

**ANÁLISIS DE PASTA DE CEMENTO ADICIONADO CON ALTOS VOLÚMENES
DE CENIZA VOLANTE**



**MARCOS CONTRERAS NARVÁEZ
ARBHEY FABIÁN CERÓN CERÓN**

GRUPO MATERIALES COMPUESTOS (CENM)



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
SANTIAGO DE CALI
2011**

**ANÁLISIS DE PASTA DE CEMENTO ADICIONADO CON ALTOS VOLÚMENES
DE CENIZA VOLANTE**



**MARCOS CONTRERAS NARVÁEZ
ARBHEY FABIÁN CERÓN CERÓN**

**Trabajo de Grado para optar
Por el título de Ingeniero de Materiales**

**Director:
RUBY MEJÍA DE GUTIERREZ PhD.**

GRUPO MATERIALES COMPUESTOS



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
SANTIAGO DE CALI
2011**

RUBY MEJIA DE GUTIERREZ Ph.D
Directora del trabajo de Grado



Santiago de Cali
Agosto del 2011

En el desarrollo de este proyecto queremos agradecer a: la Universidad del Valle por acogernos en su Alma Mater, a la Escuela de Ingeniería de Materiales, a nuestros maestros por transmitirnos sus conocimientos, en especial a la profesora Ruby Mejía de Gutiérrez, Ph.D por su dedicación y apoyo en la dirección de este trabajo. Gracias al Grupo de Materiales Compuestos GMC y al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales CENM. Gracias al personal del Laboratorio de Cementos y del Laboratorio de Análisis Químico, en especial a Carolina Perea por su disponibilidad y ayuda. Gracias a la Ingeniera Silvia Izquierdo García por su tiempo brindado al ser nuestro jurado. Y a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron o participaron en la realización de esta investigación hacemos extensivo nuestros más sinceros agradecimientos.

Gracias a Dios por darme la oportunidad de existir, a mi madre Graciela Narváez por su cariño y apoyo a lo largo de mi vida, por mostrarme la verdadera grandeza siendo humilde y teniendo fortaleza. Gracias a mi familia, a mis amigos y a todos aquellas personas que tornan mi vida interesante.

Marcos Contreras Narváez.

Doy gracias a DIOS por guiarme durante este camino, por darme sabiduría e inteligencia, por llenarme de bendiciones, de salud y amor. Gracias también a mis padres por su amor, por sus enseñanzas e incondicional apoyo en todo momento, por llenarme de felicidad y por acompañarme en todo proyecto de mi vida. A todos mis compañeros y profesores por su ayuda en mi formación como ingeniero.

Arbey Fabián Cerón.

RESUMEN

INTRODUCCION

1. GENERALIDADES	12
1.1. DESCRIPCIÓN	12
1.2. OBJETIVOS	12
1.2.1. Objetivo General	12
1.2.2. Objetivos Específicos	12
1.3. JUSTIFICACIÓN	13
2. MARCO DE REFERENCIA	15
2.1. MARCO TEÓRICO	15
2.1.1. La adición de Cenizas Volantes como sustituto del Cemento Portland	15
2.1.2. Cenizas Volantes	15
2.1.2.1. Clasificación de las cenizas volantes	15
2.1.2.2. Variabilidad en composición	16
2.1.3. Penetración del ion cloruro	17
2.1.4. Ataque de Sulfatos	17
2.1.4.1. Mecanismo de ataque	18
2.1.4.2. Durabilidad de pastas de cemento con ceniza volante en medios sulfatados	19
2.1.5. Resistencia mecánica del cemento con ceniza volante	19
2.2. ANTECEDENTES	20
3. METODOLOGÍA	24
3.1. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	24
3.1.1. Cemento	24
3.1.2. Ceniza Volante	24
3.1.3. Agua	24
3.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	24
3.2.1. Diseño de mezcla	24
3.2.2. Preparación de las mezclas	25
3.2.3. Consistencia normal	25
3.2.4. Tiempos de Fraguado	26
3.2.5. Tipos de Muestras	26
3.2.6. Resistencia a la Compresión	27
3.2.6.1. Resistencia a la Compresión Curado Normal	27
3.2.6.2. Resistencia a la Compresión Curado Térmico	28
3.2.6.3. Resistencia a la Compresión de Muestras inmersas en NaCl	28
3.2.6.4. Resistencia a la Compresión de Muestras inmersas en Sulfatos	28
3.2.7. Ensayos de Durabilidad	28

3.2.7.1. Ensayo de Absorción y Porosidad.....	28
3.2.7.2. Ensayo de Permeabilidad a Cloruros.....	28
3.2.7.3. Sulfatos (ASTM C1012).....	29
3.2.7.3.1. Ensayo de expansión.....	29
3.2.7.3.2. Inspección Visual.....	30
4. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....	31
4.1.1. Análisis Fisicoquímico.....	31
4.1.2. Análisis Químico.....	31
4.1.3. Granulometría Laser.....	32
4.2. CONSISTENCIA NORMAL Y TIEMPO DE FRAGUADO.....	32
4.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	34
4.3.1. Resistencia a la Compresión Curado Normal.....	34
4.3.2. Resistencia a la Compresión Curado Térmico.....	36
4.3.3. Resistencia a la Compresión de Muestras inmersas en Sulfatos.....	37
4.3.4. Resistencia a la Compresión de Muestras inmersas en NaCl.....	39
3.5. ENSAYOS DE DURABILIDAD.....	39
3.5.1. Absorción y Porosidad.....	39
3.5.2. Permeabilidad a Cloruros.....	40
3.5.3. Ensayo de expansión.....	42
3.5.3. Inspección Visual de las Mezclas.....	44
3.6. APARTADO DE CARACETRIZACION DE PRODUCTOS.....	60
3.6.1. Difracción de Rayos x (DRX).....	60

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFÍA

Tabla I. Rango normal de composición química para ceniza volante producida a partir de diferentes tipos de carbón.....	16
Tabla II: Nomenclatura empleada para las diferentes mezclas.....	25
Tabla III. Tipo de Muestras para cada ensayo a realizar.....	27
Tabla IV. Composición química de la ceniza volante, % en masa.....	31
Tabla V. Tamaño promedio de partícula.....	32
Tabla VI. Proporciones de las diferentes mezclas.....	33
Tabla VII: Tiempo de fraguado (ASTM C 403).....	33
Tabla VIII. Desarrollo de resistencia a la compresión curado normal.....	34
Tabla IX. Desarrollo de resistencia a la compresión curado Térmico.....	37
Tabla X. Desarrollo de resistencia a la compresión curado sulfatos y NaCl.....	38
Tabla XI. Criterios de Permeabilidad a Cloruro según Norma ASTM C1202.....	41

Fig. 1. a) Consistencia Normal, b) Tiempos de fraguado.....	26
Fig.2. Ensayo de resistencia a compresión.....	27
Fig.3. a) muestras ensayadas, b) Montaje del Ensayo de Permeabilidad a Cloruros ASTM C 1202.....	29
Fig.4. Equipos empleados en el ensayo de expansión: a) Calibrador digital y b) Peachímetro.....	30
Fig.5. Distribución de partícula de la ceniza volante. Curva obtenida por granulometría láser.....	32
Fig. 6. Tiempos de fraguado inicial y final de pastas de cemento con diferentes porcentajes y sustituciones de ceniza volante.....	34
Fig. 7. Desarrollo de resistencia a la compresión curado normal.....	35
Fig. 8. Desarrollo de la resistencia a compresión a 28 días de curado normal (CN) y curado térmico (CT).....	37
Fig. 9. Desarrollo de resistencia a compresión de muestras expuestas a sulfatos.....	38
Fig.10. Desarrollo de resistencia a compresión 90 días de curado normal, muestras inmersas en sulfatos y muestras inmersas en NaCl.....	39
Fig.11. Absorción y porosidad de las diferentes mezclas de cemento portland con ceniza volante.....	40
Fig.12. Ensayo de Permeabilidad a Cloruros en pastas de cemento adicionadas con Ceniza Volante.....	41
Fig.13. Carga total transmitida.....	42
Fig.14. Porcentaje de expansión de las diferentes adiciones de CV expuestas a solución de Na_2SO_4	43
Fig. 15. Fotografía de las muestras a los 0 días de inmersión.....	44
Fig.16. Fotografía control de PH.....	45
Fig. 17. Registro fotográfico correspondiente a los 15 días.....	45
Fig. 18 y 19. Registro fotográfico correspondiente a los 30 y 45 días respectivamente.....	46
Fig. 20. Registro fotográfico correspondiente a los 60 días R.....	46
Fig. 21. Registro fotográfico correspondiente a los 60 días CV15.....	46
Fig. 22. Registro fotográfico correspondiente a los 75 días R y CV15 respectivamente.....	47
Fig. 23. Registro fotográfico correspondiente a los 75 días CV30, CV45 y CV60 respectivamente.....	47
Fig. 24. Registro fotográfico correspondiente a los 90 días R.....	48
Fig. 25. Registro fotográfico correspondiente a los 90 días CV15.....	48
Fig. 26. Registro fotográfico correspondiente a los 90 días CV30.....	49
Fig. 27. Registro fotográfico correspondiente a los 90 días CV45 y CV60 respectivamente.....	49
Fig. 28. Registro fotográfico correspondiente a los 105 días R.....	50
Fig. 29. Registro fotográfico correspondiente a los 105 días CV15.....	50
Fig. 30. Registro fotográfico correspondiente a los 105 días CV30.....	50

Fig. 31. Registro fotográfico correspondiente a los 120 días R.....	51
Fig. 32. Registro fotográfico correspondiente a los 120 días CV15.....	51
Fig. 33. Registro fotográfico correspondiente a los 120 días CV30.....	52
Fig. 34. Registro fotográfico correspondiente a los 120 días CV45 y CV60.....	52
Fig. 35. Registro fotográfico correspondiente a los 141 días R.....	53
Fig. 36. Registro fotográfico correspondiente a los 141 días CV15.....	53
Fig. 37. Registro fotográfico correspondiente a los 141 días CV30.....	54
Fig.38.Registro fotográfico correspondiente a los 171 días R, CV15 respectivamente.....	54
Fig.39. Registro fotográfico correspondiente a los 186 días R, CV15.....	55
Fig. 40. Registro fotográfico correspondiente a los 186 días CV30.....	55
Fig. 41. Registro fotográfico correspondiente a los 201 días R.....	56
Fig. 42. Registro fotográfico correspondiente a los 201 días CV15.....	56
Fig.43. Registro fotográfico correspondiente a los 216 días R, CV15.....	57
Fig. 44. Registro fotográfico correspondiente a los 216 días CV30.....	57
Fig.45. Registro fotográfico correspondiente a los 244 días R, CV15 respectivamente.....	58
Fig. 46. Registro fotográfico correspondiente a los 259 días R.....	58
Fig. 47. Registro fotográfico correspondiente a los 259 días CV15.....	59
Fig. 48. Registro fotográfico correspondiente a los 259 días CV30.....	59
Fig.49. Registro fotográfico correspondiente a los 259 días CV45 y CV60 respectivamente.....	59
Fig.50. Difractograma de la muestra R curada en agua.....	61
Fig.51. Difractograma de la muestra R curada en Na_2SO_4	61
Fig.52. Difractograma de la muestra CV15 curada en agua.....	62
Fig.53. Difractograma de la muestra CV15 curada en Na_2SO_4	62
Fig.54. Difractograma de la muestra CV45 curada en agua.....	63
Fig.55. Difractograma de la muestra CV45 curada en Na_2SO_4	63
Fig.56. Difractograma de la muestra CV60 curada en agua.....	64
Fig.57. Difractograma de la muestra CV60 curada en Na_2SO_4	64
Fig.58. Difractograma de la iza volante virgen.....	65
Fig.59. a) Micrografía SEM (6000X), b) Micrografía SEM (10000X) y resultados EDS de la Muestra R sumergida en agua durante 90 días.....	66
Fig.60. Micrografía SEM (12000X) y resultados EDS (etringita expansiva) de la Muestra R sumergida en Na_2SO_4 durante 167 días.....	66
Fig.61. Micrografías SEM: a) (2000X), b) (6000X), c) (12000X) y sus respectivos EDS de la Muestra CV15 en agua durante 90 días.....	67
Fig.62. a) Micrografía SEM (4000X) y EDS, b) SEM (2000X) muestra CV15 sumergida en Na_2SO_4 durante 167 días.....	68
Fig 63. a) Micrografías SEM (3500X), b) SEM (1000X) CV45 en agua 90 días...69	69
Fig.64. Micrografía SEM (3000X) y EDS de la muestra CV45 sumergida en Na_2SO_4 durante 167 días.....	69
Figura 65. a) Micrografía SEM (900X) y EDS, b) SEM (10000X) y EDS y c) SEM (5000X) de la muestra CV60 sumergida en agua durante 90 días.....	70
Fig.66. Micrografías SEM a) (500X) y b) (700X) muestra CV60 sumergida en Na_2SO_4 durante 67 días.....	71

La presente investigación se enmarca en el análisis de pastas de cemento adicionado con altos volúmenes de ceniza volante. Para tal efecto se diseñaron cinco mezclas con adiciones de 0, 15, 30, 45 y 60% de ceniza volante (CV) empleando la siguiente nomenclatura para identificarlas: R, CV15, CV30, CV45 y CV60, respectivamente. Se produjeron especímenes cilíndricos para determinar Absorción y Porosidad; Resistencia a Compresión de muestras expuestas a un curado normal, curado térmico, inmersas en sulfatos e inmersas en NaCl; Resistencia química a Sulfatos (medidas de expansión) y Permeabilidad a Cloruros.

La caracterización de la ceniza volante mostró un alto porcentaje de inquemados 16,82% y un tamaño promedio de partícula de 58,65 μm . Los resultados obtenidos a los 90 días de curado normal (en agua) mostraron que la resistencia a compresión de las mezclas CV15, CV30 y CV45 superan a la mezcla de referencia R, destacándose la mezcla CV15 con una resistencia de 37,19 MPa. La mezcla CV45 presentó una ganancia de resistencia de 120% entre los 28 y 90 días de curado, habiendo alcanzado a 90 días de curado la misma resistencia de la referencia, esto muestra que es posible un mayor desempeño resistente a edades superiores. El curado térmico entre 60 y 70°C incrementó la resistencia a compresión de todas las mezclas con respecto a las curadas normalmente. La mezcla R inmersa en sulfatos presentó una pérdida de resistencia; mientras las mezclas con adición de CV presentaron un comportamiento de aumento en la resistencia a compresión a mayor tiempo de inmersión, destacándose la mezcla con 30% de CV 37,97 MPa a los 90 días de exposición. Un comportamiento similar se dio en las muestras inmersas en NaCl, donde la muestra de referencia y la adicionada con un 15% de CV presentaron pérdida en la resistencia a compresión con respecto a las muestras curadas normalmente. Se demostró que incrementos en la adición dan lugar a efectos positivos en las propiedades de durabilidad, la adición del 60% de CV presentó la más baja permeabilidad al ion cloruro. Las menores expansiones de las muestras en presencia de sulfatos se obtuvieron en los cilindros con 45 y 60% de CV, las cuales no mostraron ninguna señal de deterioro hasta el final del proyecto (259 días de exposición a sulfatos).

Hoy en día, los problemas ambientales y energéticos que origina la masiva producción de cemento Portland hacen parte de las principales tareas a abordar en el campo de los materiales, la necesidad de incorporar al proceso constructivo materiales cuya fabricación o procesamiento no conlleve asociada la emisión de grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera se hace más evidente. El reto consiste en mejorar, con el uso de nuevos materiales, las prestaciones que el cemento Portland ofrece en la actualidad; muy buenas en términos generales.

Considerando la cantidad de CO_2 emitido en la producción del cemento, es imperativo que su fabricación sea lo más amigable posible con el medio ambiente. Si esto no es posible, entonces en las nuevas plantas se deben encontrar las formas o vías para reducirlo significativamente a través del uso optimizado de cementantes complementarios en el concreto, tales como la ceniza volante.

La ceniza volante es un subproducto industrial contaminante que proviene de la industria de generación eléctrica y se obtiene del proceso de combustión del carbón. Su recolección y disposición tienen un valor económico importante que repercute en los costos de producción de la energía eléctrica. Por efecto de su morfología, composición química, mineralógica y tamaño de las partículas, algunas cenizas actúan como un material con una actividad puzolánica significativa, ya que las partículas de ceniza reaccionan con el hidróxido de calcio en presencia de agua para producir un material con características cementantes.

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de investigación del grupo Materiales Compuestos (GMC) en la línea de Aprovechamiento de Desechos y desarrollo de nuevos materiales alternativos. Su objetivo fue evaluar el efecto de la incorporación en pastas de cemento de altos volúmenes de una CV, desecho de una industria de la región y cuyo contenido en inquemados es elevado. Para evaluar el comportamiento de la pasta de cemento adicionado se realizaron ensayos de resistencia a compresión, absorción y porosidad, permeabilidad a cloruros y resistencia a sulfatos.

1.1. DESCRIPCIÓN

Específicamente, cuando el carbón es quemado en el proceso de generación de energía eléctrica quedan las cenizas volantes (del inglés, fly ash) como material de desecho que contamina el medio ambiente, además de cenizas de fondo u hogar según el tipo de equipo generador de calor.

Se ha reportado que la producción anual de ceniza volante en el mundo es de aproximadamente 450 millones de toneladas; en Colombia la producción de estas cenizas es aproximadamente 2 millones de toneladas por año en las plantas termoeléctricas, sin contar las numerosas calderas existentes en las diferentes industrias. De esta producción mundial únicamente alrededor de 25 millones de toneladas ($\approx 6\%$ del total de ceniza volante disponible), se está usando como una puzolana en cementos portland combinados o en mezclas de concreto. (Kumar M. P., 2009).

Se ha encontrado que por cada tonelada de cemento producida se genera una tonelada de dióxido de carbono (CO_2) que es emitida a la atmósfera (Aïtcin, 2000), siendo este gas el principal elemento del efecto invernadero que provoca la disminución de la capa de ozono.

Todo esto nos lleva a concluir que la gran generación de subproductos industriales es en la actualidad uno de los problemas más urgentes, por lo que su gestión, reciclado y aprovechamiento constituyen el principal reto a resolver por los países productores como Colombia.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Estudiar los efectos de la incorporación de altos volúmenes de ceniza volante tipo “F”, en pastas de cemento Pórtland ordinario.

1.2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Seleccionar y caracterizar los materiales de partida conforme a normativas existentes para conseguir mezclas adecuadas.

- ✓ Diseñar y elaborar pastas adicionada con ceniza volante, disminuyendo la cantidad de cemento y reemplazando entre un 0 y un 60 % por ceniza volante.
- ✓ Evaluar y comparar las propiedades mecánicas de las pastas adicionadas con ceniza volante, expuestas a un curado normal, curado térmico e inmersas en NaCl y Sulfatos.
- ✓ Evaluar y comparar el comportamiento en la durabilidad de las diferentes pastas adicionadas con ceniza volante, principalmente por ataque de sulfatos y cloruros.
- ✓ Realizar inspección visual durante el proceso de degradación de las muestras expuestas a sulfatos, evidenciando con archivo fotográfico.

1.3. JUSTIFICACIÓN

En el mundo se están realizando diversas investigaciones con el fin de favorecer el medio ambiente, y darle un uso adecuado a los desechos que están generando las industrias. La utilización de ceniza en la construcción ha contribuido a este problema ambiental y además ha logrado bajar los costos de los materiales empleados en este campo hasta en un 16%. Lo que antes fue "basura", ahora es un recurso para los ingenieros. En efecto las cenizas que quedan de la combustión del carbón son utilizadas, en casi todo el mundo, para construir.

Una de las posibilidades de aprovechamiento de estos residuos industriales, es su incorporación a los materiales de construcción y concretamente al cemento, dando lugar a un nuevo tipo de cemento denominado "cemento compuesto", según Taylor (1990) o "cemento de adición" según Mehta (1986).

Existe un claro consenso internacional en que el desarrollo sustentable de las industrias de cemento y concreto puede lograrse con la sustitución parcial de un porcentaje de cemento con materiales cementantes suplementarios, reduciendo con esto la emisión de CO₂ a la atmósfera.

En general, puede afirmarse que la adición de ceniza volante al concreto asegura muchos beneficios, entre estas se resaltan las propiedades del concreto fresco a través de una demanda reducida de agua para un revenimiento dado, una mejor bombeabilidad, una cohesión mejorada, una segregación reducida y un menor sangrado. También reduce la temperatura pico durante el curado, lo que ayuda a disminuir el agrietamiento térmico. En el concreto endurecido, la incorporación de la ceniza volante puede mejorar la durabilidad tal como resistencia a la reacción álcali-sílice (RAS), al ataque de sulfatos, al ingreso de cloruros y a la corrosión, reduce la permeabilidad y contribuye a la ganancia de resistencia a largo plazo del concreto. Por ejemplo, se ha reportado que la sustitución parcial del cemento

portland con ceniza volante en cantidades del orden de 50% conduce a tener concretos con mejor desempeño en cuanto a su durabilidad.

Otros beneficios debidos a la utilización de ceniza volante son la reducción de los costos del concreto, el empleo provechoso de un material destinado al relleno de tierra y la reducción de la energía y la emisión de CO_2 , asociadas con la producción del cemento. Sustituir parte del cemento portland por ceniza volante trae consigo un beneficio económico, ya que el precio de esta última es menor que el del cemento. Por otro lado, la ceniza volante, obtenida de la quema del carbón utilizado como combustible en la generación de energía eléctrica, es considerada como un contaminante, de manera que su utilización tiene beneficios ecológicos.

Aunque la combustión de carbón es igualmente generadora de CO_2 , la reutilización de la CV contribuiría a la disminución de niveles de CO_2 al reducir el consumo de cemento. Por ello, el comportamiento ambiental favorable del concreto puede realizarse considerablemente si la tasa de utilización de ceniza volante por parte de la industria del concreto se acelera en los países productores de ceniza.

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. La adición de Cenizas Volantes como sustituto del Cemento Portland

En términos generales, se puede definir adición como la acción o efecto de incorporar algo. La EHE-08 define, las adiciones como “aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos al hormigón con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales”. Esta norma sólo reconoce como adiciones a las cenizas volantes y al humo de sílice.

2.1.2. Cenizas Volantes

La instrucción, EHE-08, define a las cenizas volantes como:

- Residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentada por carbones pulverizados [2].

También la Asociación Española de Normalización bajo la norma UNE EN 450:95 define la ceniza volante como “un polvo fino de partículas principalmente de forma esférica y cristalina, procedentes de carbón pulverizado quemado, que poseen propiedades puzolánicas y que son compuestas de SiO_2 y Al_2O_3 principalmente”.

La ASTM C618 por su parte define las cenizas volantes como un “residuo finamente dividido que resulta de la combustión de carbón que es transportado por los gases de las chimeneas”.

2.1.2.1. Clasificación de las cenizas volantes

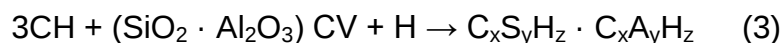
La composición química de las cenizas volantes está determinada por el tipo y cantidad de material incombustible del carbón. Las cenizas volantes están constituidas en un 85% por Si, Mg, Fe, Al y Ca, que son en su mayoría materiales vítreos; en menor cantidad están algunos materiales cristalinos como la hematita, magnetita, mullita entre otros. También se encuentran inquemados o carbón sin quemar. Generalmente la norma ASTM C618 clasifica estas cenizas en dos grupos o clases, Clase C y Clase F; la ceniza volante clasificada como clase C procede de la combustión de carbón subbituminoso que contiene un porcentaje mayor al 10% de CaO (alto contenido en calcio) y mayor al 50% de la suma de

estos tres compuestos $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$. Las cenizas clase F tienen un contenido bajo en óxido de calcio ($<10\%$ CaO) y la suma de estos tres compuestos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) es mayor al 70%.

La principal diferencia entre la ceniza volante clase C y F está en su capacidad de reacción; la ceniza clase F con bajo contenido en CaO necesita la presencia de álcalis o CH (Hidróxido de Calcio o Portlandita) para activar la reacción puzolánica y la fase vítrea de las cenizas con alto contenido en calcio clase C tiene la propiedad de auto endurecimiento (adición autopuzolánica) [3].

2.1.2.2. Variabilidad en composición

Las puzolanas como la ceniza volante son ricas en sílice, pero poseen alúmina en menor grado y el óxido de calcio es bajo para la ceniza clase F, la sílice y la alúmina reaccionan con el hidróxido de calcio (CH) del cemento hidratado, generando los geles de silicato cálcico hidratado (CSH) y aluminatos, convirtiéndose así en los productos cementantes (reacciones 1,2 y 3) [4] que son los responsables de la generación de las resistencias mecánicas de la pasta de cemento adicionada.



En la siguiente tabla se muestra el rango de composición química de la ceniza volante y como se explicara más adelante, esta composición química no es tan importante en cuanto a las propiedades finales del material cementante, como si lo es la composición mineralógica de las cenizas.

Tabla I. Rango normal de composición química para ceniza volante producida a partir de diferentes tipos de carbón [4].

COMPONENTE	PORCENTAJE POR PESO		
	Bituminoso	Sub-bituminoso	Lignito
SiO_2	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	5-35	20-30	10-25
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO_3	0-4	0-2	0-10
Na_2O	0-4	0-2	0-6
K_2O	0-3	0-4	0-4
Perdida por calcinación	0-15	0-3	0-5

Varios autores como P.K. Metha argumentan que no hay relación directa entre la composición química de la ceniza volante y las propiedades finales del hormigón. Enfatizan en que la mineralogía de las cenizas es la que determina en gran medida junto con el tamaño de partícula las propiedades resultantes del hormigón adicionado con ceniza volante. Las cenizas con bajo contenido en calcio poseen algunos compuestos menos reactivos casi inertes como: la mullita, la magnetita, la hematita y cristales de silicato de aluminio menos reactivos, estos reducen significativamente la actividad de las cenizas volantes, haciendo que las reacciones puzolánicas y la ganancia de resistencias del hormigón se logre a mayor edad [4].

2.1.3. Penetración del ion cloruro

Cuando la concentración de cloruros en morteros excede un cierto valor máximo, el acero de reforzamiento del concreto se despasiva y comienza un proceso de corrosión [5-6]. Generalmente la incorporación de puzolanas mejora la resistencia a la penetración de cloruros y reduce el periodo de iniciación de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto. Esto se debe principalmente a la reducción de la permeabilidad, haciendo más difícil la difusión del ion cloruro dentro de la estructura de concreto [7].

La ceniza volante se ha utilizado como adición al cemento portland, para aumentar el desempeño del concreto en relación a la durabilidad. La adición de CV lleva a la pasta de cemento a ser menos permeable, densificando la zona interfacial entre el agregado y la matriz de cemento [8], e impidiendo el ingreso de soluciones agresivas. También ha sido demostrado que la ceniza volante con un tamaño de partícula más fino genera mejores propiedades mecánicas al concreto, a su vez incrementan la resistencia al ataque de sulfatos y a la penetración del ion cloruro [9].

2.1.4. Ataque de Sulfatos

El ataque de los sulfatos al concreto constituye una de las formas más difundidas en el mundo de agresión química del hormigón. Los lugares propicios donde se encuentran los sulfatos son:

- Generalmente en suelos arcillosos
- En el agua de mar
- Ambientes de descomposición orgánica, donde los procesos anaerobios forman SH_2 , que posteriormente puede transformarse en ácido sulfúrico (H_2SO_4) por acción bacteriológica.
- Ambientes industrializados y urbanos, que generan altos grados de polución ambiental (lluvia acida).
- También se pueden formar por ciertos procesos biológicos que degradan lentamente al hormigón.

El ataque del ion sulfato ($\text{SO}_4^{=}$) se basa generalmente en la formación de Ettringita ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CS} \cdot \text{H}_{32}$), luego de la reacción del aluminato tricálcico del cemento ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) con el agua que está cargada de los iones $\text{SO}_4^{=}$. El ion sulfato es muy soluble en agua por lo que fácilmente puede penetrar a las estructuras de concreto expuestas a los mismos.

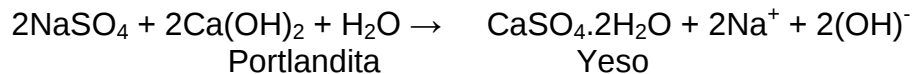
2.1.4.1. Mecanismo de ataque

El ataque de los sulfatos ocurre en forma física o química:

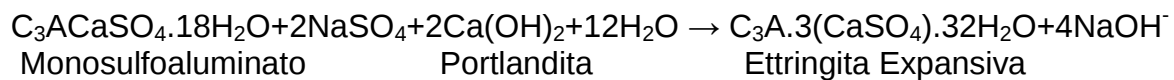
- ✓ **Ataque químico.** Cuando los iones $\text{SO}_4^{=}$ han entrado a la estructura del concreto reaccionan químicamente con los productos de hidratación del cemento, originando compuestos expansivos tales como la ettringita, el yeso y la taumasita, de estos tres compuestos el que principalmente causa deterioro en el concreto es la ettringita, que procede de la combinación de los sulfatos con hidratos del Aluminato tricálcico (C_3A) del cemento.

La ettringita provoca la expansión en la estructura del concreto, que conlleva a la creación de grandes esfuerzos que crean fisuración, agrietamiento o descascaramiento del mismo. Dependiendo del tipo de sulfato, se dan las reacciones de deterioro del concreto, que generan productos químicos indeseables, tales como [10]:

- ✓ El sulfato de sodio genera yeso + ettringita secundaria

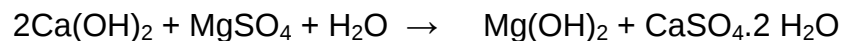


Provocando la descalcificación del gel CSH y por consiguiente la disminución de las resistencias.



Esta reacción genera la fisuración progresiva, aumento de la porosidad y disminución de las resistencias.

- ✓ El sulfato de magnesio forma yeso + ettringita secundaria + el ataque al CSH provocando su descomposición.



Esto genera la difusión de OH hacia afuera, $\text{SO}_4^{=}$ hacia dentro de la pasta y formación de yeso.



Provocando la descalcificación del CSH y la formación continua de capas de yeso.

En los casos anteriormente señalados la formación de compuestos de ettringita provoca fuerzas expansivas que van superando cada vez más la resistencia del concreto, llegando incluso en casos extremos a la destrucción de la estructura de concreto. [11]

- ✓ **Ataque físico.** El ataque físico ocasionado por la acción de los sulfatos se presenta como la cristalización de sales de sulfato en la superficie del concreto. Este mecanismo de deterioro empieza cuando las estructuras de concreto están sometidas a ciclos de humedecimiento y secado muy intensos como los que produce la acción de la marea del mar.

2.1.4.2. Durabilidad de pastas de cemento con ceniza volante en medios sulfatados

El ataque de los sulfatos al cemento depende de dos factores importantes; de la composición química y permeabilidad del cemento. En cuanto a la composición química es la parte alumínica del cemento la que reacciona con el ion SO_4^- que generan productos expansivos como la ettringita, al sustituir en parte el cemento por la ceniza volante, esta reduce la cantidad de aluminatos reactivos necesarios para la reacción con los sulfatos, aumentando de alguna manera la resistencia al ataque de este medio agresivo [12]. También reducen la cantidad de Hidróxido de calcio que se consume en buena parte en la reacción puzolánica evitando que se formen compuestos expansivos.

El cemento portland hidratado es un material poroso lo cual permite que sea atacado fácilmente por los iones SO_4^- que penetran su estructura. Al adicionar ceniza volante al cemento se disminuye la permeabilidad; esto se debe a que cuando comienza la reacción puzolánica se generan productos mucho más densos como los son el Silicato cálcico hidratado CSH que se depositan en el interior de los poros capilares interconectados que incluso pueden llegar a bloquearlos haciendo que la distribución de poros sea más homogénea y dichos poros sean más pequeños lo que quiere decir, que el material se hace más impermeable [13]; obstruyendo el paso de cualquier medio agresivo. Sin embargo al respecto de este tópico aún existen controversias.

2.1.5. Resistencia mecánica del cemento con ceniza volante

Uno de los principales factores que inciden en las propiedades mecánicas del concreto fabricado con ceniza volante es el tamaño de partícula de la ceniza. Así, un tamaño de partícula relativamente grande de las cenizas aumentara las resistencias a edades más largas que las cenizas con un tamaño de partícula más

pequeño. Estudios realizados han mostrado que la resistencia a compresión depende en gran manera de la granulometría de la ceniza volante [14, 15].

2.2. ANTECEDENTES

Se presentan algunos estudios y trabajos relacionados con el comportamiento de la ceniza volante como sustituto parcial del material cementante.

Los estudios hechos por Malhotra (1994,1995) con mezclas de concreto superfluidificado han mostrado que cuando se limita la relación a/mc a 0.3 o menos, puede reemplazarse hasta 60 por ciento de cemento con ceniza volante clase F o clase C (ASTM C 618) para obtener excelentes características de resistencia y durabilidad [16]. A partir de extensas pruebas de laboratorio se llegó a la conclusión de que las características del módulo de elasticidad de Young, fluencia, contracción por secado, y congelación y deshielo del concreto con alto volumen de ceniza volante (AVCV), son comparables a las del concreto de cemento portland normal. Es notable que el concreto con altos volúmenes de ceniza volante mostrara resistencia excepcionalmente alta a la permeación de agua y penetración de iones de cloruro [17]. Estos descubrimientos son de considerable importancia desde el punto de vista de la durabilidad de las estructuras, incluyendo el control de corrosión del acero de refuerzo en el concreto expuesto a ambientes de cloruros. Por lo tanto, el uso del concreto superfluidificado AVCV puede, a fin de cuentas, tener el mejor valor agregado de la ceniza volante en la industria de la construcción.

Según el investigador colombiano radicado en México, Carlos Caballero Badillo (2001), la ceniza volante tiene propiedades cementantes, debido, entre otros factores, a su contenido de óxidos (sílice, alúmina y fierro), arriba del 70%. Esta característica, junto a la forma esférica de sus partículas, contribuye al sellado del poro de los morteros y concretos elaborados con adiciones de ceniza volante, produciendo un material menos permeable y por lo tanto más resistente al paso del agua [18].

N. Bouzoubaa, M.H. Zhang, V.M. Malhotra (2001) evaluaron las propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos hecho con altos volúmenes de ceniza volante (45% y 55% de sustitución) usando una ceniza con tamaños de partículas gruesos (finura Blaine 2120 cm²/g, tamaño medio de partícula 21,2 µm). En esta investigación se muestra que en general la resistencia a compresión y la penetración del ion cloruro de las muestras elaboradas con los porcentajes de sustitución anteriormente nombrados, son superiores o iguales al del concreto sin adición. Además comentan que altos porcentajes de adición con ceniza volante más fina mejoran en menor grado las propiedades mecánicas y la durabilidad que para adiciones con cenizas más gruesa “Coarse Fly ash” [23].

Al-Dulaijan, S.U.; Muslehuddin, M.; Al-Zahrani, M.M.; Sharif, A.M.; Shameem, M., and Ibrahim, M. (2003) concluyeron que el uso de ceniza volante clase F con cemento tipo I mejora la resistencia al ataque de sulfatos. Sus ensayos incluyen morteros hechos con cemento tipo I, tipo V (V-resistente a sulfatos) y mezclas con ceniza volante expuestas a varias concentraciones de NaSO_4 . La resistencia a sulfatos fue evaluada por inspección visual determinando el deterioro del espécimen. Morteros hechos con cemento tipo I exhibieron un significativo nivel de deterioro físico, mientras que la mezclas de cemento tipo I + 20% de ceniza volante no mostraron ningún deterioro; los morteros hechos con cemento tipo V mostraron un deterioro marginal. La reducción de resistencia a compresión de los especímenes expuestos a sulfatos se nota más en los morteros de cemento tipo I; mientras que la reducción de resistencia a compresión de los especímenes con cemento tipo V y cemento tipo I + ceniza volante es muy bajo [32].

Prinya Chindaprasirt, Chai Jaturapitakkul Y Theerawat Sinsiri (2005) investigaron el efecto de la ceniza volante con dos tamaños diferentes de partícula en las propiedades de compresión y tamaño de poro en pastas de cemento adicionadas con esta ceniza, en sustituciones del 0%, 20% y 40%. Estos investigadores comentan que la ceniza con un tamaño de partícula de $19,1\mu\text{m}$ y que son esféricas, llenan los espacios vacíos e incrementan la densidad de la microestructura, al igual que la ceniza con un tamaño de partícula más pequeña ($6,4\mu\text{m}$); sin embargo, la ceniza más fina tiene un área superficial mucho más grande, lo que incrementa la reacción puzolánica a temprana edad y hace que la estructura de las pastas de cemento con esta adición sean más homogéneas y densas resultando en mejores incrementos en la resistencia a compresión de las muestras elaboradas con ceniza volante más fina. En este trabajo también se demostró que la porosidad total incrementa con la incorporación de ceniza volante y con el porcentaje de adición, pero que a mayor edad de curado esta porosidad total disminuye. Finalmente concluyen que las pastas de cemento que contienen ceniza volante con un tamaño de partícula de $6,4\mu\text{m}$ incrementan significativamente la resistencia a compresión y disminuyen la porosidad total [24].

Pedro L. Valdez, Alejandro Durán, Jorge M. Rivera, César A. Juárez (2007) estudiaron la producción de Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante. La investigación fue diseñada para estudiar dos series de concreto con consumos constantes de CP, 100 kg/m^3 para la serie A y 150 kg/m^3 para la serie B. Para cada serie estudiaron seis mezclas de concreto, una mezcla de referencia y cinco mezclas con adiciones de 30, 60, 90, 120 y 150% de CV en relación a la masa de CP. Concluyeron que es posible producir concretos de alta resistencia mecánica a la compresión con AVCV y con contenidos bajos de cemento Pórtland, siendo necesario el uso de aditivo superfluidificante y que las bajas relaciones agua/cementante permiten reducir la retracción por secado y la resistencia a la abrasión en concretos fluidos con AVCV. Consideran que los resultados obtenidos fortalecen los argumentos técnicos y ecológicos para seguir promoviendo el uso de concretos con altos volúmenes de ceniza volante [19].

Omar I. Molina (2008) en su tesis doctoral estudió la influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Pórtland en la durabilidad del hormigón. Investigó la influencia de dos contenidos de cemento: 250 y 350 kg por m³ de hormigón, empleando dos cementos de igual designación pero distinto origen y distintos contenidos de ceniza en todos los casos. Para este fin preparó probetas de hormigón a las que les examinó los mecanismos de transporte a través del hormigón, las propiedades mecánicas y las características físico-químicas. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la incorporación de cenizas como sustituto parcial del cemento Pórtland varía el comportamiento del hormigón en función de las características físicas y químicas de los cementos empleados. Concluyó que las cenizas volantes, empleadas adecuadamente, constituyen una adición activa que puede mejorar las propiedades durables y mecánicas de los hormigones en la mayoría de los casos. Sin embargo, el empleo de la ceniza volante, sin estudiar los efectos de la misma en el cemento que reemplaza, puede ocasionar comportamientos inesperados y adversos en el hormigón. Molina encontró que la resistencia a la penetración del ión cloruro está influenciada por la dosis de cenizas volantes utilizada, afirma que aun con dosis de sustitución altas se mejora considerablemente la resistencia del hormigón [4].

P.L. Valdez-Tamez, A. Durán-Herrera, G. Fajardo-San Miguel, C.A. Juárez-Alvarado (2009) evaluaron la Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Pórtland y ceniza volante. Ellos fabricaron especímenes cilíndricos de mortero para cuatro relaciones A/C. Los morteros con y sin ceniza volante los sometieron a un proceso acelerado de carbonatación. De este estudio concluyeron que al remplazar el 25% del CPO por CV tipo "F" en la producción de morteros curados de forma estándar por 28 días, la resistencia mecánica a la compresión es similar a los morteros sin ceniza. Los morteros con ceniza manifiestan un incremento en la porosidad total para las cuatro relaciones A/C con relación a los morteros sin ceniza, especialmente aquellos con alta relación A/C. Encontraron que los morteros con y sin ceniza presentan coeficientes de permeabilidad al agua del mismo orden de magnitud. En los morteros con y sin CV, el efecto de la carbonatación produjo una reducción en la porosidad total. La disminución de alcalinidad debido a la carbonatación es menor en los morteros que contienen ceniza volante, comparados con aquellos que no contienen ceniza. Basados en el conjunto de resultados obtenidos a los 28 días de curado, finalizan concluyendo que el uso de este tipo de puzolanas requiere un mayor tiempo de reactividad para lograr desarrollar al máximo su actividad puzolánica [20].

El colombiano José Gómez en sus memorias de la Conferencia Durabilidad del Concreto (2010) plantea que el uso de altos contenidos de ceniza volante, especialmente a edades mayores, aumenta la profundidad de carbonatación del concreto, comenta que el principal factor que hace que una ceniza volante aumente o disminuya la resistencia del cemento al ataque de sulfatos es su contenido de óxido de calcio y la composición del aluminato de calcio en la fase amorfa de la ceniza [11]. El mismo autor en otro documento [21] publicado en 2010, cita Investigaciones realizadas sobre tuberías de concreto hechas con cemento adicionado con altos porcentajes de ceniza volante entre 30 y 50% donde

han demostrado que las tuberías que contienen ceniza son del orden de 5 veces más impermeables que aquellas hechas con cemento sin adiciones.

Algunos investigadores mencionan que las cenizas volantes con bajo contenido de calcio mejoran la resistencia del hormigón a las aguas sulfatadas y que las que tienen alto contenido de calcio la disminuyen, mientras que otros mencionan que más que el calcio, es la alúmina reactiva aportada por la ceniza volante la que controla la presencia de minerales altamente sensibles al ataque de los sulfatos.

Estudios hechos por Haque y citados por Gómez J. demostraron que proporcionando un curado adecuado durante 7 días las resistencias alcanzadas por hormigones hechos con cementos adicionados con ceniza volante son sensiblemente mayores que las alcanzados por hormigones con cementos sin ninguna adición. Para este estudio se realizaron mezclas al 100% de cemento y otras adicionadas con 30% de ceniza volante, se realizaron cilindros de 10x20 cm para ensayos de compresión y 15x30 cm para la prueba de penetración de agua, se curaron en ambientes diferentes. De los resultados obtenidos se destaca que en los hormigones sin curado previo hay importantes pérdidas de resistencia respecto a la testigo, en ambientes de curado WD (Régimen caliente seco: Cámara a 45°C y humedad relativa 20%) y WW (Régimen caliente húmedo: Tanque de agua a 45°C) con diferencias más notorias a edades tempranas y más fuertes en hormigones adicionados con ceniza volante. Los efectos en el hormigón con curado previo (7 y 28 días en ambiente de curado) resultan evidentes, el hormigón hecho con cemento adicionado muestra mayores diferencias pero no tan drásticas como en el caso que no existía curado previo (0 días en ambiente de curado) [21].

Todos estos estudios demuestran que las cenizas volantes son una materia prima con enormes ventajas en la industria de la construcción y una excelente solución para evitar que este desecho continúe contaminando el medio ambiente, razón por la cual su estudio como material de adición merece considerable atención.

3.1. SELECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Para realizar las diferentes mezclas se utilizó: agua potable, cemento Portland tipo I conforme a la norma ASTM C150 y CV tipo “F” conforme a lo descrito en ASTM C618, la cual es producida por una industria de la región.

3.1.1. Cemento

En esta investigación se utilizó cemento gris Argos portland tipo I, el cual es de uso general; es decir, que podemos estudiar el efecto que tiene la adición de ceniza volante en las reacciones de hidratación y propiedades de durabilidad.

3.1.2. Ceniza Volante

Como materia prima de adición se utilizó Ceniza Volante producida en una empresa papelera de la región, para su caracterización se utilizó las siguientes técnicas:

- Granulometría Laser
- Perdida al Fuego
- Análisis Químico

3.1.3. Agua

El agua empleada para la realización de las pastas se obtuvo del suministro de agua potable. Para determinar la relación agua/cemento de cada una de las mezclas, se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM C187, la cual permite identificar la cantidad de agua necesaria para una plasticidad específica de la pasta.

3.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.2.1. Diseño de mezcla

El programa experimental fue diseñado para estudiar cinco mezclas de pasta, una mezcla de referencia y cuatro mezclas con adiciones de 15, 30, 45 y 60% de CV, porcentaje en masa del cemento. Se empleó la siguiente nomenclatura para identificar cada una de las cinco mezclas: R, CV15, CV30, CV45, CV60. Las

muestras fueron identificadas por letras y números, la letra R indica que ésta es la mezcla de referencia, en las otras mezclas, CV indica que la ceniza volante fue añadida, y el número representa el porcentaje de CV añadida, partiendo de 15 hasta 60%. (Tabla II).

Tabla II: Nomenclatura empleada para las diferentes mezclas.

Material cementante	Adición de Ceniza Volante	Nomenclatura Empleada
Cemento	0%	R
	15%	CV15
	30%	CV30
	45%	CV45
	60%	CV60

3.2.2. Preparación de las mezclas

Para realizar las mezclas de las pastas de cemento adicionadas con ceniza volante se utilizó una mezcladora de contracorriente con tambor giratorio a una velocidad de 46 rpm y paletas interiores que giran a una velocidad de 425 rpm.

Las mezclas fueron producidas de la siguiente forma: En un recipiente se mezcló el cemento portland con cada una de las adiciones de ceniza volante, hasta formar una mezcla homogénea; se agregó primero el agua a la mezcladora, después se agregó la respectiva mezcla de cemento adicionado, se dejó por 15 segundos y se procedió a mezclar por 30 segundos a velocidad lenta. Luego, se apagó la mezcladora y se procedió a raspar con las manos las paredes de la mezcladora durante 15 segundos, seguidamente se encendió la mezcladora a velocidad rápida durante 60 segundos, finalizando de esta manera el proceso de mezclado.

3.2.3. Consistencia normal

La consistencia normal se determinó según la norma ASTM C187-98, la cual permite identificar la cantidad de agua necesaria para una plasticidad específica de la pasta. El procedimiento se realizó calculando la cantidad de agua a ensayo y error para una cantidad de muestra determinada hasta que la sonda de diámetro de 10mm del aparato Vicat, penetre en la pasta 10 ± 1 mm (Figura 1a), luego se utilizó la ecuación:

$$\% \text{ CN} = \frac{W_w}{W_c} \times 100 \quad (1)$$

Dónde:

% CN = Porcentaje de humedad del cemento en consistencia normal

Ww = Peso del agua en g. Con la que se consiguió la penetración de la sonda en la pasta entre los rangos 10 ± 1 mm.

Wc = Peso del cemento en g.

3.2.4. Tiempos de Fraguado

El tiempo de fraguado se realizó de acuerdo a la norma ASTM C191, este procedimiento consiste en conocer el tiempo inicial de fraguado (TIF) que indica el momento en que la muestra comienza a perder plasticidad y se da cuando una aguja de diámetro 1mm del aparato Vicat, penetra 25 mm en la pasta, y el tiempo final de fraguado (TFF) que indica el momento en que la muestra comienza a ganar resistencias y se da cuando la misma aguja deja de penetrar en la pasta, los dos intervalos de tiempo se consideran desde el momento en que se le adiciona agua a la muestra seca (Figura 1b).

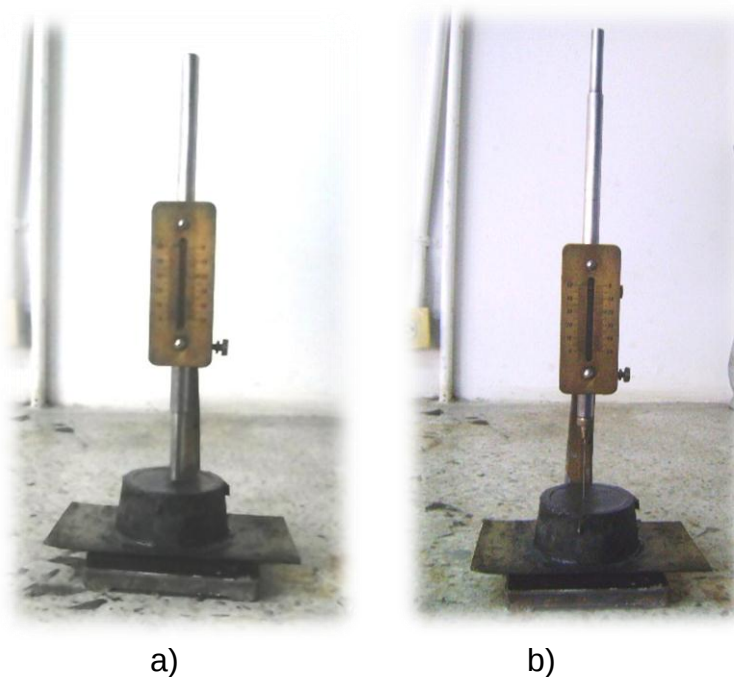


Fig. 1. a) Consistencia Normal, b) Tiempos de fraguado

3.2.5. Tipos de Muestras

Se produjeron especímenes cilíndricos de pasta para determinar la resistencia a la compresión, Absorción y porosidad, resistencia a sulfatos y Permeabilidad a cloruros. (Tabla III).

Tabla III. Tipo de Muestras para cada ensayo a realizar.

FORMA	DIMENSIÓN	ENSAYO	
Cilindros	2.97 cm x 6 cm	Absorción y Porosidad	
		Resistencia a compresión	Curado Normal
			Curado Térmico
			Sulfatos
			NaCl
	5 cm x 7.62 cm	Resistencia a Sulfatos	
		Permeabilidad a Cloruros	

3.2.6. Resistencia a la Compresión

Para determinar la resistencia a la compresión de la pasta, se fabricaron tres especímenes cilíndricos por cada mezcla y para cada edad establecida, con dimensiones reales de 2,97 cm de diámetro y 6 cm de altura. Este ensayo se llevó a cabo bajo la norma ASTM C 109 en la prensa ubicada en el laboratorio de cementos de la Escuela de Ingeniería de Materiales (Figura 2).



Fig.2. Ensayo de resistencia a compresión.

3.2.6.1. Resistencia a la Compresión - Curado Normal

Los cilindros se mantuvieron por 24 horas en HR del 60%, luego se desmoldaron y se sumergieron en un tanque a HR del 100% donde se curaron a 7, 28, 60, 90 días para realizar pruebas de compresión respectivamente a cada edad de curado.

3.2.6.2. Resistencia a la Compresión - Curado Térmico

Se fabricaron tres probetas por cada mezcla, se realizó un curado térmico entre 60 y 70°C durante 24 horas luego de 27 días de curado normal y se comparó los resultados de compresión con las probetas a 28 días de curado normal.

3.2.6.3. Resistencia a la Compresión de Muestras inmersas en NaCl

Luego de haber cumplido 28 días de curado normal se sumergieron 3 cilindros por cada adición (R, CV15, CV30, CV45, CV60) en un recipiente con sal común (NaCl) al 3,5% con el fin de realizar pruebas de resistencia mecánica a los 90 días.

3.2.6. 4. Resistencia a la Compresión de Muestras inmersas en Sulfatos

De igual manera se sumergieron 3 muestras por cada adición en solución de sulfatos luego de haber cumplido 28 días de curado normal, para medir su resistencia a compresión a los 60 y 90 días.

3.2.7. Ensayos de Durabilidad

3.2.7.1. Ensayo de Absorción y Porosidad

Para llevar a cabo el estudio de absorción y porosidad se siguió el procedimiento especificado en la norma ASTM C642. Se realizaron tres especímenes cilíndricos por cada adición (R, CV15, CV30, CV45, CV60) de 2,97cm x 6 cm. El ensayo se realizó luego de un curado normal de las probetas a 28 días.

3.2.7.2. Ensayo de Permeabilidad a Cloruros

El ensayo de permeabilidad a cloruros cubre la determinación de la conductividad eléctrica proporcionando una rápida indicación de la resistencia a la penetración del ion cloruro. Para el presente estudio se realizó un cilindro por cada mezcla (R, CV15, CV30, CV45, CV60) de 6 pulgadas de alto por 3 pulgadas de diámetro, a los 60 días de curado normal se cortaron 2 rodajas de cada cilindro de 5 cm x 7,62 cm, se realizó el ensayo con base en la norma ASTM C1202. (Figura 3), en el equipo Rapid Chloride permeability test de German Instruments del GMC ubicado en el laboratorio de Control Químico de la Escuela de Ingeniería de Materiales; cada prueba se hizo por duplicado para cada mezcla.



a)



b)

Fig.3. a) muestras ensayadas, b) Montaje del Ensayo de Permeabilidad a Cloruros ASTM C 1202

3.2.7.3. Sulfatos (ASTM C1012)

Con el fin de estudiar la durabilidad de las pastas de cemento adicionadas con ceniza volante se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM C1012. Para este ensayo se fabricaron 9 especímenes por cada una de las cinco mezclas (R, CV15, CV30, CV45 y CV60). Se preparó la solución de sulfato de sodio (NaSO_4) a una concentración de 50g/l, y se mantuvo un pH controlado (6-8), de acuerdo a la norma anteriormente mencionada.

Luego de que los cilindros cumplieran 28 días de curado normal (100% HR) y pasaron 24 horas de haber preparado la solución de NaSO_4 , se sumergieron los 45 especímenes en el recipiente con sulfatos. Se realizaron pruebas de resistencia a 60 y 90 días (3 cilindros por cada adición y edad respectivamente) como se mencionó en el literal 3.2.6. 4.

3.2.7.3.1. Ensayo de expansión.

A los cilindros restantes (3 cilindros) se les hizo un seguimiento de expansión en función del tiempo de acuerdo a la norma ASTM C1012. Usando un calibrador digital se midió el diámetro en la cara superior en varias direcciones cada 15 días a partir de la inmersión de las muestras. Durante todo el ensayo se hizo control de pH cada 15 días.

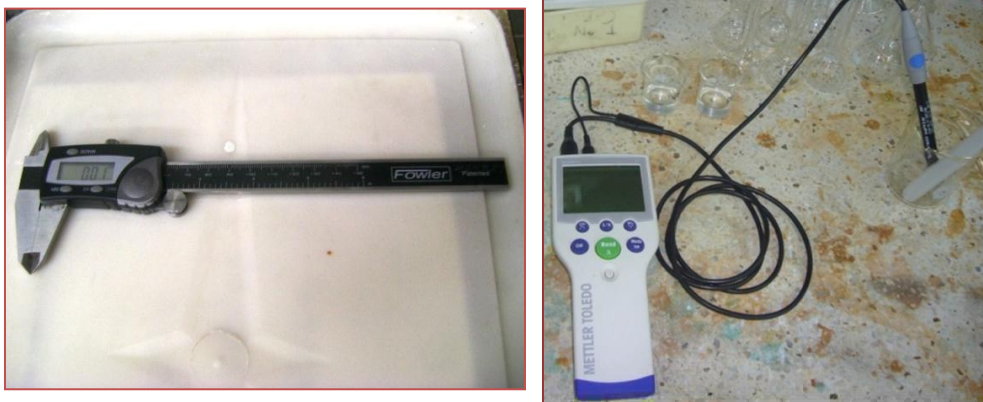


Fig.4. Equipos empleados en el ensayo de expansión: a) Calibrador digital y b) Peachímetro.

3.2.7.3.2. Inspección Visual.

Se llevó a cabo la inspección visual del proceso de degradación de las muestras expuestas a soluciones de Sulfato de Sodio (NaSO_4), de este ensayo se tiene como evidencia el archivo fotográfico correspondiente a cada una de las fechas en que se tomaron las mediciones de expansión.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Esta etapa de caracterización consistió en conocer química, mineralógica y físicamente la ceniza volante utilizada en las diferentes mezclas.

4.1.1. Análisis Fisicoquímico

Mediante el ensayo de pérdida al fuego, fue posible calcular el porcentaje de inquemados de la CV, el cual dio como resultado 16,82%; sobrepasando el valor máximo permitido por la norma ASTM C618-05 ($\leq 6\%$) para las cenizas tipo F y C. (ver Anexo 1).

4.1.2. Análisis Químico

Esta técnica de caracterización se utilizó para conocer la composición química de la ceniza volante. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. Composición química de la ceniza volante, % en masa

ANALISIS (elemento)	NORMA	RESULTADO %
Oxido de Sílice - SiO_2	ASTM C311	43,02
Oxido de Aluminio - Al_2O_3	ASTM C311	26,88
Óxido de Hierro - Fe_2O_3	UNE -80243	6,81
Oxido de Magnesio - MgO	ASTM C311	1,37
Oxido de Calcio - CaO	ASTM C311	2,94
Pérdidas por Calcinación	ASTM C311	16,82
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$		76,71

Estos resultados indican que la ceniza volante cumple satisfactoriamente con la cantidad mínima de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ establecida por la norma ASTM C618, ya que su composición química es de 76,71% contra un mínimo del 70% que establece la norma.

Respecto al porcentaje de inquemados (16,82%) es importante señalar que este alto porcentaje puede alterar la reactividad de las cenizas volantes, ya que estas partículas de carbón principalmente son no reactivas, porosas; lo que las hacen absorbentes, provocando alta demanda de agua para realizar las mezclas.

Asimismo su alto porcentaje de carbón puede disminuir la resistencia de las pastas.

4.1.3. Granulometría Laser

Por medio de esta técnica se pudo identificar el tamaño promedio de partícula de la ceniza volante (tabla V). En la figura 5 se puede observar la distribución de tamaños de partículas obtenida por granulometría laser, donde se comprueba que la distribución de las partículas es bastante amplia, en la gráfica también se evidencia que la ceniza volante contiene una cantidad alta de partículas de tamaño superior a 50 μm . Este material grueso y arenoso concuerda con el alto valor de perdida por ignición obtenido.

Tabla V. Tamaño promedio de partícula

MUESTRA	Tamaño promedio, (μm)
Ceniza volante	58,65

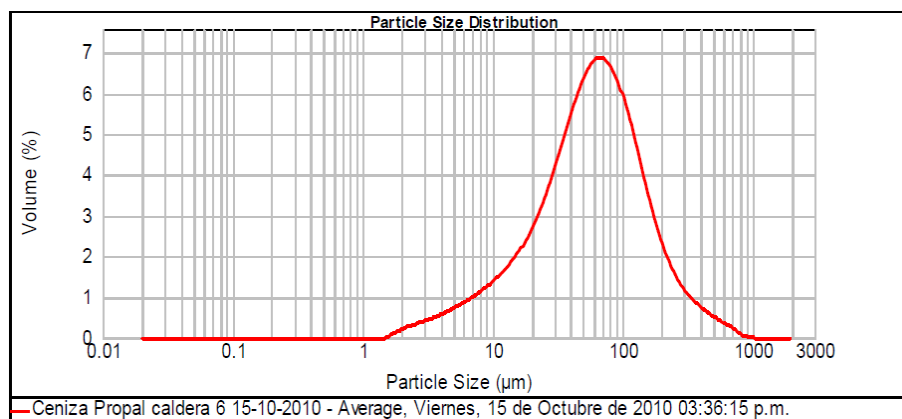


Fig. 5. Distribución de partícula de la ceniza volante. Curva obtenida por granulometría láser

4.2. CONSISTENCIA NORMAL Y TIEMPO DE FRAGUADO

Se realizaron mezclas de tanteo para encontrar la cantidad de agua necesaria. Las proporciones de todas las mezclas y las correspondientes relaciones A/C y A/(C+CV) variaron a medida que se incrementó el porcentaje de adición de ceniza volante, hasta obtener la consistencia normal. Las proporciones de todas las mezclas y las correspondientes relaciones A/C y A/(C+CV) se muestran en la tabla VI. Se concluye que al aumentar la sustitución de ceniza volante en el cemento, se necesita mayor cantidad de agua para llegar a la consistencia normal de la pasta;

esto se puede atribuir al alto nivel de inquemados en la ceniza (16,82%) (Muy superior al exigido en la norma ASTM C 618 que debe ser $\leq 6\%$).

El carbón es el principal constituyente de la pérdida por calcinación. Cuando el contenido de carbón en una ceniza es superior al 12%, se produce un aumento de la demanda de agua en la mezcla, cuando se compara con una pasta de consistencia normal, esto se debe a que la superficie específica del carbón es muy elevada [33].

Tabla VI. Proporciones de las diferentes mezclas

Ingredientes	Mezcla				
	R	CV15	CV30	CV45	CV60
cemento (g)	400	340	280	220	160
Ceniza Volante (g)	0	60	120	180	240
Agua (g)	106	125	150	178	211
A/(C+CV)	0,265	0,313	0,375	0,445	0,528

A las mismas pastas del ensayo de consistencia normal, manteniendo la relación A/(C+CV) de la tabla VI se les determinó el tiempo de fraguado inicial y final (tabla VII). La figura 6 evidencia que con el aumento en la sustitución de CV por cemento, aumentan también los tiempos de fraguado, la mezcla CV60 presentó el mayor retardo en el tiempo de fraguado final con una diferencia de 5 horas y 10 minutos con respecto a la muestra de referencia; esto significa que se retarda la reacción y así mismo el desarrollo de resistencias, se atribuye esto a la elevada cantidad de carbón no quemado que contiene la CV y con ello la cantidad de agua que se hace necesaria para mejorar la trabajabilidad de las respectivas pasta de cemento.

Tabla VII: Tiempo de fraguado (ASTM C 403)

Muestras	Tiempo de fraguado (min)	
	TIF	TFF
R	135	210
CV15	174	250
CV30	265	345
CV45	325	410
CV60	370	520

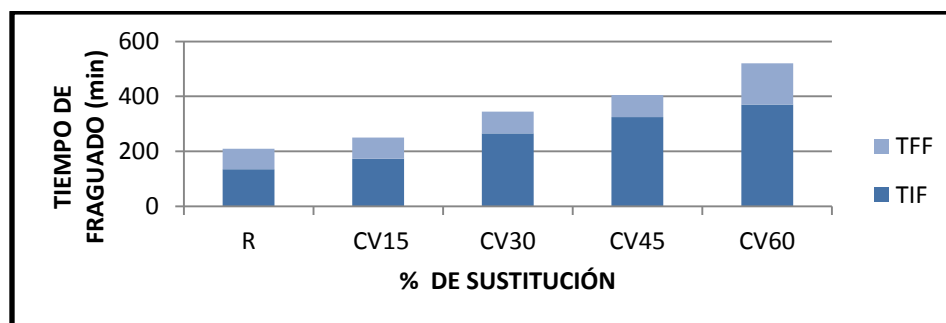


Fig. 6. Tiempos de fraguado inicial y final de las diferentes mezclas

4.3. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En este apartado del análisis se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión, evaluando así el efecto que tiene en las pastas de cemento portland la adición de altos porcentajes de ceniza volante.

4.3.1. Resistencia a la Compresión Curado Normal

En la tabla VIII y en la figura 7 se muestran los resultados del desarrollo de la resistencia mecánica a la compresión hasta una edad de 90 días de curado normal. El mayor valor de resistencia a la compresión fue obtenido para la mezcla CV15, con una resistencia de 37,19 MPa a una edad de 90 días. La mezcla con una adición de 45% de CV presentó un 59% de resistencia a la compresión menor que la resistencia obtenida en la mezcla CV15 a los 90 días de curado.

Tabla VIII. Desarrollo de resistencia a la compresión curado normal

Mezcla	Resistencia a compresión en MPa				Ganancia de resistencia %
	7 días	28 días	60 días	90 días	
R	17,36	22,81	22,93	23,14	1,45
CV15	19,81	23,60	25,61	37,19	57,58
CV30	16,06	19,58	20,39	25,36	29,52
CV45	8,76	10,63	19,65	23,39	120,04
CV60	3,16	7,83	11,95	14,25	81,99

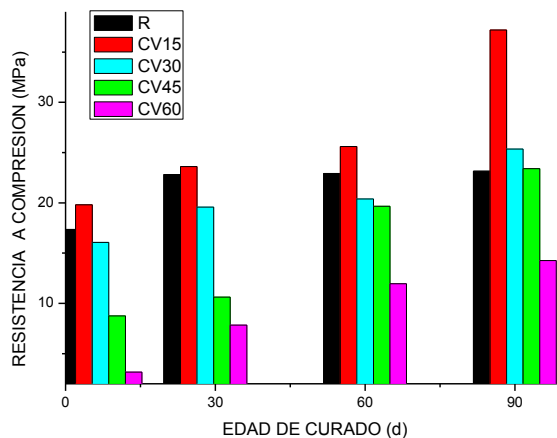


Fig. 7. Desarrollo de resistencia a la compresión curado normal

En la tabla XIII también se presenta la ganancia de resistencia a la compresión entre los 28 días de edad y las edades posteriores. La mezcla que presenta la mayor ganancia de resistencia después de 28 días de edad es aquella en la cual fue añadida un 45% de CV. En este período, la ganancia de resistencia fue de 120,04%. Lo anterior, es atribuido a la actividad puzolánica de la CV y a la actividad hidráulica remanente del cemento Pórtland. La mezcla que presentó la menor ganancia de resistencia en el mismo período fue la mezcla de referencia R. La ganancia de resistencia para estas mezclas fue de 1,45.

En la figura 7 se observa que la resistencia a la compresión de la mezcla CV45 alcanza la resistencia de la mezcla de referencia R a los 90 días de curado. Esto se debe a que el efecto de la ceniza volante en la microestructura se intensifica a mayor tiempo de curado. La precipitación de Ca(OH)_2 y gel CSH sobre la superficie de las esferas de las cenizas, puede ser un impedimento para el desarrollo de su reactividad puzolánica, sin embargo, y dependiendo del grado de alcalinidad de la fase acuosa, la parte vítrea de las cenizas se irá disolviendo, activándose así la reactividad puzolánica, Jawed y col. (1991).

Normalmente la actividad puzolánica, no comienza a estas edades cortas de la hidratación del cemento. El comienzo de dicha actividad es variable, en función de las características de la ceniza y composición del cemento empleado, como se ha explicado anteriormente. De acuerdo con investigaciones microestructurales, parece ser que el efecto de la ceniza en la microestructura, comienza después de varios días, es clara al mes, y entre 1 y 6 meses los productos de la reacción puzolánica se asemejan o incluso son más densos a los del cemento hidratado, en ese mismo período de tiempo. Como consecuencia, a edades cortas, la porosidad y contenido en fase acuosa es superior y por lo tanto, la resistencia es menor, en presencia de cenizas volantes, mientras que a edades largas, y a medida que evoluciona la actividad puzolánica, se produce un refinamiento de la estructura porosa, un aumento de densidad y resistencias mecánicas, que pueden llegar a superar a las del cemento. Es decir que una vez que la ganancia de la resistencia

mecánica del cemento Pórtland ha disminuido, la actividad puzolánica de la CV continúa desarrollándose, contribuyendo a incrementar la resistencia mecánica a edades posteriores; por lo tanto, pastas con CV que presentan resistencias bajas a edades tempranas como las mezclas CV45 y CV60, pueden presentar resistencias mecánicas mayores a edades posteriores que aquellos en los cuales no se incluya CV.

Otra causa tiene que ver con el tamaño de partícula o finura de la ceniza volante; Fraay [28], investigó las reacciones puzolánicas y sugirió que la reacción de las cenizas volantes comenzaba después de los 7 días de amasado y que en la primera semana las cenizas se comportaban como un material inerte dentro de la mezcla y Sybertz [29] observó que la finura de las cenizas aceleraba la actividad puzolánica. Estas investigaciones las realizaron con cemento portland tipo I y cinco cenizas volantes de diferente procedencia (cenizas volantes clase F). Estos investigadores concluyeron que la finura de las cenizas y no su composición química tienen un efecto significativo en la resistencia a la compresión de los morteros estudiados; donde las mezclas con cenizas más finas obtuvieron los mayores valores de resistencia a compresión que las mezclas con cenizas más gruesas [30].

4.3.2. Resistencia a la Compresión - Curado Térmico

Como ya se mencionó anteriormente, la resistencia a temprana edad del cemento adicionado con ceniza volante es demasiado baja, pero su última resistencia puede ser aún más alta que la del cemento portland normal. La baja resistencia inicial limita más o menos el uso del cemento de ceniza volante en las construcciones estructurales. El curado a vapor, puede acelerar la hidratación del cemento de ceniza volante e incrementar la resistencia de la pasta de cemento de ceniza volante con un curado subsecuente a temperatura ambiente mientras que una sobreelevación de temperatura de curado, causa pérdidas de resistencia del cemento Portland normal. De ahí que el cemento de ceniza volante sea apropiado para la producción de elementos de concreto curados a vapor [Huang Shiyuan] [27].

De la tabla IX y la figura 8 se puede inferir que la resistencia a compresión de las mezclas de cemento portland adicionadas con ceniza volante se incrementó para todas las mezclas después de un curado térmico entre 60 y 70°C durante un tiempo de 24 horas, en comparación con las muestras que se curaron a temperatura ambiente en agua (curado normal); esto se debe a que las reacciones de hidratación de la pasta de cemento se aceleran al elevar la temperatura de curado; es decir, que la reacción puzolánica se acelera, haciendo que la estructura del gel CSH se densifique y aumente la adhesión entre los granos de ceniza volante y los hidratos [27].

Tabla IX. Desarrollo de resistencia a la compresión Curado Térmico.

Mezcla	Resistencia a compresión 28 días Curado Térmico (MPa)
R	35,05
CV15	26,05
CV30	21,34
CV45	13,40
CV60	8,96

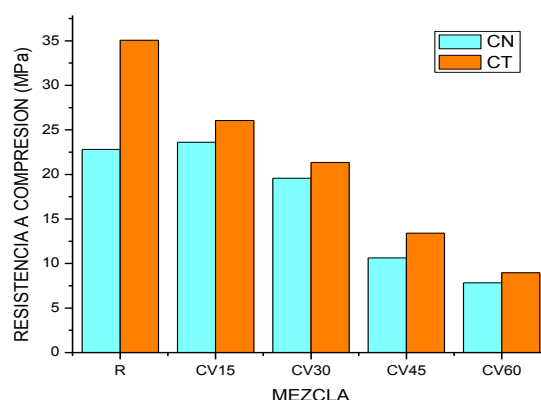


Fig. 8. Desarrollo de la resistencia a compresión a 28 días de curado normal (CN) y curado térmico (CT).

Se observa un incremento en la resistencia bastante significativo de la pasta de cemento sin adición, esto se debe a que el rango de temperatura de curado térmico a la cual se realizó el ensayo estuvo entre la temperatura óptima de curado térmico para el cemento normal sin adición (alrededor de 50°C y no mayor a 75°C).

4.3.3. Resistencia a la Compresión de Muestras inmersas en Sulfatos

En la tabla X y figura 9 se presentan los resultados obtenidos de resistencia a compresión de muestras inmersas en medio agresivo de sulfatos, se puede apreciar que hay una pérdida de resistencia para la mezcla sin adición R, como era de esperarse, ya que al haber mayores cantidades de CH (portlandita), esta al reaccionar con los iones $\text{SO}_4^{=}$ forman ettringita (ver reacción 4) ocasionando agrietamiento de la estructura, aumento de la porosidad, y con ello disminución de las resistencias. Para el cemento adicionado con ceniza volante, hay un incremento significativo de estas resistencias a mayor tiempo de exposición en el medio. Destacándose que el mayor valor de la resistencia fue para la adición del 30% de CV (37,97 MPa) a 90 días de exposición. Las adiciones del 15%, 45% y

60% de CV sigue un comportamiento de aumento de las resistencias pero en un grado menor.

Este comportamiento se asemeja a trabajos realizados anteriormente donde se explica que el incremento de las resistencias se da porque en este medio parece ser que se activa la reacción puzolánica [22] donde los productos de reacción rellenan, de forma muy eficiente los espacios capilares, provocando un refinamiento de la estructura; lo que mejora la permeabilidad y la resistencia mecánicas del sistema.

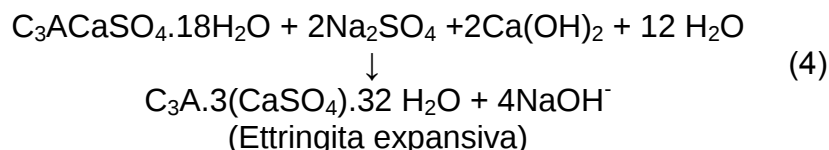


Tabla X. Desarrollo de resistencia a la compresión sulfatos y NaCl

Mezcla	Resistencia a compresión en MPa		
	60 días sulfatos	90 días sulfatos	90 días NaCl
R	22,23	20,95	20,17
CV15	31,55	34,13	33,16
CV30	30,51	37,97	28,94
CV45	28,57	29,92	22,65
CV60	12,43	16,99	18,07

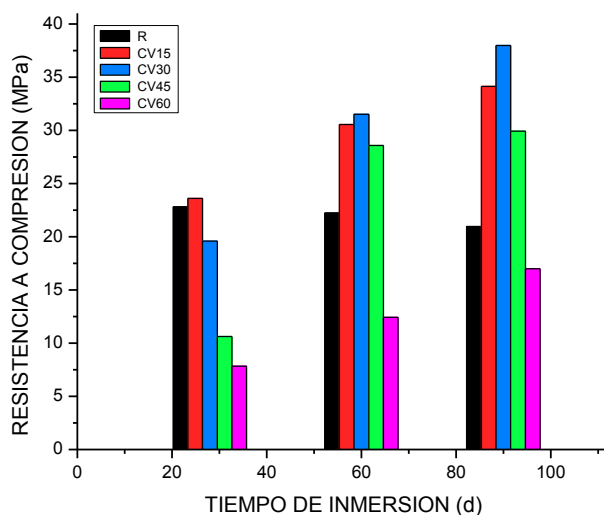


Fig. 9. Desarrollo de resistencia a compresión de muestras expuestas a sulfatos

Este comportamiento de aumento en las resistencias también se da porque las cenizas volantes, inhiben la formación de etringita “expansiva”, debido a que reducen el contenido en portlandita que se consume en la reacción puzolánica. Este factor, además de la menor permeabilidad, es la principal razón argumentada

por los autores para explicar el aumento de la durabilidad atribuida a las cenizas volantes, en los medios sulfatados y de la ganancia de resistencia en este medio [13].

4.3.4. Resistencia a la Compresión de Muestras inmersas en NaCl

De acuerdo a los resultados reportados en la tabla X y en la figura 10 que compara estos resultados se puede apreciar que la resistencia a compresión de la muestra de referencia R inmersa en medio NaCl al 3,5% disminuye en comparación con la muestra expuesta a un curado normal. Este comportamiento se presenta hasta adiciones del 15% de CV, luego de la cual hay un incremento en la resistencia para las mezclas CV30, CV45 y CV60. La mezcla con adición del 60% de ceniza volante presenta mayor ganancia de resistencia del orden de 26,81% comparada con la misma mezcla expuesta a un curado normal.

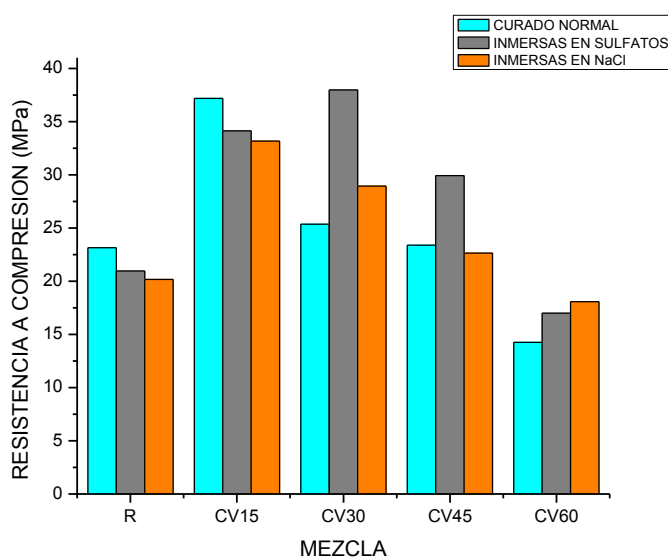


Fig.10. Desarrollo de resistencia a compresión 90 días de curado normal, muestras inmersas en sulfatos y muestras inmersas en NaCl.

3.5. ENSAYOS DE DURABILIDAD

3.5.1. Absorción y Porosidad

En la figura 11 se presentan los resultados obtenidos de absorción y porosidad, los cuales indican que hay un aumento en el porcentaje de poros permeables para las mezclas de cemento adicionadas con ceniza volante, donde la adición del 60% de CV presenta el mayor % de poros permeables (51,52) y la menor para cemento sin adición (26,09), se observa que a medida que aumenta la cantidad de CV aumenta la porosidad total del sistema, esto concuerda con reportes de otros investigadores, donde se afirma que en las pastas de cemento adicionadas con

puzolanas es mayor la porosidad total que en las pastas sin adición; sin embargo, la distribución de los poros es diferente, y permiten disminuir la permeabilidad de algunas de las mezclas adicionadas [31].

Con lo anterior se puede inferir que este ensayo no es un parámetro muy confiable para estimar la durabilidad de las pastas de cemento estudiadas.

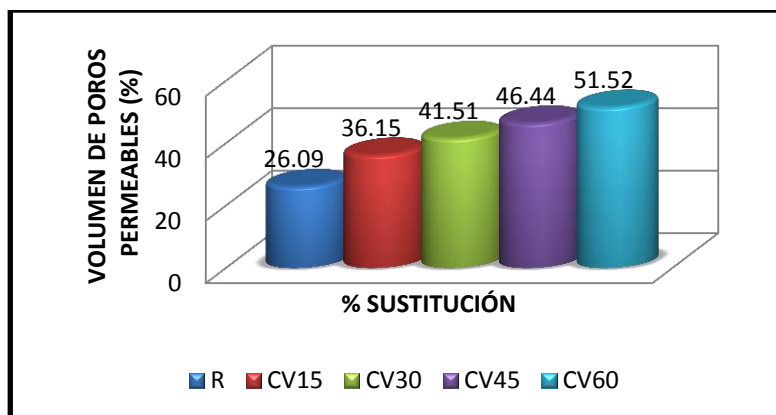


Fig.11. Absorción y porosidad de las diferentes mezclas de cemento portland con ceniza volante.

3.5.2. Permeabilidad a Cloruros

Para estudiar el desempeño de las pastas adicionadas con ceniza volante a la penetración a los cloruros, se realizó el ensayo de permeabilidad a cloruros bajo la norma ASTM C1202. Este ensayo se hizo después de 60 días de curado de las pastas. Los resultados que se obtuvieron en la experimentación se muestran en la figura 12, a partir de estos se calculó el área bajo la curva de cada una de las adiciones para determinar la carga total aplicada en cada una de ellas, los resultados obtenidos se reportan en la tabla XI y en la figura 13.

Los resultados de la carga total aplicada se interpretan según la norma ASTM C1202, sin embargo, los valores mostrados en esta corresponden a concretos; pero se puede aplicar los mismos conceptos de clasificación. La pasta sin adición y la pasta de cemento adicionada con un 15% de ceniza volante son las que presentan la permeabilidad más alta, sin embargo se puede ver que las mezclas de referencia R y las mezclas CV15, CV30 y CV45 tienen un comportamiento similar entre ellas ya que presentan un rango de carga transmitida entre 2000-4000 Culombios lo que permite clasificarlas como de moderada permeabilidad al ión cloruro. La adición del 60% de ceniza volante (CV60) presenta la más baja permeabilidad del ion cloruro.

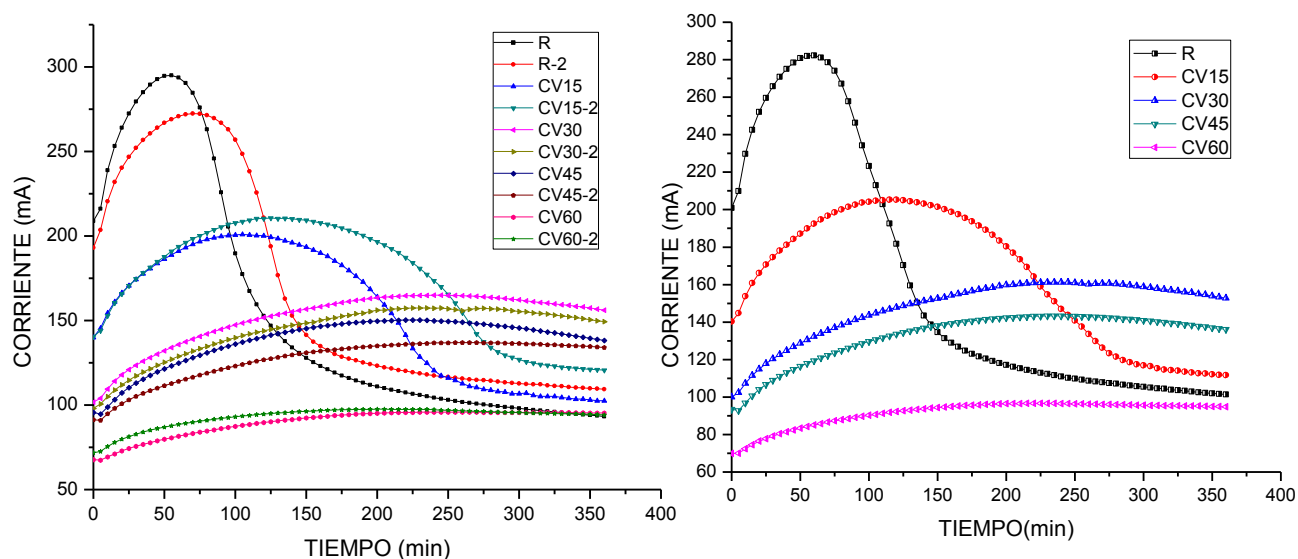


Fig.12. Ensayo de Permeabilidad a Cloruros en pastas de cemento adicionadas con Ceniza Volante.

Tabla XI. Criterios de Permeabilidad a Cloruro según Norma ASTM C1202

Mezcla	Carga (Culombios)	Carga (Culombios) promedio	Permeabilidad a Cloruro
R	3351,74-3607,47	3479,60	Moderada
CV15	3347,40-3759,02	3553,21	Moderada
CV30	3275,55-3120,89	3198,22	Moderada
CV45	2986,40-2745,81	2866,10	Moderada
CV60	1943,18-2010,81	1976,99	Baja

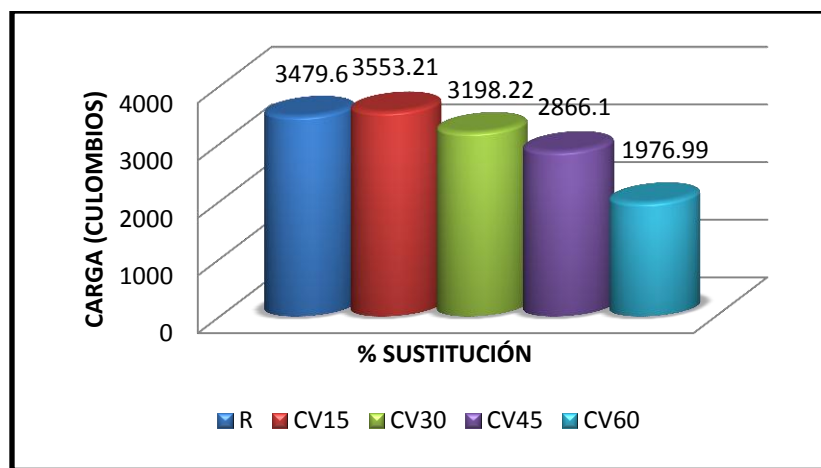


Fig.13. Carga total transmitida

Lo anterior, puede ser atribuido a que la ceniza volante hace menos permeable, desde la óptica de la permeabilidad capilar, a las pastas de cemento debido a su actividad puzolánica, por lo que los poros y conexiones intercapilares se hacen más pequeños interfiriendo en la difusión de los diferentes agentes agresivos como es el caso del ion cloruro, conllevando de esta manera a un aumento en la durabilidad. Este comportamiento concuerda con varias investigaciones hechas en concretos y morteros adicionados con cenizas volantes, donde manifiestan que al incorporar cenizas volantes parcialmente en el cemento de un concreto o mortero, se reduce de forma significativa la carga transmitida de iones cloruros en comparación con un concreto o mortero de solo cemento, es decir, que las pastas de cemento, los concretos y morteros adicionados con ceniza volante son menos permeables a agentes agresivos. Este comportamiento se muestra en la figura 13 donde se comprobó que a medida que el porcentaje de ceniza adicionado aumenta la carga en Culombios disminuye, disminuyendo de esta manera la permeabilidad al ion cloruro.

Algunos investigadores [Montemor M et al.2000] afirman que la ceniza volante disminuye el ingreso de iones cloruros libres hacia la estructura también por la formación de cloroaluminato (o Sal de Friedel), lo cual contribuye adicionalmente a reducir el tamaño de los poros.

3.5.3. Ensayo de expansión en presencia de sulfatos.

Este ensayo de expansión se realizó con base en la norma ASTM C1012, a muestras cilíndricas de referencia y con adiciones de ceniza volante, inmersas en una solución de Na_2SO_4 a concentración, temperatura y pH constantes. Las expansiones obtenidas durante el ensayo se expresan en porcentajes con las cuales se realizó la figura 14.

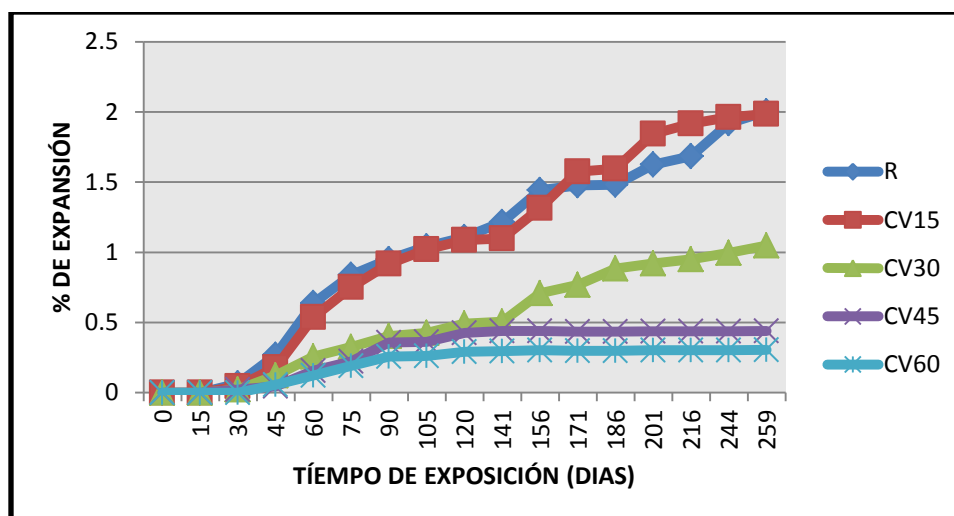
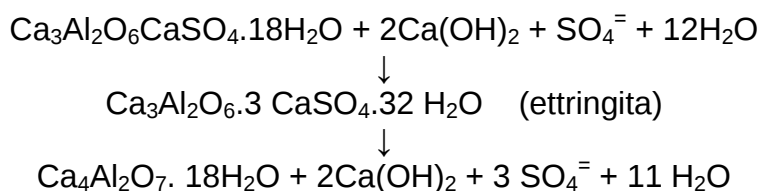


Fig.14. Porcentaje de expansión de las diferentes adiciones de CV expuestas a solución de Na_2SO_4 .

En la figura 14 se observa que las mayores expansiones se obtuvieron en la muestras de referencia R y la adición del 15% de CV (CV15) con valores de 2,002% y 1,984% respectivamente, por el contrario, las menores expansiones se obtuvieron para las adiciones de 30%, 45% y 60% de ceniza volante respectivamente, donde se puede notar que no hay un cambio dimensional apreciable en las dos últimas adiciones, obteniéndose valores máximos de 0.44% y 0.30% respectivamente. Este comportamiento se da porque hay un aumento irreversible del volumen total de la microestructura, originándose bien por cristalización de moléculas de agua, bien por formación de geles expansivos en el interior de los poros.

En el caso concreto de los iones $\text{SO}_4^{=}$ los geles expansivos que se pueden formar son la ettringita y/o yeso; siendo los componentes involucrados en su formación: iones $\text{SO}_4^{=}$, portlandita (CH), agua y las fases aluminicas del cemento, como se puede ver en la siguiente reacción:



La ettringita resultante, puede ser expansiva, produciendo tensiones internas y fisuración de la microestructura, o por el contrario, puede aportar resistencias y disminuir la permeabilidad [13]. La otra razón por la que puede atribuirse este comportamiento, es que hay un efecto de reducción de la parte aluminica, específicamente el aluminato tricalcico hidratado en la pasta de cemento, al reemplazar una cierta cantidad del cemento. Por tanto esto se debe al carácter puzolánico de la adición de ceniza volante, es decir, el consumo de CH (portlandita) y la seguida formación de un gel de CSH (silicato cálcico hidratado), como resultado de la reacción puzolánica, es decir, que esta reacción provoca un refinamiento poroso de la microestructura, que sin duda, conlleva a que las pastas de cemento adicionadas sean menos permeables y menos susceptibles a la formación de ettringita, porque el ion sulfato ($\text{SO}_4^{=}$) ya no penetrara tan fácilmente esa red de poros.

Cabe anotar que este método, ASTM C1012, recomendado tanto para cementos Portland puros como adicionados, corresponde a una técnica de ensayo de agresividad de sulfatos de carácter acelerado, al exponer las probetas de mortero a una solución de concentración de Na_2SO_4 de 50 g/l lo que equivale a 32.900 ppm de sulfato ($\text{SO}_4^{=}$) en agua, valor este que corresponde a una exposición muy severa (superior a 10.000 ppm) según los códigos [25]. Estudios realizados en morteros de cemento por otros investigadores aplicando el mismo método ASTM C1012 recomiendan límites máximos de expansión a 6 meses de 0,05% para catalogar un material como de alta resistencia a sulfatos y 0.10% para moderada resistencia [26].

3.5.4. Inspección Visual de las Mezclas

A continuación se muestra un registro fotográfico detallado donde se evidencia el proceso de degradación de las pastas de cemento adicionadas a lo largo del tiempo de exposición. Los cambios físicos de todas las muestras inmersas en una solución de sulfato de sodio (NaSO_4) a una concentración del 5%; se monitorearon desde antes de que fueran inmersas en el medio, hasta el final de la investigación.

- **0 días:** después de un curado de 28 días, las muestras se sumergieron en una solución de NaSO_4 al 5%, a temperatura ambiente y un pH controlado entre 6 y 8 (figura 15).



Fig. 15. Fotografía de las muestras a los 0 días de inmersión.

La figura 16 muestra la fotografía de control de PH realizado cada 15 días, el cual debe estar en el rango 6-8.

- **15 días:** No se observa ninguna señal de deterioro (figura 17).



Fig.16. Fotografía control de PH



Fig. 17. Registro fotográfico correspondiente a los 15 días.

- **30 y 45 días:** No se observa ninguna señal de deterioro (figura 18 y 19).



Fig. 18 y 19. Registro fotográfico correspondiente a los 30 y 45 días respectivamente.

- **60 días:** Se presenta el desmoronamiento y deterioro en la superficie de las muestras cilíndricas correspondientes a la mezcla de referencia (R) (figura 20) y pequeñas fisuras en la mezclas con el 15% de ceniza volante (CV15) (figura 21). En los cilindros con 30, 45 y 60% de CV no se observa ninguna señal de deterioro.



Fig. 20. Registro fotográfico correspondiente a los 60 días R.



Fig. 21. Registro fotográfico correspondiente a los 60 días CV15.

- **75 días:** Se presenta desmoronamiento y deterioro en la superficie de las muestras cilíndricas correspondientes a la mezcla R y fisuras más notorias en la mezcla con el 15% de ceniza volante (CV15) (figura 22). En los cilindros con 30, 45 y 60% de CV no se observa ninguna señal de deterioro (figura23).

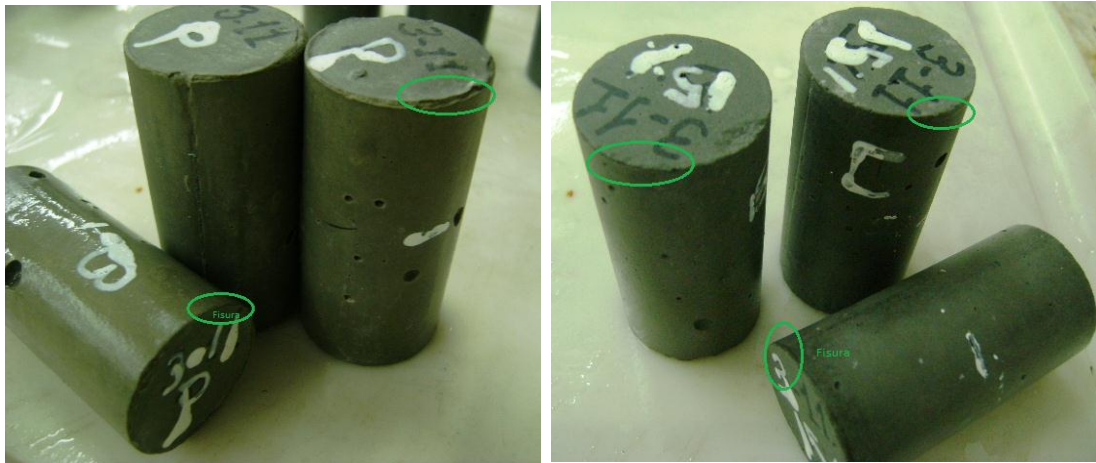


Fig. 22. Registro fotográfico correspondiente a los 75 días R y CV15 respectivamente.



Fig.23. Registro fotográfico correspondiente a los 75 días CV30, CV45 y CV60 respectivamente.

- **90 días:** Se presenta desmoronamiento y deterioro más evidente de las muestras cilíndricas correspondiente a la mezcla patrón R con la apariencia de "onion skin" o piel de cebolla (figura 24). Fisuras notorias en la mezcla con el 15% de ceniza volante (CV15) (figura 25). Aparecen leves fisuras en los cilindros correspondientes a la mezcla con 30 % de CV (figura 26). En los cilindros con 45 y 60% de CV no se observa ninguna señal de deterioro (figura 27).

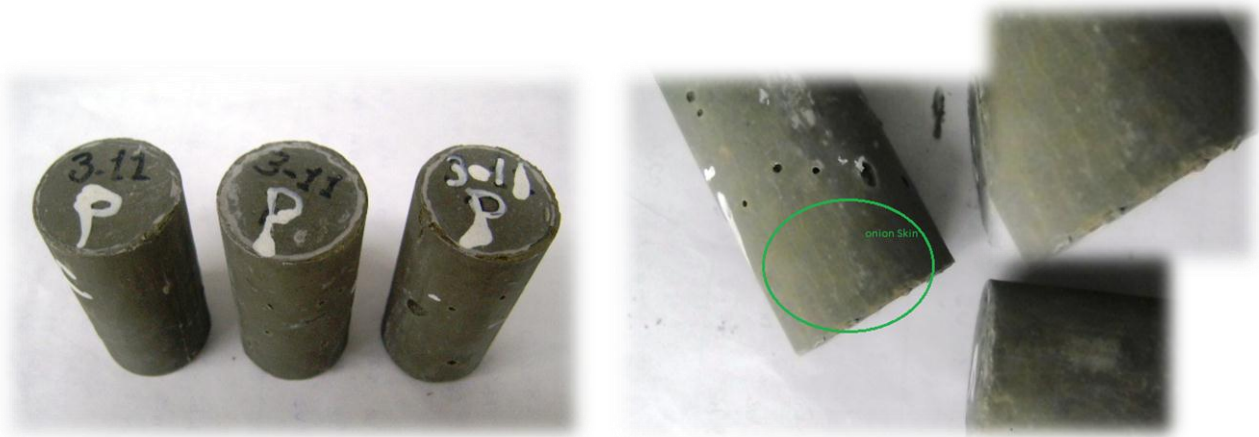


Fig. 24. Registro fotográfico correspondiente a los 90 días R.

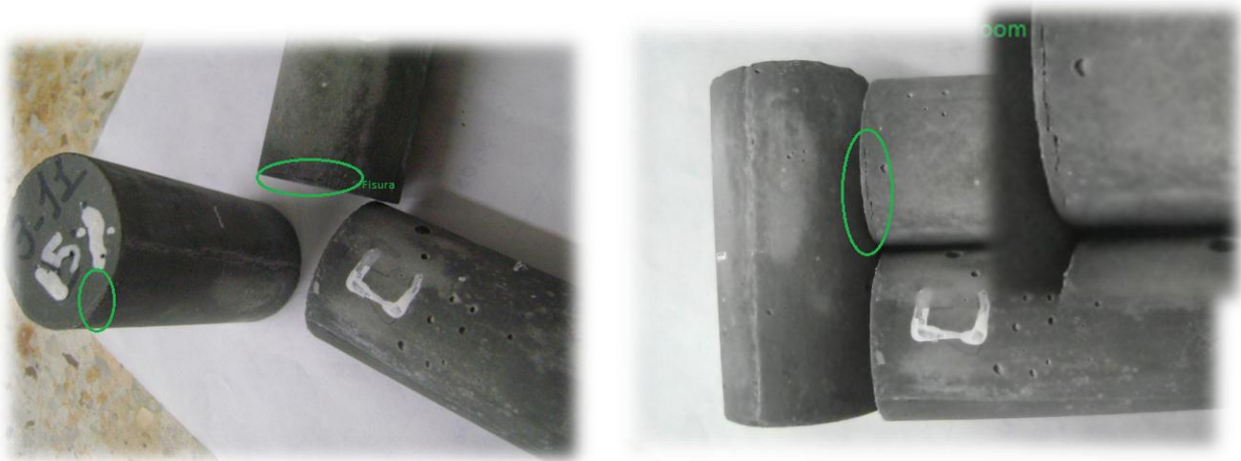


Fig. 25. Registro fotográfico correspondiente a los 90 días CV15

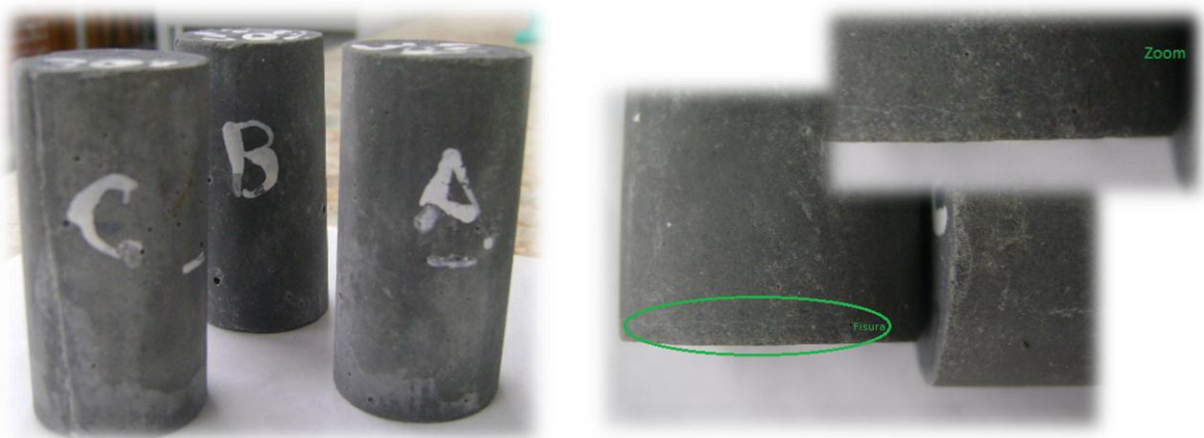


Fig. 26. Registro fotográfico correspondiente a los 90 días CV30



Fig. 27. Registro fotográfico correspondiente a los 90 días CV45 y CV60 respectivamente.

- **105 días:** el deterioro y desmoronamiento en los bordes de las muestras R es mayor (figura 28). Las fisuras son más notorias en los cilindros CV15, se evidencia con claridad la apariencia de "onion skin" y posibles fisuras en forma circular en los bordes de la cara inferior (figura 29). Los cilindros CV30 siguen igual que a los 90 días de inmersión con la diferencia que aparecen leves fisuras en los bordes de la cara inferior (figura 30). En los cilindros CV45 y CV60 no se observa ninguna señal de deterioro

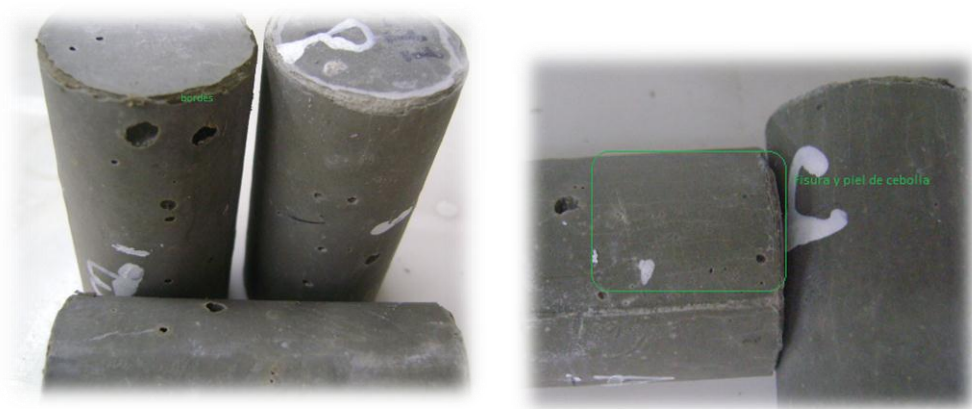


Fig. 28. Registro fotográfico correspondiente a los 105 días R.



Fig. 29. Registro fotográfico correspondiente a los 105 días CV15.



Fig. 30. Registro fotográfico correspondiente a los 105 días CV30.

- **120 días:** aumenta el desmoronamiento en los bordes de los cilindros correspondientes a las muestras R (figura 31). La apariencia de "onion skin" en los cilindros CV15 es más evidente que en los cilindros R, aumenta el tamaño de las fisuras y empieza el desmoronamiento de los bordes (figura 32). Las fisuras en los bordes de la cara inferior aumentan de tamaño en los cilindros CV30, se evidencia suave apariencia de piel de cebolla (figura 33). Los cilindros CV45 y CV60 aún no presentan señal de deterioro.



Fig. 31. Registro fotográfico correspondiente a los 120 días R.



Fig. 32. Registro fotográfico correspondiente a los 120 días CV15.



Fig. 33. Registro fotográfico correspondiente a los 120 días CV30.



Fig. 34. Registro fotográfico correspondiente a los 120 días CV45 y CV60.

- **141 días:** es bastante evidente las fisuras y el deterioro de los bordes en las muestras R (figura 35). Aumenta el desmoronamiento de los bordes y las fisuras en los cilindros CV15, se observan posibles grietas en forma de ríos que terminan en los poros de los cilindros (figura 36). En los cilindros CV30 empieza un leve desmoronamiento de los bordes, la apariencia de piel de cebolla se hace más evidente (figura 37). A los cilindros CV45 y CV60 no les pasa nada.



Fig. 35. Registro fotográfico correspondiente a los 141 días R.



Fig. 36. Registro fotográfico correspondiente a los 141 días CV15.



Fig. 37. Registro fotográfico correspondiente a los 141 días CV30.

- **171 días:** se incrementa el desmoronamiento en los bordes tanto inferior como superior de los cilindros correspondientes a las muestras R y CV15 (figura 38). En los cilindros CV30 no se observan cambios notorios con respecto a la anterior fecha (141 días). Los cilindros CV45 y CV60 siguen igual; sin señal de deterioro.



Fig. 38. Registro fotográfico correspondiente a los 171 días R, CV15 respectivamente.

- **186 días:** en los cilindros R el desmoronamiento de los bordes se hace mayor, en los cilindros CV15 incrementa el deterioro en los bordes inferiores (figura 39). Las fisuras se hacen más evidentes en los cilindros CV30 (figura 40). A los cilindros CV45 y CV60 no les pasa nada.



Fig. 39. Registro fotográfico correspondiente a los 186 días R, CV15 respectivamente.



Fig. 40. Registro fotográfico correspondiente a los 186 días CV30.

- **201 días:** en los cilindros R se hacen más notorias las posibles fisuras a lo largo de los cilindros (figura 41). Las fisuras y el desmoronamiento de los bordes aumenta en los cilindros CV15 (figura 42). En los cilindros CV30 no se observan cambios con respecto a la anterior fecha (141 días). Los cilindros CV45 y CV60 siguen sin señal de deterioro.

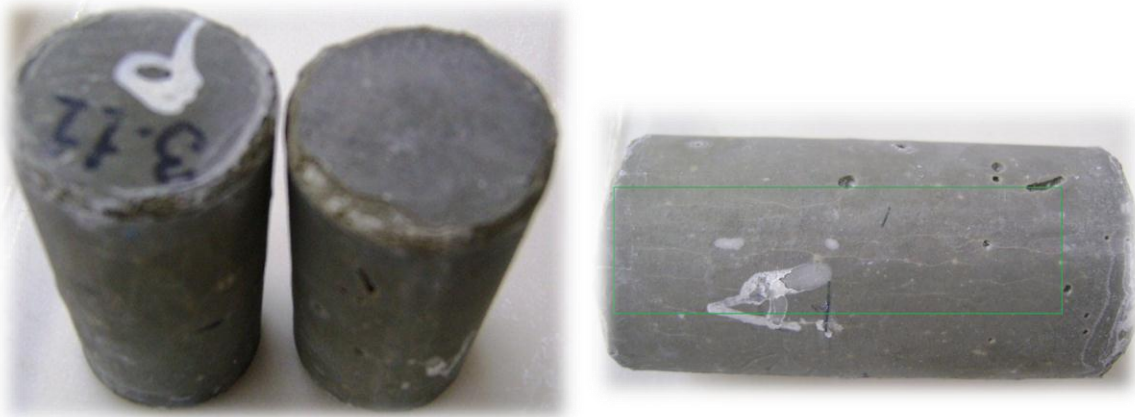


Fig. 41. Registro fotográfico correspondiente a los 201 días R.

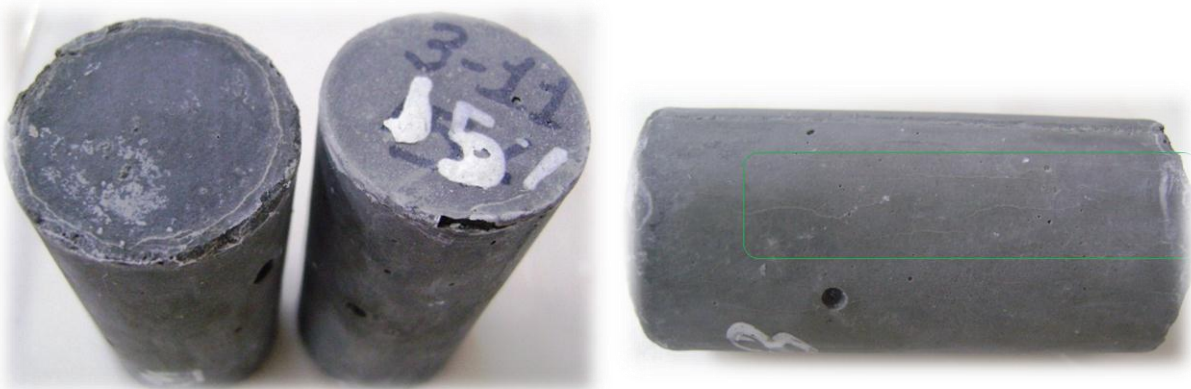


Fig. 42. Registro fotográfico correspondiente a los 201 días CV15.

- **216 días:** el desmoronamiento de los bordes aumenta en los cilindros R y CV15 (figura 43). Las fisuras aumentan de tamaño en los bordes inferiores de los cilindros CV30 (figura 44). A los cilindros CV45 y CV60 no les pasa nada.



Fig. 43. Registro fotográfico correspondiente a los 216 días R, CV15 respectivamente.



Fig. 44. Registro fotográfico correspondiente a los 216 días CV30.

- **244 días:** se observa mayor desmoronamiento y deterioro de los bordes en los cilindros R y CV15 (figura 45). En los cilindros CV30 no se observan cambios significativos con respecto a la anterior fecha. Los cilindros CV45 y CV60 siguen igual; sin señal de deterioro.



Fig. 45. Registro fotográfico correspondiente a los 244 días R, CV15 respectivamente.

- **259 días:** los bordes de la cara superior e inferior de los cilindros R se encuentran totalmente desmoronados (figura 46). En los cilindros CV15 el desmoronamiento se hace más evidente en las caras inferiores que en las superiores, las grietas en forma de ríos son más pronunciadas en los cilindros CV15 que en los cilindros patrón aunque el desmoronamiento de las caras sea menor para los especímenes CV15 (figura 47). El desmoronamiento en los bordes es muy pequeño en los cilindros CV30, las peñas grietas no han aumentado de tamaño con respecto a las anteriores fechas (figura 48). Los cilindros CV45 y CV60 hasta la fecha no presentan ninguna señal de deterioro (figura 49).



Fig. 46. Registro fotográfico correspondiente a los 259 días R

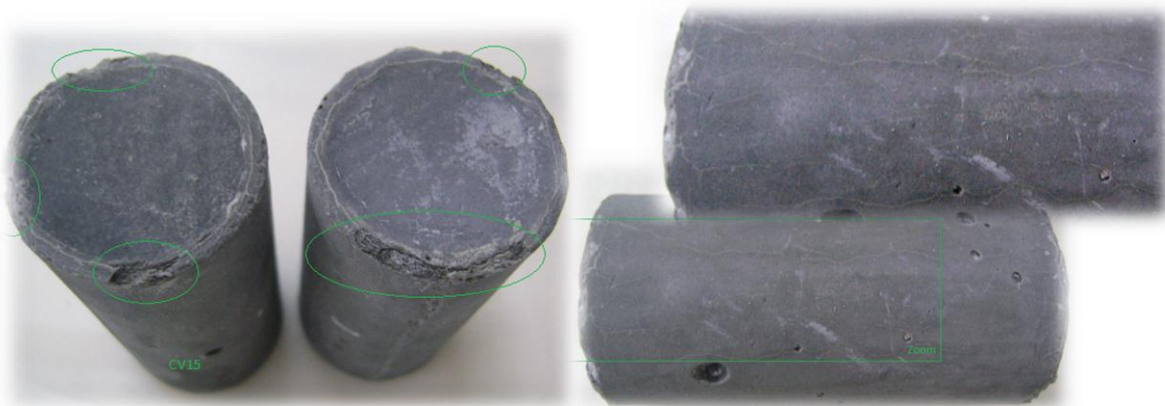


Fig. 47. Registro fotográfico correspondiente a los 259 días CV15

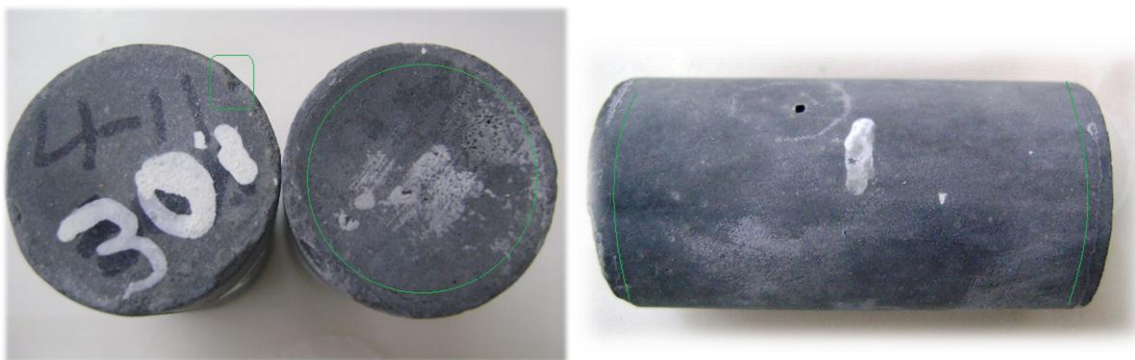


Fig. 48. Registro fotográfico correspondiente a los 259 días CV30



Fig. 49. Registro fotográfico correspondiente a los 259 días CV45 y CV60 respectivamente.

3.6. APARTADO DE CARACETRIZACION DE PRODUCTOS

3.6.1. Difracción de Rayos X (DRX)

Los resultados de la caracterización mineralógica de las muestras seleccionadas (R, CV15, CV45 y CV60) a 90 días de hidratación para curado en agua y 167 días de exposición en NaSO_4 , se muestran en las figuras 50 a la figura 57 respectivamente.

En las muestras R sin adición (figuras 50- 51) se observa la presencia de alita (C_3S) y aluminato tricálcico (C_3A) a intensidades bajas en los dos medios (agua y NaSO_4). La portlandita se hace presente a intensidades mayores en medio agresivo de sulfatos que en las muestras curadas normalmente. También se aprecia la formación de productos de reacción como etringita y yeso que se interpretan como la reacción de las partes aluminicas del cemento con los iones SO_4^{2-} del medio agresivo. Otra fase que se ve en mayor intensidad es (CC) por la el cemento portland tipo I utilizado es adicionado con carbonato de calcio.

Con la adición de ceniza volante al cemento CV15, se observa (figuras 52-53) los picos de portlandita que se muestran en menor intensidad con respecto a la pasta sin adición, debido a la reacción puzolánica de los compuestos silico-aluminicos de la ceniza volante con la portlandita del cemento que se consume durante dicha reacción, son menos intensos en sulfatos, parece ser que en este medio se activa la reacción puzolánica [13].

El ligero aumento de los picos de intensidad de la etringita (AF_1) con el aumento de ceniza volante (figuras 53, 55 y 57) correspondientes a las muestras sumergidas en NaSO_4 podría interpretarse como el resultado de la penetración del ion SO_4^{2-} , activación de la reacción puzolánica, y reacción de los geles aluminicos producto de la reacción puzolánica con los sulfatos del medio [13]; esto se ve claramente en la adición del 15% de CV.

La baja intensidad de los picos en las pasta con 45% de adición de se debe a que el cemento está en menores cantidades que la ceniza volante, esta última consume en gran cantidad la portlandita generada por la hidratación de cemento para producir nuevos geles de silicato cálcico hidratado (CSH). En la adición del 60% de CV no se evidencia la presencia de portlandita; cabe resaltar que por esta técnica de DRX no se pueden detectar el CSH debido a su carácter del gel y su pequeño tamaño.

Otra fase que se aprecia claramente con la adición de CV es el cuarzo (Q) en grandes cantidades, aumentando su intensidad a medida que aumenta el porcentaje de adición de ceniza, esto fue corroborado por la técnica de Análisis Químico que mostro un alto porcentaje de SiO_2 (42,02%). En la adición del 60% de CV se observa la presencia de mullita a intensidades bajas. En la figura 58 se presentan picos intensos de cuarzo (Q) a un ángulo $2\theta = 26,57^\circ$ y picos menos intensos de la fase Mullita (M).

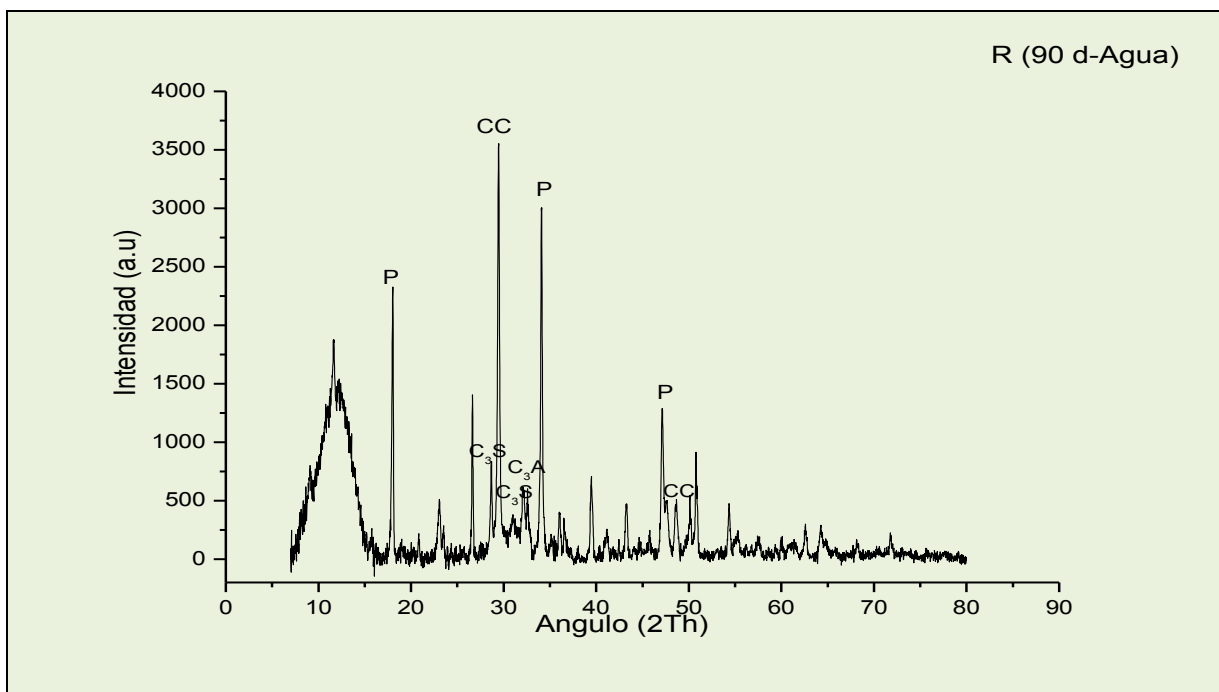


Fig.50. Difractograma de la muestra R curada en agua.

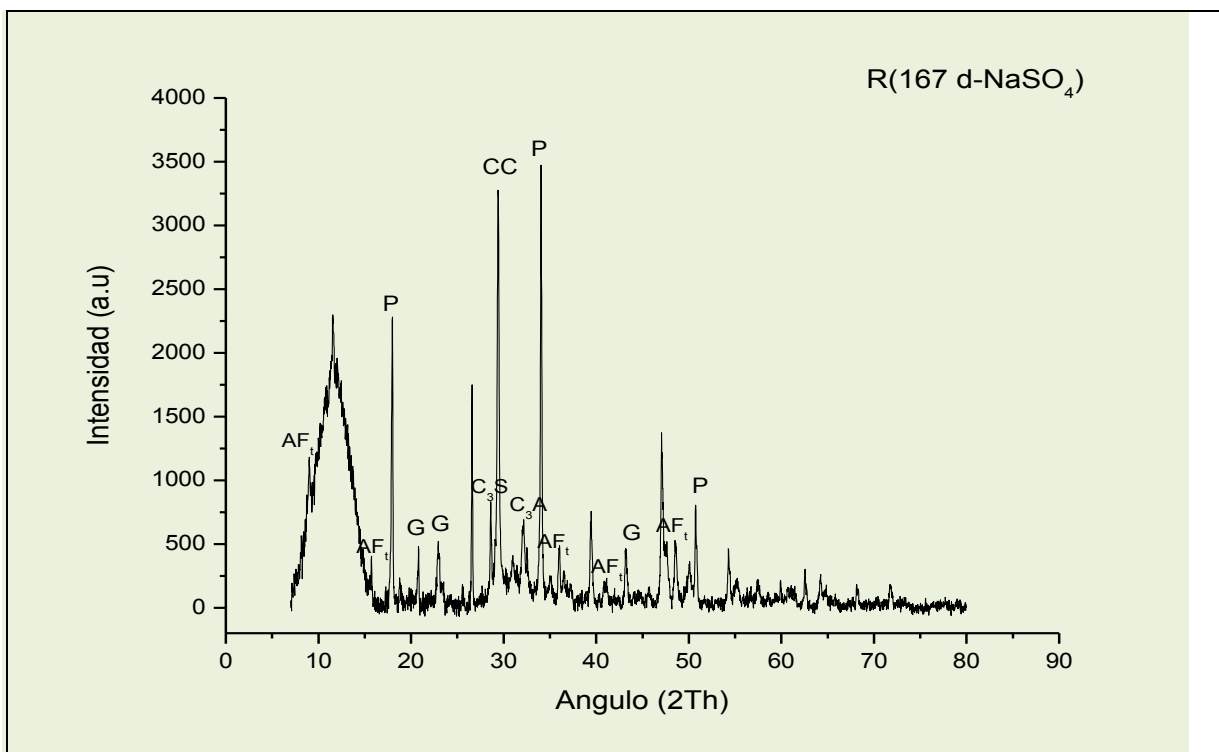


Fig.51. Difractograma de la muestra R curada en NaSO₄.

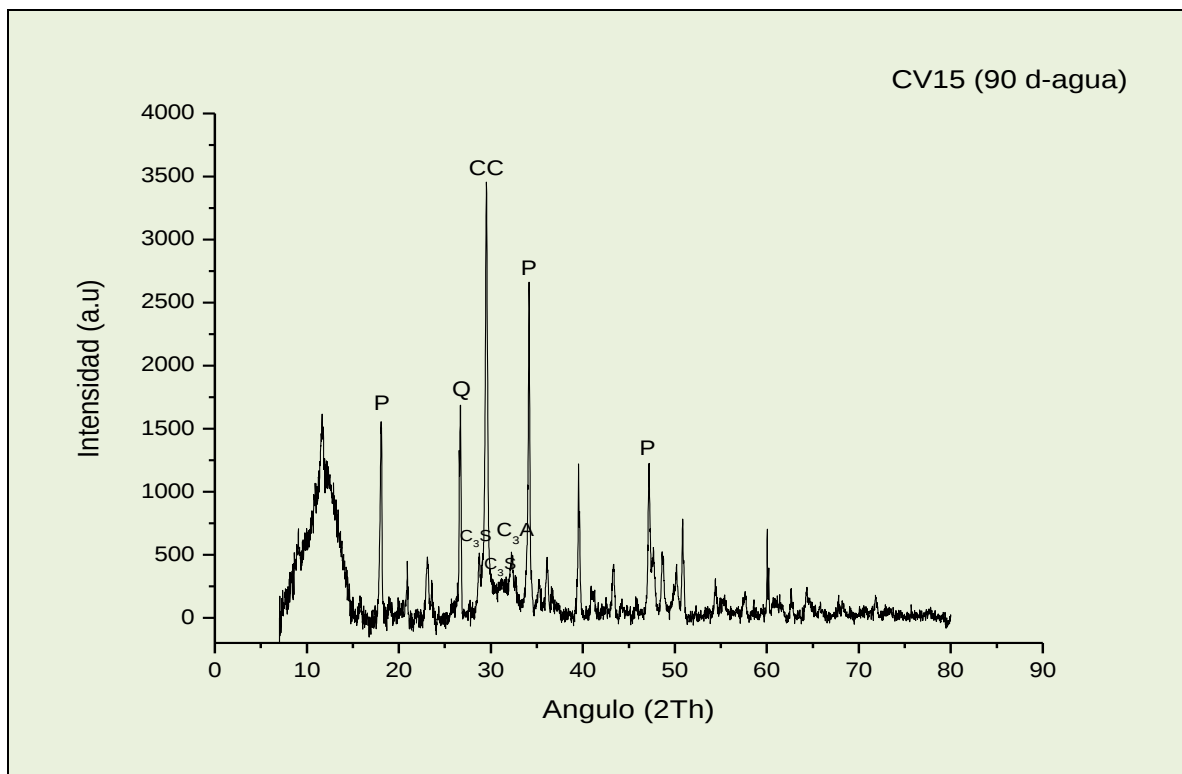


Fig.52. Difractograma de la muestra CV15 curada en agua.

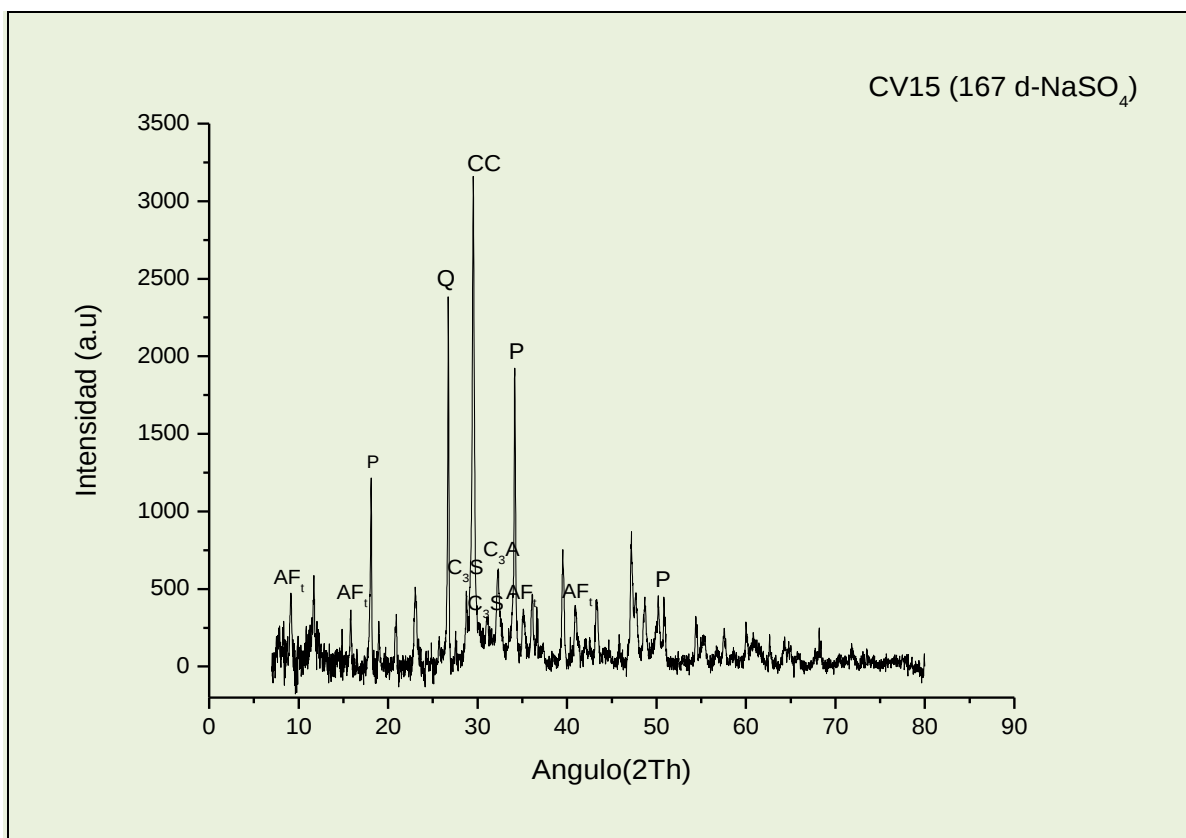


Fig.53. Difractograma de la muestra CV15 curada en NaSO₄.

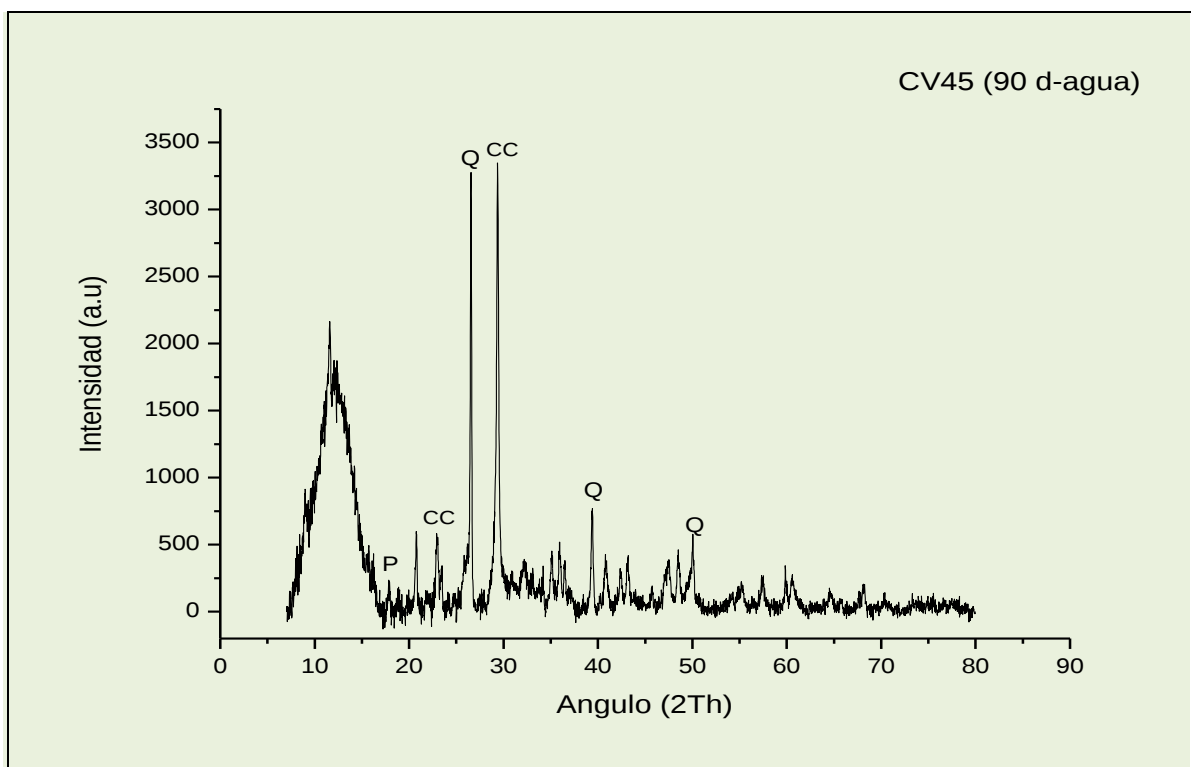


Fig.54. Difractograma de la muestra CV45 curada en agua.

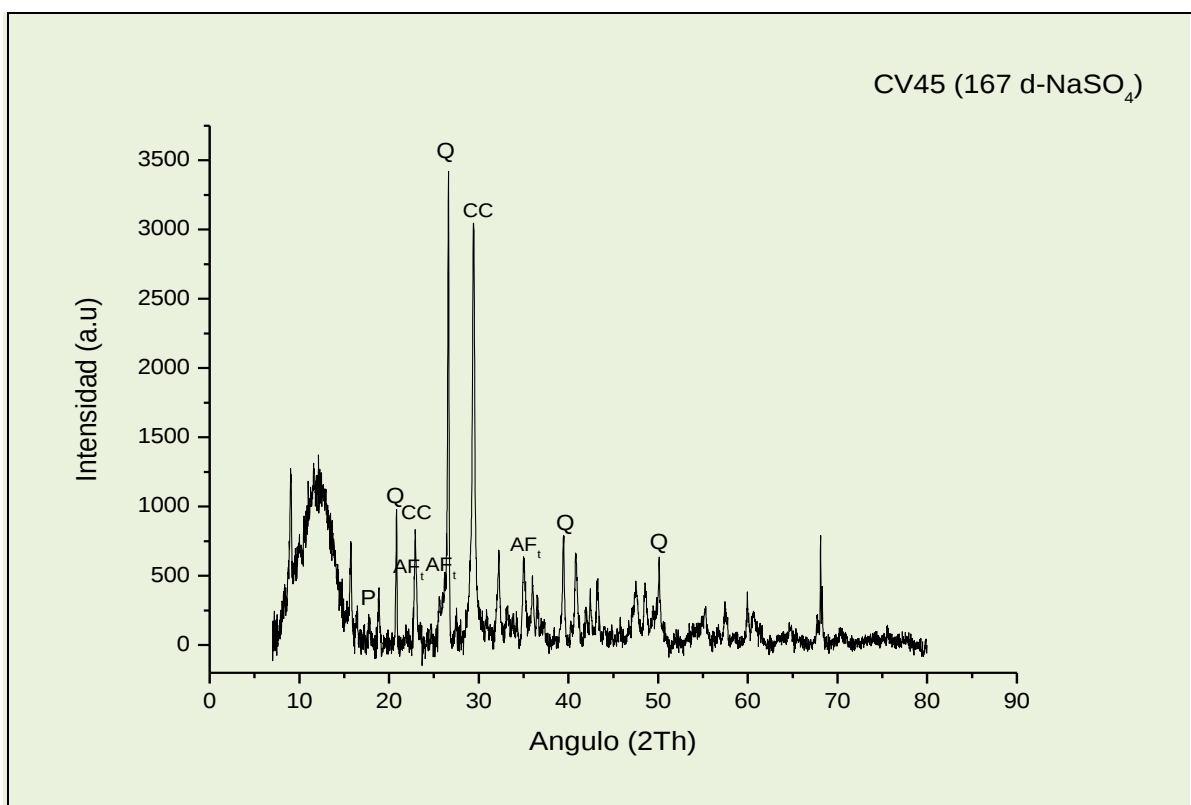


Fig.55. Difractograma de la muestra CV45 curada en NaSO_4 .

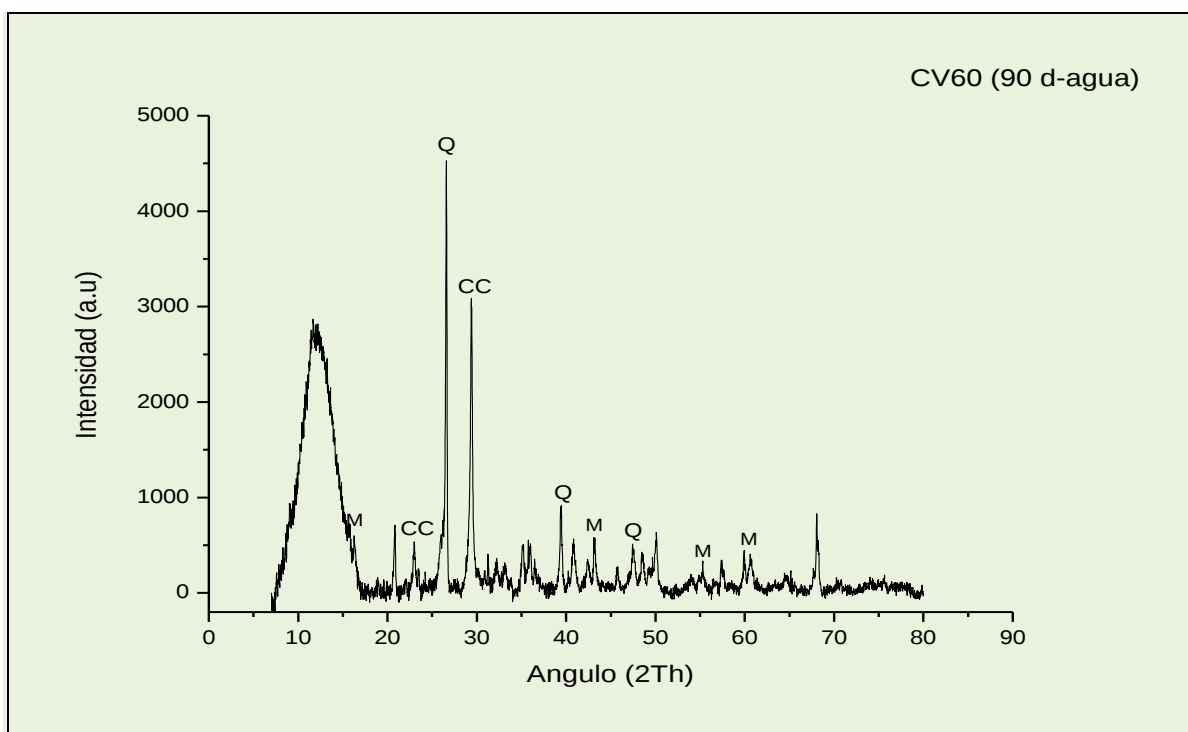


Fig.56. Difractograma de la muestra CV60 curada en agua.

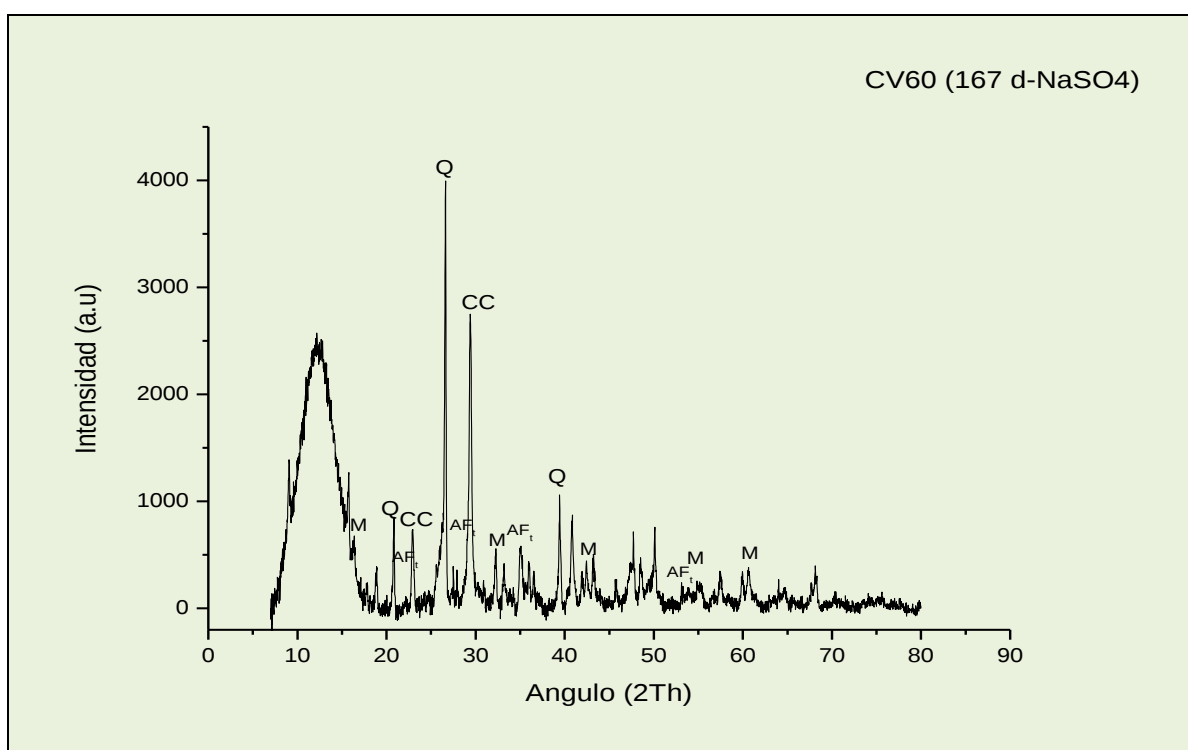
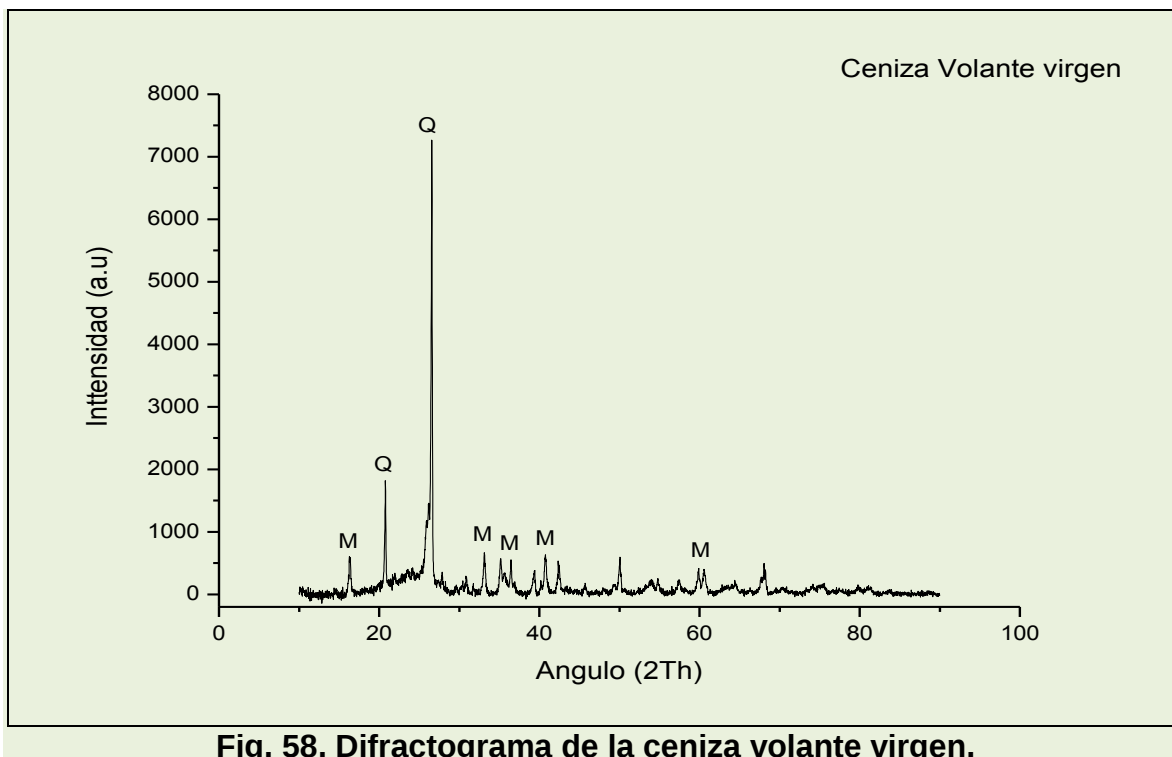


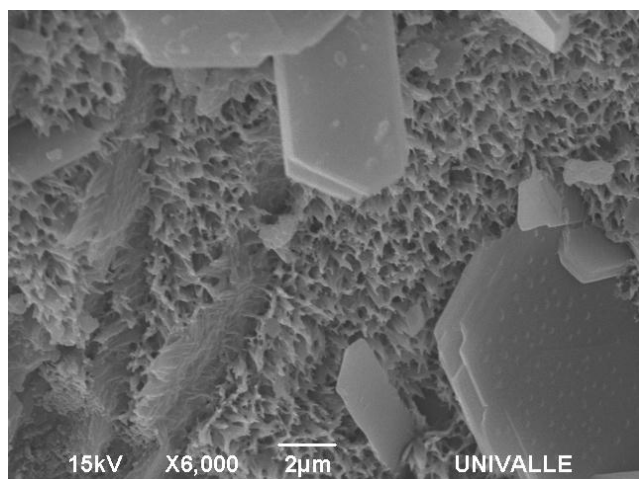
Fig.57. Difractograma de la muestra CV60 curada en NaSO₄.



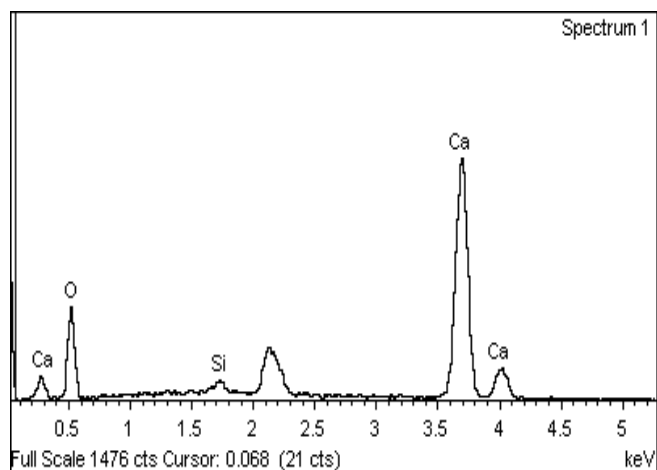
3.6.2. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y Espectrometría Dispersiva (EDS)

Mediante la técnica de SEM se realizó la caracterización morfológica de las muestras inmersas en agua a 90 días de curado y en sulfatos a 167 días de exposición. Se les realizó un análisis cualitativo de productos de hidratación y degradación a áreas específicas de cada una de las muestras por medio de la técnica EDS que permitió la identificación de los mismos.

La figura 59 correspondiente a la muestra de referencia R sumergida en agua presenta la formación de productos de hidratación tales como placas hexagonales de portlandita y productos de hidratación como geles de Silicato Cálcico hidratado (CSH), se observa una microestructura claramente homogénea creando fenómenos de polimerización [13], que se confirma por la técnica EDS; para la misma muestra sumergida en sulfatos figura 60, se observa la formación de compuestos de degradación como la etringita revelado por los resultados EDS, donde se encontró pequeñas cantidades de Aluminio, Sodio y Azufre.



a)



EDS: 57.45% O, 0.84 Si, 41.72% Ca.

b)

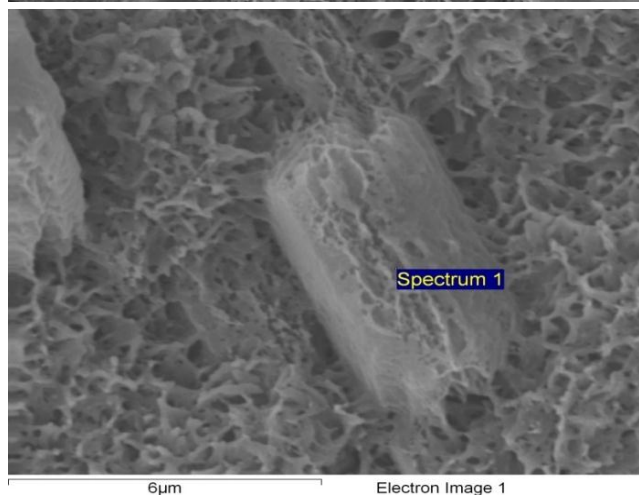
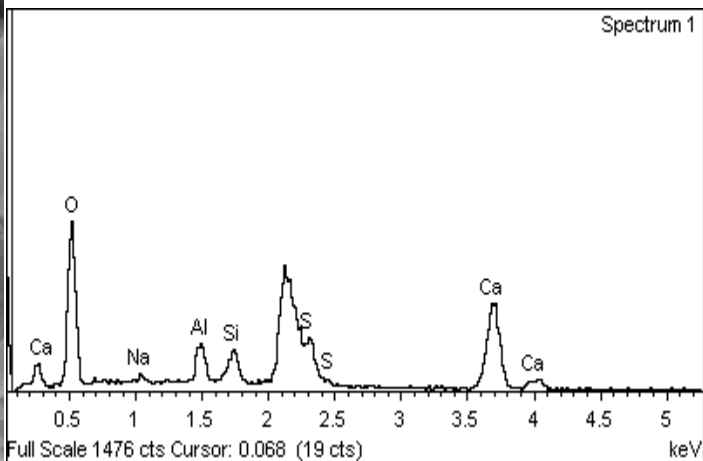
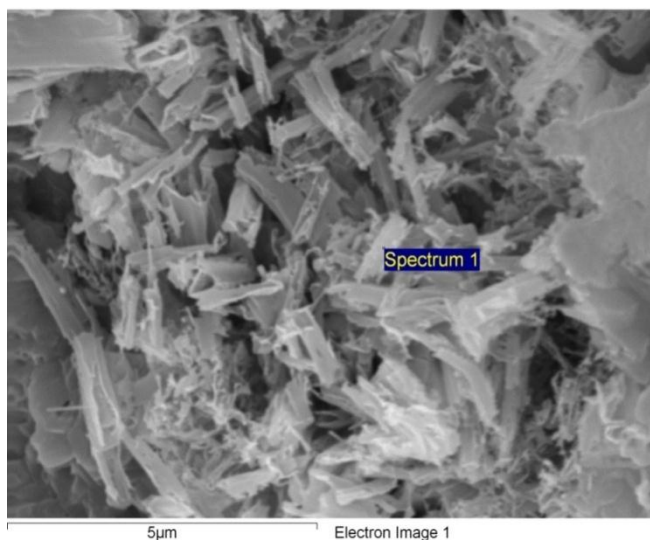
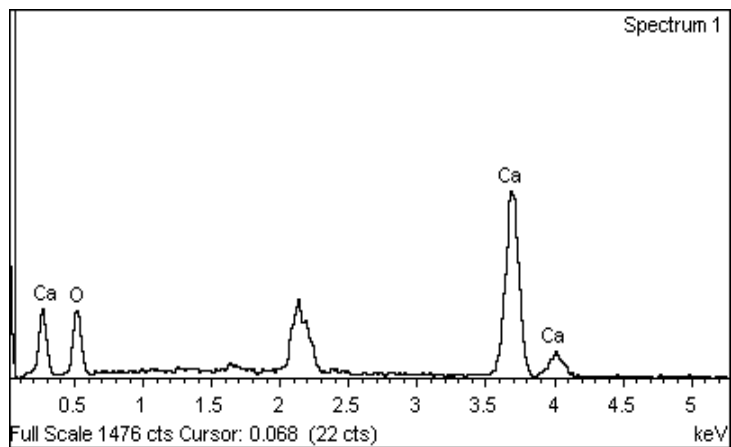


Fig.59. a) Micrografía SEM (6000X), b) Micrografía SEM (10000X) y resultados EDS de la Muestra R sumergida en agua durante 90 días



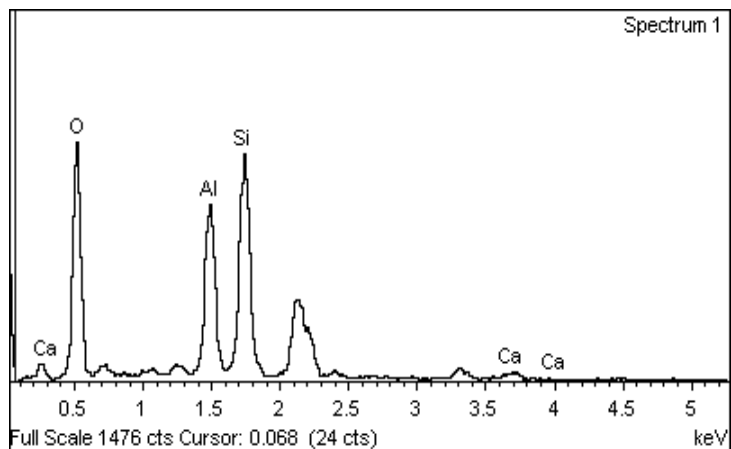
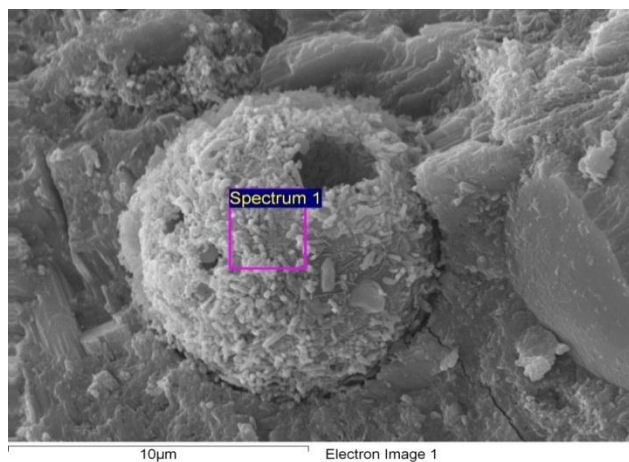
EDS: 68.87% O, 1.07% Na, 3.74% Al, 3.11% Si, 6.03% S, 17.18% Ca.

Fig.60. Micrografía SEM (12000X) y resultados EDS (etringita expansiva) de la Muestra R sumergida en NaSO_4 durante 167 días.



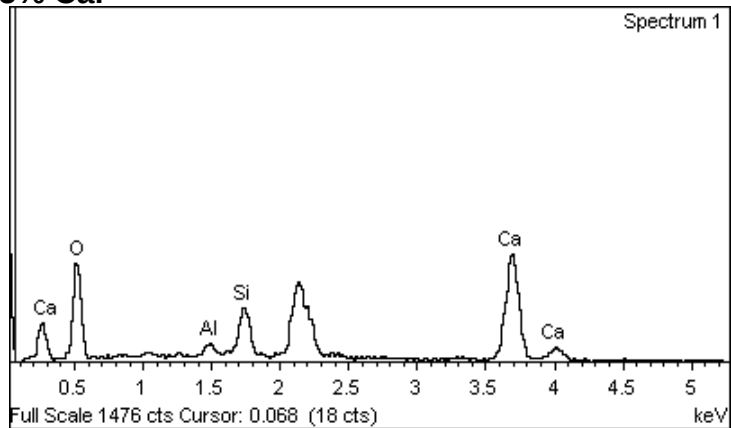
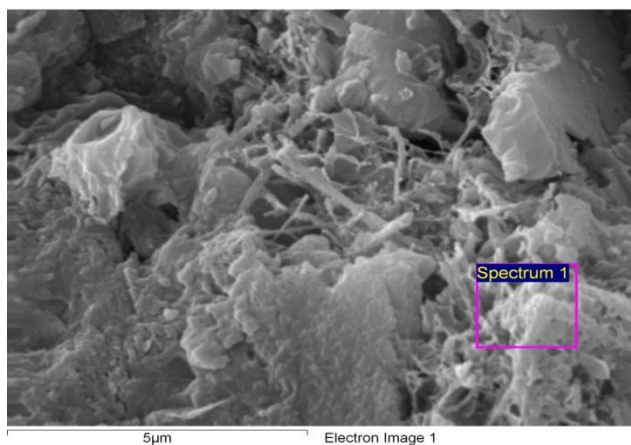
a)

EDS: 56.85% O, 43.15% Ca.



b)

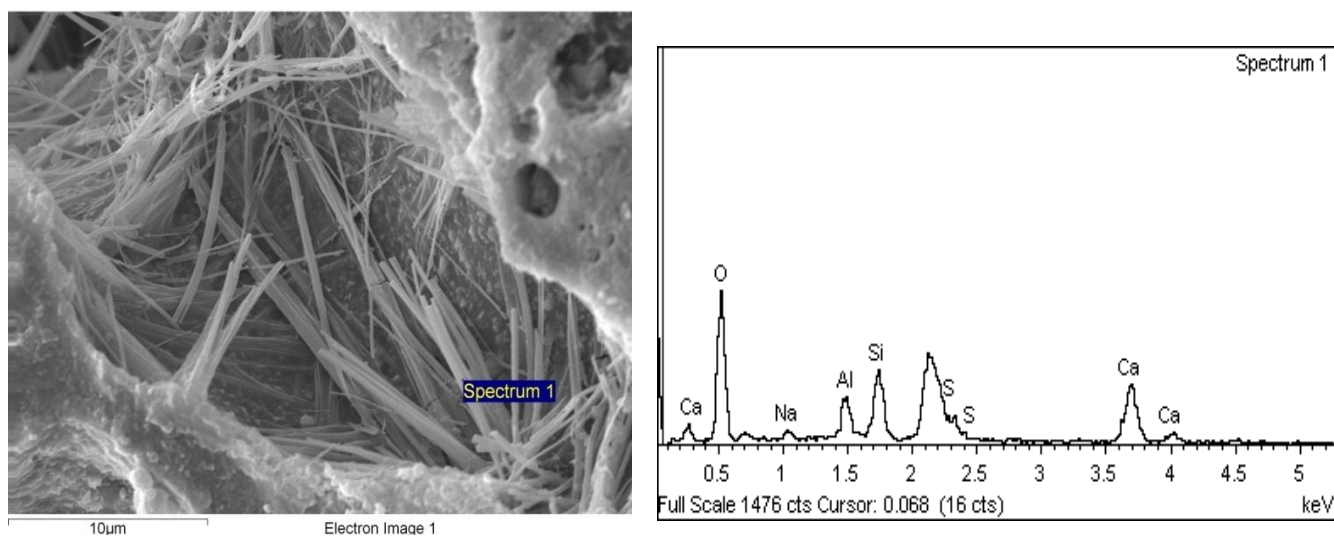
**EDS: 63.35% O, 14.09% Al, 21.41% Si,
1.15% Ca.**



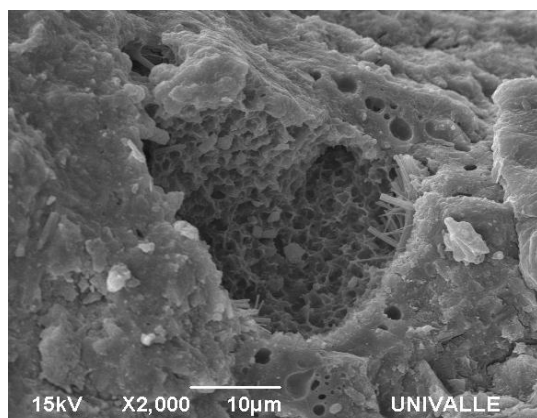
c)

**EDS: 65.88% O, 1.42% Al, 6.08% Si,
26.63% Ca.**

Fig.61. Micrografías SEM: a) (2000X), b) (6000X), c) (12000X) y sus respectivos EDS de la Muestra CV15 en agua durante 90 días.



a)



b)

Fig.62. a) Micrografía SEM (4000X) y EDS, b) SEM (2000X) de la muestra CV15 sumergida en NaSO_4 durante 167 días.

En la figura 61 correspondiente a la mezcla de cemento con un 15% de ceniza volante (CV15) a 90 días en agua se observa: en a) placas de portlandita, en b) se detalla una partícula de ceniza volante esferoidal recubierta de productos de hidratación del cemento, que podría ser Aluminatos cálcicos hidratados (CAH). La partícula de ceniza se va adheriendo en la interface donde se observan placas orientadas de portlandita, resultado de la reacción puzolánica, lo cual disminuye la porosidad, en c) se detalla la formación de geles hidratados de CSH, revelados por EDS [13].

En la figura 62 correspondiente a la muestra CV15 expuesta a 167 días en sulfatos se observa en a) la formación de etringita expansiva en formas de agujas en el interior de los poros del material, en b) se observa la formación de pequeñas agujas de etringita en el interior de un poro y productos de hidratación que podría ser silicatos cálcicos hidratados, que coincide con la estructura de la figura 59(b).

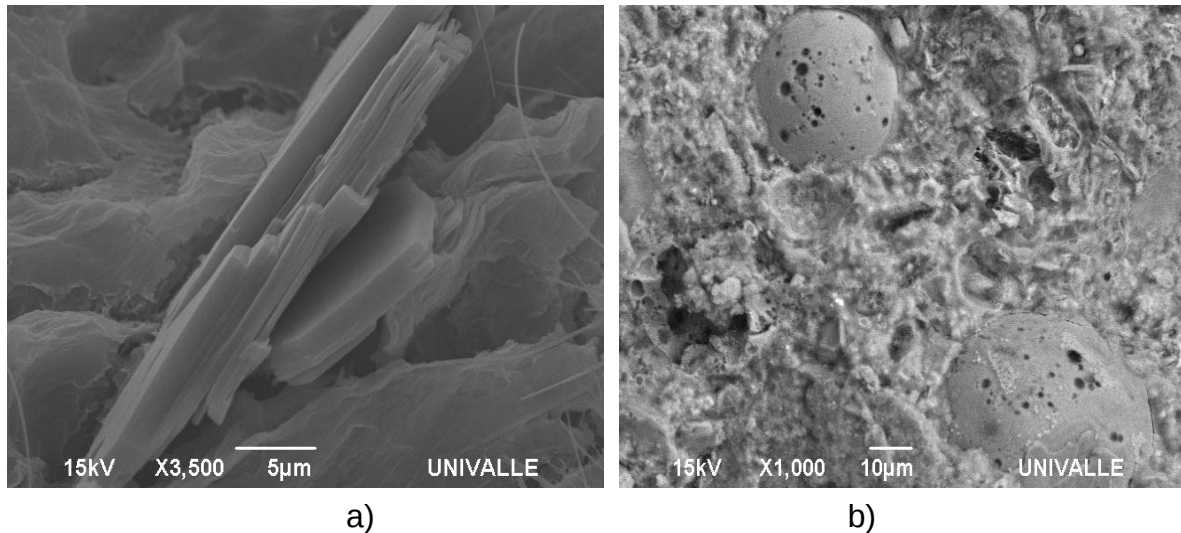


Fig63. a) Micrografías SEM (3500X), b) SEM (1000X) de la muestra CV45 sumergidas en agua durante 90 días

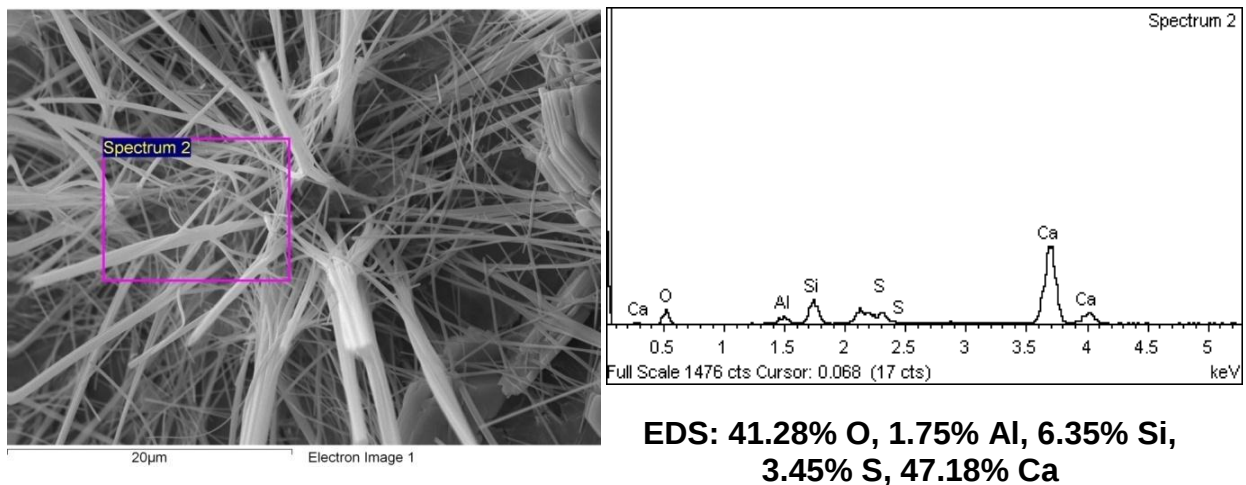
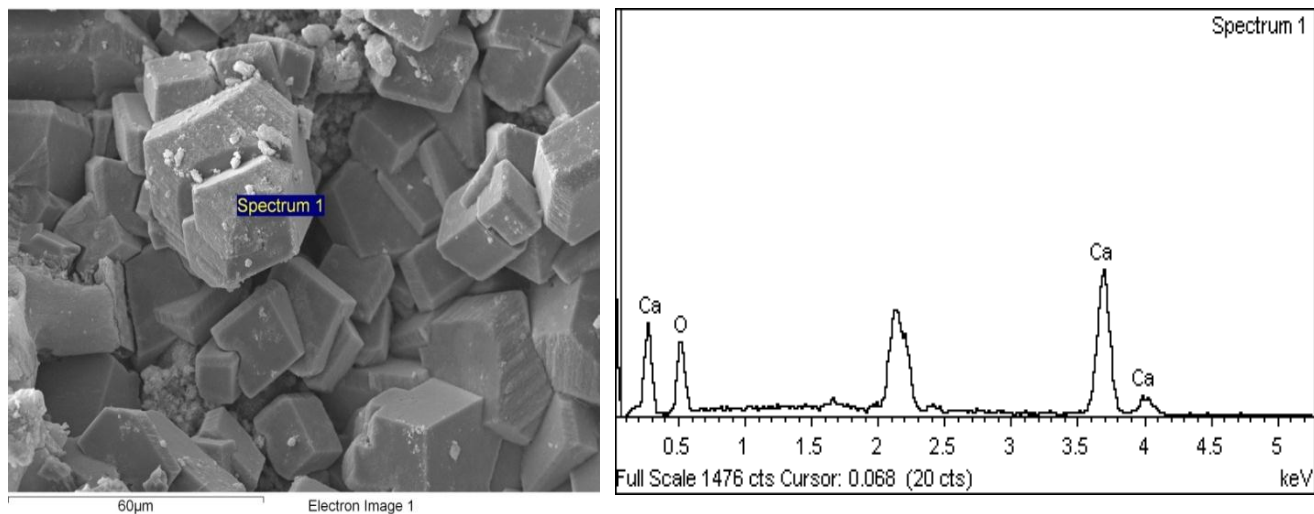
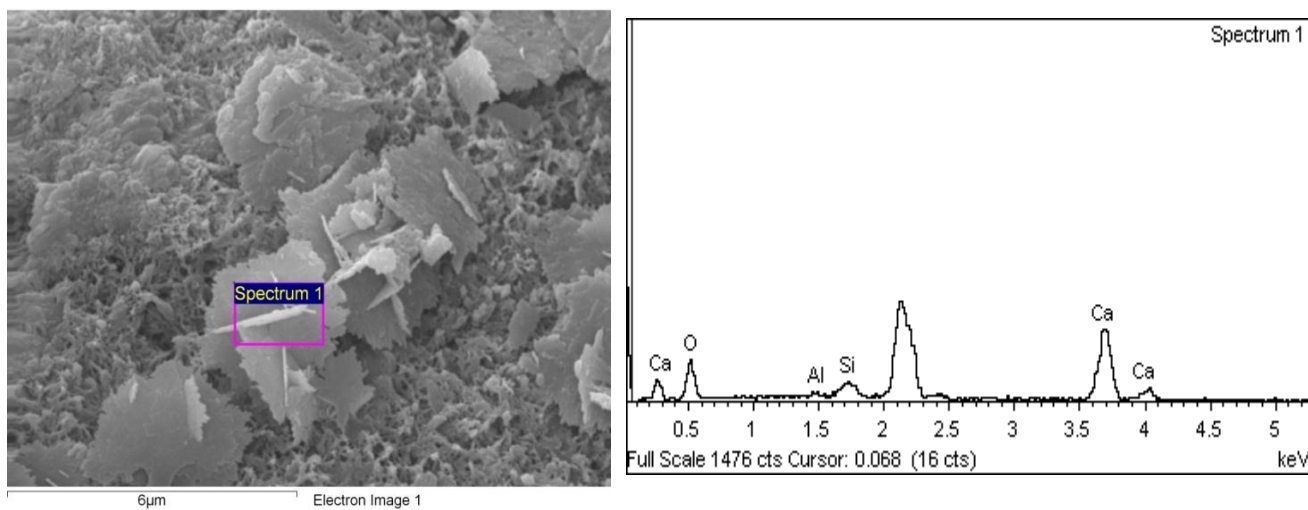


Fig.64. Micrografía SEM (3000X) y EDS de la muestra CV45 sumergida en NaSO_4 durante 167 días.

En la figura 63 de la mezcla CV45 se observa la formación de placas orientadas de portlandita y partículas de ceniza volante bien adheridas a la microestructura con señales de que se están degradando posiblemente por la reacción puzolanica. Cuando esta muestra es expuesta a los sulfatos (figura 64) se observa la formación de etringita expansiva corroborado con los resultados de EDS y por la técnica DRX (figura 55).

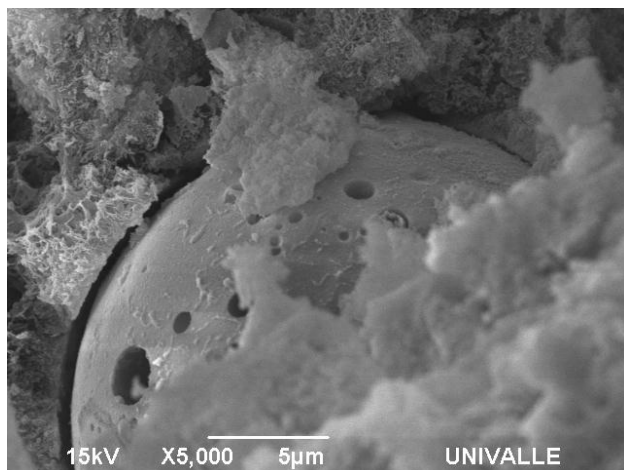


a) EDS: 62.87% O, 37.13% Ca.



b)

EDS: 60.3% O, 1.14% Al, 3.03% Si, 35,53%Ca.

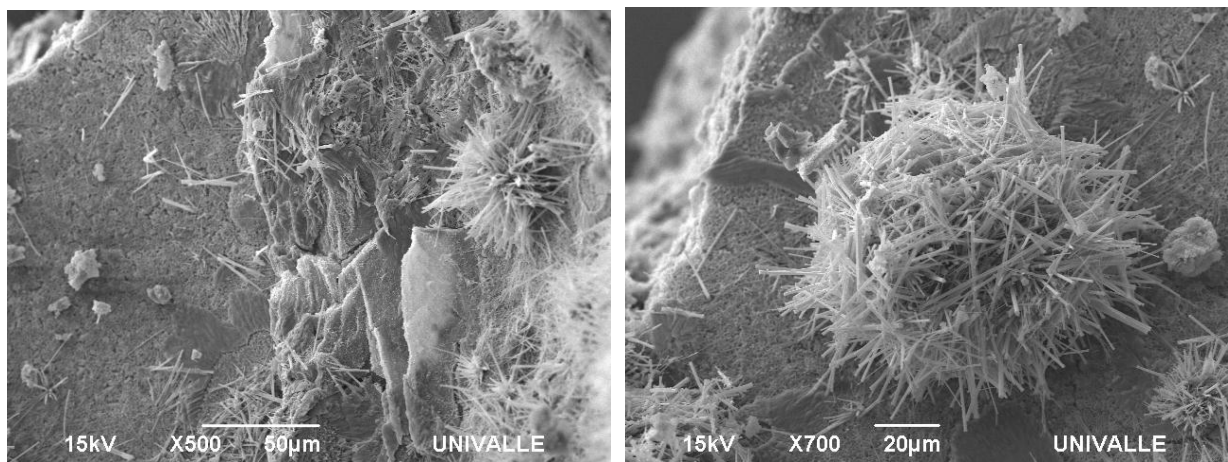


c)

Figura 65. a) Micrografía SEM (900X) y EDS, b) SEM (10000X) y EDS y c) SEM (5000X) de la muestra CV60 sumergida en agua durante 90 días.

En la figura 65(a) de la muestra CV60 sumergida en agua el EDS da como resultado una gran cantidad de calcio y oxígeno (probablemente calcita), esta muestra presenta posible carbonatación en la superficie, evidenciado en el difractograma de la figura 56. Se observa también la formación de laminillas de geles hidratados que podrían ser de Silicatoaluminatos cálcicos hidratados los cuales contienen Al, Si, O y Ca. En la figura 65(c) se observa una partícula de ceniza volante que no está bien adherida a la microestructura y que está rodeada de productos de reacción,

En la muestra de CV60 expuesta a sulfatos aunque no se hizo el respectivo EDS por la similitud de la estructura encontradas en las muestras CV45 y CV15 en forma acicular o de “erizo” se deduce que es etringita.



a)

b)

Fig.66. Micrografías SEM a) (500X) y b) (700X) muestra CV60 sumergida en NaSO_4 durante 67 días

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Desde el punto de vista mecánico las cenizas volantes pueden contribuir a mejorar la resistencia a compresión de las pastas de cemento a partir de los 28 días de curado normal para niveles de sustitución entre el 15 y 45% de CV, siendo el porcentaje óptimo 15%.
- Altos porcentajes de ceniza volante adicionados en las pastas de cemento dan lugar a efectos positivos en las propiedades de durabilidad. Adiciones superiores al 30% de CV presentan una elevada resistencia a medios agresivos como sulfatos, demostrado por la baja expansión y la elevada resistencia al deterioro que tuvieron los cilindros con 45 y 60% de CV, esto se debe a que la adición de ceniza volante disminuye la permeabilidad del cemento hidratado controlando así el deterioro por expansión del material, al incorporar ceniza volante al cemento se limita la formación de productos de reacción de carácter expansivos.
- Se confirmó que la penetración del ión cloruro es inversamente proporcional al incremento en la sustitución de cemento por ceniza volante, sustituciones superiores al 45% presentan baja permeabilidad al ión cloruro, esta eficacia de la ceniza frente al avance de los cloruros está asociada a las reducciones de porosidad producidas por la adición, por lo que los poros y conexiones intercapilares se hacen más pequeños interfiriendo en la difusión de los diferentes agentes agresivos como es el caso del ion cloruro.
- La meta del desarrollo sustentable, para las industrias del cemento y del concreto, puede ser alcanzada si hacemos un esfuerzo serio en la utilización efectiva de subproductos puzolánicos y cementantes producidos por las industrias.

- [1]. Malhotra, V.M. "Superplasticized Fly Ash Concrete for Structural Applications". ACI Concrete International, Vol. 8, No. 12. Dec. 1986, pp. 28-31.
- [2]. EHE-08. Instrucción Española de Hormigón Estructural. 2008 Ministerio de Fomento.
- [3]. Mendez Gustavo. "aplicación del diseño de experimentos en la formulación de cementos compuestos" (2006).
- [4]. Molina B. Omar I. "La Influencia de las Cenizas Volantes Como Sustituto Parcial del Cemento Portland en la Durabilidad del Hormigón". (2008).
- [5]. Thomas M. Chloride thresholds in marine concrete. Cem Concrete Res 1996; 26(4):513–9.
- [6]. Alonso C, Andrade C, Castellote M, Castro P. Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar. CemConcr Res 2000; 30(7):1047–55.
- [7]. Thomas MDA, Bamforth PB. Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag. CemConcr Res 1999; 29(4): 487–95.
- [8]. Kuroda M, Watanabe T, Terashi N. Increase of bond strength at interfacial transition zone by the use of fly ash. CemConcr Res 2000; 30(2):253–8.
- [9]. Chindaprasit P, Homwuttiwong S, Sirivivatnanon V. Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. CemConcr Res 2004;34: 1087–92.
- [10]. Moragues T. Amparo. "Procesos de Hidratación del cemento portland, Microestructura del hormigón".
- [11]. GomezJose Gabriel "Durabilidad del Concreto". Ecuador 2010.
- [12]. http://www.aggregateresearch.com/resource/dnlddocs/Tech_Bulletins.pdf
- [13]. Ma. PAZ LORENZO GARCIA. "Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento portland hidratado", (1993).
- [14]. Gengying Li, Xiaozhong Wu. Influence of fly ash and its mean particle size on certain engineering properties of cement composite mortars. Cement and Concrete Research 35, 1128-1134, 2005.

[15]. Lawrence, Phillippe, Cyr, Martin, Ringot, Erick. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength, Cement and Concrete Research 35, 1092-1105, 2005.

[16]. Malhotra, V.M., «CANNMET investigations dealing with high-volume fly ash concrete», in V.M. Malhotra [ed.], Advances in concrete technology, CANNMET, Ottawa, Canadá, 1994, pp. 445-482.

[17]. Sivasundaram, V., A. Bilodeau y V.M. Malhotra, «Effect of curing conditions on high-volume fly ash concrete made with ASTM type I and III cements and silica fume», Advances in concrete technology, SP-154, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1995, pp. 509-530.

[18]. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. Revista Construcción y Tecnología, Febrero 2001.

[19]. Pedro L. Valdez, Alejandro Duran y col. "Concretos Fluidos con Altos Volúmenes de Ceniza Volante". Ciencia UANL, México, 2007, pp. 49-57.

[20]. Valdez-Tamez, P.L.; Durán-Herrera, A.; Fajardo-San Miguel, G.; Juárez-Alvarado, C.A. "Influencia de la carbonatación en morteros de cemento Pórtland y ceniza volante "Ingeniería. Investigación y Tecnología, Vol. X, Núm. 1, 2009, pp. 39-49. Universidad Nacional Autónoma de México México.

[21]. Ing. José Gabriel Gómez. Materiales Para Ingeniería Civil, capítulo 2, Cementos.

[22]. Lorenzo, M.P., Goni, S., Guerrero, A., 2002. Activation of pozzolanic reaction of hydrated Portland cement fly ash pastes in sulfate solution. J. Am. Ceram. Soc. 85 (12), 3071–3075.

[23]. N. Bouzoubaa, M.H. Zhang, V.M. Malhotra "Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash". Cement and Concrete Research vol. 31 (2001) 1393–1402.

[24]. PrinyaChindaprasirt, Chai Jaturapitakkul Y TheerawatSinsiri "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste" Cement & Concrete Composites vol. 27 (2005) 425–428.

[25]. ACI 201.2R-92 (1997) "Guide to Durable Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. Materials and General Properties of Concrete.

[26]. T. Patzias (1991) "The development of ASTM C1012 with Recommended Acceptance Limits for Sulphate Resistance of Hydraulic Cements", Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 13, N°1.

[27].Prof. HuangShiyuan. Hidratación del Cemento con Ceniza Volante a Temperaturas Elevadas. (2009).Pgs 114-117.

[28].Fraay, A., Beijin, J.M y Haan, D. (1989) "The Reaction of Fly Ash in Concrete: a Critical Examination". Cement and Concrete Composites, 19, 235-246.

[29].Sybertz, F. y Wiens, U. (1991). "Effect of Fly Ash Fines on Hydration Characteristics of Concrete And Strength Development". International conference on blended cements in construction, University of Sheffield, UK.

[30].Kiattikomol K, Jaturapitakkul C, Songpiriyakij S y Chutumbtim S. (2001) "A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Finenesses from Various Sources as Pozzolanic Materials". Cement and concrete composites, 23, 335-343.

[31].Mejía R; Rodríguez P; "Durabilidad Y Corrosión En Materiales Cementicios" (1999).

[32]. Al-Dulaijan, S.U.; Muslehuddin, M.; Al-Zahrani, M.M.; Sharif, A.M.; Shameem, M., and Ibrahim, M., "Sulfate Resistance of Plain and Blended Cement Exposed to Varying Concentrations of Sodium Sulfate," Cement & Concrete Composite, Vol. 25, pages 429 to 437, 2003.

[33]. Santaella L., "Caracterización Física, Química y Mineralógica de las Cenizas Volantes", Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 2001.

NORMAS

- ASTM C187-98
- ASTM C191-01
- ASTM C618-05
- ASTM C1202
- ASTM C1012
- ASTM C642