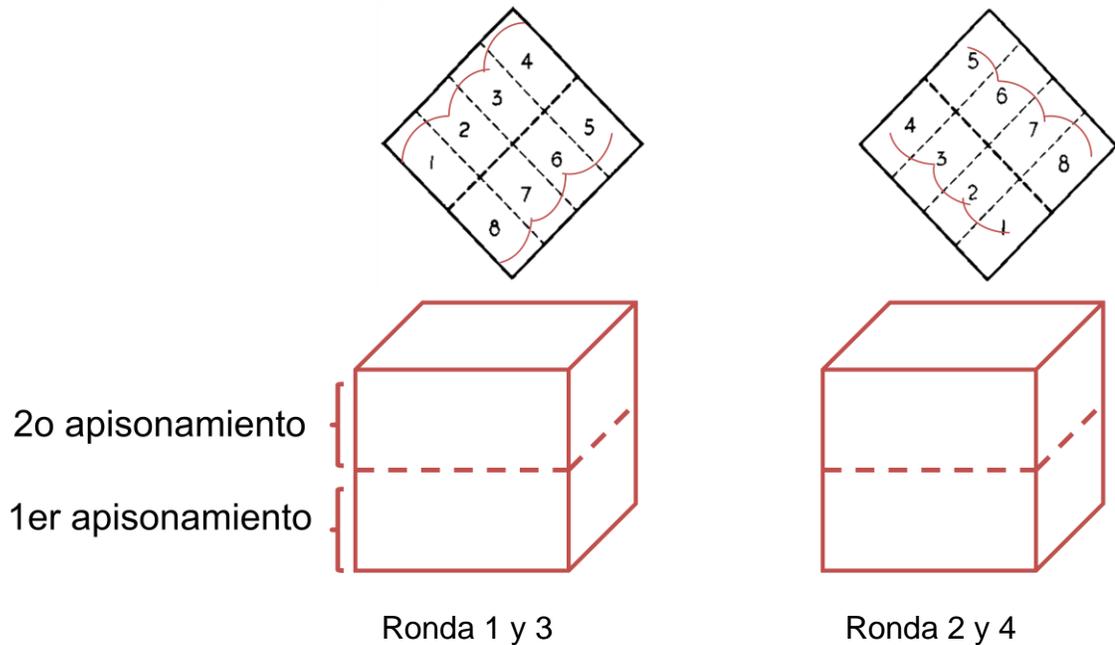


Figura 3.7. Orden de apisonamiento de moldeo de los cubos.

Una vez llenado los moldes con la pasta, se llevaron al ras con una espátula para darle un acabado liso, se limpió el exceso de las paredes y los moldes se cubrieron con plástico. Estos moldes se etiquetaron con la fecha, tiempo de activación, tipo de mezcla y tiempo de curado. Una vez identificados, los cubos se dejaron curar en los moldes y posteriormente fueron desmoldados. Una vez desmoldados los cubos, se envolvieron en bolsas de plástico, que fueron etiquetadas con el tiempo de activación, el tipo de mezcla y el tiempo de curado, hasta el día del ensaye a compresión. Cada uno de los cubos fue curado en condiciones de laboratorio, de forma hermética y a una temperatura de $21\pm 1^{\circ}\text{C}$, para los tiempos mencionados previamente, por 7, 14, 28 y 90 días. La razón porque no se curaron bajo el agua, es porque las pastas estuvieron fabricadas con una solución alcalina mencionada anteriormente (con $\text{pH}\sim 13$), que al curarlas bajo el agua, podría perder la alcalinidad y, por lo tanto, la activación alcalina se vería afectada, lo que podría provocar que no se logran resultados significativos para esta investigación.

Los ensayos para determinar su resistencia a la compresión se realizaron por triplicado, tomando el promedio como resultado. Con los resultados de las diferentes pastas producidas se realizó una comparación entre todos ellos. Se evaluaron las distintas proporciones de cada uno de los sistemas de vidrio activado mecano-químicamente y ceniza volante activada químicamente y el efecto de la concentración del yeso.

3.2.4. Resistencia a la compresión de las pastas.

Una vez transcurrido los 7, 14, 28 y 90 días de curado de cada una de la series de cubos de las pastas preparadas, se llevaron a cabo los ensayos de resistencia a la compresión. Para esta prueba se utilizó una prensa hidráulica marca ELE International ADR-Auto con una capacidad de 200 toneladas (Figura 3.8) que permite realizar los ensayos a compresión de los diversos tipos de materiales, así mismo se utilizó un dispositivo que permitiera los ensayos de cubos de 5 cm. Se utilizó una velocidad de aplicación de la carga de 5 kg/s.

Esta prueba se basa en un sistema que aplica cargas controladas sobre los cubos de dimensiones conocidas, y permite conocer la carga al momento de su ruptura.



Figura 3.8. Prensa Hidráulica.

Una vez que los cubos preparados de cada una de las pastas fueron ensayados a 7, 14, 28 y 90 días, de cada mezcla y de cada tiempo de curado, se procedió a llevar a cabo su caracterización estructural por medio de difracción de rayos-X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB). Para evitar que la reacción química avanzara después de los días de curado, cada cubo fue sumergido en acetona. Después las muestras fueron molidas y guardadas en bolsas de polietileno.

3.3 Caracterización Estructural.

3.3.1 Difracción de rayos-X en polvos.

Cada una de las pastas preparadas fue caracterizada mediante la técnica de rayos-X método de polvos, ya que éste es un método rápido y preciso para identificar las diferentes fases cristalinas contenidas en un material. En este método, el compuesto es irradiado por un haz de rayos-X monocromático de determinada longitud de onda λ ; los planos cristalográficos son aquellos que cumplen la Ley de Bragg.

$$2 d \sin \theta = n \lambda \quad (\text{Ecuación 2.1}).$$

Donde:

n = número entero

λ = longitud de onda de rayos X

d = espacio interplanar

θ = ángulo de incidencia del Rayo (X)

En este trabajo se utilizó un equipo de difracción de rayos-X marca BRUKER D8 ADVANCE (Figura 3.9) que cuenta con un detector VANTEC de alta velocidad. Este equipo está ubicado en el Departamento de Ecomateriales y Energía del Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Los difractogramas son recolectados en un nivel 2θ de 10 a 70°, con un tamaño de paso de 0.5° y radiación $\text{CuK}\alpha$. La muestra se prepara en forma de polvo y colocada en un portamuestras, manteniendo una superficie perfectamente plana sobre la que incidirá el haz de rayos-X.



Figura 3.9. Difractómetro de rayos- X.

3.3.2. Microscopía electrónica de barrido con electroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS).

La técnica de microscopía electrónica de barrido permite obtener información sobre la morfología de la muestra y también acerca de su composición química mediante el microanálisis por EDS. Con este análisis se

logró obtener información acerca de la forma y tamaño de las partículas, así como detectar la presencia de poros o micro-grietas en las pastas fabricadas.



Figura 3.10. Microscopio Electrónico de Barrido



Figura 3.11. Recubridora de Oro/Paladio (Au/Pd)

El análisis se llevó a cabo en un microscopio electrónico de barrido marca JEOL 6490LV (Figura 3.10) acoplado con un detector de microanálisis químico, espectroscopía de dispersión de energía (EDS) marca Oxford Instruments. Previo al análisis las muestras en polvo de las distintas pastas curadas a 7, 14, 28 y 90 días, fueron colocadas sobre cinta de carbono para tener un medio conductor y se les aplicó un recubrimiento de oro/paladio

(Au/Pd), posteriormente se introdujo en la cámara del equipo para su observación y análisis (Figura 3.11).

3.5 Propiedades térmicas.

3.4.1. Expansión térmica.

Se sabe que cualquier material sólido, cerámico, metálico o plástico, tiende a expandir al incrementarse la temperatura. Esto es debido a que al aumentar la temperatura la mayoría de los materiales tiende a incrementar su volumen y al enfriarse tienden a contraerse. Este fenómeno se conoce como expansión térmica. La expansión térmica de un material se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\alpha = (L_f - L_i) / [L_i * (T_f - T_i)] \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

L_f = Longitud final

L_i = Longitud inicial

T_f = Temperatura final

T_i = Temperatura inicial

Debido a que los materiales cementantes tienden a incrementar su volumen al aumentar la temperatura, como consecuencia de la expansión térmica, es importante el conocer el comportamiento expansivo de las pastas preparadas. Lo anterior servirá para contar con información que permita inferir

si estos materiales alternativos con propiedades cementante incrementan su volumen de la misma manera que un material cementante tradicional.

Los análisis se llevaron a cabo en un dilatómetro Orton™ 2010C (Figura 3.12) en un nivel de temperatura entre 25 y 200° C. Se utilizaron celdas de cuarzo como soportes, aplicando una velocidad de calentamiento controlado. En este caso la preparación de la muestra consistió en cortar los cubos en probetas en forma rectangular de 25.4 mm de largo, 10 mm de ancho y 10 mm de espesor de cada pasta preparada a distintos tiempos de curado o edades (7, 14, 28 y 90 días).

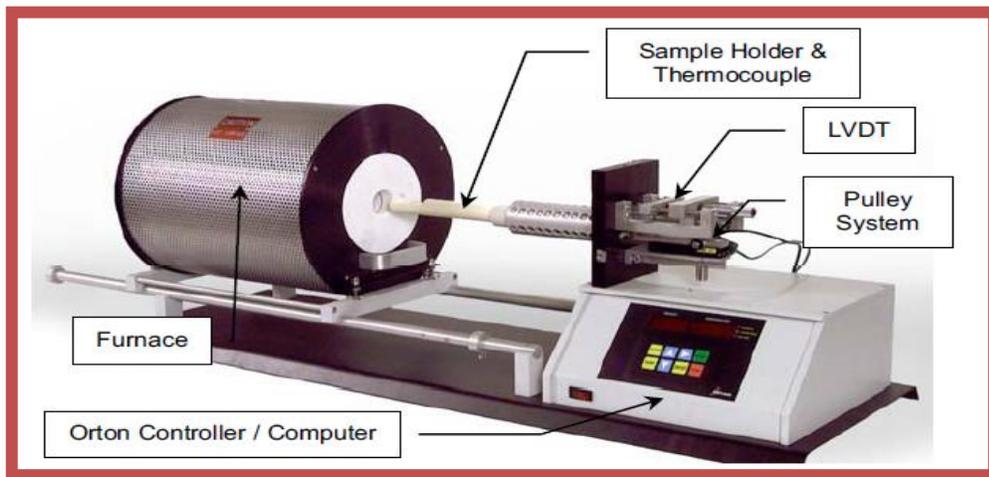


Figura 3.12. Dilatómetro.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización de la materia prima: materiales de partida.

La caracterización estructural de la materia prima, es decir, los materiales de partida se llevó a cabo por difracción de rayos-X en polvos y microscopía electrónica de barrido. El análisis cuantitativo, tanto del vidrio reciclado como de la ceniza volante, fue proporcionado por la industria que facilitó el material. Por la naturaleza de estos materiales, el contenido de óxidos que están presentes es similar a los que se encuentran en el cemento portland o en los materiales puzolánicos. En la Tabla 4.1, se muestra la composición química cuantitativa del vidrio sódico-cálcico de desecho y la ceniza volante. Puede apreciarse que en ambos materiales se encuentra presente una gran cantidad de sílice (SiO_2).

Es importante mencionar que al vidrio en polvo empleado se consideró clasificarlo como un material puzolánico tipo N según la norma ASTM C 618. Lo anterior debido a la gran cantidad de Na_2O , la cual no sobrepase de la cantidad de sus óxidos principales (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3). En el caso de la ceniza volante, ésta fue clasificada como una puzolana tipo F según la norma ASTM C 618. Esto se basó en que la suma de óxidos principales (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), es mayor a 70%; aunque la cantidad de hierro varía de unas cenizas a otras. Se

sabe que ambos subproductos industriales con propiedades puzolánicas presentan un carácter ácido debido a la gran cantidad de sílice que contienen ($\text{SiO}_2 > 65\%$) [28,55].

**TABLA 4.1
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MATERIA PRIMA**

Composición química	Materia Prima (%)	
	Vidrio	Ceniza volante
SiO_2	72.50	60.42
Al_2O_3	2.47	27.28
Fe_2O_3	-	4.07
Na_2O	12.82	0.62
MgO	0.31	0.91
CaO	11.90	2.47
SO_3	-	0.34
K_2O	-	1.11
TiO_2	-	1.09
P_2O_5	-	0.09
Mn_2O_3	-	0.02
P.I. a 950°C	-	1.0
Otros	0.1-0.4	

P.I. = pérdida por ignición

Cabe mencionar que la norma ASTM no especifica la estructura, ni la morfología que deban tener los compuestos; por consiguiente, no se tiene un valor concluyente para definir la reactividad de los materiales en estudio [15]. Lo que sí se debe considerar es que antes de ser utilizados los materiales deben

ser molidos para que así tengan una homogeneidad y con ello adquieran características que mejoren sus propiedades físicas y químicas.

4.1.1. Determinación del tamaño de partícula.

Cada una de las materias primas fue analizada mediante la técnica de granulometría por difracción de rayos láser. Los resultados para el vidrio y la ceniza volante se muestran en las gráficas de las Figura 4.1 y Figura 4.2, respectivamente.

En la Figura 4.1 se presenta la distribución de tamaño de partícula del vidrio. Se observa que la mayor parte de las partículas de vidrio presentan en promedio un tamaño de partícula con un diámetro de 23 μm ; se aprecia que todas las partículas son menores que 400 μm .

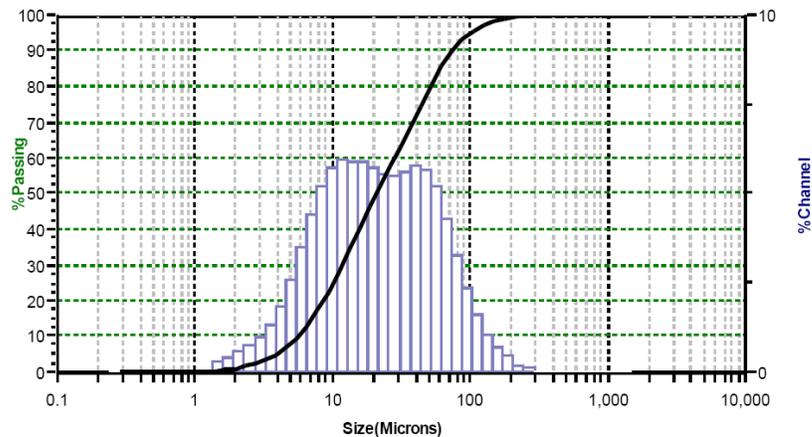


Figura 4.1. Gráfica que muestra la granulometría del vidrio de desecho molido.

Por otro lado, la gráfica obtenida para la ceniza volante que se presenta en la Figura 4.2 muestra que la mayoría de las partículas se encuentran dentro

de un tamaño de 30 a 100 μm ; se observa que todas las partículas son menores que 500 μm , con un tamaño promedio de 65 μm .

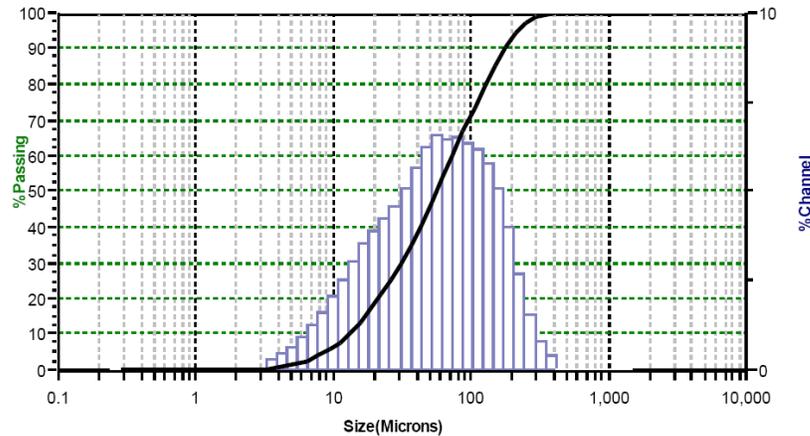


Figura 4.2. Gráfica que muestra la granulometría de la ceniza volante.

Estos resultados indican que la mayoría de las partículas de ambos materiales son menores que 100 μm , lo que podría considerarse como un resultado favorable. Es bien sabido que, entre más pequeña la partícula, mayor será el área superficial específica y, por lo tanto, la reactividad se verá incrementada.

4.1.2. Difracción de rayos X, método de polvos (DRX).

Con la finalidad de conocer las características estructurales de las materias primas, tales como el vidrio y la ceniza volante, se llevó a cabo el análisis por difracción de rayos-X. En el difractograma de la Figura 4.3 del vidrio molido se observa que no presenta picos atribuidos a algún compuesto cristalino, sin embargo, y como era de esperarse, se puede observar una banda ancha difusa y de muy baja intensidad que se le atribuye a la fase vítrea (material amorfo). Esta es una característica típica de los sólidos amorfos, en

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ángulos de 2θ de entre 20 y 30° [57-58]. Se dice que la presencia de este pico ancho está relacionada con el contenido de óxido de calcio (CaO) en el vidrio, tal como lo reporta S. Diamond [56], quien demostró que cuando la concentración de CaO es menor que el 20%, el pico aparece a un ángulo de 2θ alrededor de 23° .

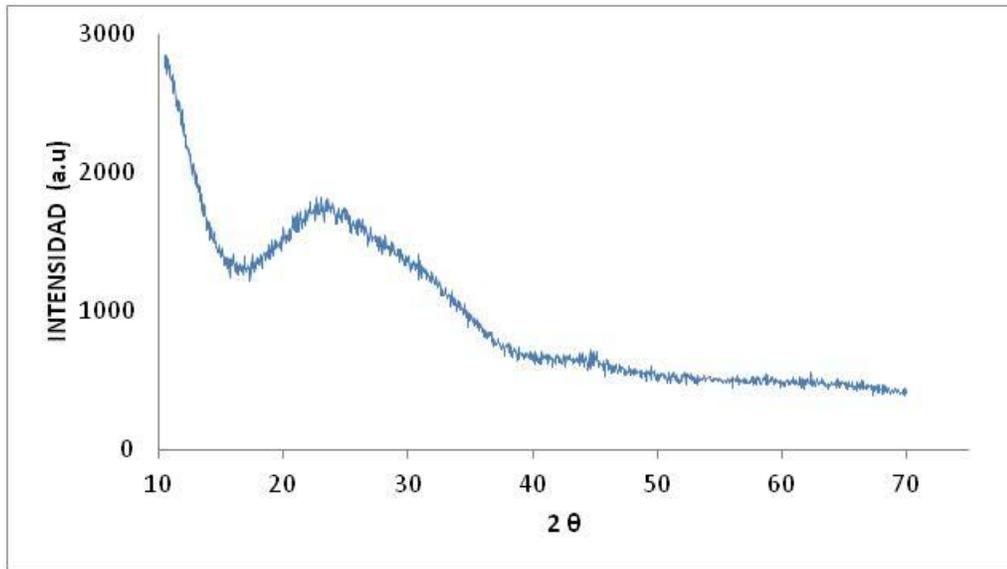


Figura 4.3. Difractograma del vidrio molido.

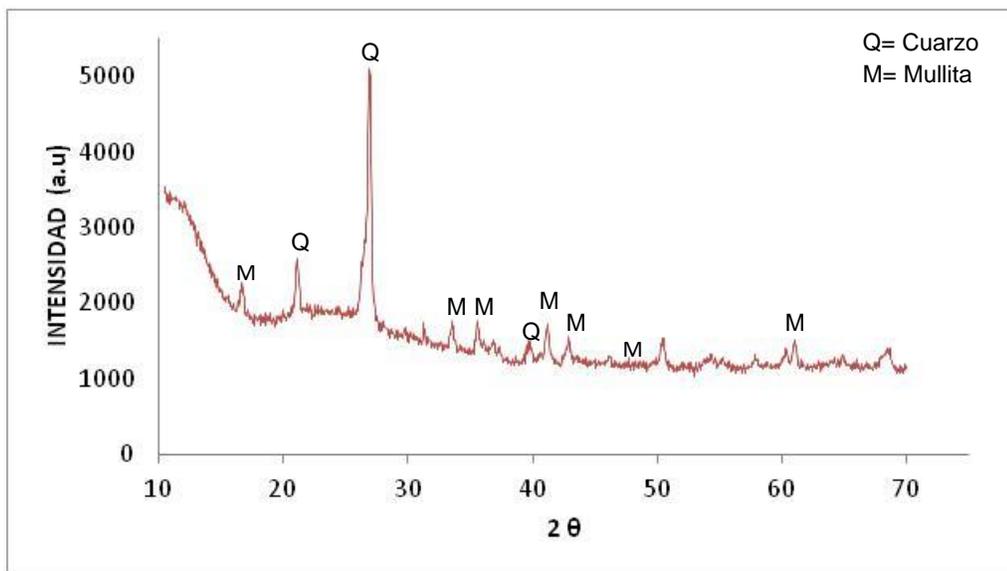


Figura 4.4. Difractograma de la ceniza volante.

A diferencia del difractograma que muestra un material amorfo para el vidrio molido, el patrón de difracción de rayos-X de la ceniza volante sí presenta picos bien definidos que corresponden a la presencia de fases cristalinas, ver la Figura 4.4. Las fases detectadas corresponden al cuarzo (SiO_2) y a la mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), principales componentes de la ceniza volante, tal como lo reportó Umaña Peña [39].

Por otro lado, se muestra en la Figura 4.5 el patrón de difracción de rayos-X para el yeso comercial. Tal como se observa en la figura, los picos corresponden a la fase cristalina $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

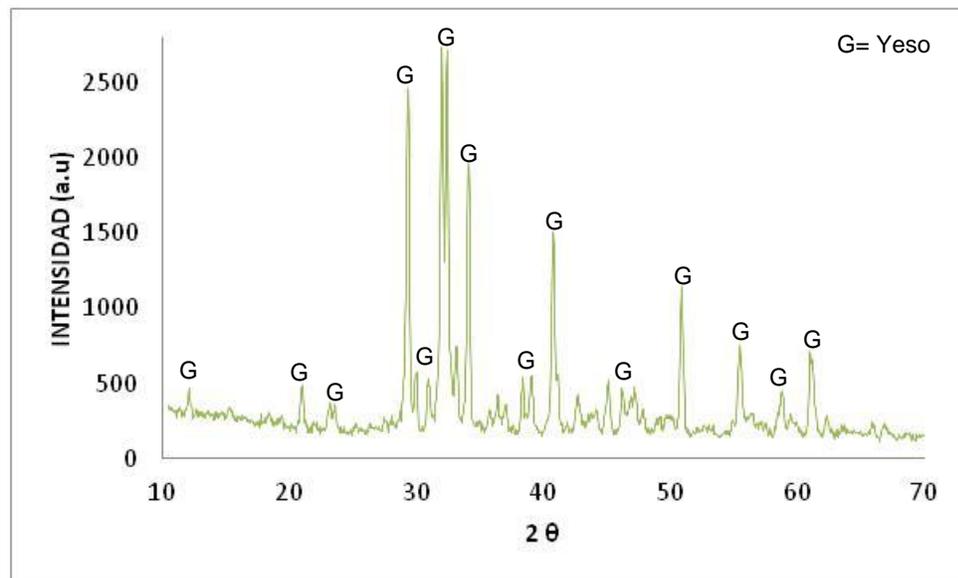


Figura 4.5. Difractograma del yeso.

4.1.3. Microscopía electrónica de barrido con espectroscopia de dispersión de energía (MEB-EDS).

Para observar la morfología de los materiales de partida se realizó un análisis de toda el área por MEB-EDS. En la Figura 4.6 se muestra la

micrografía correspondiente al vidrio molido donde se observa una mezcla de partículas de forma irregular, principalmente de partículas gruesas y escamosas angulares. Estas partículas presentan un tamaño en un rango de 1 a 100 μm , aunque algunas de ellas también presentan tamaños entre 10 μm y 50 μm . Asimismo, en la figura se puede apreciar el espectro de rayos-X del análisis por EDS que muestra la presencia de los elementos de mayor concentración como son el Si, Al, Ca, O y Na, corroborando con ello lo reportado en la tabla 4.1.

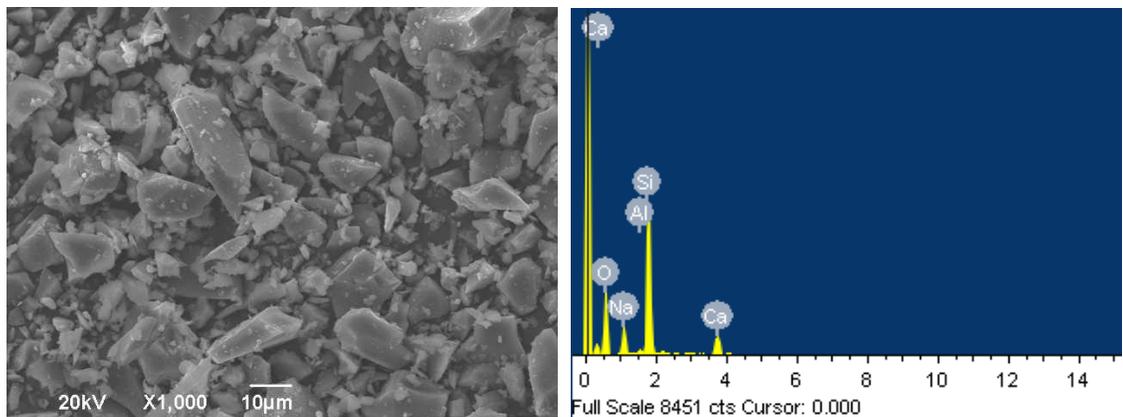


Figura 4.6. Micrografía del vidrio molido

Por otro lado, analizar por microscopía a la ceniza volante, se encontró que la morfología es totalmente diferentes a la observada para el vidrio molido. En la Figura 3.7 se puede observar la presencia de partículas de tipo esférico con un tamaño aproximado de 10 μm . Este análisis está en concordancia con información reportada en bibliografía en donde se indica que la ceniza Tipo F presenta principalmente partículas esféricas. En esa misma figura se puede apreciar que en el espectro de rayos-X se detectó la presencia de elementos como el Si, Al, Ca, Fe, K, Ti y O. Este resultado corrobora lo reportado

previamente en la tabla 4.1 donde se mostró que la composición de la ceniza volante incluía algunos óxidos formados con los elementos detectados.

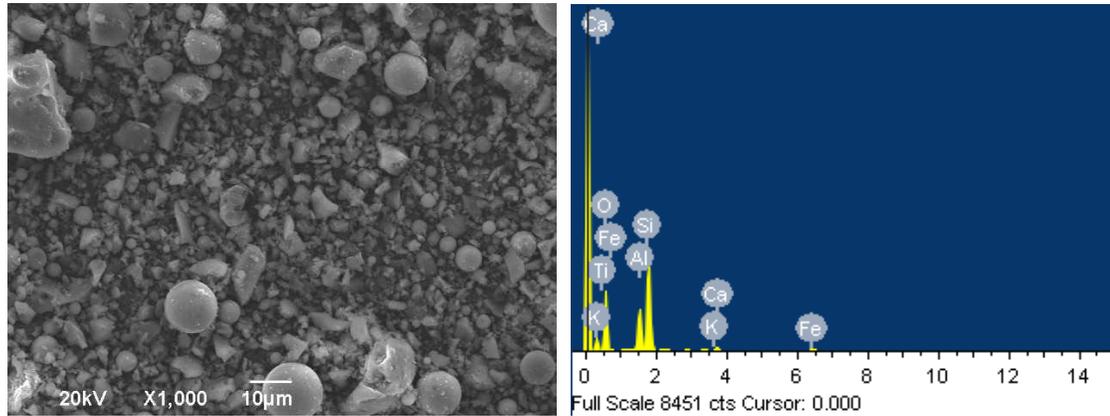


Figura 4.7. Micrografía de la ceniza volante

Por otro lado, en la Figura 4.8 se puede observar la micrografía del yeso, que presenta partículas con morfología heterogénea, algunas de forma angular. La mayoría de las partículas presenta un tamaño alrededor de 10 µm.

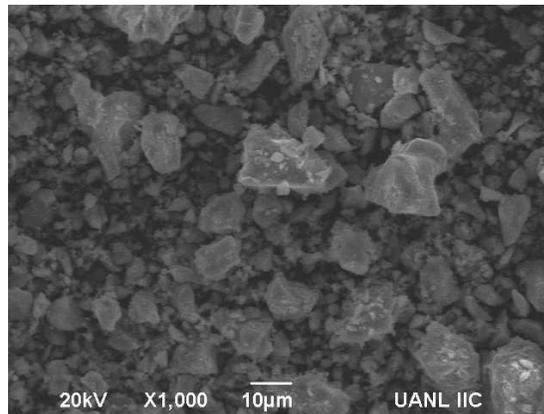


Figura 4.8. Micrografía del yeso.

4.2. Fabricación de materiales cementantes alternos: pruebas de resistencia a la compresión.

Como se mencionó anteriormente, se llevaron a cabo cinco mezclas con diferentes proporciones de vidrio activado, ceniza volante y yeso. Se produjeron

pastas para los tres diferentes tiempos de activación. Una vez preparadas, éstas fueron evaluadas para medir su resistencia a la compresión, para los diferentes tiempos de curado.

Se sabe que los materiales puzolánicos no reaccionan cuando se mezclan con agua y, por lo tanto, no fraguan ni endurecen [49]. Además, es común que al fabricar un nuevo material con propiedades cementantes, éste no cuente con normas para su fabricación y tiempo de endurecimiento. Por ello, en el presente trabajo se hicieron algunas pruebas preliminares adicionales para conocer un tiempo óptimo o considerable para el desmolde de las probetas en forma de cubo de 5 x 5 cm.



Figura 4.9. Cubos de materiales alternos con propiedades cementantes: elaborados y desmoldados.

El vaciado de la pasta hacia los molde se pudo efectuar de manera adecuada, por lo que las probetas en forma de cubo elaborado fueron de fácil manejo igual que su desmolde y posterior curado.

Es importante mencionar, que los cubos elaborados se mantuvieron dentro de bolsas de plástico herméticamente cerradas para su curado hasta el día de su ensayo a la compresión a una temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, ver Figura 4.10. También se debe mencionar que al momento de sacar los cubos de la bolsa de plástico se observó la presencia de pequeñas gotas de agua, por lo que el material cementante tendía a exudar o perder líquido, a causa de la reacción de hidratación que estaba experimentando el material.



Figura 4.10. Cubos de pastas bajo curado en bolsas de plástico herméticamente cerradas.

El curado de los materiales permitió que éstos comenzaran a endurecer, proceso que fue ayudado por la presencia del yeso. Se asume que tal vez exista alguna reacción entre el yeso y algún material formado durante la activación del vidrio molido. Es decir, que durante el proceso de curado se logre formar algún compuesto inorgánico que le imparta a la pasta cierta resistencia a edades tempranas y tardías, tal como lo hacen los compuestos C_2S y C_3S , fases típicas que aparecen durante la fabricación del cemento portland.

4.2.1. Sistemas de mezcla M1: 99% vidrio activado + 0% ceniza volante.

En la Figura 4.11 se observa el comportamiento de las resistencias a la compresión del sistema de mezcla M1, el cual contiene 99% de vidrio activado con solución alcalina de NaOH. Esta mezcla contiene además el 1% de yeso.

De acuerdo con los resultados, los materiales cementantes preparados con 2 horas de activación mostraron los valores más altos de resistencia a la compresión, alcanzando valores de 14 MPa a los 90 días. Mientras que los materiales preparados con 6 horas de activación muestran valores de resistencia a la compresión menores que 6 MPa. Es importante mencionar que en este caso no se observa gran diferencia entre los valores obtenidos a 28 y 90 días. Cuando el material se activó por 4 horas, la máxima resistencia fue de 6 MPa y se logró para la mezcla a los 28 días.

Como puede apreciarse en la gráfica de la Figura 4.11, el comportamiento de la M1 a 2 horas de activación fue diferente al mostrado por las muestras M1 a 4 horas y M1 a 6 horas de activación, ya que a 7 días de curado su resistencia inicial fue de más del 50% que las anteriores. Sin embargo, a los 14 días mostró un valor menor a la muestra M1 con 4 horas de activación. Nuevamente a los 28 y a los 90 días, la resistencia de la M1 con 2 horas de activación incrementó. Esta resistencia a los 90 días incrementó en

más del 70% con respecto a los valores promedio de resistencia de los materiales curados a 28 días.

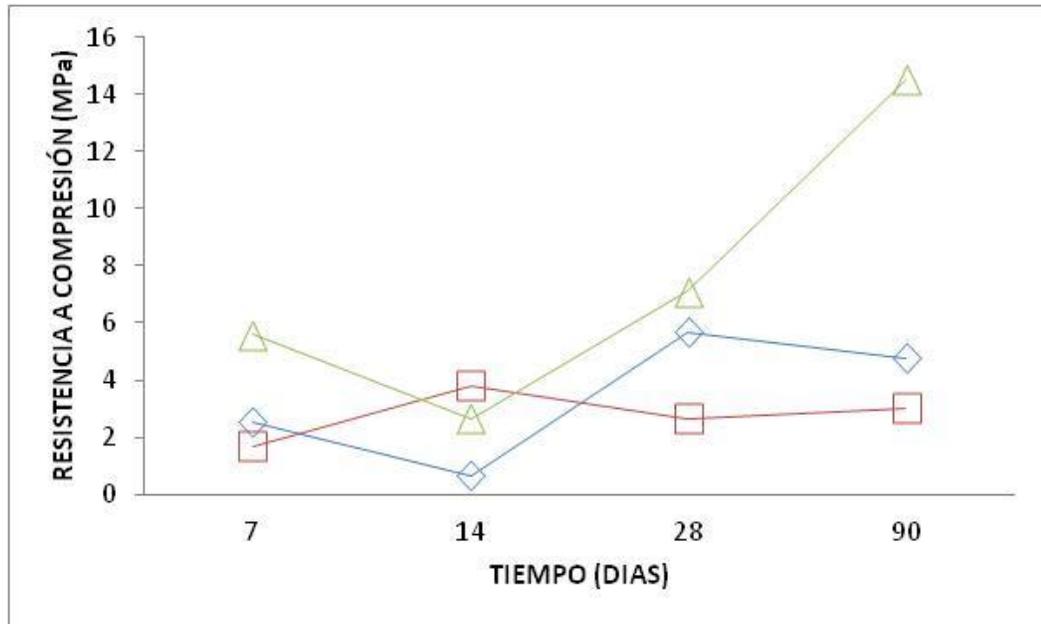


Figura 4.11. Gráfica que muestra la resistencia a la compresión de la muestra M1 activada por: 6 Horas (◇); 4 Horas (□); 2 Horas (△)

Sistemas similares que han sido reportados previamente donde el vidrio es activado mediante molienda mecano-química alcalina indican que la resistencia a edades tempranas es muy baja; sin embargo, después de 90 días la resistencia llega a alcanzar valores considerables. Por ejemplo, JJ Torres [60], reportó que una pasta preparada con vidrio activado por 2 horas, llega a tener una resistencia de 32 MPa después de 90 días de curado. Sin embargo, a los 7 días esa misma pasta presenta tan sólo una resistencia de 1 MPa.

Con base en la información anterior, esperaríamos que al realizar la activación del vidrio con mayores tiempos de molienda se tuviera una mayor reactividad del vidrio y por lo tanto una mejor resistencia; sin embargo, ocurre lo

contrario. Es decir, al aumentar el tiempo de molienda (4 y 6 horas), el material sufre una disminución considerable en su resistencia, lo que podría explicarse como una consecuencia de la aglomeración que experimentan las partículas después de 2 horas de molienda. Tal parece que este tiempo es el óptimo para lograr una adecuada activación del vidrio molido.

De esta manera, en las pastas de vidrio molido preparadas con diferentes tiempos de activación se observa que después de 90 días de curado se tiene un incremento en la resistencia, el cual es superior a la resistencia mostrada a los 7 días.

4.2.2. Sistema de mezcla M2: 70% vidrio activado + 29.7% ceniza volante.

En la Figura 4.12 se puede observar en el gráfico el comportamiento de la resistencia a compresión de la mezcla M2 a los distintos tiempos de activación y días curado, esta mezcla contiene un 70% de vidrio activado con 29.7% de ceniza volante y 0.3% de yeso.

Se puede observar en la gráfica de la Figura 4.12 que, en general, las mezclas a 90 días de curado presentan los valores más altos de resistencia a la compresión, siendo la más alta 12 MPa. Así como también se puede ver en la figura que la mezcla M2 activada a 2 y 4 horas va incrementando su resistencia conforme avanza el tiempo de curado. En este caso, su resistencia aumentó en más de 60% entre los 28 y 90 días de curado. Mientras que la mezcla M2 con 6

horas de activación tuvo un aumento del 78% a los 90 días de curado con respecto a la resistencia a los 28 días, alcanzando los 12 MPa.

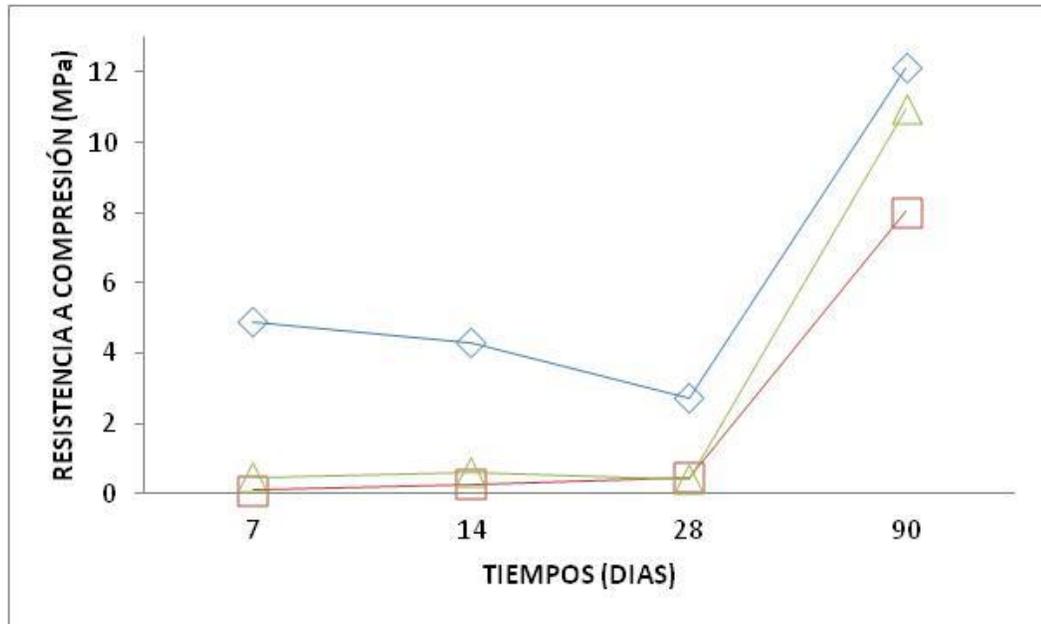


Figura 4.12. Gráfica que muestra la resistencia a la compresión de la muestra M2 activada por: 6 Horas (\diamond); 4 Horas (\square); 2 Horas (\triangle)

Nuevamente se observó que después de 90 días la resistencia se incrementó considerablemente. Resaltó el hecho de que aún a los 28 días la resistencia de las pastas no era tan notable. A diferencia de las pastas, que solamente contenían vidrio molido, en este caso tal parece que la presencia de la ceniza volante retardó un poco el incremento en la resistencia del material y, por lo tanto, necesitó un mayor tiempo de activación para que lograra reaccionar.

Tal vez entre el vidrio activado y la ceniza volante estuvo ocurriendo una reacción, que en presencia del yeso, estuvo favoreciendo la formación de algún compuesto inorgánico que le estuviera impartiendo propiedades de resistencia

al material a edades tardías. Este resultado no es sorprendente ya que la ceniza volante por sí sola es un material puzolánico que requiere una mínima cantidad de energía para activarse y tal parece que al estar mezclada con vidrio activado químicamente, éste le induce un carácter reactivo que afecta el fraguado de la pasta.

4.2.3. Sistema de mezcla M3: 50% vidrio activado + 49.5% ceniza volante.

En la Figura 4.13 se pueden observar los resultados de la resistencia a la compresión de la mezcla M3 a los distintos tiempos de activación y de curado. Esta mezcla contiene un 50% de vidrio activado, con un 49.5% de ceniza volante y un 0.5% de yeso.

En este caso, se observó que para la mezcla de M3 con diferentes tiempos de activación, los valores de resistencia a la compresión se fueron incrementando, conforme aumentó el tiempo de curado hasta alcanzar valores de 14 MPa. De hecho, se pudo apreciar que los valores de resistencia a la compresión fueron se incrementando a partir de los 28 días.

Como se observó anteriormente, debido a la presencia de la ceniza volante en la mezcla, tal parece que se requiere un tiempo de activación de 6 horas para provocar la reacción entre la ceniza volante y el vidrio. De hecho, durante la elaboración de la pasta, después de 2 y 4 horas de activación, ésta aún se mantenía con cierta fluidez, lo que dificultó su proceso de curado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con lo observado, la mezcla activada por 6 horas es la que presentó el mejor comportamiento para este sistema. Es importante resaltar que los valores de resistencia a la compresión aumentaron hasta un 100% en relación con la mezcla que contenía únicamente vidrio activado (M1) y 60% en relación con los resultados de la mezcla M2, la cual contenía aproximadamente el 30% de ceniza volante.

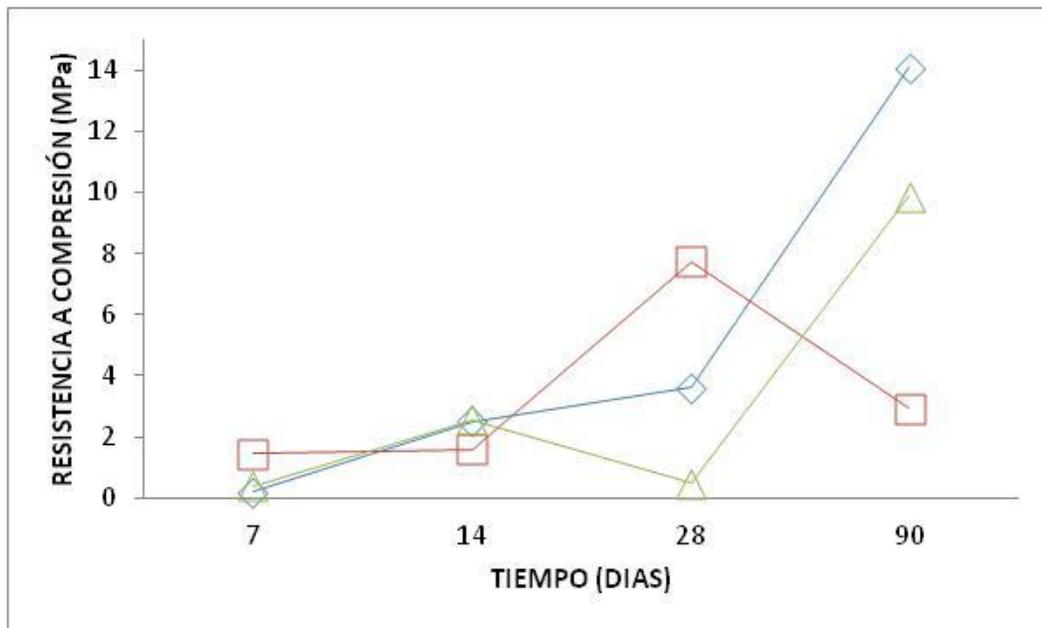


Figura 4.13. Gráfica que muestra la resistencia a la compresión de la muestra M3 activada por: 6 Horas (◇); 4 Horas (□); 2 Horas (△)

Es un hecho que al agregar ceniza volante a la mezcla con vidrio molido en relación 1:1, se logra obtener materiales con propiedades cementantes cuya mejor resistencia se alcanza a los 90 días. Aunque la pasta que contenía solamente vidrio también presentó su mejor resistencia a los 90 días, la presencia de la ceniza volante retardó la posible reacción que estuviera ocurriendo, permitiendo un mayor control de la misma. Por ese motivo, el

comportamiento observado en las figuras de las mezclas M2 y M3 es diferente al observado en la mezcla M1.

4.2.4. Sistema de mezcla M4: 30% de vidrio activado + 69.3% de ceniza volante.

En la Figura 4.14 se muestran los resultados del comportamiento de la resistencia a la compresión de las mezclas M4, a los distintos tiempos de activación y curado. Estas mezclas contienen 30% de vidrio activado, 69.3% de ceniza volante y 0.7% de yeso. Al incrementar la cantidad de ceniza volante en la mezcla, se logró apreciar que, al igual que en los casos anteriores, la resistencia de la pasta se incrementó después de 90 días.

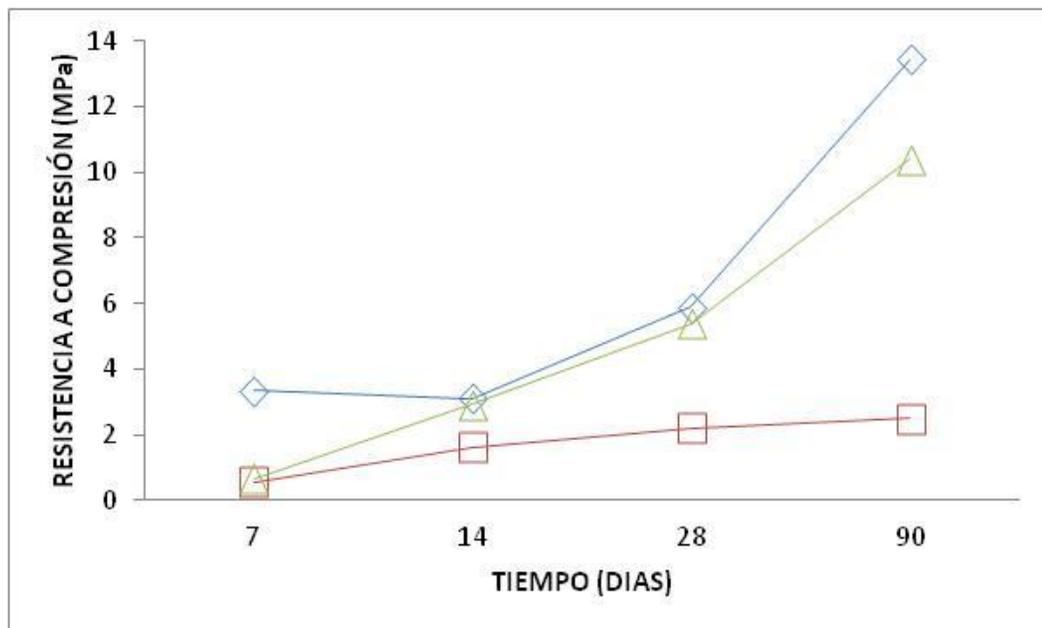


Figura 4.14. Gráfica que muestra la resistencia a la compresión de la muestra M4 activada por: 6 Horas (◇); 4 Horas (□); 2 Horas (△)

En este caso, las mezclas activadas a 2 y 6 horas son las que incrementaron potencialmente los valores de resistencia, alcanzando entre 10 y

14 MPa, a los 90 días de curado. Es importante hacer notar que, en general, las mezclas activadas por 4 horas son las que presentan el valor más bajo de resistencia. Esto puede ser debido a que en ese lapso el material tiende a aglomerarse y, por lo tanto, se inhibe la posible reacción que esté ocurriendo.

4.2.5. Sistema de mezcla M5: 0% vidrio activado + 99% ceniza volante.

La Figura 4.15 muestra los resultados de las pruebas de resistencia realizadas a la mezcla M5 preparada únicamente con ceniza volante y mezcla con una pequeña proporción de yeso (1% en peso). En este caso, esta muestra es la contraparte de la mezcla M1, que fue preparada únicamente con vidrio molido y una pequeña proporción de yeso (1% en peso).

La intención de llevar a cabo la elaboración de esta pasta con ceniza volante obedece a que cuenta con propiedades puzolánicas, por lo que podría ser empleado como material de referencia y para comparar con las otras mezclas desarrolladas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, esta mezcla M5, alcanzó su máxima resistencia a los 28 días, 10 MPa, valor que es el doble del reportado por F. Puertas [53], quien realizó un estudio similar, activando la ceniza volante con NaOH (10 M), y curando las probetas en una temperatura de 25°C (Resistencia de 5 MPa a los 28 días de curado).

Con este resultado se infiere que está claro que existe una sinergia entre la ceniza volante y el vidrio molido, y que este fenómeno podría estar siendo ocasionado por la presencia de alguna reacción química favorecida por la activación química alcalina del vidrio.

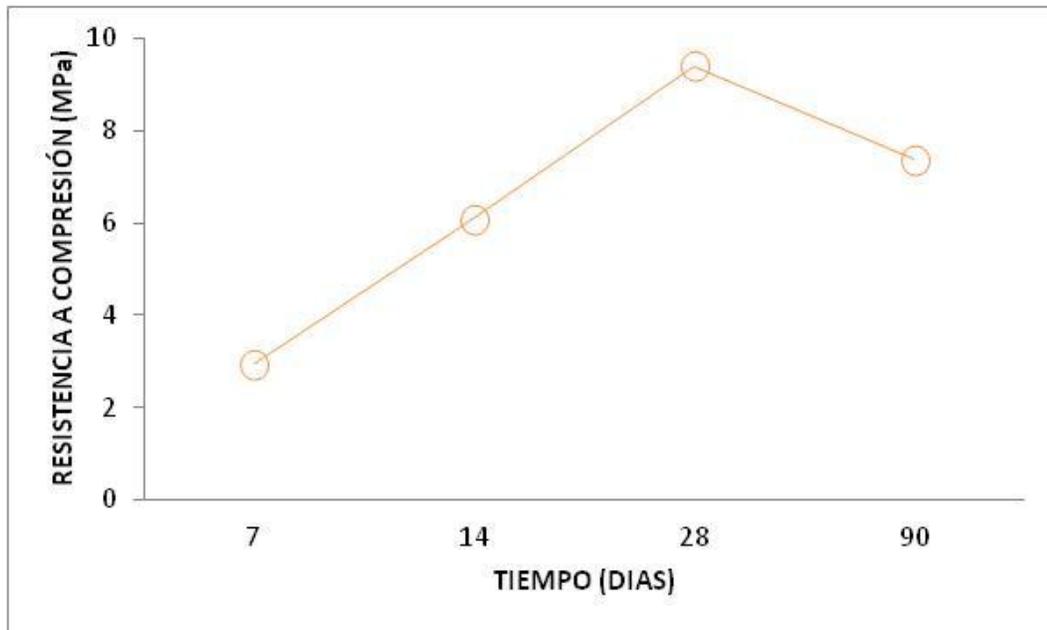


Figura 4.15. Gráfica que muestra la resistencia a la compresión de la muestra M5.

A manera de resumen, en la Tabla 4.2, se muestran los mejores valores de resistencia a la compresión obtenidos en esta investigación, para cada una de las mezclas preparadas, e independientemente del tiempo de activación. Adicionalmente, en el **Apéndice I**, se muestran los resultados de resistencia a compresión de todas las mezclas preparadas.

Como se puede observar, con excepción de la mezcla M5, existe una ligera diferencia entre cada uno de los valores de resistencia que presentaron cada una de las mezclas después de 90 días de curado. Estas mezclas

necesitaron un tiempo de activación de 6 horas para lograr un efecto importante.

TABLA 4.2

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS MEZCLAS PREPARADAS.

Mezcla	Tiempo de activación (hrs)	Edad de curado (días)	Resistencia (MPa)
M1 (99% vidrio, 1% yeso)	2	90	14
M2 (70% vidrio, 29.7% CV, 0.3% yeso)	6	90	12
M3 (50% vidrio, 49.5% CV, 0.5% yeso)	6	90	12
M4 (30% Vidrio, 69.3% CV, 0.7% yeso)	6	90	14
M5 (99% CV, 1% yeso)	0	28	10

Anteriormente se había mencionado que todas las mezclas incrementaron su resistencia hasta después de 28 días, lo que indica que el posible compuesto que se esté formando le estará impartiendo propiedades de resistencia al material a edades tardías.

En este caso, la activación química del vidrio molido mediante la adición de NaOH contribuye a que la combinación de vidrio-ceniza volante pueda reaccionar provocando la formación de un compuesto que retardará la propiedad de resistencia del material y entre más ceniza volante contenga más

tardará en incrementar su resistencia. Esto debido a que durante el proceso de activación se incrementa la cantidad de sílice soluble en la solución activadora, lo que tiende a hacer más lenta la cinética de activación de las puzolanas, afectando negativamente el desarrollo de la resistencia en el material. Sin embargo, si se lleva a cabo la posible formación de silicato de sodio, éste favorecerá la formación, desde el inicio de, un gel condensado y compacto, que hará al material mecánicamente muy resistente [17].

De esta manera, de acuerdo a los resultados obtenidos, es posible la fabricación de materiales con propiedades cementantes a partir de materiales de desecho como son el vidrio y la ceniza volante. Se debe notar el hecho de que estos materiales presentan resistencias ligeramente mayores a las que presenta la ceniza volante por sí sola.

En la Figura 4.16 se muestran de manera gráfica las mejores resistencias obtenidas para las mezclas M1, M2, M3 y M4, a un tiempo de curado de 90 días. Es importante mencionar que, independientemente de la proporción vidrio:ceniza volante, todas estas mezclas requirieron un tiempo de activación de 6 horas, con excepción de la mezcla M1, que requirió solamente 2 horas, debido a que esta última contenía únicamente vidrio molido y yeso.

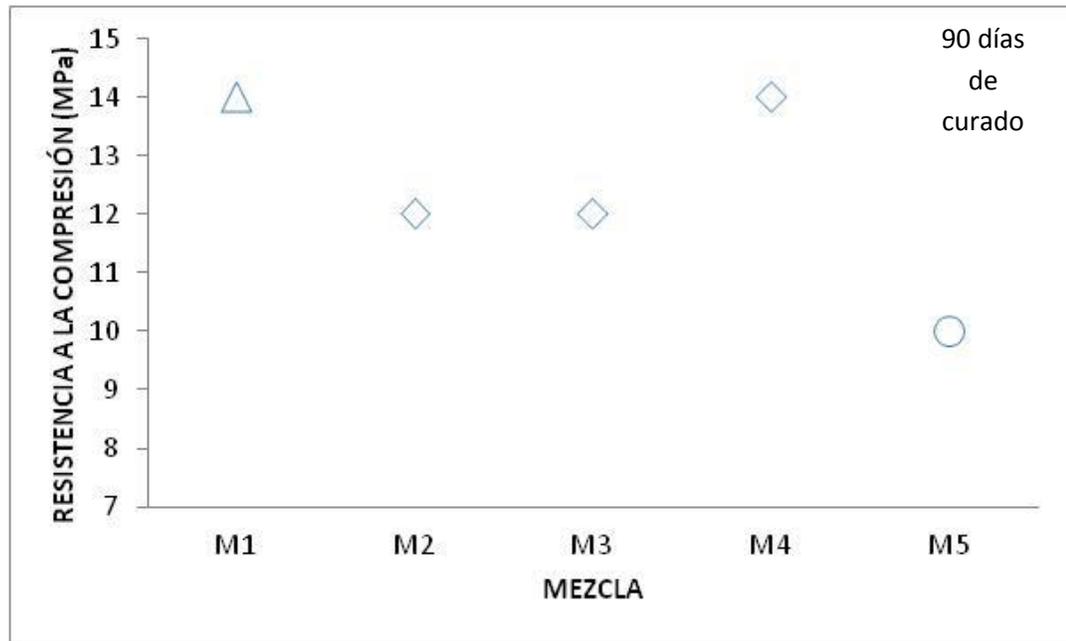


Figura 4.16. Gráfica con los mejores resultados de resistencia a la compresión: 6 Horas (◇); 4 Horas (□); 2 Horas (△)

Con la finalidad de contar con información que permitiera determinar el efecto de sinergia entre el vidrio activado, la ceniza volante y el yeso, se llevó a cabo el análisis por difracción de rayos-X de cada una de las mezclas preparadas.

4.3. Caracterización por Rayos-X de las Mezclas Preparadas.

En la figura 4.17 se muestra el patrón de difracción de la muestra M1 (99% vidrio activado, y 1% yeso) con 2 horas de molienda. Se observa que se mantiene la estructura amorfa del vidrio sin sufrir cambios considerables. Es probable que, en caso de estarse presentando la formación de alguna fase cementante, ésta será enmascarada por el patrón de DRX del vidrio que es el que está en mayor proporción. En este caso, el único pico que aparece está en un valor cercano a 33° en 2θ y corresponde al SiO_2 . Por otro lado, aún cuando

se tiene la presencia de yeso en la muestra, la cantidad es tan pequeña que no alcanza a ser detectada por el equipo de rayos-X.

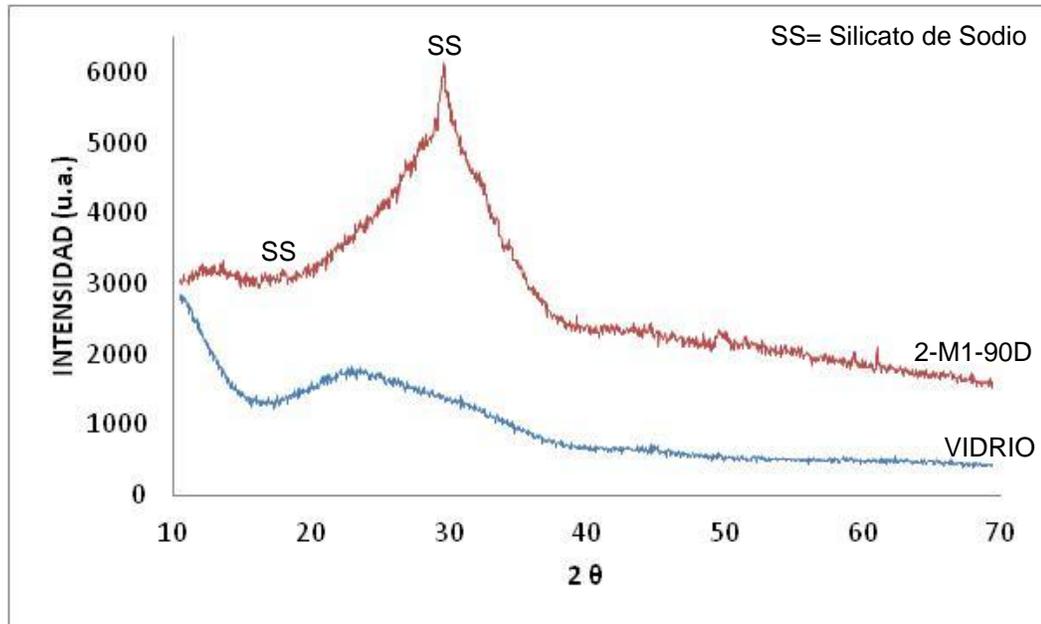


Figura 4.17. Difractograma de la mezcla 2-M1 90 días de curado y vidrio molido.

Al analizar por rayos-X el material cementante de la mezcla M2 (70% vidrio activado, 29.7% ceniza volante y 0.3% yeso) activado por 4 horas a la edad de 90 días, se encontró la presencia de una mezcla de fases y con material amorfo, ver figura 4.18. Los picos detectados corresponden a las fases mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y cuarzo (SiO_2), componentes de la ceniza volante. Asimismo, se aprecia que el pico correspondiente al cuarzo sufre un ensanchamiento debido a la presencia del vidrio.

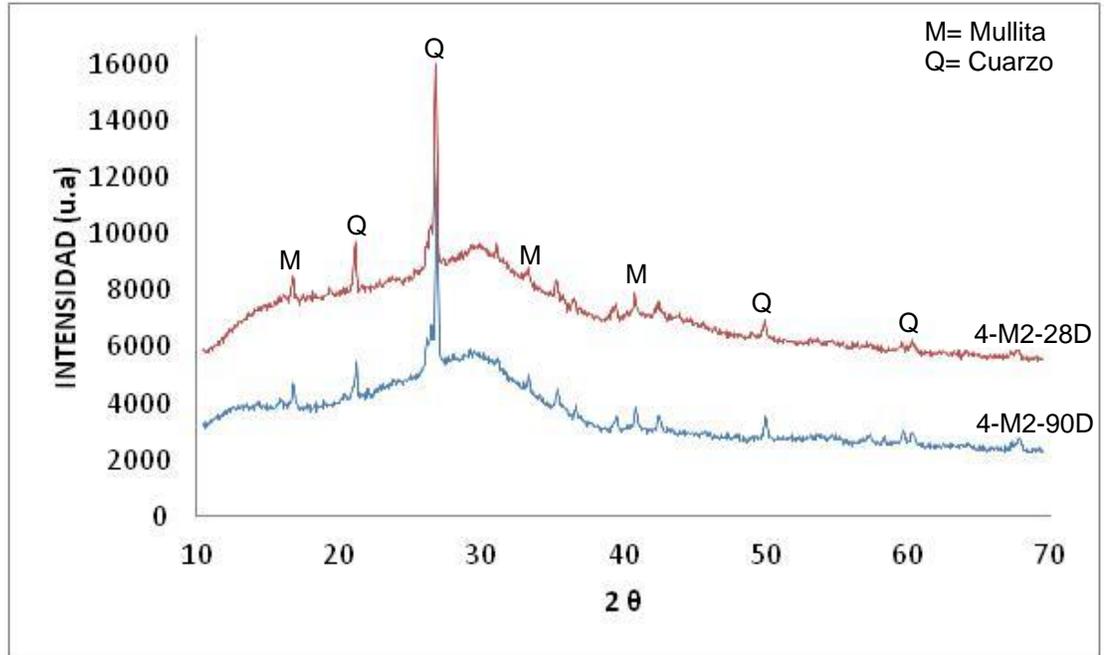


Figura 4.18. Difractograma de la mezcla 4-M2 con 28 y 90 días de curado.

En este caso es difícil apreciar la presencia de alguna fase diferente a las fases de las materias primas. Sin embargo, esto no quiere decir que no se esté formando algún compuesto que le imparta propiedades cementantes a la mezcla. Lo que pasa es que su proporción aún puede ser muy pequeña y no logra ser detectada por la resolución del equipo.

En la Figura 4.19 se presenta el patrón de difracción de rayos-X de la mezcla M3 activada por 6 horas y con un tiempo de curado de 90 días. En este difractograma se puede observar que se siguen presentando los picos correspondientes a las materias primas, ceniza volante y vidrio. Sin embargo, es notoria la presencia de nuevos picos alrededor de 25°, 30° y 45° en 2θ. Al realizar la identificación de estos picos, se encontró que corresponden al compuesto silicato de sodio (Na_2SiO_3); el que, para fácil identificación en la

figura, se ha etiquetado como SS. Este compuesto, formado durante el proceso de activación mecano-químico alcalino del vidrio, pudiera ser el precursor de los nuevos materiales cementantes si se logra hacerlo reaccionar *in situ* con la ceniza volante y el yeso.

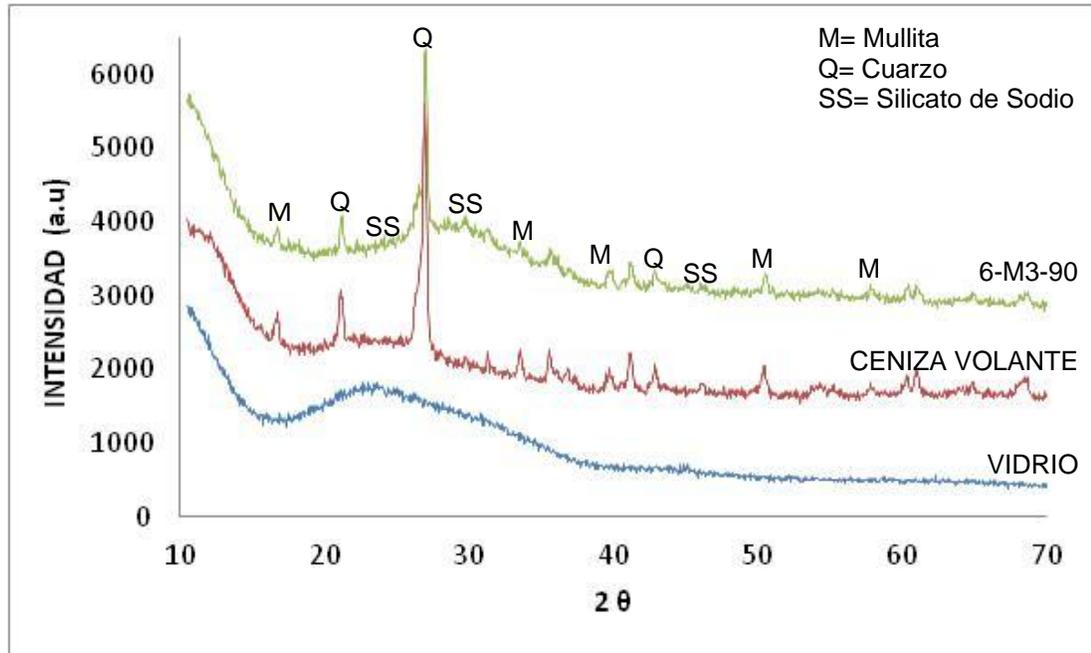


Figura 4.19. Difractograma de la mezcla 6-M3-90D; Mezcla 3 activada por 6 horas a la edad de 90 días.

Es importante destacar también que la intensidad de los picos cristalinos se ve afectada como consecuencia de disminución en cantidad de la ceniza volante, pues como se recordará, esta muestra contiene 49% vidrio, 50% ceniza volante y 1% yeso. Al igual que en los casos anteriores, la presencia del yeso no fue detectada por rayos-X, ya que el límite de difracción en este equipo es menor que el 5%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis por rayos-X de la mezcla M4 (30% vidrio activado, 69.3% ceniza volante y 0.7% yeso) activada por 6 horas a la edad de 90 días, arrojó un patrón de rayos-X similar a los anteriores, ver Figura 4.20.

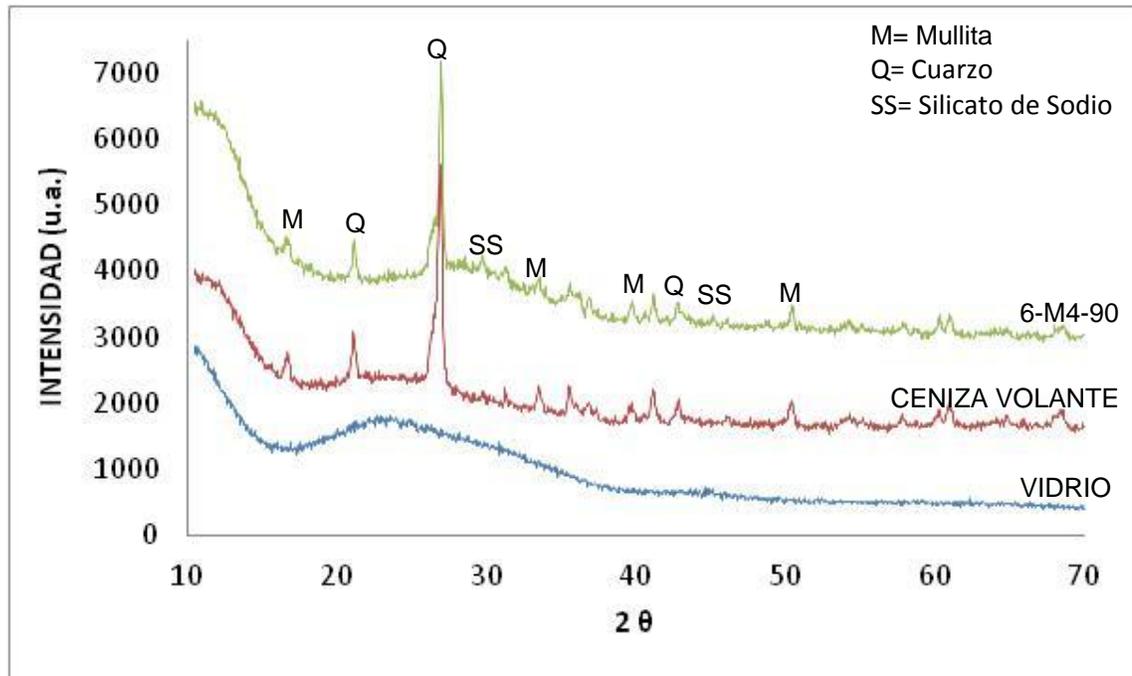


Figura 4.20. Difractograma de la mezcla 6-M4-90D; Mezcla 4 activada por 6 horas a la edad de 90 días.

En este caso se observó nuevamente la presencia de los picos correspondientes al silicato de sodio, los cuales aparecieron un poco más intensos en comparación con la muestra M3, como consecuencia del incremento en la cantidad de ceniza volante. De igual manera, se siguieron observando los picos o fases que correspondieron a las materias primas; cuarzo (Q) y mullita (M).

En la figura 4.21 se presenta el difractograma de la mezcla M5 (99% ceniza volante, 1% yeso) con tiempos de curado de 7, 14, 28 y 90 días. Únicamente se observan los picos correspondientes a las fases cristalinas de la

ceniza volante, los que en la muestra curada a 90 días comienzan a desaparecer. Esta situación pudiera ser la causa de la disminución en la resistencia a compresión obtenida previamente para esta muestra, a edades tardías.

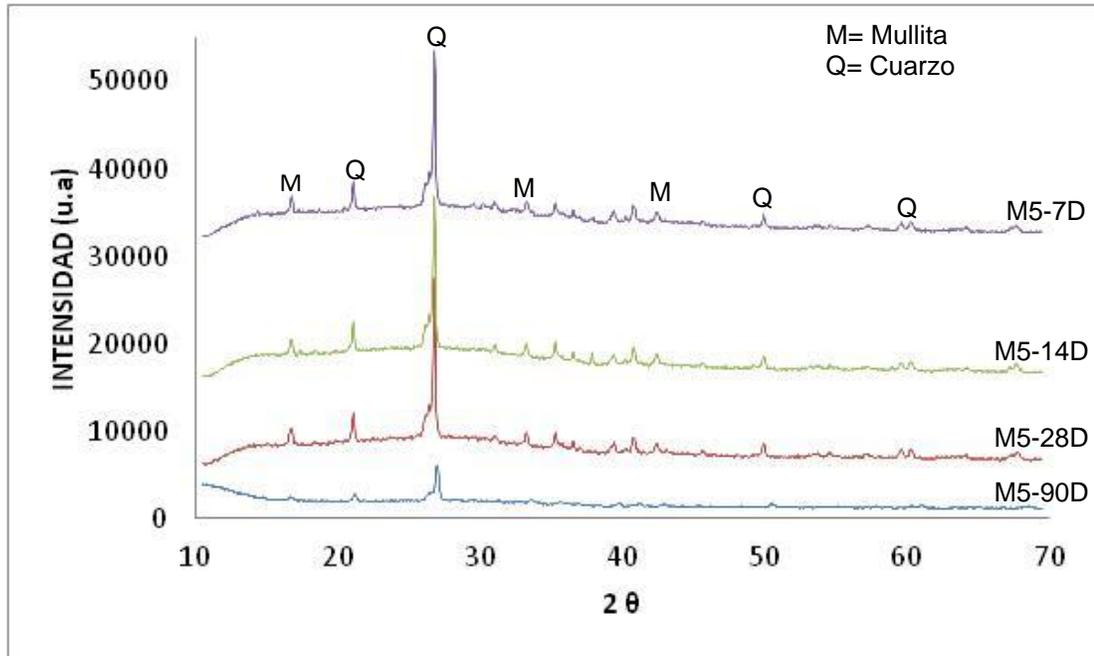


Figura 4.21. Difractograma de la mezcla M5 con tiempos de curado de 7, 14, 28 y 90 días.

La posible reacción entre el vidrio molido, la ceniza volante y el yeso para formar un material con propiedades cementantes es de esperarse debido a las propiedades puzolánicas de la ceniza volante. Aunque en este trabajo la ceniza volante no fue activada, la presencia de la solución alcalina, aunado al vidrio mecano-químicamente activado, debería ser suficiente para que pueda iniciarse una reacción. Sin embargo, después de analizar por difracción de rayos-X las mezclas anteriores, no ha sido posible detectar la presencia de alguna fase cementante como lo es el C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF , típicas fases presentes en los

morteros tradicionales con cemento portland. En el **Apéndice III** se muestran los patrones de difracción de rayos-X de algunas otras muestras preparadas.

4.4. Caracterización por microscopía electrónica de barrido de las mezclas cementantes.

Buscando complementar la información sobre la caracterización de las mezclas preparadas, se consideró necesario llevar a cabo el análisis por microscopía electrónica de barrido de cada una de las mezclas. De esta manera, con los resultados de este análisis, se busca detectar algún cambio significativo en la microestructura del material cementante, el tipo de morfología, el tamaño de partícula, la composición química, la apariencia superficial, etc., que conduzca a entender el comportamiento mecánico de los materiales preparados.

En la figura 4.22 se muestran las micrografías de la muestra M1 a 7, 14, 28 y 90 días de curado, que fue activada por 2 horas. Se observa que las partículas incrementan su tamaño a medida que aumenta el tiempo de curado; sin embargo, no se encontró alguna evidencia de la formación del silicato de sodio como consecuencia del proceso de molienda mecánica alcalina.

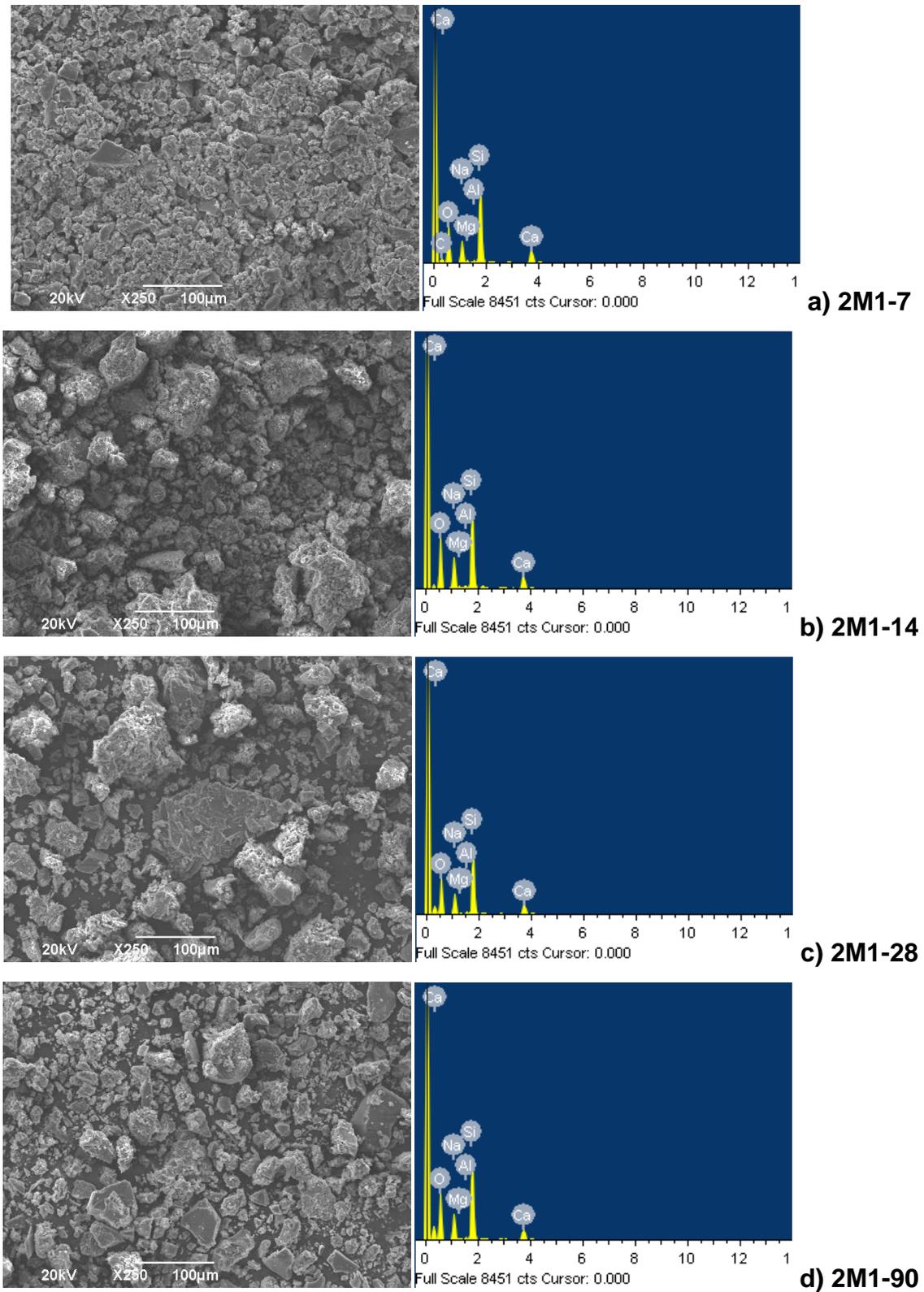


Figura 4.22. Micrografías de la mezcla 2-M1 a 7 (a), 14 (b), 28 (c) y 90 (d) días de curado.

Por otro lado, en la Figura 4.23, se presentan las micrografías de la mezcla M2 activada por 4 horas a diferentes edades. En todas ellas se observa que se tiene una mezcla heterogénea de morfologías y con diferentes tamaños debido a la molienda del vidrio. Los tamaños de algunas partículas llegan a alcanzar los 100 μm . En estas imágenes no se detecta la presencia de las partículas de ceniza volante tal vez debido a que el tamaño de las partículas de vidrio es tan grande que enmascara las pequeñas partículas de ceniza volante que son menores que 10 micras.

De manera general, se aprecia que las partículas de esta mezcla están dispersas y con diferentes tamaños, por lo que no se unen entre sí. Esto provoca que el material presente una baja resistencia a la compresión. Lo que también se puede observar es que el tamaño de las partículas de estos materiales cementantes con vidrio activado, ceniza volante y yeso es mayor, comparado con el tamaño de las partículas de vidrio (100 μm vs 50 μm).

Por otro lado, aunque el análisis por EDS que se muestra en la figura indica la presencia de los elementos químicos típicos que conforman al vidrio y la ceniza volante (Na, Ca, Si, O, Mg, y K), es difícil con ello poder determinar la presencia de alguna fase en específico, como sería el caso del silicato de sodio que se asume se está formando por la activación mecano-química alcalina del vidrio.

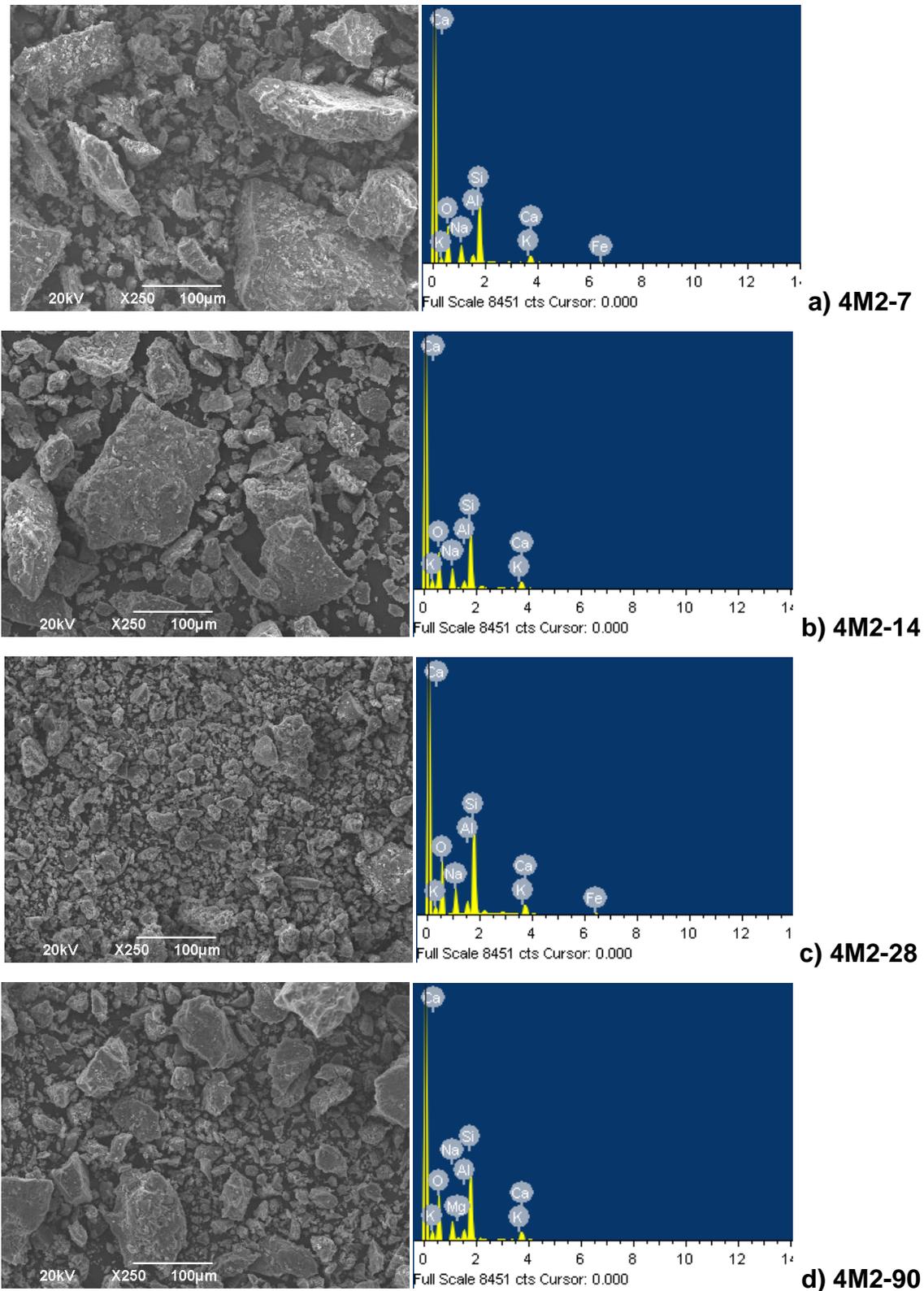


Figura 4.23. Micrografías de la mezcla 4-M2 a 7(a), 14(b), 28(c) y 90(d) días de curado.

En la Figura 4.24 se muestran las micrografías de las mezclas 6-M3-7D, 6-M3-14D, 6-M3-28D y 6-M3-90D. Se puede observar en la Figura 4.24a (6-M3-7D), que a la edad de 7 días la mezcla tiene la presencia de esferas de ceniza volante rodeadas de material vítreo. Aunque suponemos que la activación mecano-química alcalina del vidrio molido posiblemente esté provocando la formación de silicato de sodio, éste no se logra apreciar en la micrografía.

En la siguiente micrografía de la Figura 4.24b (6-M3-14D), que corresponde a 14 días, se sigue observando la presencia de vidrio activado y también la ceniza volante, sin apreciarse la presencia de alguna otra fase que no sea el vidrio molido y la ceniza volante.

La muestra curada a 28 días, (ver Figura 4.24c), presenta una microestructura diferente, las partículas que se formaron tienen un tamaño mayor que 10 μm y sus partículas se ven más compactas. No se observa la presencia de esferas de ceniza volante. Es importante mencionar que los resultados de resistencia a la compresión de esta muestra son mejores que los que se tuvieron para las muestras a 7 y 14 días, como se observó anteriormente en la Figura 4.13.

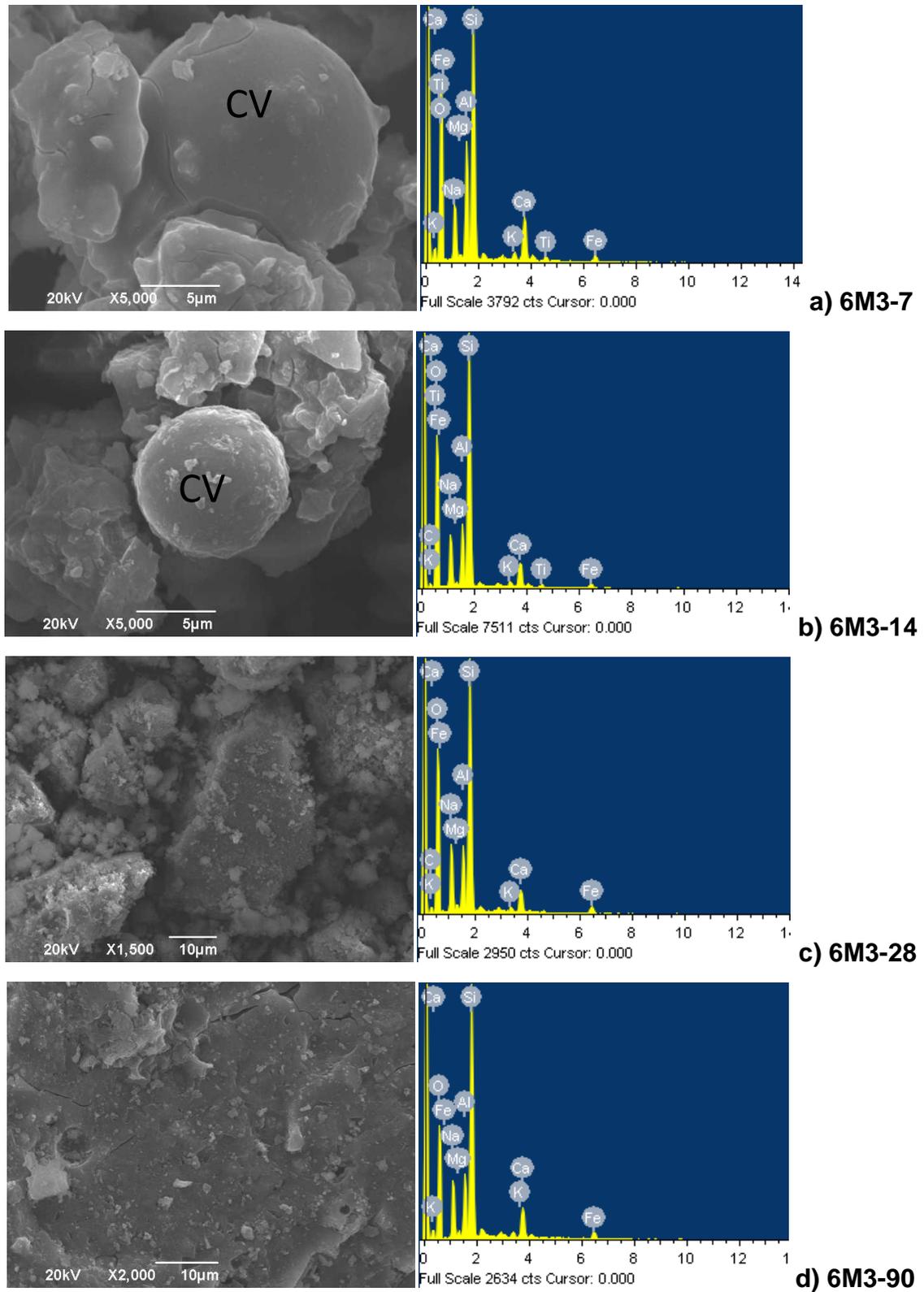


Figura 4.24. Micrografías de las mezclas 6-M3 a 7(a), 14(b), 28(c) y 90(d) días de curado.

De igual manera, la muestra curada a 90 días (Figura 4.24d), muestra la presencia de partículas en forma de lascas por toda la mezcla. Además, ya no se observan partículas individuales de ceniza volante. Por lo tanto, se asume que alguna reacción está ocurriendo entre el vidrio molido, la ceniza volante y el yeso; pues, al igual que en el caso anterior, la resistencia a la compresión incrementa su valor, en comparación con las muestras curadas a edades tempranas.

Sin embargo, no se obtuvo algún indicio que mostrara el tipo de compuesto que se estaba formando. Incluso los análisis por EDS realizados a cada una de estas muestras indican la presencia de los elementos Na, Ca, Mg, Si, Al, O, K, Ti y Fe, los cuales varían muy poco en sus proporciones en cada caso. Esto nos podría corroborar la formación de un compuesto que le imparte propiedades cementantes a la mezcla. Sin embargo, es difícil determinar la composición del mismo ya que es probable que éste se encuentre en pequeña proporción.

Las siguientes micrografías, mostradas en la Figura 4.25, corresponden a la mezcla M4 activada por 6 horas y con edades de curado de 7, 14, 28 y 90 días. En este caso, se aprecia una morfología diferente a la mostrada por las muestras anteriores, aunque se siguen presentando partículas de ceniza volante en las muestras curadas a 7 y 14 días. Por ejemplo, en las Figuras 4.25a y 4.25b, se aprecia que las esferas de ceniza volante están rodeadas de pequeñas partículas que podrían ser de la misma ceniza volante y del vidrio

molido. Esto es entendible ya que en este caso la cantidad de ceniza volante es mayor que la cantidad de vidrio en la mezcla.

En las Figuras 4.25c y 4.25d, correspondientes a las muestras curadas a 28 y 90 días, respectivamente, se observa que la presencia de las partículas esféricas ya no es tan notoria. Es importante mencionar que la resistencia a la compresión de estas muestras va incrementando conforme aumenta el tiempo de curado. Esto se debe a las propiedades puzolánicas de la ceniza volante, la cual, al estar en contacto con el vidrio activado, el yeso y la solución alcalina, es probable que esté experimentando alguna reacción dando paso a la formación de alguna fase cementante.

Sin embargo, al igual que en los casos anteriores, esta nueva fase pudiera estar en una proporción tan pequeña que no es fácil su detección. Como puede apreciarse en los análisis por EDS de cada una de las muestras, se aprecia, al igual que el caso anterior, la presencia de elementos como el Na, K, Ca, Si, Al, O y Fe. Sin embargo no se logra apreciar ninguna diferencia considerable que pudiera evidenciar la presencia de alguna fase cementante.

En el **Apéndice IV** se muestran las micrografías del análisis de microscopía electrónico de barrido de algunas otras mezclas.

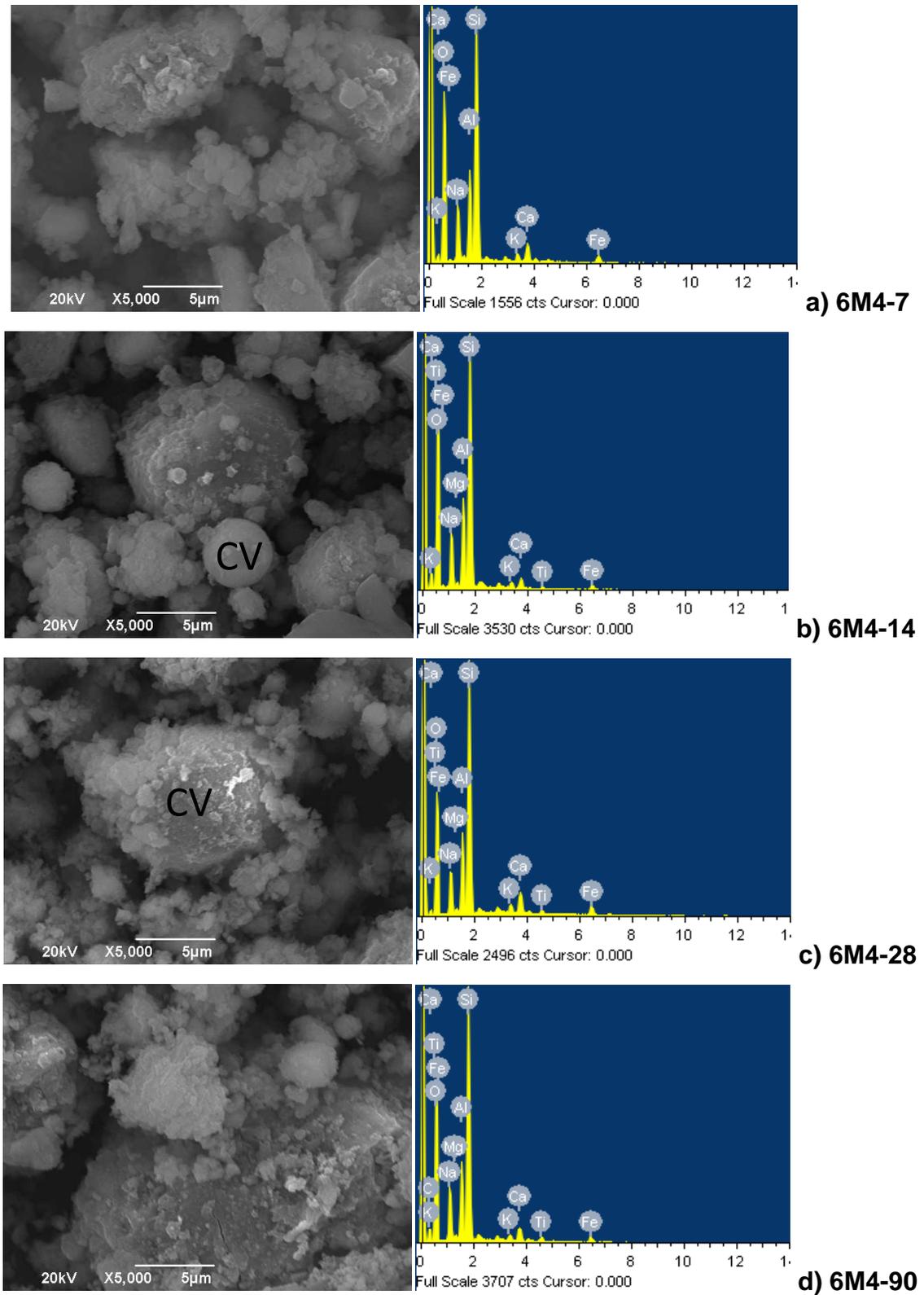


Figura 4.25. Micrografías de las mezclas 6-M4 7(a), 14 (b), 28(c), 90(d) días de curado.

En la Figura 4.26 se muestran las micrografías de de la mezcla M5 que contiene únicamente 99% de ceniza volante y 1% yeso. Se observa, en general, en las micrografías una morfología similar a la observada en la mezcla anterior, sólo que en este caso es mayor la presencia de la ceniza volante, tal como se aprecia en las figuras 4.26a y 4.26b.

Por otra parte, en las figuras 4.26c y 4.26d se logra apreciar que alrededor de las partículas de ceniza volante se comienza a formar una capa de partículas aglomeradas, lo que podría estar indicando la posible reacción de formación de una nueva fase cementante.

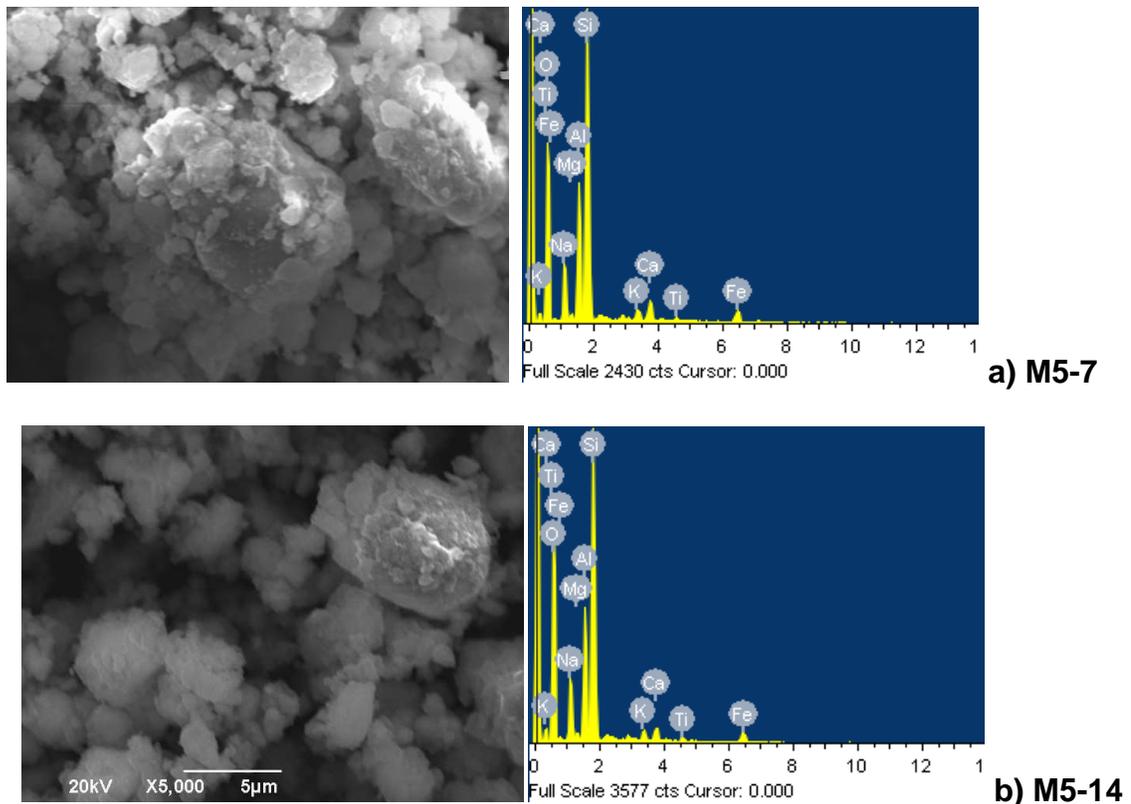


Figura 4.26. Micrografías tomadas a diferentes aumentos de la mezcla M5 7 (a), 14 (b) días de curado. (Continúa)

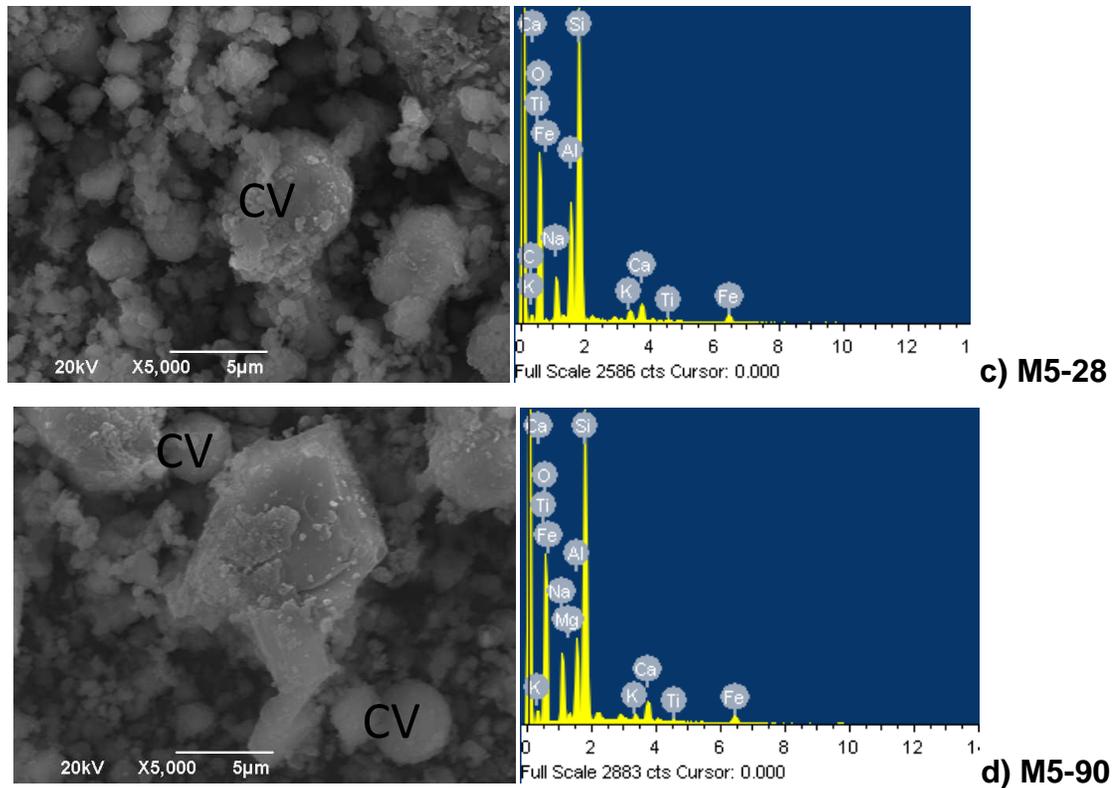


Figura 4.26. Micrografías tomadas a diferentes aumentos de la mezcla M5 28 (c), y 90 (d) días de curado.

4.5. Probable mecanismo de la activación mecano-químico alcalino del vidrio molido.

Con base en los resultados anteriormente mostrados y discutidos, es posible establecer un probable mecanismo para la activación mecano-químico alcalino del vidrio y con ello la obtención de la fase cristalina de silicato de sodio (SS).

En la Figura 4.27 se presenta el posible mecanismo del proceso de activación mecano-químico alcalina del vidrio. Este mecanismo está basado en el hecho de que los subproductos industriales con propiedades puzolánicas, al activarse con algún medio fuertemente alcalinos ($\text{pH} > 12$), dan lugar

esencialmente a la formación de un gel de aluminosilicato alcalino, con estructura tridimensional en los que los tetraedros de SiO_4 y de AlO_4 se encuentran distribuidos al azar [21]. Este fenómeno se ve incrementado a medida que se aumenta la temperatura.

En este caso, se asume que durante la activación del vidrio se forma la fase de silicato de sodio (SS). De acuerdo con lo observado en la figura, el elemento alcalino compensa la deficiencia de carga que se produce cuando el Al^{3+} sustituye al Si^{4+} en la red estructural. Cuando entra en contacto la ceniza volante con la solución activadora se produce un proceso de disolución de su componente vítreo, precipitando inmediatamente un gel relativamente rico en Al^{3+} . Dicho gel, con el paso del tiempo, se va enriqueciendo en Si^{4+} , para formar un precursor zeolítico [21]. El ion OH^- actúa como catalizador ya que contribuye a la disolución de los cationes Al^{3+} y Si^{4+} . Con ello los iones de silicato aumentan la velocidad del proceso de polimerización, por ello desarrollan unas resistencias mayores y los iones carbonato retrasan la reacción debido a la acidificación del sistema [17, 61].

Debido a que parte de los álcalis que participan en la disolución de los materiales, fueron liberados en la activación mecano-químico alcalino, se da la posibilidad de que se produzca la formación del silicato de sodio.

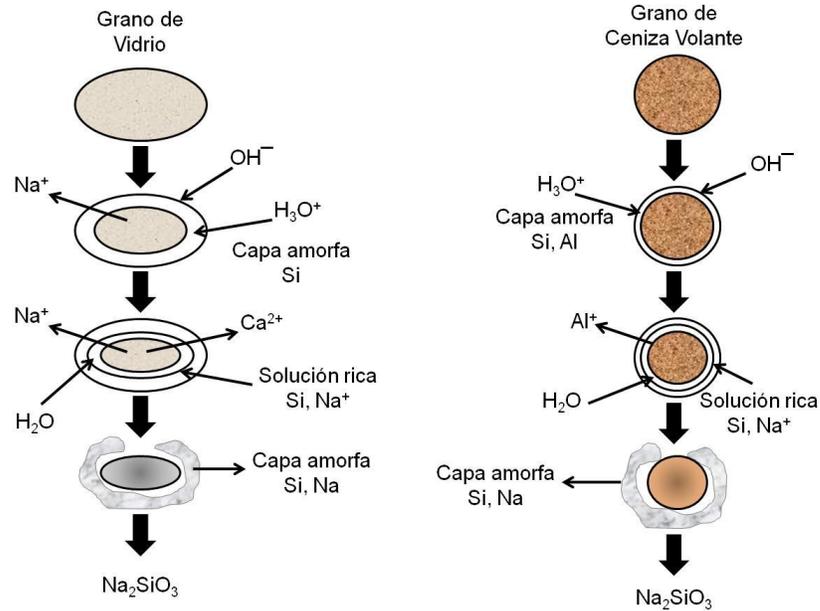


Figura 4.27. Mecanismo de disolución entre el vidrio, la ceniza volante y la solución alcalina.

Una vez formado el silicato de sodio, en esta investigación se tiene la teoría de la posible reacción entre el silicato de sodio y el yeso para la formación de una fase cementante. Esta explicación es la que se asume que está pasando, ya que el material a edades tardías va endureciendo alcanzando su resistencia a la compresión más alta a los 90 días de curado con excepción de la muestra que contiene únicamente ceniza volante y yeso, pues en ese caso la resistencia más alta se alcanza a los 28 días.

Además, con lo observado en los rayos-X y en las micrografías, se puede decir que existe una probabilidad de la formación de fases cementantes como el silicato tricalcico (C_3S), esta fase es en la que se endurece a edades tempranas y da la resistencia a los materiales.

En la figura 4.28 se muestra el posible mecanismo de la reacción del silicato de sodio con el yeso para formar la fase cementante. Se asume que el silicato de sodio reacciona con el yeso formando la fase C_3S . Esto es, el SiO_3 reacciona con el Ca formando $CaSiO_3$ o comúnmente llamado C_3S , esta fase genera endurecimiento rápido y alta resistencia a edades tempranas.

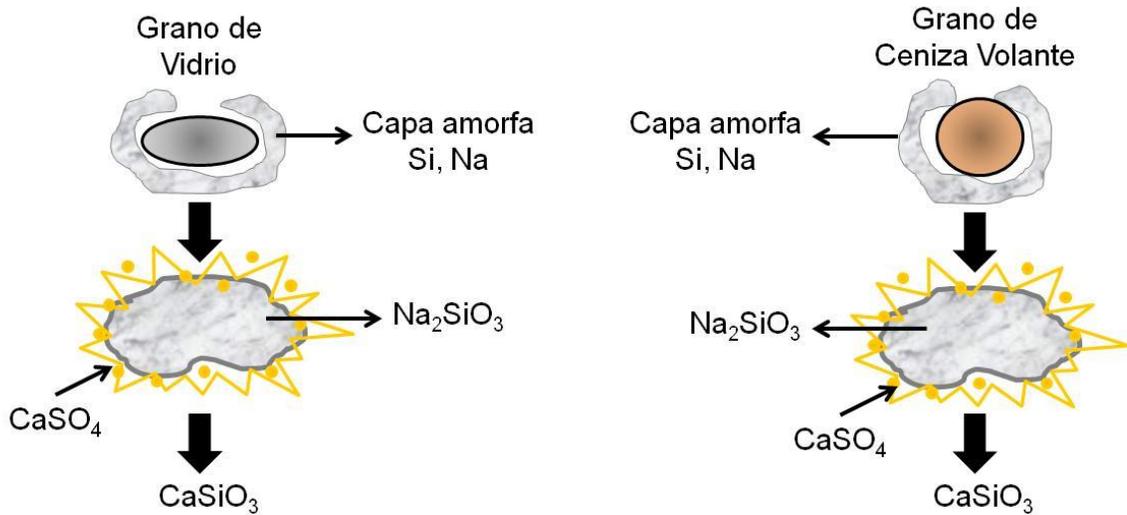
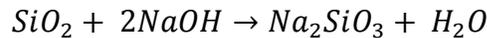


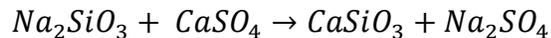
Figura 4.28. Mecanismo de reacción entre el silicato de sodio (SS) y el yeso.

La reacción anteriormente mencionada puede escribirse de la siguiente manera:

Formación del silicato de sodio:



Formación del C_3S



De esta manera, aunque no se logra evidenciar las reacciones anteriormente expuestas, pues tal vez los compuestos formados se encuentran

en pequeña proporción, sí es factible que estén ocurriendo debido a las condiciones experimentales empleadas. Tal vez si se emplean algunas otras técnicas de caracterización más sofisticadas se podría llegar a contar con alguna evidencia concreta que permita corroborar el mecanismo propuesto.

4.6. Pruebas de expansión térmica.

Con la finalidad de conocer el comportamiento de expansión térmica de cada una de las mezclas preparadas, se llevó a cabo la prueba de dilatometría. Es sabido por anteriores investigaciones que la variación de dimensiones al variar la temperatura es una propiedad inherente a todos los cuerpos y presenta en cada uno de ellos características propias que pueden llegar a diferenciarlos de los demás.

Estudios previos indican que los vidrios sódicos cálcicos tienden a ser expansivos, incluso este comportamiento se ha observado en morteros elaborados con cemento, vidrio y con bajo contenido de alcalis [62, 63].

En el gráfico de la Figura 4.29 se muestran las curvas de expansión relativa de la muestra M3 que la que presentó los mejores valores de resistencia a la compresión. Se puede apreciar un comportamiento lineal con un incremento de expansión gradual, a medida que aumenta la temperatura.

La mezcla con la que se llevó a cabo esta prueba fue la 6 M3. Este material presenta una expansión lineal que conforme la temperatura aumenta el

volumen del material se ve incrementado. Este comportamiento se mantiene desde los 25°C hasta cerca de los 200°C, aunque cerca de los 150°C se observa una ligera disminución en la expansión.

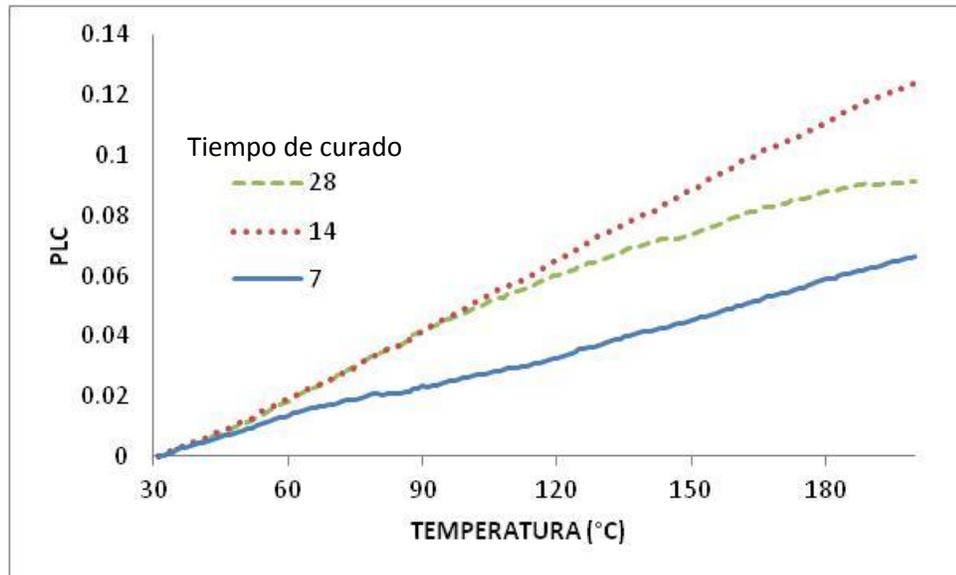


Figura 4.29. Gráficas de las curvas de expansión relativa de las mezclas: 6-M3-7D, 6-M3-14D y 6-M3-28D.

En la Tabla 4.3 se muestran los valores del coeficiente de expansión térmica de cada una de muestras preparadas que presentaron el mejor comportamiento mecánico.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 4.3, se puede apreciar que todos los materiales evaluados, con excepción de la muestra M1, presentan valores de expansión térmica menores que los que presenta un mortero fabricado con cemento portland. En algunos casos los valores de expansión son hasta 50% más bajos que el mortero. La disminución de los valores de expansión térmica puede estar relacionada con la presencia de microfisuras internas en los materiales con propiedades cementantes. Éstas

podrían ser ocasionadas por la posible reacción que se está dando entre el vidrio activado con la ceniza volante y el yeso.

TABLA 4.3

VALORES DE EXPANSIÓN TÉRMICA DE LAS PASTAS PREPARADAS

Mezcla	Tiempo de activación (hrs)	Tiempo de curado (días)	Coefficiente de expansión térmica, $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
M1 (99% vidrio)	2	90	20.58
M2 (70% vidrio, 29% CV)	4	90	6.31
M3 (50% vidrio, 49.5% CV)	6	90	4.91
M4 (30% Vidrio, 69.5% CV)	6	90	2.56
M5 (99% CV)	-	28	3.01
Mortero	-	28	12

Nota: Los valores fueron medidos en un rango de temperatura de 25°C a 200°C.

Algunos estudios indican que materiales puzolánicos como la escoria de alto horno, la ceniza volante, el humo de sílice y el meta-caolín han sido utilizados para reducir la expansión en el concreto. Aunque su eficiencia depende en gran medida de las características químicas y físicas del material de reciclaje, pues lo que provocan es la reducción o eliminación de las reacciones álcali-agregado en el concreto [63, 64, 65, 66, 67].

En el presente estudio, los materiales que contenían ceniza volante en la mezcla presentaron una disminución en la expansión térmica de los morteros,

debido a que ocurrió un proceso de contracción en la pasta que contrarrestó la expansión del material. Esta situación es similar a los reportes de Mauricio y Héctor [35], Venuat [66], Cabrera y Plowman [67], en los cuales se observó que la adición de ceniza volante a morteros de cemento reduce la expansión térmica.

Así, con base en los resultados obtenidos en este trabajo, se puede concluir que es posible la reutilización de materiales de desecho o subproductos industriales como son el vidrio y la ceniza volante, para la obtención de nuevos materiales alternativos con propiedades cementantes.

Aunque estos materiales fueron aumentando sus resistencias hasta los 90 días de haberse fabricado la mezcla, existe la probabilidad de que pudieran ser considerados para su aplicación en sustitución parcial del cemento portland ordinario, con lo que se estaría contribuyendo a la disminución de la contaminación del medio ambiente.

Por supuesto, es importante tener en cuenta todas las variables que están influyendo en el proceso de elaboración de las pastas. En este caso y de acuerdo con los resultados de este trabajo, es importante llevar a cabo la activación mecano-química alcalina de la materia prima, pues es gracias a ello que probablemente se esté formando el silicato de sodio, precursor de algunas fases cementantes.

Asimismo, es importante resaltar que estos resultados son fruto de un trabajo inicial que debe continuarse para optimizar el proceso de activación y con ello lograr la obtención de un buen material con propiedades cementantes con el que se puedan construir edificaciones básicas y necesarias para los seres humanos, siempre que se acaten las normas adecuadas para su fabricación.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

- 1.- Mediante la mezcla de desechos inorgánicos como la ceniza volante y el vidrio sódico-cálcico, este último previamente tratado y activado mecano-químicamente, es posible obtener nuevos materiales con propiedades cementantes.

- 2.- La combinación de la molienda mecánica y la adición de una solución alcalina al vidrio resultaron fundamentales para incrementar su actividad puzolánica, y en conjunto con la ceniza volante y una proporción de yeso, sirvieron como base para la obtención de los nuevos materiales con propiedades cementantes.

- 3.- Las características microestructurales de cada uno de los nuevos materiales preparados fueron muy similares, con excepción de la presencia del silicato de sodio detectado por difracción de rayos-X en las mezclas 6-M3-90D y 6M4-90D.

CONCLUSIONES

4.- La mezcla 6-M3-90D fue la que presentó el mayor valor de resistencia a la compresión, atribuido a la proporción 1:1 de vidrio reciclado y ceniza volante y al efecto ocasionado por las propiedades puzolánicas de ambos materiales.

5.- Los nuevos materiales cementantes tienden a mantener un comportamiento de expansión lineal mayor cuando contienen altos porcentajes de vidrio reciclado que cuando tienen altos porcentajes ceniza volante (>50%), en un intervalo de temperatura de 30°C a 200°C.

6.- En general, empleando una pequeña cantidad de solución alcalina, una pequeña proporción de yeso, y manteniendo una proporción 1:1 de vidrio reciclado-ceniza volante, se logra obtener nuevos materiales cementantes con propiedades y características interesantes para el área de la construcción.

7.- La fabricación de materiales cementantes alternativos permitirá contribuir a la disminución de la contaminación con CO₂, pues al contar con nuevos materiales con propiedades cementantes se podrá reducir el uso del cemento portland tradicional.

Recomendaciones.

- a)** Se recomienda controlar la temperatura exterior, tanto en la activación del vidrio, como en la fabricación del material cementante para tener un buen manejo de la mezcla de los materiales.

- b)** Se sugiere ampliar el estudio de la mezcla con 6-M3, ya que fue la que presentó la más alta resistencia a la compresión, aplicando otras técnicas instrumentales de caracterización para tener mayor información sobre la presencia de los geles y la formación de fases cementantes.

- c)** Con el fin de obtener mezclas más fluidas se recomienda la utilización de aditivos, pues algunos de ellos ayudarían al incremento de la resistencia a la compresión.

- d)** De igual forma, se recomienda estudiar nuevas composiciones de pasta e incorporar agregados pétreos para la formación de mortero para dar algún uso en el nivel de laboratorio, utilizando la pasta 6-M3 para optimizar las condiciones de preparación e incrementar la resistencia.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Mari Eduardo A, Celeda Ana, De Waal Henk, Solier Carlos, Cano Juan Martin. (2000) El vidrio: Reciclado en la Fabricación de Envases. Red Iberoamericana sobre Ciencia y Tecnología de Materiales Vítreos, CYTED.
- [2] Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J.L. (2007) Geopolymer Technology: the Current State of the Art. J. Mat. Sci. 42(9), 2917-2933.
- [3] Buchwald A., Schulz M. Res. (2004) Álcali-activated binders by use of industrial by-products, Cement Concr. 35, 968-973.
- [4] Krizan D., Zivanovic B. Effect of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. Cement Concr. Res.-2002.-Vol.32.-P.1181-1188.
- [5] Fernandez A., Palomo J.G., Puertas F. (Res, 1999) Alkali-activated slag mortars mechanical strength behavior, Cement Concr. 29, 1312-1321.
- [6] A. V. Gorokhovskii, D. V. Meshcheryakov, I. N. Burmistrov, D. S. Spiricheva, J. I. Escalante-Garcia, and F. Puertas (2010). Heat-Insulating Material Based on Cullet Subjected to Mechanochemical Activation, Glass and Ceramics Vol. 67, Nos. 1 – 2.
- [7] Suárez S, Fernández L. Tesis de Master. (Julio 2010). Mezclas binarias y ternarias basadas en cenizas volantes influencia del activador sobre las formación de fases y resistencias mecánicas Universidad Politécnica de Catalunya.
- [8] Valdez Pedro. Tesis doctoral, Desarrollo de un método para evaluar materiales naturales con potencial puzolánico para su uso en cemento, p.145. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [9] Diseño y Control de mezclas de concreto. PCA. Primera Edicion p 25-56.
- [10] Taylor H. F. W. (1997). Cement chemistry. London, Thomas Telford. Pag 459. ISBN : 0 7277 2592 0.

- [11] Fernández-Jiménez A, Palomo A. Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) Madrid, ESPAÑA.
- [12] Della M. Roy. (1999). Alkali-activated cement. Opportunities and challenges. Cement and Concrete Research 29 249-254.
- [13] Malhotra VM, Metha PK. (1996). Puzzolanic and cementitious materials. In: Advances in concrete technology. New York: Gordon and Breach Publishers.
- [14] L.M. Federico, S.E. Chidiac. (2009). Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete- Critical review of treatment methods. Cement and Concrete Composites.
- [15] J. Péra, J Ambroise, and M. Chabannet. (2001). Transformation of Waste into complementary cementing materials, p. 459 Flys ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, SP199, ACI, volume 2.
- [16] Criado M, Palomo A, Fernández A. (2006). Nuevos materiales cementantes basados en ceniza volantes. Influencia de los aditivos en las propiedades reológicas. Monografía del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja N° 416, pág. 11-49.
- [17] Criado S. (2007) Nuevos materiales cementantes basados en la activación alcalina de ceniza volantes. Caracterización de geles N-A-S-H en función del contenido de sílice soluble. Efecto del Na₂SO₄. Tesis doctoral, pag. 8, 58-68, 227-230.
- [18] C. Suryabarayana, E.Ivanov, V.V. Boldyrev. (2001). The science and technology of mechanical alloying. Materials Science and Engineering A304-306 pag 151-158.
- [19] D. K. Arginbaev. (1999). Development of processes for mechanical, thermal and activation, Yuzhno-Kaz Gos Univ in M O Auezova, Shymkent, Kazakhstan Izv Minist Nauki Vyssh Obraz resp Kaz, Nats Akad Nauk Resp Kaz, Ser Khim, (4) pp 91-95.
- [20] P. Parameswaran, A.K. Chatterjee. (1986). Alkali activation of Indian blast furnace slag, 8th International congress of chemical cement, Rio de Janeiro, Brazil.
- [21] Hardjito D, Rangan BV. Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Curtin research report. <<http://www.geopolymer.org/library/technical-papers/17-development-and-properties-of-low-calcium-fly-ash-based-geopolymer-concrete>>.

- [22] Yang KH, Song JK, Ashour AF, Lee ET. (2009) Properties of cements mortars activated by sodium silicate. Constr Build Mater 22:1981-9.
- [23] Sathonsaowaphak A, Chindaprasirt P, Pimraksa K. (2009) Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. J Hazard Mater. Doi:10.1016/j.jhazmat.2009.01.12.
- [24] Kong DLY, Sanjayan JG. (Res 2005) Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. Cem Concr; 35:1233-46.
- [25] Josephson, G. W., Siller, F and Runner, D.G. (1949) Iron Blast Furnace Slag-Production, Processing, Properties and Uses, Bulletin 479, Bureau of Mines, Washington, p 304.
- [26] Moranville-Regourd, M (1998) Cement Made from Blastfurnace Slag, in Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Arnold, Londres ISBN 0-340-56589-6, pp. 633-674.
- [27] Le Chatelier Henri Book. (1904) Chapter 8, p 351-401
- [28] ASTM C 618-05. Stándar Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Minerak Admixture in Portland cement Concrete.
- [29] Chesner, W.H., Collins, R.J., MacKay, M.H., User Guidelines for Waste and By-product Materials in Pavement Construction, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-97-148.
- [30] Vidrio: (2010) Historia, fabricación y usos actuales
<http://www.abcpedia.com/construccion/materiales/vidrio.html> consultado el 15 de noviembre de.
- [31] Caijun Shi, Keren Zheng. (2007) A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources Conservation and Recycling 52 234-247.
- [32] Espinoza-Pérez L. J., Escalante García J. I. (Diciembre 2011) Morteros a base de vidrio de desecho/escoria de alto horno; activación mecano química del vidrio en soluciones alcalinas. Nexo. Vol. 24, No. 02, pp.92-103/.
- [33] McLellan, G. W., Shand, E. B. (1984) Glass Engineering Handbook, McGraw-Hill, Inc.

- [34] Phillips JC, Cahn DS, Keller GW. (1972) Reuse glass aggregate en Portland cement concrete. In: Proceeding of the third mineral waste utilization symposium Chicago, p 163.
- [35] Ossa Mauricio, Jorquera Héctor. (1984) Cementos con Cenizas Volante, Materiales de Construcción Vol 34 N°193.
- [36] García C. (2003) Reutilización de cenizas de centrales térmicas. Ambient 2002-2003. Edición 23. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, pág. 43-46.
- [37] Alonso M.C.; De luxan M.P. (1995) Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción. Experiencia española. Instituto de Ciencias de las Construcción Eduardo Torroja. Madrid, pag.12-50.
- [38] Concrete Materials Book, Propertier, Specifications and Tesintig, Second Edition, by Sandor Popovics. Hydraulic Cement Other Than Standard Portland pag 34-50.
- [39] Umaña Peña. Juan Carlos. (2002) Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón. Tesis. Universidad Politécnica de Cataluña, pág. 1-11.
- [40] Poon, C.S; Kou S.C; Lam L and Lin Z.S. (2001) Activation of fly ash/cement systems using calcium sulfate anhydrite (CaSO₄). Cement and Concrete Research N°31, pág. 873-881.
- [41] Fernandez A, Palomo A. (Research 2005) Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activador. Cement and Concrete.
- [42] Palomo A, Grutzeck M.W, Blanco M.T. (1999) Alkali activated fly ashes: a cement for the future, Cem. Concr Res 29 (8) 323-1329.
- [43] Fernandez A, Palomo A. (2003) Alkali-activated fly ashes; properties and characteristics, 11th International Congress on the Chemistry of Cement Durban, South Africa, pp 1332-1340.
- [44] Palomo A, Alonso S, Fernandez A, Sobrados I, Sanz J. (2004) Alkaline activation of fly ashes. A 29 Si NMR study of the reaction products, J. Am Ceram. Soc 87 (6) 1141-1145.
- [45] Deepak Ravikumar, Sulapha Peethamparan, Narayanan Neithalath. (2010) Structure and strength de NaOH activated concrtes containing fly ash or GGBFS as the sole binder, Cement & Concrete Composites 32 399-410.

- [46] Crespo Escobar Santiago. Los materiales cerámicos para edificación y obra civil book. pag 95-101.
- [47] Sanz Arauz David. Análisis y empleado en revestimiento en interiores mediante técnicas geológicas. Tesis Doctoral. Universidad Politecnica de Madrid.
- [48] Seung Bum Park, Bong Chun Lee, Jeong Hwan Kim. (2004) Studies on Mechanical Propierties of Concrete Containg Waste Glass Aggregate, Cement and Concrete Research 34 pag, 2181-2189.
- [49] Caijun Shi, Yanzhong Wu, Chris Riefler, Hung Wang. (2005) Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. Cement and Concrete Research 35 pag, 978-993.
- [50] Ahmad Shayan, Aimin Xu. (2006) Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A fiel trial on concrete slabs. Cement and Concrete Research 36 pag, 457-468.
- [51] Sanjay Kumar, Rakesh Kumar. (2011) Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer. Ceramics International 37 pag 533-541.
- [52] Živko Sekulić, Svetlana Popov, Mirjana Đuričić, Aleksandra Rosic. (1999) Mechanical activation of cement with addition of fly ash. Materials Letters 39 pag. 115-121.
- [53] Puertas F, Martínez-Ramírez S, Alonso S, Vázquez T. (2000) Alkali-activated fly ash/slag cement. Strenght behaviour and hydration products. Cement and Concrete Research 30 pag.1625-1632.
- [54] ASTM C305-99. Stándar Practice for Mechanical Mixing of Hidraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.
- [55] Metha Kumar and Paulo J. M. Monteiro, Concrete, Indian Edition, 1999, p.228
- [56] Diamod S. (1983) On the glass present in low-calcium and high-calcium fly ashes. Cem Concr Res; 13(3):459-63
- [57] McCarthy GJ, Swanson KD, Steinw SJ. (1988) X-ray diffraction analysis of fly ash. Adv X-Ray Anal; 31:331-42.
- [58] Van Roode M, Douglas E, Hemmings RT (1987) X-ray diffraction measurement of glass content in fly ash and slags. Cem Concr Res; 17(2): 183-97.

- [59] Bardudo Sanjuán, Miguel Ángel y Chichón Yepes. (2004) El cemento Portland. Fabricación y expedición. Publicaciones Universidad de Alicante, pág. 25-29 ISBN 84-7908-806-0.
- [60] Torres JJ, Reporte de Actividades de Estancia Post-Doctoral. Periodo Noviembre 2010-Octubre 2011. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [61] Palomo A, Fernández Jiménez A y Criado M, "Geopolimeros": una única base química y diferentes microestructurales (2004). Materiales de Construcción. Vol 54, n° 275, p 77-91.
- [62] Figg, J.W. (1981) Reation between Cement and Artificial Glass in Concrete. In: Proceedings of Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Cape Town, South Africa, paper S252/7, 19p.
- [63] Meyer C, Baxter S, (1997) Use of Recycled glass for Concrete masonry Blocks Final Report 97-15. Albany, New York: New York State Energy Research and Development Authority.
- [64] Jin C, Meyer C, Baxter S. "Glascrete"-Concrete with glass aggregate ACI Mater J 2000;97(2):208-13.
- [65] Zhu H, Byars EA. Alkali-silica reaction of recycled glass in concrete, alkali-aggregate reaction in concrete. In: Proceeding of the 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, October 15-19; 2004. P. 811-20.
- [66] Venuat M. y Papadakis M. (1968) Fabricación, características y aplicaciones de los diversos tipo de cementos, Editores técnicos Asociados, S, A., Barcelona.
- [67] Cabrera J.G. y Plowman C. (1980) The influence of pulverized fuel ash on the early and long term strength of concrete, 7° Congres International de la Chimie des Ciments. Vol II, IV-84, Paris

APÉNDICES

APÉNDICE I

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE TODAS LAS
MEZCLAS PREPARADAS.

APENDICE I

RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE TODAS LAS MEZCLAS PREPARADAS.

Tiempo de Activación- Mezcla-Edad de ensayo	Resistencia
6-M1-90D	5 MPa
6-M1-28D	6 MPa
6-M1-14D	1 MPa
6-M1-7D	3 MPa
6-M2-90D	12 MPa
6-M2-28D	3 MPa
6-M2-14D	4 MPa
6-M2-7D	5 MPa
6-M3-90D	14 MPa
6-M3-28D	4 MPa
6-M3-14D	2 MPa
6-M3-7D	0 MPa
6-M4-90D	13 MPa
6-M4-28D	6 MPa
6-M4-14D	3 MPa
6-M4-7D	3 MPa
6-M5-90D	7 MPa
6-M5-28D	9 MPa
6-M5-14D	6 MPa
6-M5-7D	3 MPa
4-M1-90D	3 MPa
4-M1-28D	3 MPa
4-M1-14D	4 MPa
4-M1-7D	2 MPa
4-M2-90D	8 MPa
4-M2-28D	0 MPa
4-M2-14D	0 MPa
4-M2-7D	0 MPa
4-M3-90D	3 MPa
4-M3-28D	8 MPa

APÉNDICE I

4-M3-14D	2 MPa
4-M3-7D	1 MPa
4-M4-90D	2 MPa
4-M4-28D	2 MPa
4-M4-14D	2 MPa
4-M4-7D	1 MPa
2-M1-90D	15 MPa
2-M1-28D	7 MPa
2-M1-14D	3 MPa
2-M1-7D	6 MPa
2-M2-90D	11 MPa
2-M2-28D	0 MPa
2-M2-14D	1 MPa
2-M2-7D	0 MPa
2-M3-90D	10 MPa
2-M3-28D	0 MPa
2-M3-14D	3 MPa
2-M3-7D	0 MPa
2-M4-90D	10 MPa
2-M4-28D	5 MPa
2-M4-14D	3 MPa
2-M4-7D	1 MPa

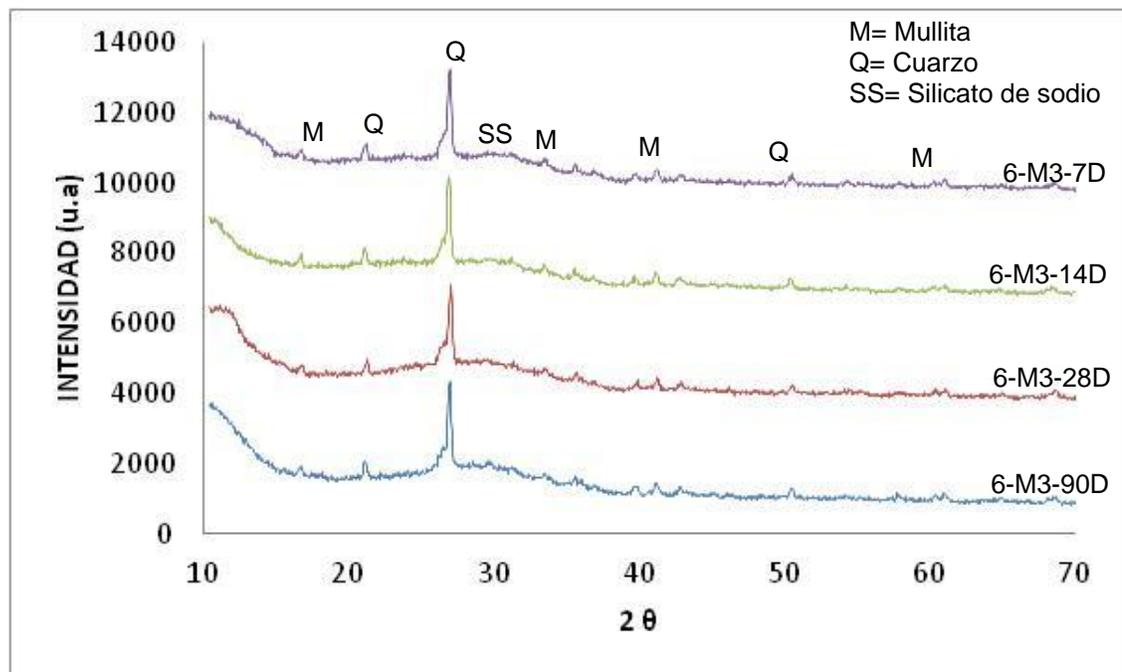
APÉNDICE II

PATRONES DE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X DE CADA UNA DE LAS PASTAS
PREPARADAS

APÉNDICE II

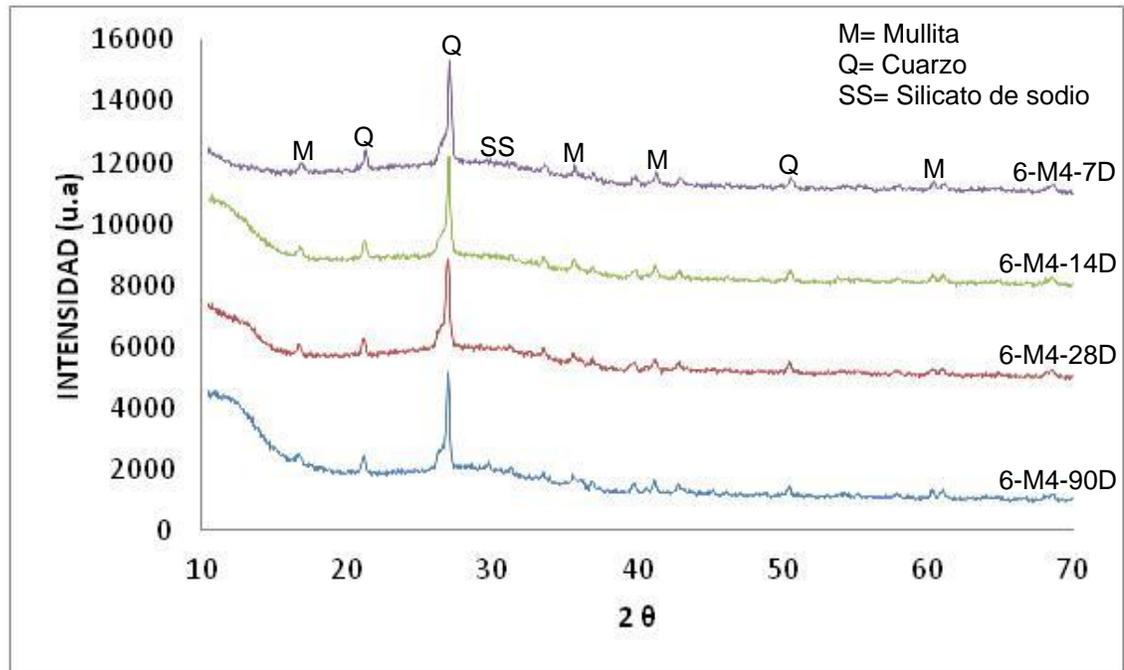
PATRONES DE DIFRACCIÓN DE RAYOS-X DE CADA UNA DE LAS PASTAS PREPARADAS

A continuación se muestran los patrones de difracción de cada una de las pastas elaboradas a diferentes tiempos de activación y a los diferentes tiempos de curado.

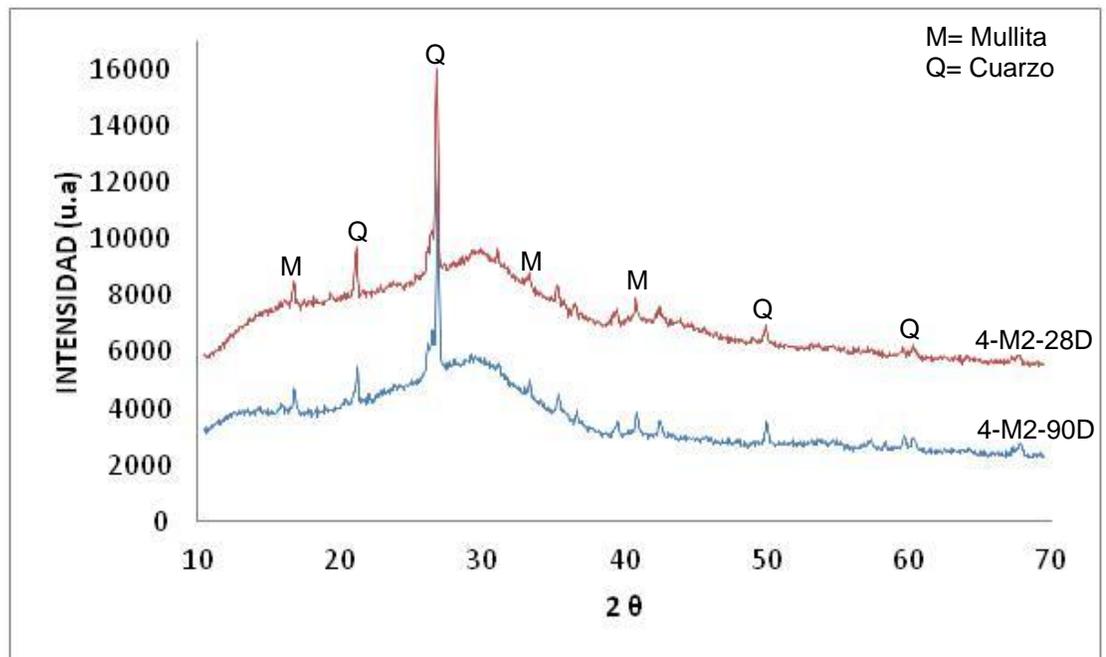


DRX de la mezcla 6-M3-90D, 28D, 14D, 7D.
Pasta 3 activada por 6 horas

APÉNDICE II

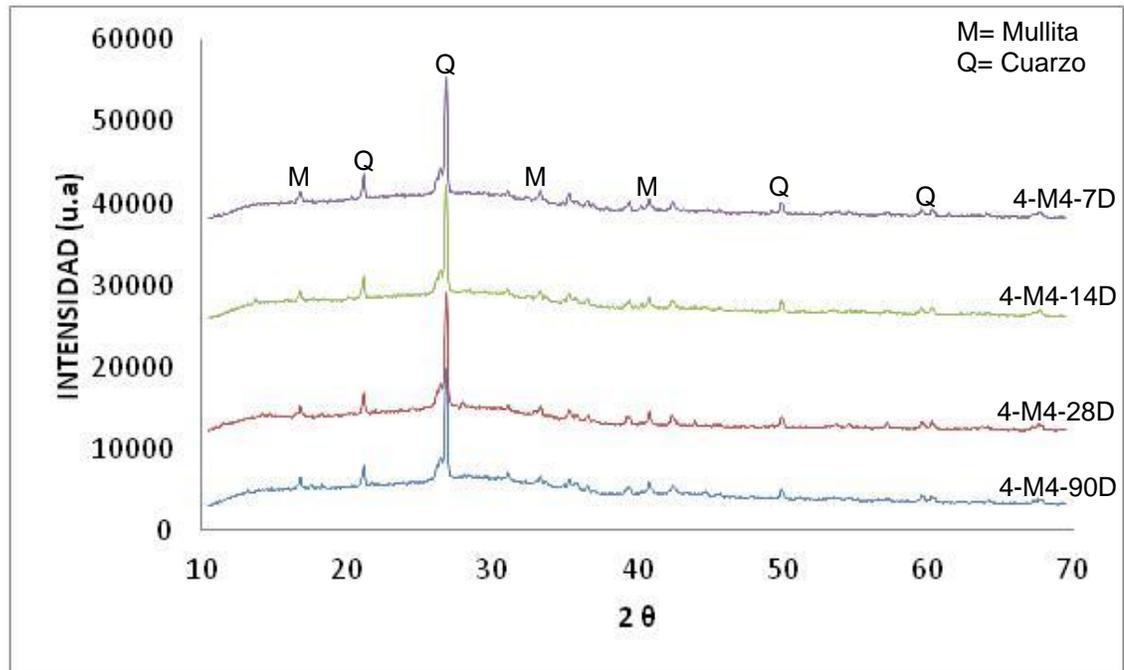


DRX de la mezcla 6-M4-90D, 28D, 14D, 7D.
Pasta 4 activada por 6 horas

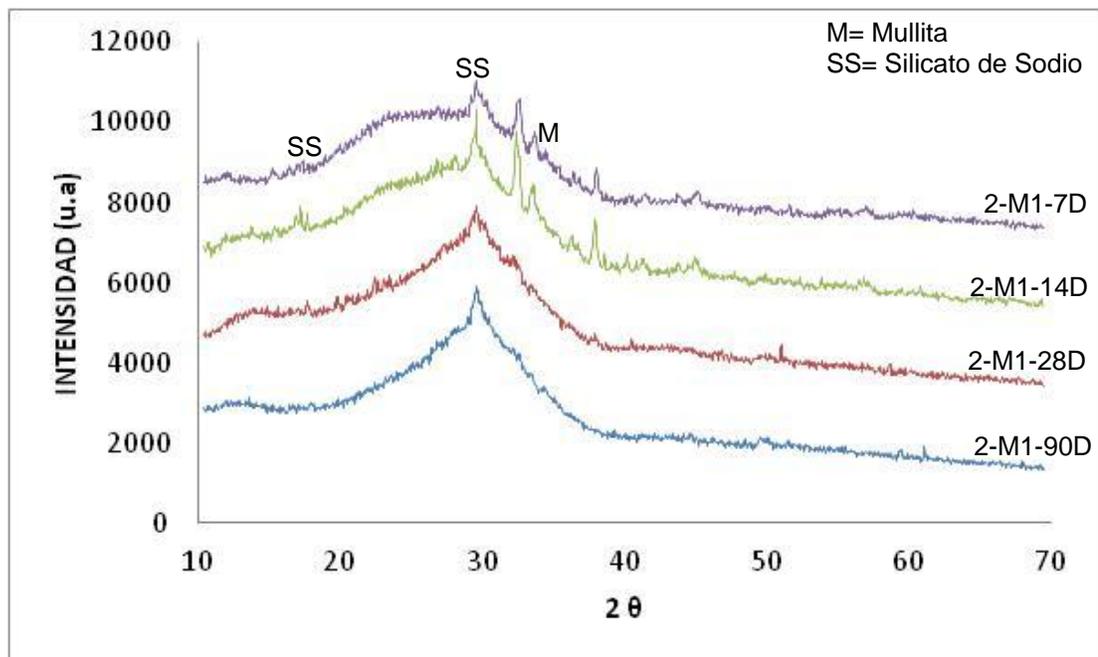


DRX de la mezcla 4-M2-90D 28D.
Pasta 2 activada por 4 horas

APÉNDICE II

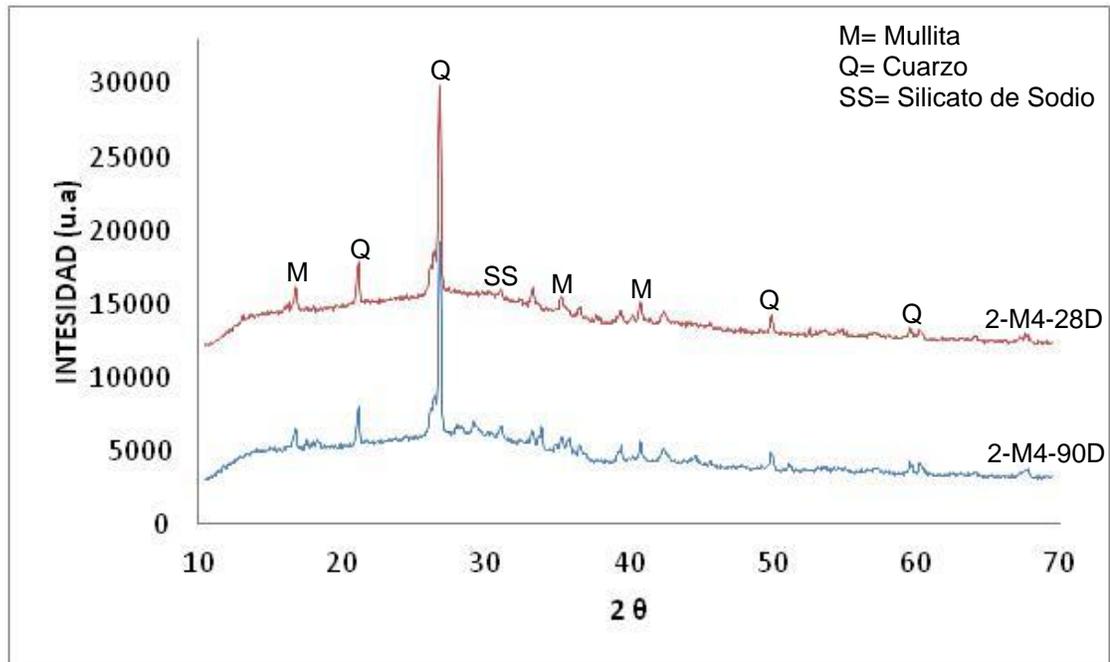


DRX de la mezcla 4-M4-90D, 28D, 14D, 7D.
Pasta 4 activada por 4 horas

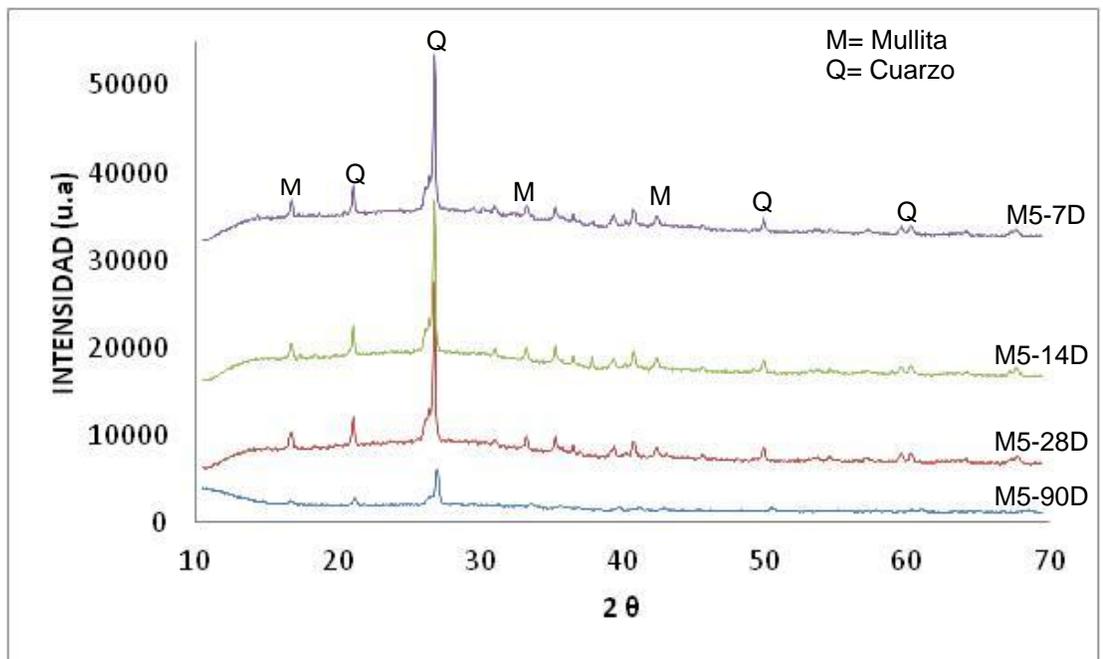


DRX de la mezcla 2-M1-90D, 28D, 14D, 7D
Pasta 1 activada por 2 horas

APÉNDICE II



DRX de la mezcla 2-M4-90D, 28D
Pasta 4 activada por 2 horas



DRX de la mezcla M5-90D, 28D, 14D, 7D.
Mezcla 5 activada

APENDICE III

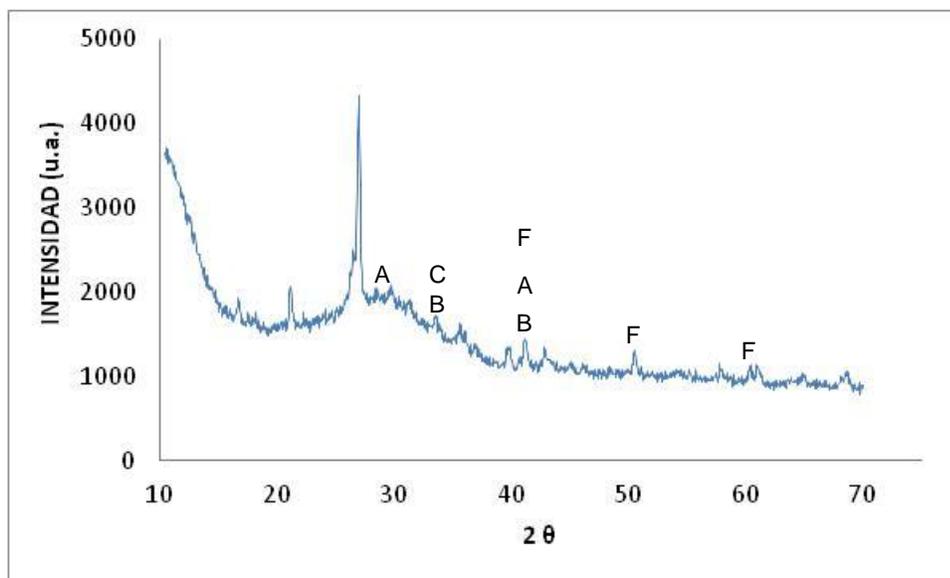
FASES DEL CEMENTO PORTLAN EN EL MATERIAL CON PROPIEDADES
CEMENTANTES (VIDRIO/CENIZA VOLANTE/YESO)

APÉNDICE III

FASES DEL CEMENTO PORTLAN EN EL MATERIAL CON PROPIEDADES CEMENTANTES (VIDRIO/CENIZA VOLANTE/YESO)

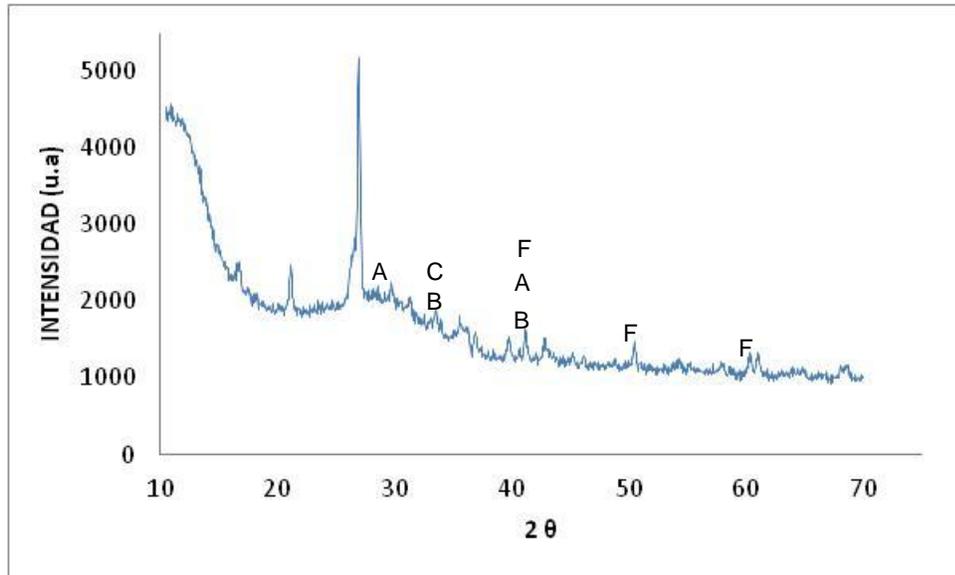
Anteriormente se mostraron estos patrones de DRX de las mezclas 6-M3-90D y 6-M4-90D y se vio que solo mostraban fases cristalinas como la Mullita, Cuarzo y aparece el Silicato de Sodio, lo que se pretende demostrar en este apéndice es que, no aparecen picos relacionados con las fases cristalinas del cemento portland como la alita, belita, ferrita y C_3A . Si existiera la posibilidad de que una de ellas se formara, la intensidad es mínima que el equipo no pudo detectar.

6-M3-90D



Fases del cemento portland.
 B= C_2S , A= C_3S , C= C_3A , F= C_4AF

6-M4-90D



Fases del cemento portland.
B= C₂S, A= C₃S, C=C₃A, F=C₄AF

APENDICE IV

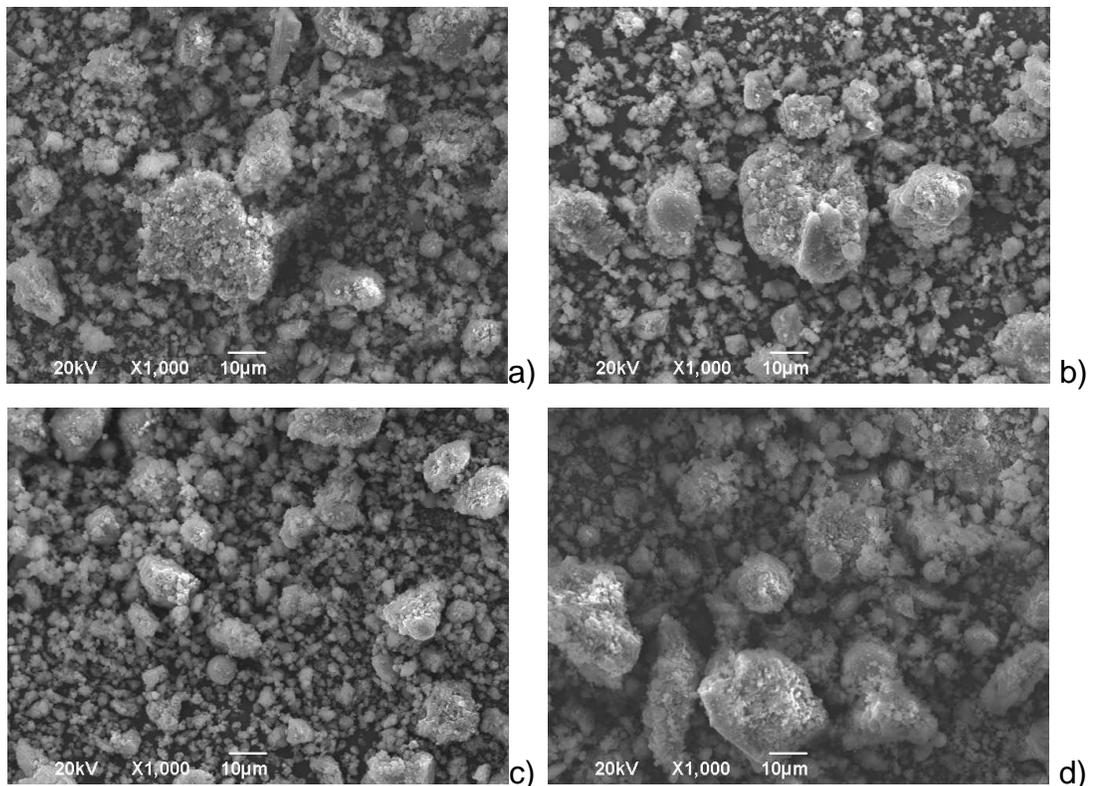
MICROGRAFÍAS DE ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE
BARRIDO DE CADA UNA DE LAS PASTAS PREPARADAS

APÉNDICE IV

MICROGRAFÍAS DE ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO DE CADA UNA DE LAS MEZCLAS PREPARADAS

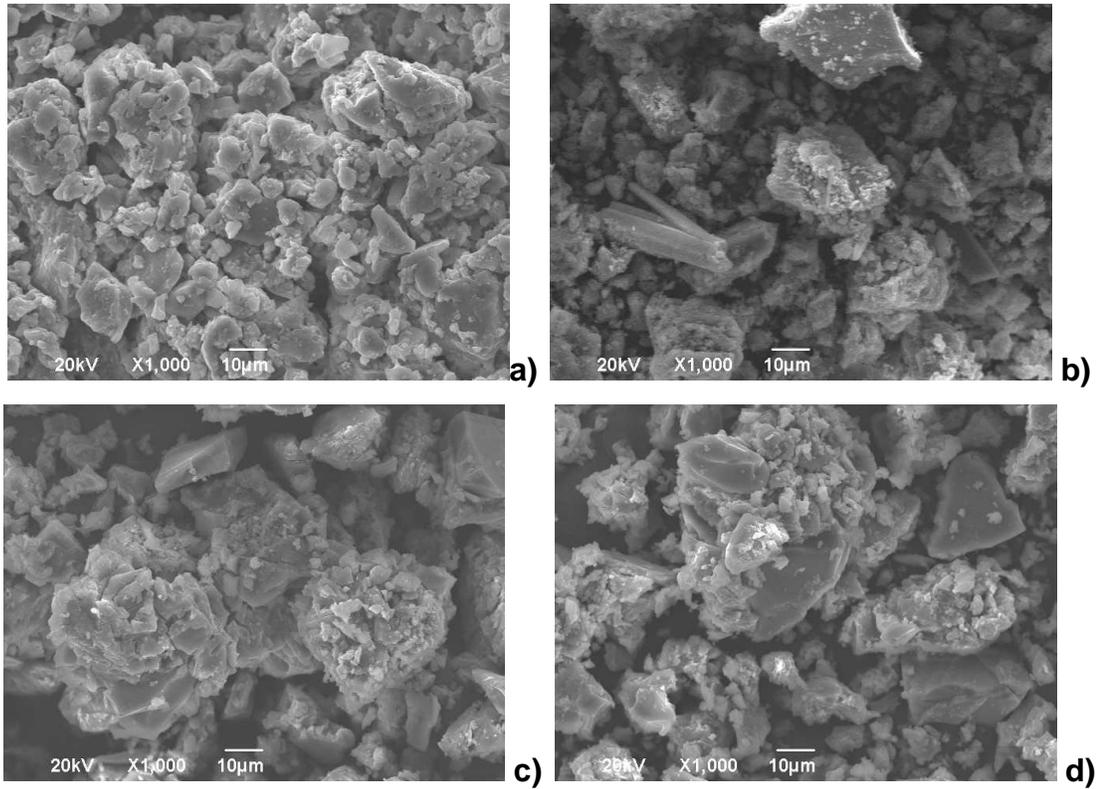
A continuación se muestran las micrografías de las pastas preparadas. En ellas se puede apreciar la morfología y el tamaño de las partículas que dan forma a los cementantes preparados en este trabajo.

M4-ACTIVACIÓN 4 HORAS



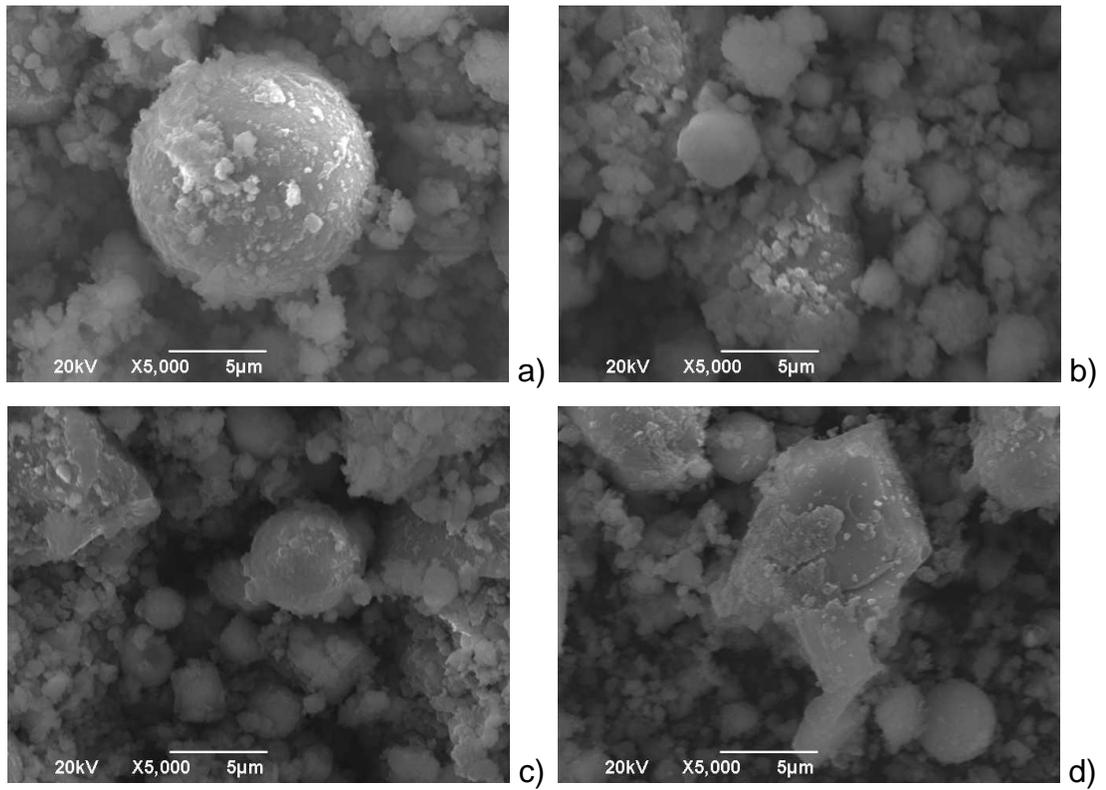
Micrografías tomadas a diferentes aumentos de la mezcla 4-M4 a:
a) 7 días, b) 14 días, c), 28 días, d) 90 días

M1-ACTIVACIÓN 2 HORAS



Micrografías tomadas a diferentes aumentos de la mezcla 2-M1 a
a) 7 días, b) 14 días, c), 28 días, d) 90 días

MEZCLA M5



Micrografías tomadas a diferentes aumentos de la mezcla M5 a
a) 7 días, b) 14 días, c) 28 días, d) 90 días

CURRICULUM VITAE

I. Datos Personales.

Nombre Completo: Myrna Sinaí Guevara Laureano
Lugar de Nacimiento: Altotonga, Veracruz
Fecha de Nacimiento: 24 de mayo de 1985
Género: Femenino
Correo Electrónico: ingmyrnaguevara@gmail.com

II. Grados Académicos.

Nombre de la Escuela: Escuela Primaria “Eufrosina Camacho de Ávila”
Lugar: Altotonga, Veracruz
Fecha: 1991 – 1997

Nombre de la Escuela: Escuela Secundaria General “Porfirio Aburto Aparicio”
Lugar: Altotonga, Veracruz
Fecha: 1997 – 2000

Nombre de la Escuela: Escuela Preparatoria Federal “Antonio Audirac”
Lugar: Teziutlan, Puebla
Fecha: 2000 – 2003

Nombre de la Escuela: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León
Grado: Titulado
Fecha: 2003-2008

Nombre de la Escuela: Geos Languages
Lugar: Calgary, Alberta Canadá.
Fecha: Noviembre 2009-Abril 2010

Nombre de la Escuela: Posgrado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León
Grado: Maestría con Orientación: en Materiales de Construcción
Fecha: 2010-2013

III. Experiencia Laboral.

Nombre de la Empresa: IIC- Departamento de Mecánica de Suelos
Puesto: Instructora
Duración: 7 meses
Motivo de Separación: Cuestiones Académicas

Nombre de la Empresa: IIC- Departamento de Geohidrología y Geofísica
Puesto: Asistente de Investigación
Duración: 6 meses
Motivo de Separación: Cuestiones Académicas

Nombre de la Empresa: Departamento de Mantenimiento (Parque Fundidora)
Puesto: Servicio Social
Duración: 6 meses

Nombre de la Empresa: Instituto de Ingeniería Civil
Puesto: Estudiante de Maestría
Duración: 3 años

IV. Proyecto de Vida.

Metas de superación personal: encontrar un trabajo que propicie el desarrollo profesional y personal.

PRIMER LOGRO DE ESTA TESIS.

Se elaboró un artículo científico que será enviado para su publicación a la revista Cement and Concrete Research en este 2013.