



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN MICRO Y MACRO-ESTRUCTURAL DE
COMPÓSITOS CERÁMICOS ELABORADOS CON CEMENTOS INORGÁNICOS
REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO TIPO E.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN METALURGIA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES.

PRESENTA:

ALFREDO ACHA PALOMARES.

ASESOR:

DRA. MARÍA EUGENIA DE LA SALUD CONTRERAS GARCÍA.

CO-ASESOR:

DR. JOSÉ CARLOS RUBIO ÁVALOS.



FEBRERO 2012

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.	iv
AGRADECIMIENTOS.	v
INTRODUCCIÓN.	vi
LISTA DE TABLAS.	vii
LISTA DE FIGURAS.	viii
RESUMEN.	xii
HIPÓTESIS.	xiii
OBJETIVOS.	xiii
1. ANTECEDENTES.	1
1.1. Cemento Portland.	1
1.2. Formación del cemento Portland.	1
1.3. Composición del cemento Portland.	2
1.3.1. Silicato tricálcico (C_3S).	2
1.3.2. Silicato dicálcico ($C_2S-\beta$).	3
1.3.3. Aluminato tricálcico (C_3A).	3
1.3.4. Ferroaluminato tretracálcico o ferrita (C_4AF).	4
1.3.5. ÁLCALIS.	4
1.3.6. Sulfato de calcio (CS).	4
1.4. Tipos de cemento Portland.	5
1.5. Proceso de hidrólisis.	8
1.5.1. Hidratación del C_3S .	8
1.5.2. Hidratación del $C_2S-\beta$.	9
1.5.3. Reacciones de C_3A .	9
1.5.4. Reacciones de C_4AF .	11
1.6. Compuestos formados de la hidratación del cemento.	11
1.7. Hidratación de CS .	14
1.8. Reacción de CH.	15
1.9. Carbonatación del cemento.	16
1.9.1. Definición de la reacción de carbonatación.	16
1.9.2. Mecanismo de reacción.	16

1.9.3.	Reacciones.	17
1.9.4.	Cambios microestructurales.	18
1.10.	Materiales puzolánicos.	19
1.11.	Fibra de vidrio.	21
1.12.	Problemática establecida.	23
1.12.1.	Modificación de la matriz de cemento con ceniza volante.	24
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.	25
2.1.	Materias primas.	26
2.2.	Súper plastificantes.	26
2.3.	Formulación de las mezclas y elaboración del compósito.	27
2.4.	Elaboración del compósito.	28
2.5.	Caracterización de la materia prima.	29
2.5.1.	Fluorescencia de Rayos-X.	29
2.5.2.	Difracción de Rayos-X (DRX).	29
2.5.3.	Distribución del tamaño de partícula.	30
2.5.4.	Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (EITF).	30
2.5.5.	Microscopia electrónica de barrido (MEB).	31
2.4.	Propiedades mecánicas.	32
2.4.1.	Resistencia a la compresión.	32
2.4.2.	Resistencia a la flexión simple.	33
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	34
3.1.	Caracterización de la materia prima.	34
3.1.1.	Fluorescencia de Rayos-X.	34
3.1.2.	Difracción de Rayos-X.	34
3.1.3.	Distribución del tamaño de partícula.	37
3.1.4.	Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier.	38
3.1.5.	Microscopia electrónica de barrido.	41
3.2.	Caracterización de las mezclas.	46
3.2.1.	Difracción de Rayos-X.	46
3.2.2.	Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier.	52
3.2.3.	Microscopia electrónica de barrido.	58

3.3. Propiedades mecánicas.	70
3.3.1. Resistencia a la compresión.	70
3.3.2. Resistencia a la flexión simple.	77
4. CONCLUSIONES.	80
RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO.	81
5. REFERENCIAS.	82
ANEXOS.	85
Anexo A: Resistencia a la compresión de las mezclas E expuestas a un estado saturado de hidratación.	85
Anexo B: Reporte fotográfico de las barras saturadas en agua.	88

DEDICATORIA

A mi padre el Sr. Agustín Acha Pérez[†], que siempre lo llevo en mi mente y siempre lo voy a tener presente en mis logros, por haber tenido la oportunidad de haber trabajado juntos.

A mi madre la Sra. Herminia Palomares Salvador que me ha impulsado a seguir con mis objetivos y siempre ha estado apoyándome incondicionalmente.

A mi hermano José Adrián Acha Palomares quién nos sigue apoyando moralmente y económicamente. A mis hermanos Fidencio Acha Palomares, Martha Donaciana Acha Palomares, Agustina Acha Palomares, Raquel Acha Palomares, Ana Isabel Acha Palomares, Gabriela Acha Palomares y Jazmín Acha Palomares con las que he convivido en esta etapa de mi vida.

A José Capi, Salvador Sierra, Jesús Ruiz grandes amigos de mi pueblo.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. María Eugenia Contreras García por darme la oportunidad de haber sido su alumno y apoyarme en el proyecto de mi tesis, y quien siempre estuvo orientándome.

Al Dr. José Carlos Rubio Avalos quién me apoyó en el proyecto de mi tesis y quien me orientó en el curso de mi trabajo de tesis y siempre tuvo tiempo para atender mis dudas, y también por permitirme trabajar en el laboratorio de Innovación en Materiales de Construcción, muchas gracias.

A mis maestros la Dra. Ena Athenea Aguilar Reyes, el Dr. Ruben Torres Sánchez, el Dr. Juan Serrato Rodríguez, el Dr. Gerardo Antonio Rosas Trejo, el Dr. Juan Zarate Medina, y la Dra. Sandra Leticia Bribiesca Vázquez. Por darme la oportunidad de haber sido su alumno.

Al Ing. Francisco Solorio por las largas horas de apoyo en el microscopio electrónico de barrido.

A la Sra. Vicky por el trabajo y apoyo en difracción de Rayos-X.

A la Dra. Elia Mercedes Guzmán por haberme permitido trabajar en el área de resistencia de materiales y permitirme utilizar las máquinas de prueba, y quien me ha orientado y aconsejado en las decisiones que he tomado gracias.

Al M.A. Wilfrido Martínez Molina por apoyarme en el uso de material del laboratorio.

Al personal técnico de la sección de Resistencia del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil: a Jesús Zauno, Ruben Hernandez, M. I. Cyndi Lara, Ing. Marco Antonio Mondragon.

A mis compañeros

INTRODUCCIÓN

Los materiales de construcción a base de cemento Portland o yeso son los materiales más usados como materiales de construcción: El cemento portland ofrece relativamente alta resistencia a la compresión, pero su producción se asocia con un alto consumo de energía. El remplazar yeso por cemento Portland reduciría el costo del compuesto y minimizaría su impacto al medio ambiente. La principal desventaja es su baja resistencia al agua. Un material que incorpore ambos aglutinantes sería una solución barata para la industria de la construcción, y además debería tener buenas propiedades mecánicas y físicas. En la práctica se acepta que estos dos aglutinantes no se deben mezclar por el efecto asociado con expansión de la etringita, fracturas y pérdida de resistencia. Una matriz cementicia yeso-cemento sin modificar en condiciones secas tienen propiedades mecánicas satisfactorias, pero cuando son expuestas a entornos saturados de agua muestran muy poca resistencia, que se manifiesta como cambios de deterioro que resultan de la creación y crecimiento de cristales de etringita. La expansión de la etringita en compósitos de cemento-yeso depende principalmente del hemihidrato y del hidróxido de calcio. La adición de ceniza volante al compuesto de cemento-yeso podría reducir el hidróxido de calcio y el crecimiento de etringita además de aumentar la resistencia mecánica del compuesto. Por otro lado las fibras se utilizan para reforzar los materiales que son menos resistentes en tensión que en compresión o son materiales frágiles. Las fibras de refuerzo se utilizan en materiales de secciones delgadas. Sin embargo, las pastas de cemento Portland reforzadas con fibra de vidrio pueden sufrir pérdida de resistencia y rigidez cuando son expuestas en ambientes húmedos. Esta pérdida se ha atribuido a fenómenos tales como ataque de los álcalis del cemento sobre las fibras de vidrio y cambios en la interface fibra-matriz. Para superar la reducción en resistencia del compuesto reforzado con fibra de vidrio tipo E con el tiempo, la modificación de la matriz con materiales de reciclado tal como la ceniza volante clase F, y el remplazamiento de yeso por cemento Portland debe modificar la concentración de portlandita, también reducir la densidad de la matriz y el costo de la matriz cementicia.

LISTA DE TABLAS.

Tabla I.- Nombres de componentes de cementos comunes, composiciones, fórmulas y abreviaciones.	2
Tabla II .- Composición de compuestos típicos de cemento portland [1].	5
Tabla III.- Clasificación del cemento por tipo.	6
Tabla IV.- Clasificación del cemento por clase resistente.	6
Tabla V.- Nomenclatura para cementos especiales.	7
Tabla VI.- Componentes de los cementos, los valores de la tabla representan el % en masa.	7
Tabla VII .- Composición de las mezclas usadas en la elaboración del compuesto en % en peso.	27
Tabla VIII .- Composición química de las materias primas % en peso.	34
Tabla IX.- Resistencia a compresión de las mezclas A expuesta a temperatura ambiente.	85
Tabla X.- Resistencia a compresión de las mezclas B expuestas a temperatura ambiente.	85
Tabla XI.- Resistencia a compresión de las mezclas D expuestas a temperatura ambiente.	85
Tabla XII.- Resistencia a compresión de las mezclas E expuestas a temperatura ambiente.	86
Tabla XIII.- Resistencia a flexión de las mezclas A expuestas a un estado saturado de hidratación.	86
Tabla XIV.- Resistencia a flexión de las mezclas B expuestas a un estado saturado de hidratación.	86
Tabla XV.- Resistencia a flexión de las mezclas D expuestas a un estado saturado de hidratación.	87
Tabla XVI.- Resistencia a flexión de las mezclas E expuestas a un estado saturado de hidratación.	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.- Micrografías de ceniza volante clase F, a) a 2000X, y b) a 1000X.	19
Figura 1.2.- Micrografía de la ceniza volante clase F, a) plerosfera a 500X, y b) plerosfera a 5000X.	20
Figura 1.3.- Estructura del vidrio [12].	22
Figura 2.1.- Diagrama de flujo del desarrollo experimental.	
Figura 2.2.- Estructura química del aditivo policarboxilato [13].	26
Figura 2.3.- Ensayo de resistencia a la compresión simple.	32
Figura 2.4.- Ensayo de resistencia a la flexión en tres puntos o módulo de ruptura.	33
Figura 3.1.- Difractograma del cemento CPC 30 R Holcim Apasco.	35
Figura 3.2.-Difractograma del Yeso Supremo San Luis.	36
Figura 3.3.- Difractograma de la Ceniza volante clase F de la carboeléctrica de Petacalco.	36
Figura 3.4.- Distribución del tamaño de partícula del volumen diferencial.	37
Figura 3.5.- Distribución del tamaño de partícula en volumen acumulado %.	38
Figura 3.6.- Espectro IR-TF del cemento Apasco CPC 30 R.	39
Figura 3.7.- Espectro IR-TF del Yeso Supremo San Luis.	40
Figura 3.8.- Espectro IR-TF del a ceniza volante clase F de la termoeléctrica de Petacalco.	40
Figura 3.9.- Micrografías del cemento Portland CPC 30 R a 1000X y mapeo a 3000X.	42
Figura 3.10.- Micrografías a 1000X y mapeo a 3000X del yeso Supremo San Luis.	43
Figura 3.11.- Micrografías a) 1000X y b) microanálisis a 3000X de la ceniza volante clase F de la termoeléctrica de Petacalco Guerrero.	44
Figura 3.12.- Micrografía a 1000X y microanálisis a 3000X de la fibra de vidrio tipo E.	45

Figura 3.13.- Difractogramas de las muestras A, hidratadas 28 días a temperatura ambiente.	48
Figura 3.14.- Difractogramas de las muestras A, saturadas en agua durante 28 días.	49
Figura 3.15.- Difractogramas de las muestras D, hidratadas 28 días a temperatura ambiente.	49
Figura 3.16.- Difractogramas de las muestras D, saturadas en agua durante 28 días.	50
Figura 3.17.- Difractogramas de muestras A, hidratadas 180 días a temperatura ambiente.	50
Figura 3.18.- Difractogramas de las muestras A, saturadas en agua durante 180 días.	51
Figura 3.19.- Difractogramas de muestras D, hidratadas 180 días a temperatura ambiente.	51
Figura 3.20.- Difractogramas de las muestras D, saturadas en agua durante 180 días.	52
Figura 3.21.- Espectro IR de muestras A, hidratadas 28 días a temperatura ambiente.	54
Figura 3.22.- Espectro IR de muestras A, saturadas en agua durante 28 días.	55
Figura 3.23.- Espectro IR las muestras D, hidratadas 28 días a temperatura ambiente.	55
Figura 3.24.- Espectro IR de las muestras D, saturadas en agua durante 28 días.	56
Figura 3.25.- Espectro IR de las muestras A, hidratadas 180 días a temperatura ambiente.	56
Figura 3.26.- Espectro IR de las muestras A, saturadas en agua durante 180 días.	57
Figura 3.27.- Espectro IR de las muestras D, hidratadas 180 días a temperatura ambiente.	57
Figura 3.28.- Espectro IR de las muestras D, saturadas en agua	

durante 180 días.	58
Figura 3.29.- Micrografía de barrido de las muestras A1S a 1500X, B1S a 2500X, D1S a 2500X y E1S a 1500X, hidratadas 28 días.	59
Figura 3.30.- Micrografía de barrido de las muestras A1S a 1500X, B1S a 1500X, D1S a 1500X y E1S a 1500X, hidratadas 180 días.	60
Figura 3.31.- Micrografía de barrido de las muestras A3S a 1500X, B3S a 5000X, D3S a 1500X y E3S a 5000X, hidratadas 28 días.	61
Figura 3.32.- Micrografía de barrido de las muestras A3S a 1500X, B3S a 5000X, D3S a 1500X y E3S a 5000X, hidratadas 180 días.	62
Figura 3.33.- Micrografía de barrido de las muestras A5S a 1500X, B5S a 5000X, D5S a 2500X y E5S a 1500X, hidratadas 28 días.	63
Figura 3.34.- Micrografía de barrido de las muestras A5S a 5000X, B5S a 5000X, D5S a 1500X y E5S a 1500X, hidratadas 180 días.	64
Figura 3.35.- Micrografía de barrido de las muestras A2H a 5000X, B2H a 1500X, D2H a 1000X y E2H a 5000X, saturadas en agua por 28 días.	65
Figura 3.36.- Micrografía de barrido de las muestras A2H a 5000X, B2H a 5000X, D2H a 5000X y E2H a 2500X, saturadas en agua por 180 días.	66
Figura 3.37.- Micrografía de barrido de las muestras A4H a 5000X, B4H a 5000X, D4H a 1500X y E3H a 1500X, saturadas en agua por 180 días.	67
Figura 3.38.- Micrografía de barrido de las muestras A5H a 1500X, B5H a 2500X, D5H a 5000X y E5H a 10000X, saturadas en agua por 28 días.	69
Figura 3.39.- Micrografía de barrido de las muestras A5H a 5000X, B5H a 5000X, D5H a 2500X y E5H a 2500X, saturadas en agua por 180 días.	69
Figura 3.40.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras A.	73
Figura 3.41.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras B.	73
Figura 3.42.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras D.	74
Figura 3.43.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras D.74	
Figura 3.44.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras A saturadas en agua.	75
Figura 3.45.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras B saturadas en agua.	75
Figura 3.46.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras D saturadas en agua.	76
Figura 3.47.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras E saturadas en agua.	76

Figura 3.48.- Gráfica de resistencia a la flexión de las muestras A, saturadas en agua.	78
Figura 3.49.- Gráfica de resistencia a la flexión de las muestras B, saturadas en agua.	79
Figura 3. 50.- Gráfica de resistencia a la flexión de las muestras D, saturadas en agua.	79
Figura 3.51.- Gráfica de resistencia a la flexión de las muestras E, saturadas en agua.	80

RESUMEN

En este trabajo de investigación se hizo un estudio de la hidratación de un material compósito con una matriz de cemento Portland modificada con diferentes porcentajes de yeso y la adición de ceniza volante clase F reforzado con fibra de vidrio tipo E, se determinó la relación de la composición de la matriz cementicia con las propiedades mecánicas de la compresión y a la flexión en condiciones de saturado en agua y curado a temperatura ambiente. También se relacionó la microestructura con las propiedades mecánicas identificando las fases presentes en la hidratación de la matriz cementicia.

Para el estudio del remplazo de yeso por cemento Portland se elaboraron diferentes mezclas en las que el incremento de remplazo fue de 0.25. Se elaboraron cubos de 50 mm de lado para evaluar la resistencia a la compresión, y barras con dimensiones de 40X40 mm de lado y 160 mm de largo para evaluar la resistencia a la flexión en base a la norma ASTM. En la investigación de la ceniza volante solo se adicionó el 20% respecto a la composición de la matriz cemento Portland-yeso. También se utilizó refuerzo con fibra de vidrio para evaluar el efecto sobre las propiedades mecánicas. Para evaluar el ambiente de hidratación se estudiaron dos ambientes. Uno a envejecimiento acelerado en el cual las probetas fueron sumergidas en agua hasta su ruptura y otro en el cual las muestras fueron mantenidas a temperatura ambiente.

Del estudio se puede resumir lo siguiente: la exposición en un estado saturado en agua demuestra que la expansión de la matriz cementicia no es función de la cantidad de etringita producida en la matriz, sino más bien de la cantidad de yeso utilizado como remplazo del cemento Portland, esto es evidente en los patrones de difracción de Rayos-X, donde la mayor cantidad de etringita la presentaron las muestras que contenían solo 0.25 de remplazo de yeso, ya que su expansión no fue tan evidente como en las muestras que contenían el 0.75 de remplazo de yeso. También se determinó que la cristalización de la fase etringita no depende de la humedad presente en el medio donde se encuentre si no que depende de la cantidad de yeso en el cemento Portland.

El uso de ceniza volante dio estabilidad al sistema cemento Portland-yeso incrementando la resistencia a la compresión y a la flexión debido a la reacción puzolánica y a que se redujo el agrietamiento de la matriz, como se observó en las fotografías obtenidas. También el

reforzamiento con la fibra de vidrio mejoró la resistencia a la flexión pero no la resistencia a la compresión debido a que el refuerzo es solo para mejorar la resistencia a la flexión de los materiales frágiles. El uso de la espectroscopía de infrarrojo permitió identificar las fases amorfas presentes en el cemento portland hidratado como el C-S-H que no difracta en Rayos-X.

HIPÓTESIS

La adición de ceniza volante clase F y yeso al compuesto cemento-fibra de vidrio tipo E disminuirá la degradación por ataque alcalino de la fibra de vidrio y resultará en un aumento en las propiedades mecánicas del sistema.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

Evaluar las propiedades mecánicas y microestructurales de un compuesto reforzado con fibra de vidrio tipo E y con una matriz de cemento Portland modificada con diferentes porcentajes de yeso y la adición de ceniza volante clase F, así como relacionar los productos de las reacciones de la hidratación con las propiedades dependientes del tiempo, esto es, la resistencia a la compresión y flexión por medio de estudios microestructurales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Estudiar el efecto del remplazamiento de yeso y la adición de ceniza volante clase F en la matriz de cemento Portland sobre las propiedades mecánicas y la microestructura.
- Caracterizar las fases presentes en las mezclas elaboradas durante la hidratación de la matriz cementicia en diferentes intervalos de tiempo.
- Evaluar las propiedades mecánicas de compresión y flexión en el material compuesto a diferentes edades de prueba.

- Determinar el efecto de la modificación de la matriz cementicia sobre la durabilidad de la fibra de vidrio.
- Estudiar el efecto de la exposición en agua de las mezclas sobre las propiedades mecánicas.

1. ANTECEDENTES.

1.1. CEMENTO PORTLAND.

Según Adam N. Neville el cemento Portland puede definirse como “un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto”.

De la norma mexicana: “el cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava u otros materiales, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, desarrolla su resistencia y conserva su estabilidad” [1].

1.2. FORMACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.

El cemento Portland está compuesto principalmente de materiales calcáreos; tales como roca caliza (CaCO_3), por alúmina y sílice, que se encuentran en la arcilla o pizarra ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), óxido de hierro (Fe_2O_3) y arena de sílice (SiO_2). El cemento Portland también contiene cantidades pequeñas de otros compuestos tales como óxido de magnesio, álcalis, fosfato, y óxido de zinc. El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla en proporciones y calcinarla en un horno rotatorio a una temperatura aproximada de 1400°C , en donde el material se sinteriza y se funde parcialmente, formando bolas que son conocidas como “Clinker”. La secuencia de las reacciones es como sigue: a una temperatura aproximadamente 100°C (zona de secado) el agua libre es expulsada. En la zona de precalentado (750°C) el agua enlazada a la arcilla se pierde. En la zona de calcinado ($750\text{-}1000^\circ\text{C}$) el carbonato de calcio se disocia. En la zona de quemado ($1000\text{-}1450^\circ\text{C}$) ocurre fusión parcial de la mezcla, con la formación de C_3S , C_2S . En la zona de enfriado ($1450\text{-}1300^\circ\text{C}$) la cristalización de la fusión ocurre con la formación de aluminato de calcio y aluminoferrita de calcio. Después de la cocción de la materia prima por el período requerido, el Clinker resultante es enfriado y se muele con cerca de 4-5% de yeso a un grado especificado de finura [2].

1.3. COMPOSICIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.

El cemento Portland está compuesto principalmente de dos silicatos y dos aluminatos. Las fases principales del cemento Portland son el silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_3$), y el silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), y una fase ferrita de composición promedio ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$).

La literatura del cemento usa abreviaciones para muchos óxidos de calcio, silicatos, aluminatos, y compuestos importantes para el cemento. En el presente trabajo también se usarán las mismas abreviaciones las cuales se presentan a continuación junto con la composición y fórmulas químicas correspondientes en la Tabla I.

Tabla I.- Nombres de componentes de cementos comunes, composiciones, fórmulas y abreviaciones.

Nombre del Componente	Composición	Formula empírica	Abreviación
Óxido de calcio (cal)	CaO	CaO	C
Dióxido de silicio (sílica)	SiO ₂	SiO ₂	S
Óxido de aluminio (alúmina)	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	A
Óxido de hierro _(III)	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	F
Silicato dicálcico	2CaO•SiO ₂	Ca ₂ SiO ₄	C ₂ S
Silicato tricálcico	3CaO•SiO ₂	Ca ₃ SiO ₅	C ₃ S
Aluminato tricálcico	3CaO•Al ₂ O ₃	Ca ₃ Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferritalumino tetracálcico (Brownmillerita)	4CaO•Al ₂ O ₃ •Fe ₂ O ₃	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	C ₄ AF

Las abreviaciones para esos compuestos usados en la industria del cemento son C₃S, C₂S, C₃A y C₄AF, respectivamente. La sílice normalmente constituye cerca del 20% del cemento en masa, mientras que el óxido de calcio de 60 a 65%. Estos se combinan para formar los silicatos en el Clinker: alita (C₃S) y belita (C₂S) [3]. Los cuales se describen a continuación:

1.3.1. SILICATO TRICÁLCICO (C₃S).

Es la fase principal en la mayoría de los cementos Portland es una forma de silicato tricálcico, originalmente descrita como alita. El C₃S es triclinico pero en pequeñas cantidades de solución sólida puede llegar a ser monoclinico o triclinico. Los tres polimorfos difieren ligeramente en la estructura. El C₃S puro en la forma triclinica es estable a temperatura ambiente, la forma monoclinica a temperaturas moderadas y la forma triclinica a altas temperaturas. El C₃S en el cemento Portland es usualmente monoclinico

[4]. En el C_3S el empaquetamiento iónico consiste en la coordinación de los iones de oxígeno alrededor del calcio de forma irregular, por lo que los oxígenos se concentran a un lado de cada uno de los iones calcio. Esta organización deja grandes huecos estructurales que explican la energía de la estructura y la reactividad [5]. Los silicatos C_3S y C_2S - β siempre tienen cantidades pequeñas de iones de magnesio, aluminio, hierro, potasio, sodio, y azufre.

1.3.2. SILICATO DICÁLCICO (C_2S - β).

El silicato dicálcico puede ocurrir en cuatro modificaciones polimórficas: α , α' , β y γ . Se ha mostrado que la fase γ es casi inerte, y que la fase β hidrata a una velocidad dependiendo de la velocidad del estabilizador, y que α' da resistencia muy pobre, y la α no es hidráulica [6]. La resistencia obtenida del C_2S - β depende de la naturaleza del estabilizador. Y las sustancias que más pueden ocurrir en solución sólida con el C_2S - β del Clinker del cemento Portland son la magnesia y la alúmina. La forma de C_2S que está presente comúnmente en el Clinker ocurre en la forma C_2S - β con una celda unitaria monoclinica, llamada belita. La estructura de la belita en los cementos es irregular, pero los huecos intersticiales aquí formados son mucho más pequeños que en el C_3S , y esto hace a la belita mucho menos reactiva que la alita [5].

1.3.3. ALUMINATO TRICÁLCICO (C_3A).

El aluminato tricálcico forma del 5-10% de la masa del cemento Portland. La alúmina es incluida en la mezcla en un horno de cemento porque ayuda a reducir la temperatura de quemado requerida para fabricar el cemento. La alúmina se une con óxido de calcio o hierro para formar dos compuestos aluminatos de calcio en el Clinker: aluminato tricálcico (C_3A) y ferroaluminato tetracálcico o ferrita [3]. A temperaturas ordinarias y en la ausencia de suficiente sulfato, la hidratación del C_3A causa el fenómeno conocido como fraguado instantáneo, de acuerdo con el cual el fraguado es acelerado por una rápida formación de aluminatos de calcio hidratados, pero la resistencia mecánica de la pasta resultante es pobre. Ambos, el C_3A y C_4AF en el Clinker contienen en sus estructuras cristalinas cantidades significantes de impurezas como magnesio, sodio, potasio, y sílice.

El C_3A puede existir en las estructuras cristalinas cúbica, ortorrómbica, y monoclinica. El C_3A puro es cúbico y no tiene ningún polimorfismo [4]. En el Clinker, es más común que iones de Na^+ sustituyan iones de Ca^{2+} en la estructura del C_3A y su estructura cristalina es ortorrómbica. Las estructuras cristalinas son complejas pero se caracterizan por grandes huecos estructurales que explican la alta reactividad [7].

1.3.4. FERROALUMINATO TETRACÁLCICO O FERRITA (C_4AF).

Es el producto resultante del uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de cocción durante la fabricación del cemento [8]. La fase ferrita, designada C_4AF , es una solución sólida de composición variable desde C_2F a C_6A_2F . Los componentes posibles de este compuesto son C_2F , C_6AF_2 , C_4AF , y C_6A_2F .

1.3.5. ÁLCALIS.

El sodio y el potasio en el cemento están presentes como fases sulfato o contenidas dentro las fases de los silicatos o aluminatos del cemento anhidro. Más de la mitad de los álcalis no están en forma de sulfatos y se encuentran en C_3A , C_3S y la ferrita en el cemento con concentraciones superiores de álcalis (K o Na).

1.3.6. SULFATO DE CALCIO $C\bar{S}$

El sulfato de calcio puede materializarse como tres minerales distintos: yeso, basanita o hemihidrato y anhidrita (anhidro). Estas son las tres fases que pueden cristalizar en contacto con el agua, aunque el hemihidrato es una fase metaestable. El hemihidrato ocurre en dos formas: tipo α y β , pero el β -hemihidrato es principalmente usado sobre todo desde que el producto de la hidratación del α -hemihidrato es demasiado frágil para ser utilizado como material de construcción. El yeso está presente: cristalizado como selenita, a gran escala como alabastro, o fibroso. Los cristales de yeso son monoclinicos, tomando forma tabular elongada de varios espesores o prismático a forma acicular y, muchas veces formando conjuntos como rosetas. Esta descripción principalmente corresponde a esos observados en el crecimiento de florecimiento de yeso. La basanita ocurre como agujas microscópicas, y los cristales anhidrita son ortorrómbico, di-piramidal, y usualmente masivo. También pueden ocurrir en conjuntos y frecuentemente como grupos de fibras paralelas [9].

1.4. TIPOS DE CEMENTO PORTLAND.

Varios tipos de cementos Portland se pueden elaborar variando las cantidades de los componentes químicos. En general hay cinco tipos principales de cementos Portland cuyas composiciones básicas se resumen en la tabla II.

Tabla II .- Composición de compuestos típicos de cemento portland [10].

Tipo de cemento	Designación ASTM C150	Composiciones, % en peso			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Ordinario	I	55	20	12	9
Moderado calor de hidratación y moderada resistencia al sulfato	II	45	30	7	12
Endurecimiento rápido	III	65	10	12	8
Bajo calor de hidratación	IV	25	50	5	13
Resistente a sulfato	V	40	35	3	14

El *Tipo I* es el cemento Portland normal para usos generales. Se utiliza donde el concreto no está expuesto a un gran ataque por sulfatos del agua o del suelo, o donde no va a producirse un incremento de temperatura importante debido al calor generado por la hidratación del cemento. Aplicaciones típicas del cemento tipo I es en aceras, edificios, puentes, alcantarillas.

El *Tipo II* de cemento Portland se utiliza donde el ataque por sulfatos es importante, como en estructuras de desagüe donde las concentraciones de sulfato en aguas residuales son mayores de las normales. El cemento tipo II se utiliza normalmente en estructuras anchas como pilares y paredes de retención.

El *Tipo III* es una clase de cemento de resistencia temprana y que desarrolla grandes resistencias en un periodo de tiempo corto. Se emplea cuando se requiere que las cimbras de una construcción se necesitan retirar rápidamente y debe ponerse prontamente en uso.

El *tipo IV* es un cemento Portland de bajo calor de hidratación que se utiliza cuando la cantidad de calor debe ser minimizada. El tipo IV de cemento Portland se reserva para estructuras tales como presas donde el calor generado por el endurecimiento del cemento es un factor crítico.

El *tipo V* es un cemento sulfatoresistente usado cuando el cemento está expuesto a severos ataques a sulfatos como aquellos expuestos a suelos y aguas residuales con un alto contenido de sulfato [10]. En México para referirse a un cemento se identifica el tipo en la tabla III, y la clase resistente en la tabla IV. De acuerdo a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004.

Tabla III.- Clasificación del cemento por tipo .

TIPO	DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	Es el cemento producido a base de la molienda de clinker Pórtland y usualmente, sulfato de calcio.
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	Es el cemento que resulta de la integración de clinker portland, materiales puzolánicos y sulfato de calcio.
CPEG	Cemento Pórtland con escoria granulada de alto horno	Es el cemento que resulta de la integración de clinker Pórtland, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	Es el cemento que resulta de la integración de clinker Pórtland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de caliza, éste puede ser único.
CPS	Cemento Pórtland con humo de sílice	Es el cemento que resulta de la integración de clinker Pórtland, humo de sílice y sulfato de calcio.
CEG	Cemento con escoria Granulada de alto Horno	Es el cemento que resulta de la integración de clinker Pórtland, sulfato de calcio y principalmente escoria granulada.

Tabla IV.- Clasificación del cemento por clase resistente.

CLASE RESISTENTE	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, N/mm ²		
	RÁPIDA (3 DÍAS)	NORMAL (28 DÍAS)	
	MIN. N/mm ²	MIN. N/mm ²	MAX. N/mm ²
20	-	20	40
30	-	30	50
30 R	20	30	50
40	-	40	-
40 R	30	40	-

Tabla V.- Nomenclatura para cementos especiales.

NOMENCLATURA	CARACTERISTICAS ESPECIALES DE LOS CEMENTOS
RS	Resistente a los sulfatos.
BRA	Baja reactividad álcali-agregado.
BCH	Bajo calor de hidratación.
B	Blanco.

Los cementos se deben identificar por el tipo y la clase resistente. Además, si el cemento tiene especificada una resistencia a tres días se añadirá la letra R (resistencia rápida). En el caso de que un cemento tenga alguna de las características especiales señaladas en la tabla V, su designación se completa de acuerdo con la nomenclatura indicada en dicha tabla; de presentar dos o más características especiales, la designación se hace siguiendo el orden descendente de la tabla 5, separándolas con una diagonal. En la tabla VI se resumen los tipos de cementos elaborados en México.

Tabla VI.- Componentes de los cementos, los valores de la tabla representan el % en masa.

TIPO	COMPONENTES					
	CLINKER	PRINCIPALES				MINORITARIOS (1)
	Pórtland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales Puzolánicos (2)	Humo de sílice	Caliza	
CPO	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP	50-94	-	6-50	-	-	0-5
CPEG	40-94	6-60	-	-	-	0-5
CPC ⁽³⁾	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	90-99	-	-	1-10	-	0-5
CEG	20-39	61-80	-	-	-	0-5

Nota 1.- Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales, representados en la tabla.

Nota 2.- Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas, artificiales y/o cenizas volantes.

Nota 3.- El cemento Pórtland compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede estar en forma individual en conjunto con clinker + yeso.

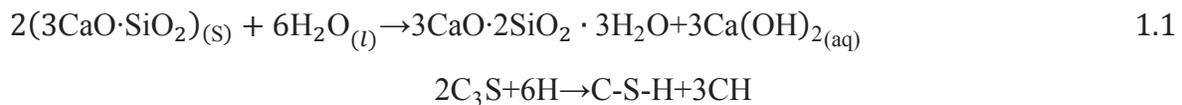
1.5. PROCESO DE HIDRÓLISIS.

La química del cemento usa el término hidratación para representar los cambios que ocurren cuando el cemento no hidratado, o una de sus fases, son mezclados con agua. Esto involucra un complejo grupo de reacciones que causan cambios en la química y propiedades mecánicas y físicas del sistema, particularmente en el fraguado y endurecimiento del sistema. El proceso de hidratación es sensible a muchos factores, entre los cuales la composición del Clinker es de especial relevancia porque éste controla la cinética de hidratación del cemento [11].

La hidratación es una serie de reacciones químicas no reversibles entre el cemento portland y agua. La hidratación comienza tan pronto como el cemento está en contacto con agua. Las partículas de cemento parcialmente disueltas, y los diferentes componentes comienzan a reaccionar a diferentes velocidades generando calor, un proceso que puede elevar la temperatura y que resulta en varios productos de reacción. Las reacciones pueden continuar por años, siempre que el cemento contenga partículas sin reaccionar y agua resultando en desarrollo continuo de resistencia [3]. La velocidad de hidratación de las distintas fases en particular se pueden clasificar en el cemento Portland como: (Romboédrica > triclínica > monoclínica) $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$. Las reacciones químicas para la hidratación del cemento se presentan en forma desarrollada y también se presentan usando la nomenclatura de la química del cemento. La primera reacción está en la forma desarrollada y la segunda está en la forma de la química del cemento.

1.5.1. HIDRATACIÓN DE C_3S .

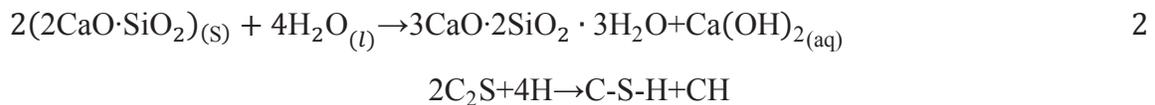
El silicato tricálcico (C_3S) es el mayor componente del cemento Portland y reacciona más rápidamente, dándole al cemento su resistencia a una edad temprana. Su reacción de hidratación es representada por la siguiente reacción química aproximada:



Los productos formados son un hidrato de silicato de calcio conocido como C-S-H o gel de Tobermorita e hidróxido de calcio conocido como Portlandita. La fórmula dada para el gel C-S-H es solo una aproximación porque más de una variedad de C-S-H se forma durante la reacción de hidratación.

1.5.2. HIDRATACIÓN DE C₂S-β.

El silicato dicálcico (C₂S-β) se hidrata mucho más lentamente que el C₃S. Tanto el C₃S y C₂S-β forman productos similares de gel C-S-H y Ca(OH)₂.



El C₂S-β contribuye a la resistencia a largo plazo. Y menos hidróxido de calcio se forma durante la hidratación del C₂S-β que cuando el C₃S es hidratado.

1.5.3. REACCIONES DE C₃A.

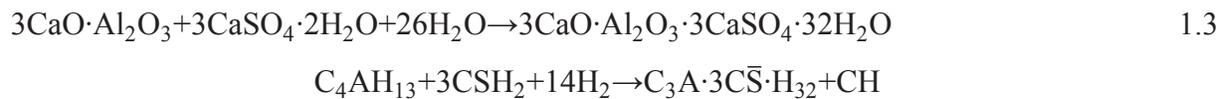
La reacción del aluminato tricálcico (C₃A) con el agua es instantánea. Hidratos cristalinos tales como C₃AH₆, C₄AH₁₉, y C₂AH₈, se forman rápidamente, generando grandes cantidades de calor [5]. Para reducir la velocidad de la reacción de hidratación, se adiciona sulfato de calcio a la mezcla, que causa la formación de etringita. La etringita es un sulfoaluminato de calcio (C₆A \bar{S} ₆H₃₂) que se forma durante las primeras etapas de la hidratación y subsecuentemente crece en una red no cristalina tridimensional. Si la hidratación del C₃A en el cemento no es controlada, ocurre el fraguado muy rápidamente y la mezcla resultante no puede ser usada para la mayoría de aplicaciones en construcción a causa de la baja trabajabilidad [12].

Los resultados demuestran que importantes diferencias ocurren en la hidratación de cada polimorfismo de C₃A y yeso cuando nada de cal es adicionada; C₃A ortorrómbico reacciona más rápido con yeso que la fase cúbica, formando agujas de etringita más largas [12]. Sin embargo, los niveles deben tomarse en cuenta como tema referente de larga

durabilidad, así como la reactividad del aluminato de calcio con soluciones en presencia de sulfato que hacen a los cementos con un alto C_3A propensos a desarrollar una serie de reacciones de deterioro conocidas generalmente como ataque de sulfatos [12].

El aluminato tricálcico (C_3A) normalmente se encuentra en el Clinker del cemento portland entre un 5 a 15% en masa, y éste hidrata muy rápidamente en agua para formar cristales de aluminatos de calcio hidratados de C_2AH_8 y C_4AH_{13} que se convierten con el tiempo a la fase cúbica C_3AH_6 que es más estable, o si la temperatura es suficientemente alta ($>40^\circ C$), C_3A convierte directamente a C_3AH_6 . La secuencia de las reacciones de la hidratación entre el C_3A y yeso a temperatura ambiente pueden ser escritas como sigue:

- Formación de Etringita:

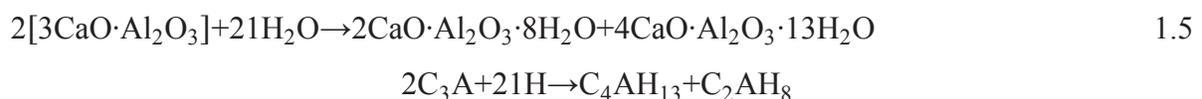


La etringita, por tanto no se forma directamente desde el C_3A sino más bien de las fases hidratadas teniendo bajas relaciones sulfato a aluminato.

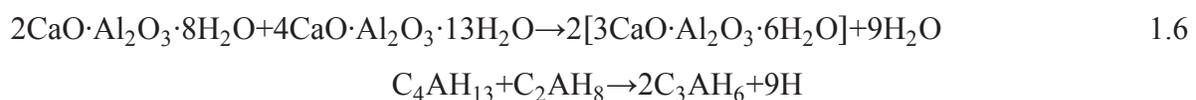
- Formación de monosulfato después del agotamiento de yeso:



- Formación de aluminato de calcio hidratado metaestable:



- Conversión a hidrato cúbico:



En soluciones saturadas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. El C_2AH_8 reacciona con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar C_4AH_{13} o C_3AH_6 , dependiendo sobre las condiciones de formación.

Las pastas de C_3A exhiben menores resistencias que las pastas de los silicatos dentro de condiciones normales de hidratación.

Las reacciones entre el C_3A y el sulfato de calcio en el cemento portland controlan el fraguado rápido que de otro modo podría resultar de la formación rápida de los aluminatos de calcio hidratados hexagonales, C_2AH_8 y C_4AH_{13} . Generalmente es aceptado que la velocidad de hidratación se reduce en la presencia de sulfato de calcio. La retardación es generalmente asociada con la formación de una fase $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CSH}_2$.

1.5.4. REACCIONES DE C_4AF .

La fase ferrita en el sistema puro: $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Fe}_2\text{O}_3$ no forma un compuesto con estequiometría definida, sino que es una solución sólida que tiene un rango de composición definido por $\text{Ca}_2\text{Fe}_{(2-X)}\text{Al}_X\text{O}_5$ donde X varía de 0 a 0.6. El comportamiento de hidratación de C_4AF generalmente se considera igual a del C_3A .

1.6. COMPUESTOS FORMADOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO.

Silicato de calcio hidratado (C-S-H).- Abreviado C-S-H, es un producto de las reacciones de los silicatos, alita (C_3S) y belita ($\text{C}_2\text{S}-\beta$) con agua y constituye de 50 a 60 por ciento del volumen de sólidos en una pasta de cemento Portland bien hidratada y es, por lo tanto, el más importante en determinar las propiedades de la pasta. El C-S-H no es un compuesto bien definido; la relación C/S varía entre 1.5 a 2.0 y el contenido de agua estructural varía aún más. La forma de solidificar del C-S-H también varía desde fibras pobremente cristalinas a una red reticular. La resistencia del material se atribuye principalmente a fuerzas de atracción de Van der Waals. La adhesión entre dos superficies sólidas puede ser atribuida a esas fuerzas físicas. Los cristales pequeños de C-S-H, sulfoaluminatos de calcio hidratados, aluminatos de calcio hexagonales hidratados poseen enormes áreas superficiales y capacidad adhesiva. Estos productos de la hidratación del cemento Portland tienden a

adherirse fuertemente no solo entre sí, sino también a sólidos de área superficial baja como el hidróxido de calcio, y partículas de agregado fino y grueso.

La naturaleza exacta del C-S-H, que se forma en la hidratación del cemento Portland tiene estequiometría variable y es afectada por muchos factores, incluyendo la composición del cemento, la relación de agua/cemento, temperatura de curado, el grado de hidratación, y el uso de materiales cementicios suplementarios. El principal parámetro que controla la formación de varias estructuras C-S-H sintéticas es la relación molar de partida de CaO a SiO₂ (relación C/S).

El silicato de calcio hidratado posee un nivel importante complejidad estructural. Se conocen más de 30 fases de silicatos de calcio hidratados, Estas fases a temperatura ambiente tienen estructuras que son semicristalino a cercanamente amorfo, y todas ellas son descritos por el término, “C-S-H” términos más específicos son usados cuando es necesario. Las fases de silicato tricálcico (C₃S) y el silicato dicálcico (β -C₂S) constituyen alrededor del 75% del cemento Portland. La hidratación de estos silicatos resulta en la obtención de un gel amorfo (con estructura desordenada) llamado “gel C-S-H” para distinguirlo de las fases C-S-H obtenidas por síntesis de otros compuestos tales como la reacción entre el CaO y el SiO₂ o bien por la descomposición de una sal de Ca y la posterior reacción con un silicato alcalino en solución acuosa.

C-S-H (I)

Las fases sintéticas de C-S-H con una relación entre $0.7 < C/S < 1.7$ han sido referidas como C-S-H (I). Las fases de silicatos de calcio hidratados (C-S-H), $x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$, constituyen los principales productos de la hidratación y las fases de aglomeración primaria en los productos de cemento Portland.

Cuando el CaO y SiO₂, o un silicato alcalino y una sal de Ca, o silicatos de calcio tal es como C₃S o β -C₂S reaccionan a temperatura ambiente en suspensiones acuosas diluidas, resulta una fase imperfecta de Tobermorita 1.4 nm, llamada C-S-H (I). El C-S-H (I) puede acomodar una concentración substancial de defectos en su estructura tales como la omisión de puentes tetraédricos o también puede contener variaciones en el contenido de Ca en la intercapa y protones unidos a Si-O⁻. Esos cambios permiten variaciones en la relación

Ca/Si, que van desde 0.67 hasta 1.5. Y la longitud de la cadena, aumenta disminuyendo la relación Ca/Si, particularmente por debajo de una relación de 1.1 a 1.3.

C-S-H (II)

Varios estudios han identificado una fase única llamada C-S-H (II) obtenida después de la reacción prolongada del C_3S o del $\beta-C_2S$ con exceso de agua. Donde la relación de Ca/Si del C-S-H (II) es cercana a 2.

Gel C-S-H.

La reacción de C_3S o $\beta-C_2S$ con la mitad de su peso de agua produce una pasta endurecida que contiene dos productos: gel C-S-H y $Ca(OH)_2$. El gel C-S-H es aún menos ordenado que el C-S-H (I) o C-S-H (II). La relación de Ca/Si en el gel C-S-H es de 1.7-1.8.

Hidróxido de calcio. Los cristales de hidróxido de calcio también llamados portlandita constituye de 20 a 25 por ciento del volumen de sólidos en la pasta hidratada. En contraste con el C-S-H, el hidróxido de calcio es un compuesto con estequiometría definida, $Ca(OH)_2$. Tiende a formar cristales con una morfología distintiva hexagonal prismática. Es afectada por el espacio disponible, temperatura de hidratación, e impurezas presentes en el sistema. Comparado con el C-S-H, la resistencia que aporta el hidróxido de calcio debido a las fuerzas de van der Waals es limitado como resultado de la baja área superficial. También, la presencia de una cantidad considerable de hidróxido de calcio en el cemento Portland hidratado tiene un efecto adverso sobre la durabilidad química de cemento Portland en soluciones ácidas por efecto de la mayor solubilidad del hidróxido de calcio en este medio, que es mayor que la del C-S-H.

Sulfoaluminatos de Calcio.- Los compuestos de sulfoaluminatos de calcio ocupan de 15 a 20 por ciento del volumen de sólidos en la pasta hidratada. Durante los primeros días de la hidratación la relación iónica sulfato/alúmina de la solución favorece la formación de trisulfato hidratado, $C_6\bar{A}S_3H_{32}$, también llamada etringita, que forma cristales prismáticos en forma de agujas. En la pasta de cemento Portland ordinario, la etringita eventualmente se transforma a monosulfato hidratado, $C_4\bar{A}SH_{18}$, que forma cristales hexagonales en forma de

placa. La presencia de monosulfato hidratado en el cemento Portland hace al concreto vulnerable al ataque de sulfatos. Granos de Clínter sin hidratarse.- Dependiendo en la distribución del tamaño de partícula del cemento anhidro y el grado de hidratación, algunos granos de Clínter anhidros pueden ser encontrados en la microestructura de pastas de cemento hidratado.

1.7. HIDRATACIÓN DE CS̄.

Las reacciones 1.7 y 1.8 muestran la hidratación del hemihidrato, que toman lugar rápidamente después de mezclarlo con agua vía ruta a través de solución, primeramente el hemihidrato disuelve reacción 1.7 y entonces el dihidrato generado precipita desde la solución, reacción 1.8. La reacción 1.9 muestra la reacción de hidratación completa y es una combinación de los pasos anteriores.



En cementos Portland la fuente de la mayor parte del sulfato SO₃ es el yeso, o sulfato de calcio en una de sus varias formas posibles, que es adicionado al Clínter. El objetivo principal de este aditivo es retardar la tendencia de fraguado rápido del Clínter de cemento Portland debido a la alta reactividad del C₃A. El sulfato de calcio puede ocurrir como yeso (CaSO₄·2H₂O), hemihidrato (CaSO₄·1/2H₂O), anhidrita (CaSO₄). Comparado a los compuestos del Clínter, el yeso disuelve rápidamente en agua; sin embargo, el hemihidrato es más soluble y está presente en los cementos debido a la descomposición del yeso, que es adicionado al Clínter durante el proceso de molienda final.

1.8. REACCIÓN DE CH.

La reacción entre una puzolana e hidróxido de calcio es llamada la reacción puzolánica. La puzolana un material silíceo o silicoaluminoso, el cual tiene poco o nulo valor cementante, pero en forma muy fina y en presencia de humedad reaccionará químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar un producto cementante. Al hablar de puzolanas en general, conviene notar que la sílice debe ser amorfa, porque la sílice cristalina tiene reactividad muy baja. Las cenizas volantes reaccionan sometándose a una reacción puzolánica con el hidróxido de calcio creado por la hidratación del cemento y el agua, para crear el mismo aglutinante silicato de calcio hidratado como el cemento.



La ceniza volante reduce el hidróxido de calcio, que se combina con los sulfatos para producir yeso. El yeso es un material que tiene mayor volumen que el hidróxido de calcio y los sulfatos que se combinan para formarlo, causando daño por expansión. La importancia técnica de los cementos puzolánicos principalmente deriva de tres características de la reacción puzolánica. Primero la reacción es lenta, por lo tanto, las velocidades de liberación de calor y la resistencia desarrollada será en consecuencia lenta. Segundo, la reacción está consumiendo calor en lugar de producir calor, la cual tiene un aspecto importante en la durabilidad de la pasta hidratada en ambientes ácidos. Tercero, la distribución del tamaño del poro, los productos de la reacción es muy eficiente en llenar totalmente espacios capilares grandes, mejorando así la resistencia e impermeabilidad del sistema. Además de la sílice reactiva, las puzolanas aportan alúmina reactiva, que en presencia de hidróxido de calcio y iones sulfato en el sistema, también forma productos cementicios tales como etringita, y monosulfato. Las cuales varían dependiendo de las condiciones de curado y las características físico-químicas de los materiales constituyentes presentes.

1.9. CARBONATACIÓN DEL CEMENTO.

En servicio, los materiales basados en cementos Portland generalmente están expuestos a infiltración de agua subterránea o filtrado de agua de lluvia, y por lo tanto sujetos a corrosión. Si el agua contiene CO_2 , el efecto es que el ácido carbónico neutraliza los álcalis en la estructura interna del cemento. El silicato de calcio hidratado (C-S-H), que es el producto de la hidratación dominante que resulta de la hidratación normal del cemento Portland, se disuelve por el medio ácido, por consiguiente, afectando las características de lixiviación y la durabilidad de los productos de cemento con el tiempo. Conforme se lleva a cabo el ataque ácido, resulta la disolución de las fases primarias de cemento y la precipitación de fases secundarias [13]. El mineral secundario principal, CaCO_3 , se forma por la combinación de CO_2 húmedo con Ca^{2+} , se moviliza a través de la disolución de hidróxido de calcio (portlandita), y de la decalcificación de la fase del gel, C-S-H para dejar hidrato de silicato [14]. Cuanto más C_3S contiene el aglutinante, mayor será el potencial para producir un producto carbonatado.

1.9.1. DEFINICIÓN DE LA REACCIÓN DE CARBONATACIÓN.

El dióxido de carbono ionizado induce solvatación de iones calcio desde las fases sólidas, las cuales entonces reprecipitan en el espacio del poro de la mezcla como CaCO_3 , formando un producto solidificado [15].

1.9.2. MECANISMO DE REACCIÓN.

El siguiente es el mecanismo que tiene lugar durante la carbonatación de materiales cementicios. Los pasos individuales en la secuencia son:

- 1) Difusión de CO_2 en el aire.
- 2) Infiltración de CO_2 a través del sólido.
- 3) Solvatación de $\text{CO}_{2(\text{g})}$ a $\text{CO}_{2(\text{aq})}$. La transferencia de la capa límite se ve favorecida por una gran superficie interna del sólido.
- 4) Hidratación de $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ a H_2CO_3 . Este es un proceso lento, que determina la velocidad de paso.

- 5) Ionización de H_2CO_3 a H^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} . Esto ocurre de forma casi instantánea, haciendo caer el pH por aproximadamente 3 unidades, típicamente de 11 a 8.
- 6) Disolución de las fases cementicias C_3S y C_2S . Debido a que el proceso es cíclico, este paso es rápido y extenso. Los granos de silicato de calcio están cubiertos por una capa suelta de gel silicato de calcio hidratado, que se disuelve rápidamente, liberando iones Ca^{2+} y SO_4^{4-} .
- 7) Nucleación de CaCO_3 , C-S-H. La nucleación se ve favorecida por temperaturas ligeramente altas y la presencia de material finamente dividido, que actúa como núcleos heterogéneos.
- 8) Precipitación de las fases sólidas. En un principio se pueden formar, vaterita y aragonita, pero estos polimorfismos del CaCO_3 finalmente regresan a la fase calcita. El carbonato de calcio amorfo se puede encontrar en el producto final.
- 9) Carbonatación secundaria. El gel C-S-H formado es progresivamente decalcificado convirtiéndose finalmente en S-H y CaCO_3 .

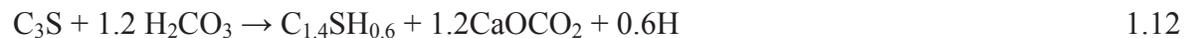
1.9.3. REACCIONES.

La estequiometría global de la reacción de la carbonatación de las fases principales de los silicatos en el cemento indican que la carbonatación es acompañada por la hidratación, y es seguida con cierto retraso por carbonatación secundaria.

Primero, el dióxido de carbono disuelve en agua para formar ácido carbónico:



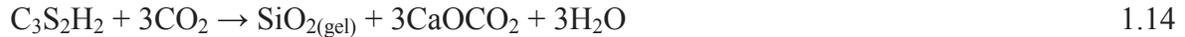
El ácido carbónico promueve una reacción.



La carbonatación del gel es la mayor reacción.



Después de la carbonatación proceden más cambios en la composición del gel C-S-H. El C-S-H es completamente descalcificado y finalmente transformado en carbonato de calcio y el gel sílice, altamente polimerizado. Este gel es estable y mantiene una morfología similar al hidrato original [16].



Consecuencias físicas. Una de las principales reacciones, la carbonatación del hidróxido de calcio, se acompaña por un aumento en el volumen sólido [17], que es causado por la siguiente reacción:



Cada mol de hidróxido de calcio se convierte en carbonato con el consiguiente aumento de 11.8% en el volumen del sólido. El carbonato de calcio se precipita dentro de la microestructura de la matriz del material cementicio y este aumento de volumen dará lugar a cambios estructurales.

1.9.4. CAMBIOS MICROESTRUCTURALES.

La portlandita es una estructura cristalina, que se supone está íntimamente creciendo en medio del C-S-H. La microestructura se caracteriza por la precipitación de calcita en los poros, la decalcificación del gel C-S-H, y la producción de yeso desde la descomposición de etringita. Durante la carbonatación, los tres polimorfismos de carbonato de calcio se pueden producir. La morfología de la calcita por pequeños cristales estrechamente empaquetados (< 3 μm) de forma acicular. El C-S-H no se convierte en gel de sílice por la reacción con CO₂. Este gel tiene una estructura de polímero ramificado, y por medio de la carbonatación, la polimerización se promueve con una reorganización estructural dando lugar a una estructura de armazón de sílice.

1.10. MATERIALES PUZOLÁNICOS.

La puzolana es un material natural o artificial que contiene sílice en una forma reactiva. La puzolana es un material silíceo o silicio aluminoso, el cual tiene poco o nulo valor cementante, pero en forma de polvo fino y en presencia de humedad reaccionará químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas normales para formar un compuesto con propiedades cementantes. Es esencial que la puzolana esté finamente dividida, a fin de que la sílice pueda combinarse con la cal liberada por la hidratación del cemento Portland en presencia de agua, para formar silicatos de calcio hidratados estables con propiedades cementantes. Los materiales puzolánicos que frecuentemente encontramos son: ceniza volcánica -la puzolana original-, pumocita, esquistos de opalina, tierra diatomáceas calcinadas, arcilla quemada, ceniza volante, etc. Las puzolanas y las escorias se clasifican como material cementante suplementario o adición minera [1]. El uso de materiales cementantes suplementarios en concreto viene creciendo desde la década de los 70. Su empleo es deseable no solo bajo el punto de vista de la conservación del medio ambiente y de la energía, sino también por los beneficios que estos materiales ofrecen al concreto. La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadores de electricidad y es un material cementante suplementario. Bajo la combustión en el horno, la mayor parte de la materia volátil y el carbón se queman. Durante la combustión, las impurezas minerales del carbón (tales como arcilla, feldespato, cuarzo y esquisto) se funden en suspensión y se transportan hacia afuera de la cámara por los gases de escape. En el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica como pequeñas esferas vítreas llamadas cenizas volantes, Figura 1.1 (a). Luego, se colecta la ceniza volante de los gases de escape a través de precipitadores electrostáticos o de filtros de manga. La ceniza volante es un polvo finamente dividido parecido al cemento Portland figura 1.1 (b). La mayoría de las partículas de la ceniza volante son esferas y algunas son cenizas huecas. También se pueden presentar en la forma de plerosferas, que son esferas que contienen esferas menores (Figura 1.2).

La ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Los constituyentes menores son magnesio, azufre, sodio, potasio y carbón [8]. Los compuestos cristalinos están presentes en pequeñas cantidades. La masa específica relativa de la ceniza volante normalmente varía de 1.9 a 2.8 y el color es generalmente gris marrón.

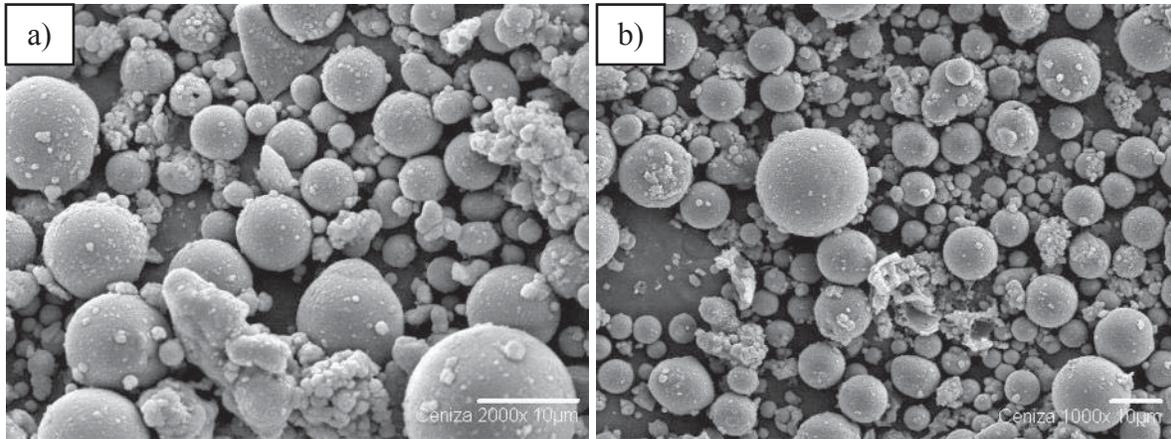


Figura 1.1.- Micrografías de ceniza volante clase F, a) a 2000X, y b) a 1000X.

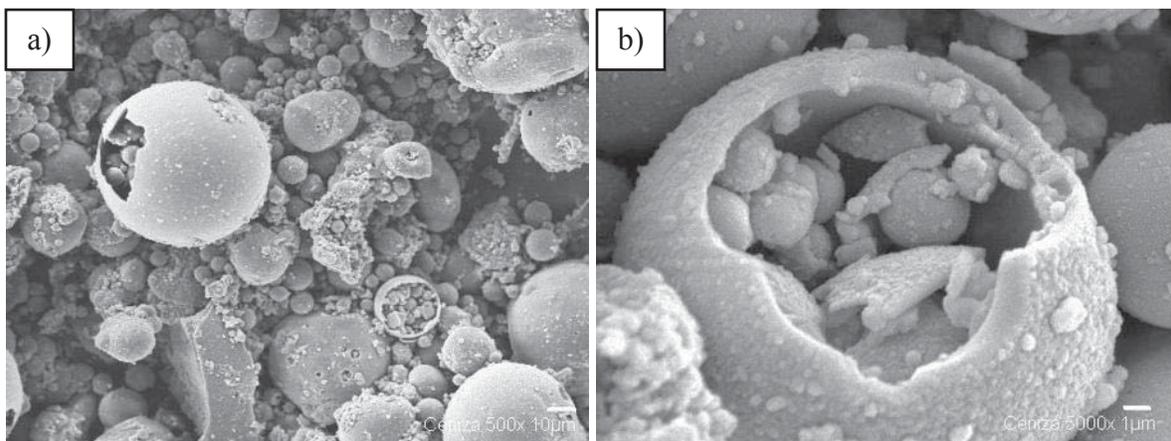


Figura 1.2.- Micrografía de la ceniza volante clase F, a) plerosfera a 500X, y b) plerosfera a 5000X.

Las cenizas volantes clase F y clase C de la ASTM C 618 se emplean comúnmente como aditivos puzolánicos en concretos. Las cenizas de clase F son normalmente cenizas volantes con bajo contenido de calcio, menos del 10% de CaO, y el contenido de carbón menor de 5%, pero algunas pueden tener hasta 10%. Los materiales de la clase C normalmente presentan un alto contenido de calcio, del 10% al 30% de CaO. La ceniza volante clase F se usa en una proporción del 15% al 25% de la masa del material cementante y la ceniza volante clase C del 15% al 40% de la masa del material cementante. La dosificación varía con la reactividad de la ceniza volante [18]. Las propiedades ingenieriles de la ceniza volante que son de interés particular cuando la ceniza volante es usada en el cemento como un material cementicio suplementario son como sigue:

- A. Finura: La finura es la principal característica física de la ceniza volante que se relaciona a la actividad puzolánica. Como la finura aumenta, la actividad puzolánica se espera que aumente.
- B. Actividad puzolánica: La actividad puzolánica se refiere a la capacidad de los componentes de sílice y alúmina de la ceniza volante para que reaccionen con el calcio y/o sodio disponible desde los productos de la hidratación del cemento portland.
- C. Trabajabilidad: A una relación de agua-cemento, la forma esférica de la mayoría de las partículas de la ceniza volante permite mayor trabajabilidad que la que adquiriría con mezclas de concreto convencional.
- D. Sangrado: El sangrado suele ser reducido a causa de un mayor volumen de finos y menor contenido de agua requerida para un grado de trabajabilidad dado.
- E. Permeabilidad: Como el tamaño de la ceniza volante es mucho más pequeño, la mezcla es mucho más densa reduciendo la permeabilidad. La reacción puzolánica producida por la ceniza volante genera compuestos cementicios adicionales que actúan llenando el espacio de poro y reduciendo la permeabilidad del cemento endurecido.
- F. Resistencia al ataque por sulfatos: Los álcalis presentes en el cemento reaccionan con la sílice presente en los agregados causando reacciones expansivas, que pueden causar la fractura. Cuando la ceniza volante es usada como un remplazamiento del cemento, los álcalis totales en la mezcla se reducen para mitigar la reacción álcali-sílice. La sílice presente en la ceniza volante reacciona con los álcalis presentes en el cemento para formar un gel de sílice-álcali-calcio no expansivo mediante la reducción de los álcalis libres que reaccionan con los agregados.

1.11. FIBRA DE VIDRIO.

Las fibras fueron usadas como material de construcción por muchos siglos. En las últimas décadas hubo un crecimiento por el interés en el uso de fibras en el concreto, concreto prefabricado y concreto lanzado. Las fibras de acero, plástico, vidrio y materiales naturales (celulosa de madera) están disponibles en una amplia variedad de formas y tamaños. Los factores principales que controlan el desempeño del material compuesto son:

1. Propiedades físicas de las fibras y de la matriz.
2. Resistencia de adherencia entre la fibra y la matriz.

Las fibras se adicionan al concreto normalmente en bajos volúmenes (frecuentemente menos de 1%) y han mostrado eficiencia en el control de la fisuración por contracción. Las fibras no alteran considerablemente la contracción libre del concreto, pero, si son empleadas en cantidades adecuadas, pueden aumentar la resistencia al agrietamiento y disminuir la abertura de las fisuras. En la primera investigación sobre fibras de vidrio se realizó a principio de los años 60, se usó vidrio convencional de boro silicato (fibras de vidrio-E). Los resultados de las pruebas mostraron que la reactividad entre las fibras de vidrio-E y la pasta del cemento reduce la resistencia del concreto. La fibra de vidrio E está compuesta de 53-54% de SiO_2 , 14-15.5% de Al_2O_3 , 16% de CaO , 5% de MgO y 6.5-9% B_2O_3 y de $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ menos de 1% [19]. El vidrio tipo E tiene un peso específico de 2.6 g/cm^3 . Y este consiste de una red amorfa de silicio-oxígeno Figura 1.3.

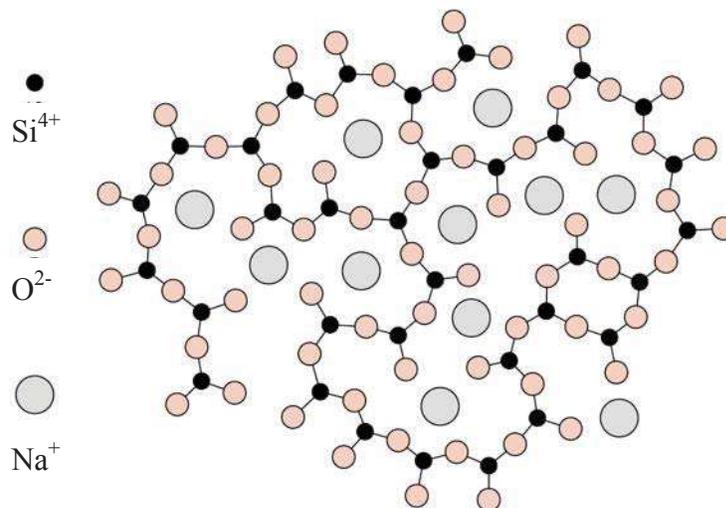
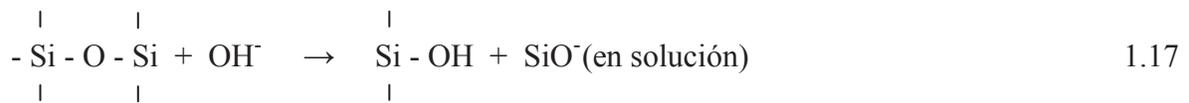


Figura 1.3.- Estructura del vidrio [20].

La exposición de las fibras de vidrio tipo E en ambientes alcalinos conduce a un proceso de deterioro que involucra pérdida de resistencia, peso y una reducción del filamento. Este proceso se atribuye al rompimiento de los enlaces de Si-O-Si en la estructura del vidrio, por los iones OH^- :



El rompimiento de la estructura lleva al daño superficial del vidrio por picaduras y los productos de la reacción pueden disolverse, filtrarse o se pueden acumular en la superficie del vidrio.

1.12. PROBLEMÁTICA ESTABLECIDA.

Los cementos reforzados con fibra de vidrio pueden sufrir una pérdida de resistencia y dureza cuando son expuestos a ambientes húmedos. Esta reducción en las propiedades se ha atribuido a dos fenómenos principales: i) ataque alcalino en las fibras de vidrio por los iones hidroxilo derivados de la hidratación de la matriz de cemento, lo que resulta en alteración química y reducción de su resistencia; ii) cambios en la interface fibra-matriz, que densifica la matriz en la interface de la fibra de vidrio. Este último se relaciona a la depositación de los productos de la hidratación principalmente al $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dentro de las fibras de vidrio que resulta en mejora en el unión de los filamentos individuales. El modo de falla de las fibras de vidrio debido a cambios de envejecimiento van desde desprendimiento de las fibras a fractura a la tensión de las fibras, esto conduce a la fragilidad del compuesto. Para superar la reducción en resistencia y ductilidad de los cementos reforzados con fibra de vidrio con el tiempo, se han desarrollado dos líneas de investigación: El uso de fibras resistentes a los álcalis (RA) con un alto contenido de zirconia. La modificación la matriz de cemento Portland con varios aditivos tales como humo de sílice, escoria, ceniza volante, y metacaolín. El objetivo de tales aditivos es reducir la alcalinidad y eliminar la depositación de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ alrededor de las fibras.

1.12.1. MODIFICACIÓN DE LA MATRIZ DE CEMENTO CON CENIZA VOLANTE.

El estudio de adición de ceniza volante en la matriz de cementos Portland para disminuir la alcalinidad del cemento y mejoramiento en las propiedades mecánicas ha sido tema de estudio. Investigaciones anteriores sobre la modificación de la matriz de cemento Portland con la sustitución de ceniza volante se han realizado, Kayali 2004 [21] investigó los efectos de incluir volúmenes altos de ceniza volante como remplazamiento de los finos en la arena para concretos reforzados con fibras. Se realizaron dos series de morteros de una matriz de cemento y humo de sílice con 10% en masa del cemento Portland. Se utilizaron fibras de acero y propileno en un 0.75% en volumen del concreto, y para evaluar el efecto de la ceniza volante se utilizaron 275 kg por metro cúbico de concreto. El diseño de las mezclas se elaboró en la base que la ceniza volante se consideró como un remplazamiento parcial de los finos. Y la porción de la ceniza volante considerada fue aproximadamente una tercera parte del total del agregado fino en volumen. Y para evaluar el efecto de la fibra de vidrio en esta matriz se adicionaron 0.75% y 1% del volumen del concreto. Todas las mezclas se diseñaron para que tuvieran un revenimiento de 100 mm. Las muestras se analizaron para la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad. Al final de su estudio, el autor concluye que el uso de volúmenes altos de ceniza volante en el concreto reforzado con fibra resultó en un gran aumento en sus características mecánicas. Esto lo atribuye a la actividad puzolánica de la ceniza volante que reemplaza la capa cristalina orientada preferencialmente de hidróxido de calcio en la interface con productos de hidratación más densos que imparten mayor resistencia a la matriz y mayor capacidad de unión entre la matriz y las fibras. Sin embargo, las muestras solo fueron analizadas hasta 90 días, siendo un periodo corto de hidratación para la degradación de las fibras. También en el análisis de los resultados a 90 días casi no se nota la diferencia entre los dos porcentajes de refuerzo. La actividad puzolánica se pudo deber a la adición de humo de sílice, lo que no es concluyente ya que el incremento en resistencia a la compresión se debió únicamente a la adición de la ceniza volante, ya que todas las muestras tuvieron el 10% de humo de sílice.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

En este capítulo se describen los materiales, métodos y procedimientos utilizados en la experimentación. Para la investigación se describe el procedimiento de manera general. Figura 2.1.

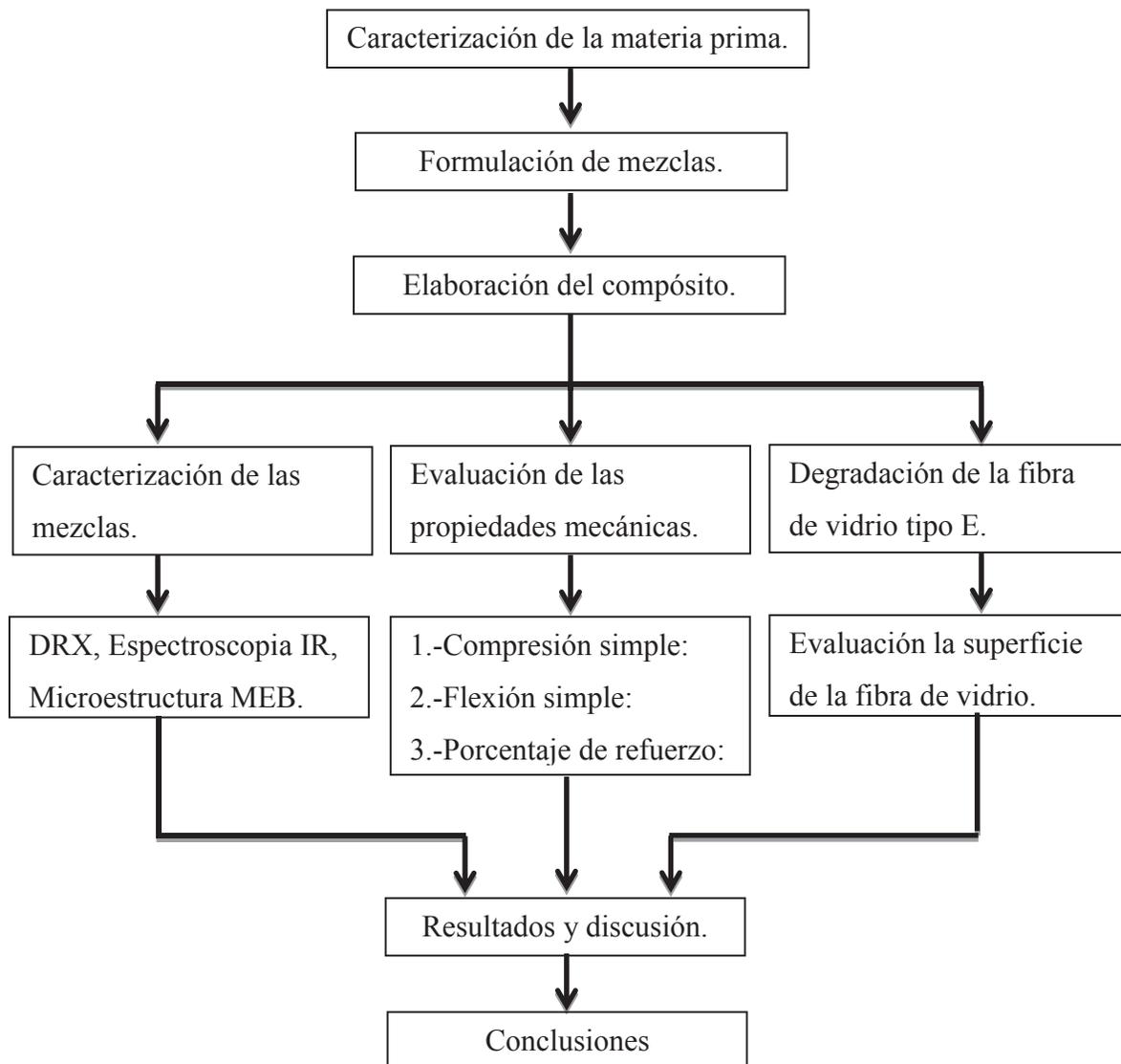


Figura 2.1.- Diagrama de flujo del desarrollo experimental

2.1. MATERIAS PRIMAS.

Las materias primas utilizadas fueron: cemento Apasco CPC 30 R, Yeso Supremo San Luis, ceniza volante clase F de la termoeléctrica de Petacalco, Guerrero, fibra de vidrio tipo E, y un aditivo súper plastificante Eucon Precast AE (The Euclid Chemical Company). El agua utilizada fue de la red potable de Morelia. Estas son materias primas de uso comercial usadas en la industria de la construcción.

2.2. SÚPER PLASTIFICANTES

Entre los aditivos más importantes que se utilizan actualmente en la elaboración de concreto están los súper plastificantes, que se prefieren por su capacidad para mejorar las propiedades del concreto, haciéndolos: a) más trabajables y más fáciles de colocar; b) tienen mejor comportamiento mecánico debido a menor relación agua/cemento requerida; c) más barato porque el contenido de cemento se puede optimizar.

La estructura molecular del policarboxilato PC se muestra en la figura 2.2. Su estructura tipo peine se compone de una cadena lineal principal con grupos y cadenas laterales constituidas por grupo carboxilato y grupos éteres. Estos aditivos se adsorben a través de los grupos carboxilato sobre las partículas de cemento y originan su dispersión como consecuencia de la repulsión electrostática y fundamentalmente repulsión estérica, asociada a las largas cadenas de grupos éteres.

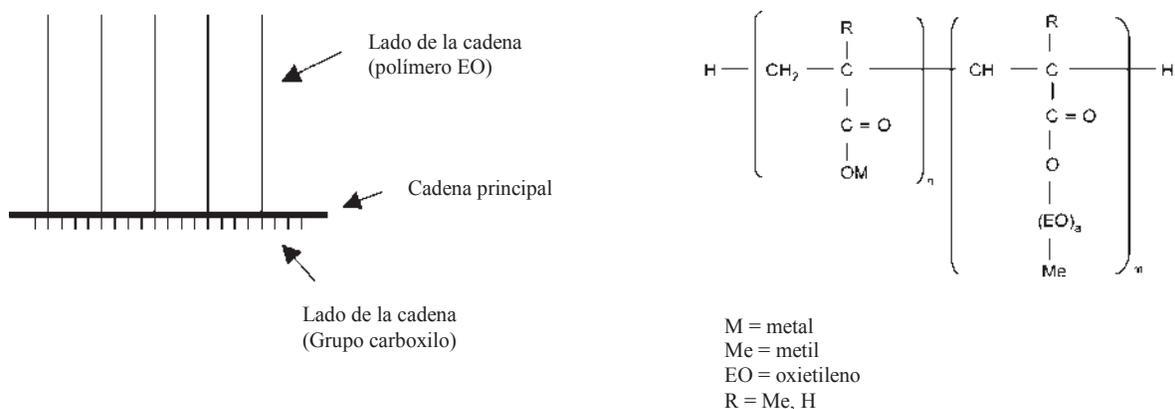


Figura 2.2.- Estructura química del aditivo policarboxilato [22].

El uso de aditivos PC hace posible reducir el contenido de agua hasta en un 40%, produciendo trabajabilidad, y de alta rendimiento, y por lo tanto un concreto muy resistente. El empleo de aditivos basados en policarboxilato también produce una disminución en la porosidad y, por lo tanto, una mejora de sus propiedades mecánicas. El efecto de aditivos de policarboxilato sobre el comportamiento mecánico, mineralógico, microestructural y reológicas de pastas de cemento portland, se observó que la presencia de aditivos de PC retardan las reacciones de hidratación iniciales, aunque este efecto puede ser compensado por posible aumento de difusión en etapas posteriores. El uso de aditivos PC no altera los productos formados en las pastas y principalmente no afecta el gel C-S-H, y la cantidad de este producto es similar después de 28 días de hidratación, pero por análisis espectroscópicos muestran una pequeña alteración en la estructura y composición del gel C-S-H originado. Así también, el aditivo no afecta la resistencia mecánica de las pastas [23]. El aditivo súper plastificante utilizado de la marca Eucon Precast AE es un aditivo Súper plastificante reductor de agua de alto rango a base policarboxilato, para la trabajabilidad de la mezcla a pesar de las bajas relaciones de agua-cemento.

2.3.- FORMULACIÓN DE LAS MEZCLAS Y ELABORACIÓN DEL COMPÓSITO.

Para analizar el efecto de la composición de las cuatro materias primas (Cemento Apasco portland CPC 30 R, Yeso Supremo San Luis, Ceniza volante clase F y fibra de vidrio tipo E), se formularon 20 mezclas diferentes mostradas en la tabla VII. El análisis de las veinte mezclas es importante para identificar la mezcla óptima. Así también, se analizaron dos ambientes de hidratación una a temperatura ambiente y otro en condición de saturación en agua, con el fin de analizar la reactividad puzolánica.

Tabla VII .- Composición de las mezclas usadas en la elaboración del compuesto en % en peso.

Mezcla	Cemento (g)	Yeso (g)	Ceniza (g)	Fibra de vidrio (g)
A1	0	1000	0	0
A2	250	750	0	0

A3	500	500	0	0
A4	750	250	0	0
A5	1000	0	0	0
B1	0	1000	0	30
B2	250	750	0	30
B3	500	500	0	30
B4	750	250	0	30
B5	1000	0	0	30
D1	0	1000	200	0
D2	250	750	200	0
D3	500	500	200	0
D4	750	250	200	0
D5	1000	0	200	0
E1	0	1000	200	30
E2	250	750	200	30
E3	500	500	200	30
E4	750	250	200	30
E5	1000	0	200	30

2.4.- ELABORACIÓN DEL COMPÓSITO.

El procedimiento para elaborar probetas tanto para el ensayo de compresión (ASTM C 109/C 109M-99), así como para el de flexión (ASTM C 348-97) el procedimiento es el mismo, lo único que cambia son los moldes utilizados. Las proporciones de los materiales para las probetas estándar se realizaron en peso; el cemento, yeso, y la fibra de vidrio se pesaron en una báscula con aproximación al centésimo de gramo. Y usando una relación A/C “agua/material cementante” (cemento + yeso) de 0.4, por cada 400 de agua potable se utilizaron 15 g de súper plastificante. Hay varios procesos para la elaboración de materiales fibroreforzados. En esta investigación se utilizó el proceso del premezclado, donde las fibras se combinan con la matriz cementicia mezclándolo simplemente como un material adicional. El agua se incorpora hasta que la mezcla fue uniforme, mezclando por aproximadamente 1 min. Después de haber realizado el mezclado del material, se procede a llenado de los moldes. Y después de haber realizado el llenado de los moldes, y de ahí las probetas se almacenaron a temperatura ambiente por 24 horas (tiempo del fraguado final del cemento). Inmediatamente después de haberse completado las 24 horas de almacenamiento se procedió al desmolde. Para analizar las condiciones de prueba a

temperatura ambiente y en ambiente saturado; para la temperatura ambiente las probetas fueron almacenadas en un estante donde estaban en condiciones ambientales, y para ambiente saturado las probetas se sumergieron en agua hasta la edad de prueba. Las edades de prueba fueron las siguientes: para compresión de 1, 7, 28, 90, y 180 días, y para flexión de 7, 28, 90 y 180 días. Estas pruebas se realizaron de acuerdo a la norma ASTM.

2.5. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

2.5.1. FLUORESCENCIA DE RAYOS-X.

La espectroscopía de Fluorescencia de Rayos-X es una técnica empleada, cuando se quiere conocer la composición química de una sustancia. Mediante esta técnica es posible determinar la mayoría de los elementos de la tabla periódica, desde el Na hasta el uranio, tanto en muestras sólidas, polvos y en líquidos. La Fluorescencia de Rayos-X permite el análisis químico cualitativo y cuantitativo de materiales cristalinos y amorfos.

La técnica se basa, en el estudio de las emisiones de fluorescencia de Rayos-X generados después de la excitación de una muestra mediante una fuente de Rayos-X. Los átomos presentes en la muestra analizada son excitados de modo que los electrones de las capas internas son arrancados o excitados a niveles de energía superiores. Los electrones de otras capas minimizan su energía ocupando los huecos electrónicos que quedan libres, de modo que la energía asociada a dichas transiciones se remite en forma de fotones. A estas emisiones se les conoce como emisiones de fluorescencia o radiación secundaria. Esta técnica se utilizó para conocer los óxidos presentes en las materias primas.

2.5.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X (DRX).

La difracción de Rayos-X es una de las técnicas más usadas en la ciencia del cemento. Esta técnica es capaz de identificar y valorar la estructura de muchas fases hidratadas y anhidras del cemento Portland. Sin embargo, no puede ser eficientemente usada para el C-S-H y otras fases que son casi amorfos. La difracción es usada para seguir la cinética de hidratación del cemento en la presencia y ausencia de aditivos minerales.

La difracción de Rayos-X es una técnica analítica no destructiva, y es usada para identificar las fases cristalinas presentes en muestras sólidas o en polvo, tanto cu alitativamente como cuantitativamente. El estudio de la composición mineralógica se realizó por la técnica de difracción de Rayos-X, la cual también se utilizó para analizar la hidratación del cemento y del yeso producido en los compositos. Los polvos de las muestra s fueron analizados utilizando un difractómetro de Rayos-X marca SIEMENS D5000 con una r adiación monocromática de Cu K α de 1.54056, operando a 20 kV y con un barrido en un rango de 5 a 70°, una velocidad de barrido de 2 grados/minuto.

2.5.3. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA.

La finura es un par ámetro importante que de termina la reactividad d el cemento. Un aumento en la finura corresponde a un aumento en el área superficial que debería estar en contacto con el a gua durante la hidrata ción, y así un aumento en la velocidad de hidratación. La distribución del tamaño de part ícula esta estrechamente relacionado a la finura.

2.5.4. ESPECTROSCOPÍA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (EITF).

El espectro de absorción infrarrojo de un compuesto puede ser us ado como una huella o proporcionar un an álisis cualitativo o cuantitati vo de mezclas. Su peculiar co ntribución surge del hecho que éste es una función de las masas atómicas y fuerzas interatómicas, y su geometría. La espectroscopía infrarroja está basada en la interacción de la luz con la materia y permite la identificación de los enlaces químicos presentes. Cuando la ra diación infrarroja penetra en un material, puede ser absorbida por éste y estimular la vibración de los enlaces químicos presentes en el materi al. Las diferentes combinaciones de masas atómicas y energías de enlaces constituyen sistemas que vibran a diferentes frecuencias, así los diferentes movimientos vibracionales del átomo en la mol écula producen absorción característica a diferentes números de onda. Existe una correlación entre la frecuencia a la que una molécula absor be radiación infrarroja y su estructura. Esta co rrelación permite identificar la estructura de moléculas des conocidas a partir d e su espe ctro de infra rojo. Esta técnica permite identificar ambas muestras cristalinas y amorfas. La caracterización de

las muestras en pastillas de las materias primas, se llevo a cabo mediante la técnica de reflexión total atenuada ATR (con un cristal de ZnSe), utilizando un espectrómetro: TENSOR™ 37 serie FT -IR (Ópticas de Bruker Inc.), con una resolución de 4 cm^{-1} y un barrido acumulativo de 32 veces.

2.5.5. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).

La microscopia óptica ha sido extensivamente usada para examinar el clínker del cemento y los agregados usados en el concreto. Sin embargo muchos materiales de interés en la química del cemento son demasiado pequeños para la resolución del microscopio óptico y en tales casos el microscopio electrónico de barrido es muy útil. El microscopio electrónico de barrido MEB ha tenido un significativo papel en el entendimiento de sistemas cementicios hidratados. La técnica consiste de un pequeño haz de electrones barriendo la superficie de una muestra. Los electrones dispersados son colectados por un detector y una señal amplificada controla la intensidad de punto en el tubo de rayos catódico. El MEB tiene una gran profundidad de foco pero su resolución es solamente cerca de 200 \AA . La profundidad de foco permite examinar una muestra en un plano tridimensional. Indicaciones han sido obtenidas de la presencia de cristales hexagonales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, monosulfato de calcio y silicato de calcio también han sido reportadas. La morfología general de C-S-H es dependiente de varios factores tales como el periodo de hidratación, relación agua/cemento, temperatura, y la presencia de mezclas adicionales. El C-S-H puede estar presente como una masa de irregulares laminas pequeñas. Una etapa de la caracterización de materiales la representa el examen morfológico de una superficie fracturada, empleando aumentos que con el microscopio electrónico oscilan entre los 100 y 10,000 X, aproximadamente. Tales estudios permiten definir características microestructurales. Se puede conocer el tamaño, forma y distribución de las fases cristalinas y amorfas, e impurezas que pueden modificar las propiedades mecánicas. En la caracterización se utilizó un microscopio electrónico de barrido marca JOEL modelo JSM-6400 con una aceleración de los electrones de 15 keV.

2.6.- PROPIEDADES MECÁNICAS.

2.6.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

La resistencia de un material es definida como la capacidad para resistir esfuerzos sin fallar. En el cemento, la resistencia se relaciona al esfuerzo requerido para causar fractura. Los cerámicos normalmente no se caracterizan mediante pruebas de tensión debido al alto costo en la fabricación de muestras experimentales y de los requerimientos de alta precisión en la alineación de dispositivos que aplican la carga durante el ensayo de tensión uniaxial. La resistencia a la compresión es una medida común para los cerámicos, sobre todo para aquellos que resisten cargas estructurales. La resistencia a la compresión está determinada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad 1.18$$

Dónde:

σ_c , es la resistencia a la compresión (MPa),

P , es la carga a la fractura (N),

A , es el área de la sección transversal donde se aplica la carga (mm²),

El método de prueba se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 348-97, Figura 2.3.

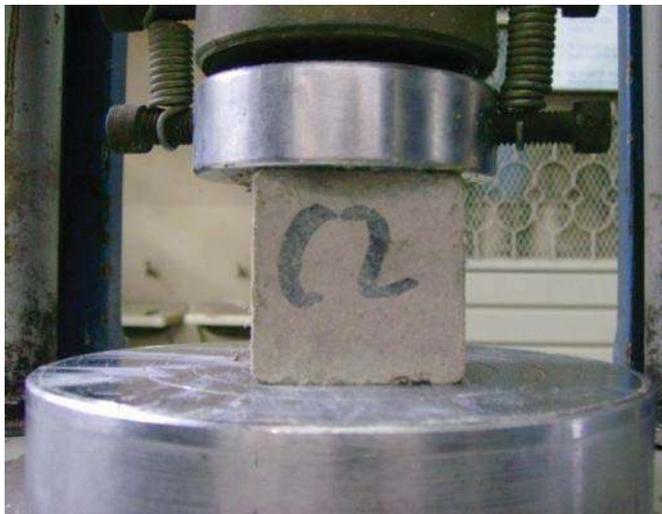


Figura 2.3.- Ensayo de resistencia a la compresión simple.

2.6.2. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN SIMPLE.

En los materiales cerámicos no se puede efectuar con facilidad el ensayo de tensión debido a la presencia de defectos de superficie y porosidad. La resistencia mecánica de los materiales cerámicos se puede determinar utilizando el ensayo de flexión en tres puntos mostrado en la Figura 2.4. El método de prueba se realizó de acuerdo a la norma ASTM C 348-97. Al aplicar la carga en tres puntos causando flexión, actúa una fuerza que provoca tensión sobre la superficie opuesta al punto medio de la barra. El máximo esfuerzo teórico de tensión que se alcanza en la parte inferior de la viga de prueba, se conoce como el módulo de ruptura. La fractura iniciara en este sitio, y el módulo de ruptura describe la resistencia del material y se describe mediante la siguiente ecuación:

$$M_R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad 1.19$$

Dónde:

M_R, es el módulo de ruptura (MPa),

P, es la carga a la fractura (N),

L, es la distancia entre soportes (mm),

b, es el ancho de la probeta (mm) y

d, es la altura de la probeta (mm).

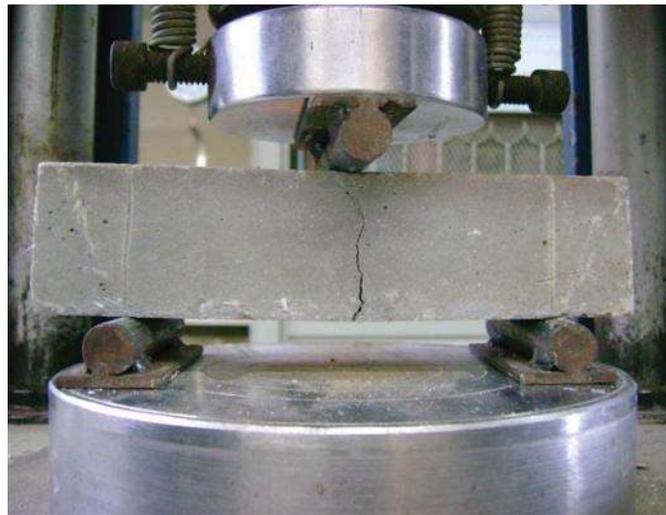


Figura 2.4.- Ensayo de resistencia a la flexión en tres puntos o módulo de ruptura.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

3.1.1. FLUORESCENCIA DE RAYOS-X.

El cemento Portland CPC 30 R Apasco, el yeso Supremo San Luis, la fibra de vidrio tipo E de Vitromex son productos comercialmente disponibles y son materiales que se utilizaron en toda la experimentación. En la tabla VIII se muestra de manera resumida los principales compuestos presentes en las materias primas. La ceniza volante clase F fue proporcionada por la termoeléctrica de Petacalco, Guerrero pero también se puede adquirir de manera directa y ésta satisface la norma ASTM C 618 clasificada como una ceniza clase F. Para la clasificación F, la cantidad total de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ debe ser mayor del 70 %. El cemento utilizado es recomendado para la construcción de obras o para la elaboración de elementos de concreto donde no se tiene ningún requisito especial. La composición química del cemento cumple con la clasificación de cemento tipo III de acuerdo a la tabla II y también la clasificación de la ASTM C150. Para el yeso los principales componentes son el CaO y el SO_3 . El análisis de la composición química del yeso muestra que ha y sólo pequeñas cantidades de impurezas de (Si, Fe, K y Na) menos del 4.5 % en masa en la muestra, y también la cantidad de Ca y S están elevados de acuerdo a los valores teóricos, comparados con la composición química teórica del yeso es CaO: 32.6 %; SO_3 : 46.5%; H_2O : 20.9% [24].

Tabla VIII .- Composición química de las materias primas % en peso..

Materia	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Ceniza Volante Clase	2.613	63.35	5.704	27.02	1.318	1.250	0.118
Cemento Portland CPC 30 R Apasco	62.38	19.59	3.047	5.47	0.657	0.768	4.642
Yeso Supremo San Luis	52.61	3.596	0.227	0	0.086	0.419	62.27

3.1.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X.

En el estudio del Yeso Supremo San Luis, la ceniza volante clase F y el cemento Portland Apasco CPC 30 R, las muestras fueron analizadas en forma de polvo, cuyos difractogramas

se muestran en las Figuras 3.1, 3.2, y 3.3, respectivamente. La figura 3.1 muestra el difractograma de cemento CPC 30 R de Holcim Apasco y donde se observan las principales fases que difractan. Se puede observar que por la gran cantidad de fases presentes en la muestra hay un traslape de los picos. El pico de mayor intensidad es del silicato tricálcico, el segundo pico más intenso pertenece al silicato dicálcico. Se identificaron también aluminato tricálcico, yeso en la forma de anhidrita y pequeñas cantidades de óxido de calcio, debido a la naturaleza amorfa y la cantidad de fases se observan como picos poco definidos. La figura 3.2 muestra el difractograma del yeso Supremo San Luis utilizado. Los picos muestran que el hemihidrato consiste únicamente de $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$ designada con el nombre mineralógico de basanita, consistente con la composición química analizada mediante fluorescencia de Rayos-X. En la figura 3.3 se muestra el difractograma de la ceniza volante clase F, cuyo pico con mayor intensidad es del cuarzo, característico de la parte cristalina de la ceniza volante; la otra fase que difracta es la silimanita. En las cenizas volantes se puede formar silimanita o mullita dependiendo de la temperatura a que opere el horno, en la ceniza utilizada para este trabajo es la fase silimanita la que se identificó. La sílice amorfa se identifica por la curvatura en el difractograma entre 15 y 30°, figura 3.1.

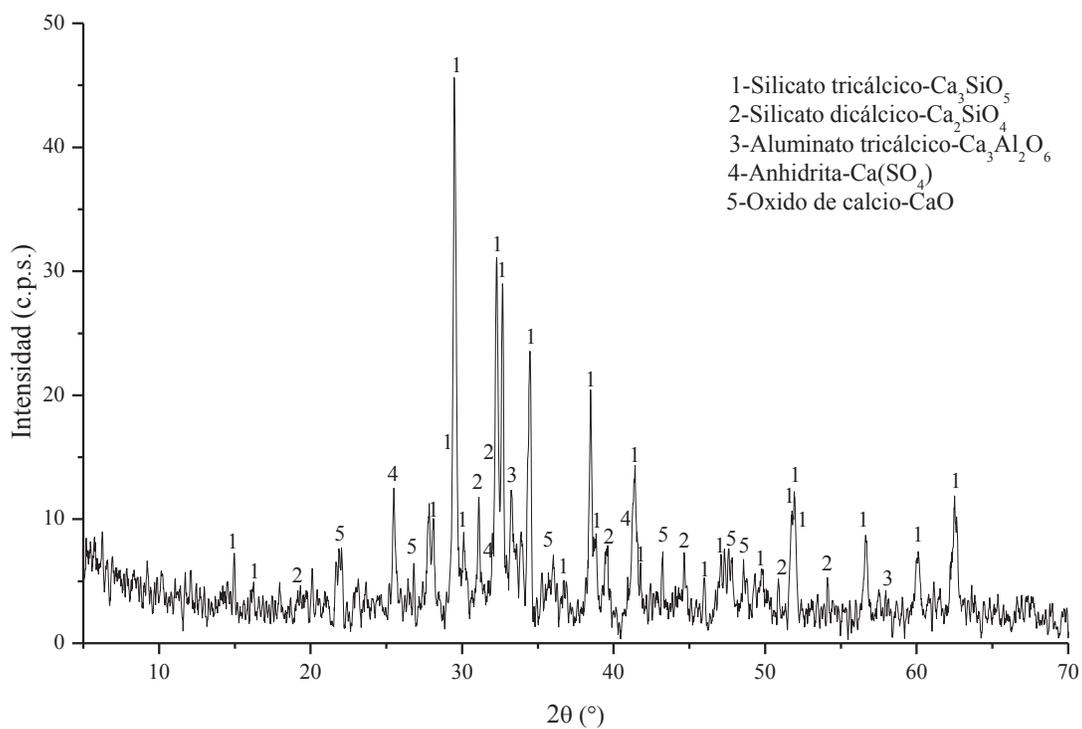


Figura 3.1.- Difractograma del cemento CPC 30 R Holcim Apasco.

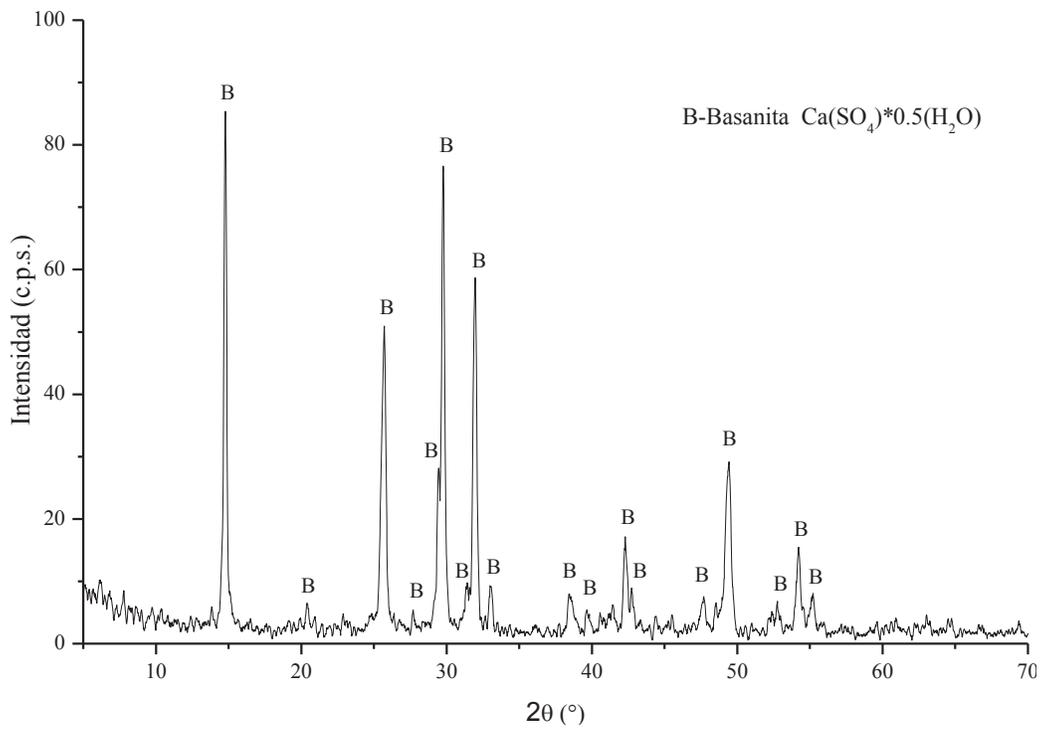


Figura 3.2.-Difractograma del Yeso Supremo San Luis.

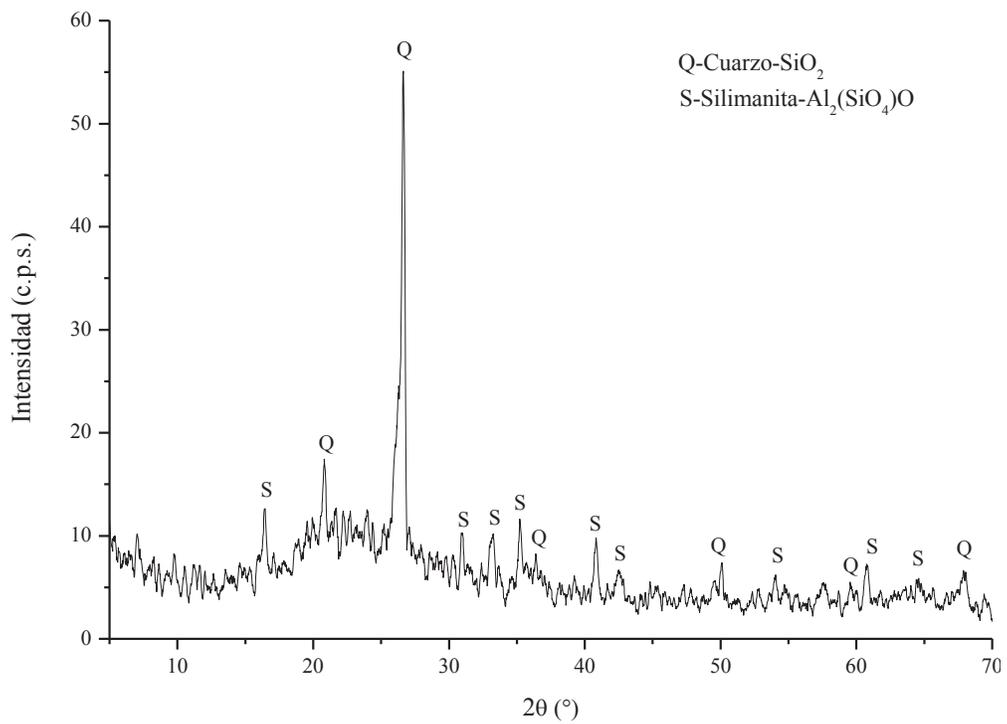


Figura 3.3.- Difractograma de la Ceniza volante clase F de la carboeléctrica de Petacalco.

3.1.3. DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA.

Las figuras 3.4 y 3.5, muestran la distribución del tamaño de partícula en porcentaje en volumen y porcentaje acumulativo del cemento Portland CPC 30 R, yeso Supremo San Luis, y de la ceniza volante clase F. Estos resultados, muestran que el tamaño promedio de partícula para el cemento es de $11.72 \mu\text{m}$ y todas las partículas son menores de $60 \mu\text{m}$ con un 96% de las partículas menores a $44 \mu\text{m}$, y el tamaño promedio de partícula para los cementos portland es de $15 \mu\text{m}$ y con un 95% de las partículas menores que $45 \mu\text{m}$ [8], donde el promedio obtenido para la muestra de cemento es menor, debido a que es un cemento de resistencia rápida.

El yeso presentó un tamaño promedio de partícula de $14.72 \mu\text{m}$, este valor es mayor que el presentado por otros autores posiblemente debido al proceso de molienda del material, y en consecuencia podría disminuir la velocidad de reacción del yeso. Finalmente, para la ceniza volante el tamaño promedio de partícula es de $21.65 \mu\text{m}$, de la literatura se tiene que el tamaño promedio es de $35 \mu\text{m}$, el valor promedio obtenido es menor que el de la literatura.

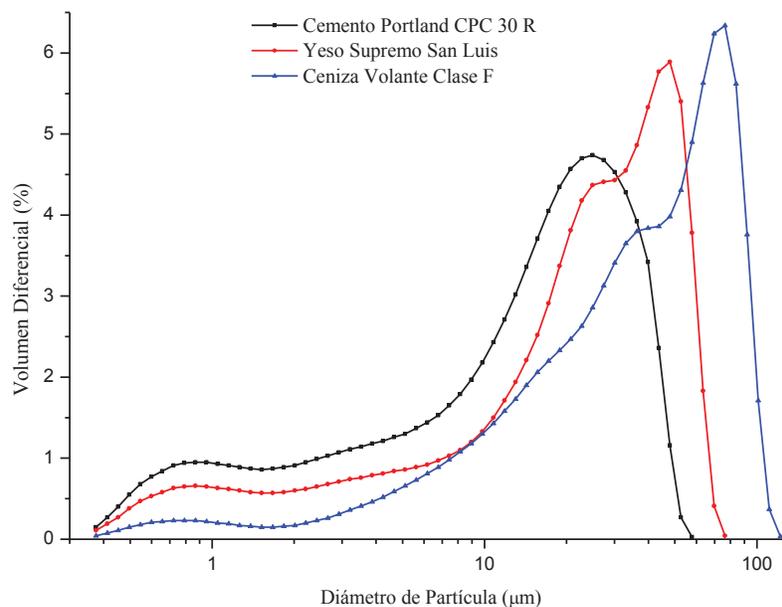


Figura 3.4.- Distribución del tamaño de partícula del volumen diferencial.

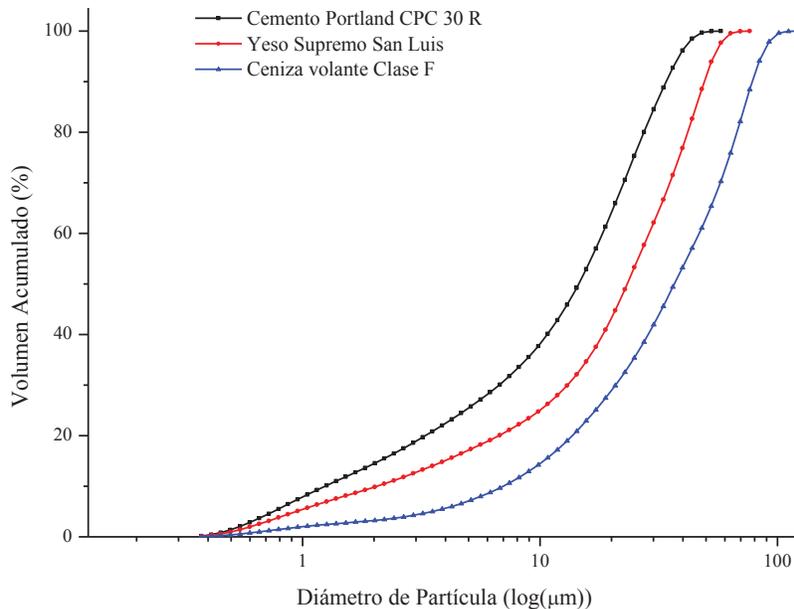


Figura 3.5.- Distribución del tamaño de partícula en volumen acumulado %.

3.1.4. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER.

La figura 3.6 muestra el espectro IR del cemento anhidro en el que, las bandas en 929, 529 cm^{-1} corresponden al modo de vibrar de valencia asimétrico ν_3 Si-O, y modo de vibrar de deformación asimétrico ν_4 Si-O en SiO_4 . Las bandas en 1124 cm^{-1} asignada a enlace Si-O-Si. Las bandas de 1080-1100 son debidas a la presencia de sulfatos. Las bandas en el rango de 750-700 cm^{-1} en el espectro de C_3A aparece sin ningún tipo de sola pamiento de las frecuencias del espectro de las fa ses de los silicatos y por lo tanto puede ser considerada como distintiva. La banda en 1427 cm^{-1} asignada al modo de vibrar de valencia simétrico ν_3 del CO_3^{2-} en la calcita (CaCO_3), y una banda en que corresponde al modo de vibrar de valencia asimétrico ν_3 879 cm^{-1} también de la calcita.

Las bandas de absorción en la muestra de cemento incluyen: una en 3456 cm^{-1} asignada a un modo de vibrar de valencia simétrica ν_1 H-O-H del agua y otra en 1633 cm^{-1} asignada a un modo de vibrar de deformación simétrica ν_2 H-O-H en el agua; generalmente conocidas como bandas de agua [25-27].

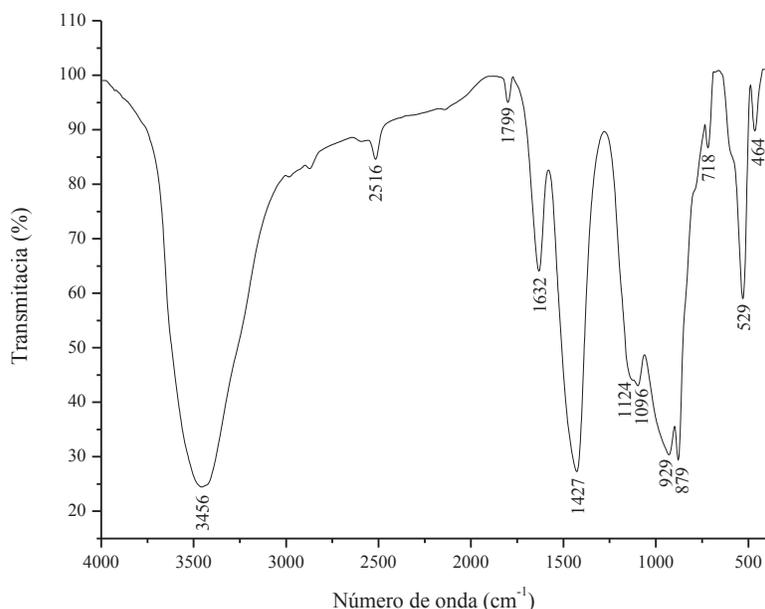


Figura 3.6.- Espectro IR-TF del cemento Apasco CPC 30 R.

El espectro IR-TF del yeso San Luis anhidro se muestra en la figura 3.7. Las bandas características se presentan en 3610 cm^{-1} , 3548 cm^{-1} , 1626 cm^{-1} , 1013 cm^{-1} , 665 cm^{-1} , 604 cm^{-1} , 468 cm^{-1} . Las bandas del ion SO_4^{2-} se presentan desde $1140\text{--}1080\text{ cm}^{-1}$ que corresponden a un modo de vibrar de valencia asimétrico ν_3 , la banda en 1013 cm^{-1} corresponde a un modo de vibrar de valencia simétrico ν_1 , y las bandas de vibración en 665 , 604 cm^{-1} corresponden a modos de vibrar de deformación asimétricos ν_4 , la banda en 468 cm^{-1} corresponden a un modo de vibrar de deformación simétrico ν_2 [28]. La banda en 3610 cm^{-1} corresponde a un modo de vibrar de valencia asimétrico ν_3 H-O-H y la banda en 3548 cm^{-1} es un modo de vibrar de valencia simétrico ν_1 H-O-H, la única banda de vibración en 1626 cm^{-1} corresponde a un modo de vibrar de deformación simétrico ν_2 del H_2O característico de la basanita [29]. Por último, las bandas en 2215 y 2137 cm^{-1} son debidos a modos de segundo orden del SO_4^{2-} .

El espectro de infrarrojo de la ceniza volante clase F se muestra en la figura 3.8. Las bandas de vibración que se encuentran en 3459 cm^{-1} , 1633 cm^{-1} pertenecen al modo de vibrar de valencia simétrico ν_1 O-H y al modo de vibrar de deformación simétricos ν_2 H-O-H del agua, la banda que aparece 1093 cm^{-1} es una vibración característica de los silicatos y pertenece a un modo de vibrar de valencia asimétrico ν_3 Si-O-Si y Al-O-Si, la banda en 790 cm^{-1} pertenece al modo de vibrar de valencia simétrico ν_1 Si-O-Si del cuarzo, la banda en

559 cm^{-1} se asocia con Al -O-Si presente en la silimanita que es un modo de vibrar de valencia simétrico ν_1 Al-O-Si, y por último la banda en 464 cm^{-1} es un modo de vibrar de deformación simétrico ν_2 Si-O-Si y O-Si-O del cuarzo [27, 30, 31].

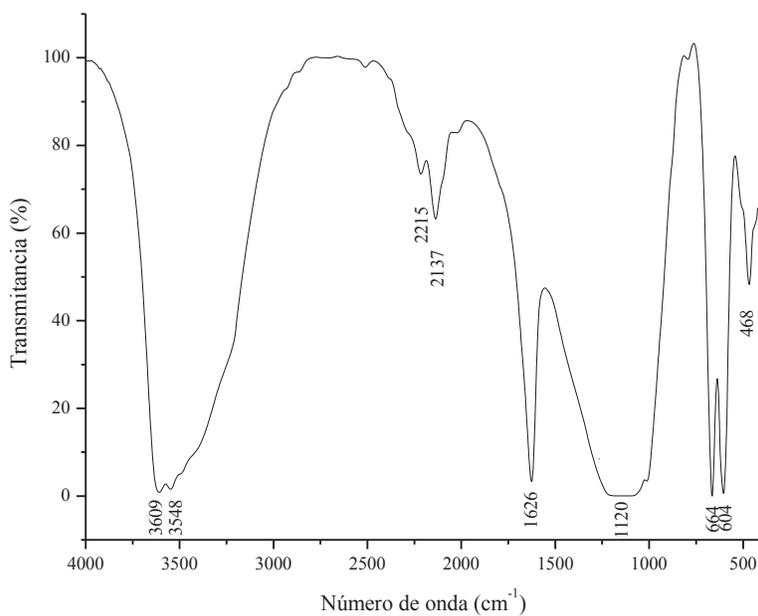


Figura 3.7.- Espectro IR-TF del Yeso Supremo San Luis.

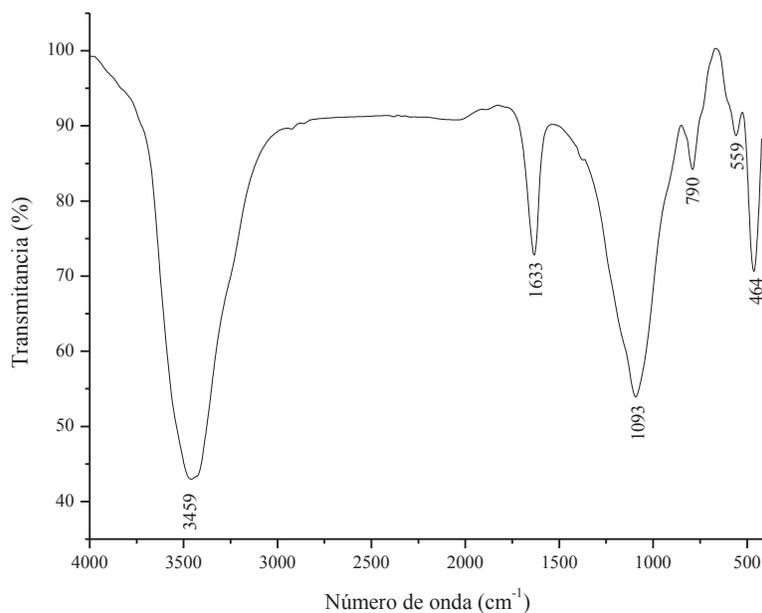
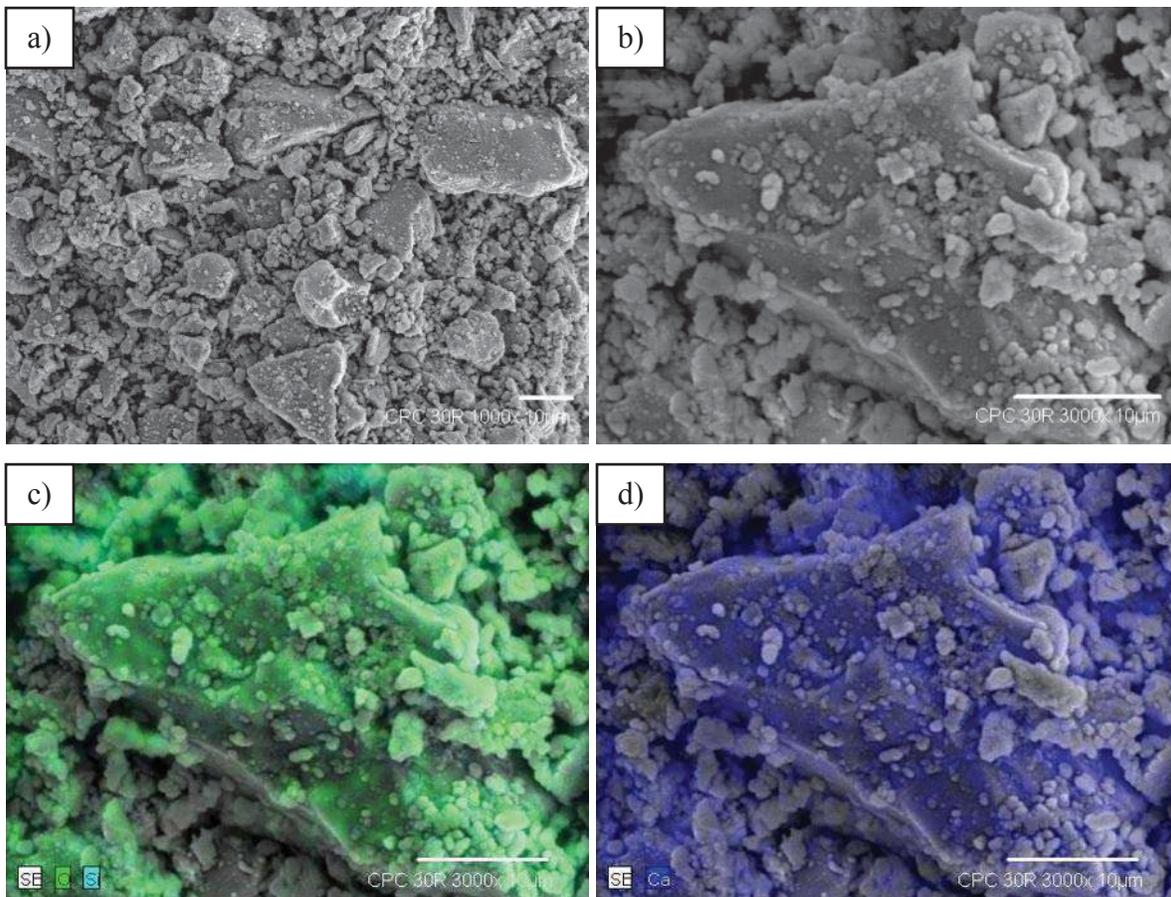


Figura 3.8.- Espectro IR-TF del a ceniza volante clase F de la termoeléctrica de Petacalco.

3.1.5. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

La figura 3.9 muestra imágenes de barrido, obtenidas para ilustrar la morfología y el tamaño de las partículas. La figura 3.9 (a) es una micrografía a 1000X donde se muestran diferentes tamaños de partículas que corresponden a los diferentes diámetros obtenidos por la medición de la distribución del tamaño de partícula. Las figuras 3.9 (c), (d), (e), corresponden a los mapas obtenidos para ilustrar los principales elementos Si, Ca, Al, donde se observa que la distribución se encuentra en la mayor parte de la partículas. Y la figura 3.9 (f) muestra los elementos detectados en el microanálisis químico por EDS, los elementos que se identificaron son Ca, O, Al, Si, S, y C. Todos los elementos corresponden al cemento menos el C que es corresponde a la carbonatación del cemento Portland por el medio ambiente.



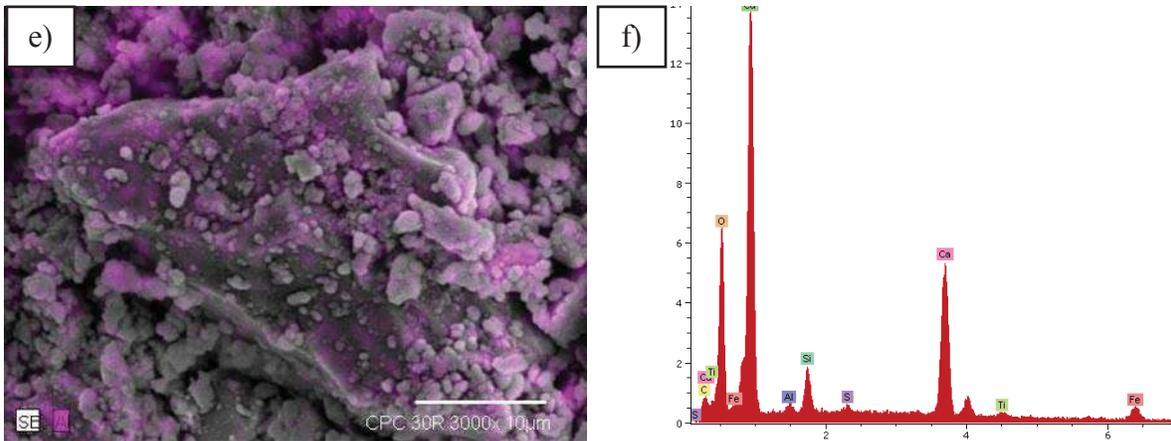
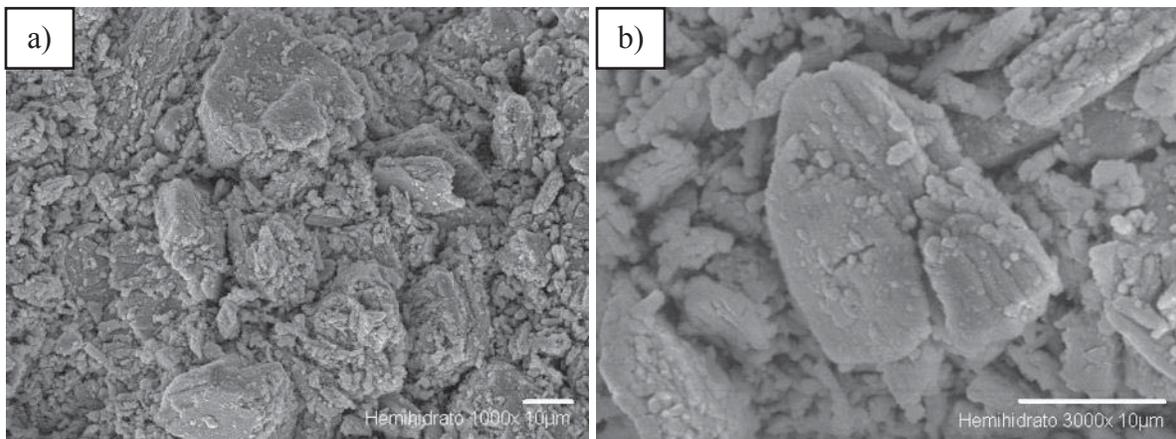


Figura 3.9.- Micrografías del cemento Portland CPC 30 R a 1000X y mapeo a 3000X.

La figura 3.10 muestra micrografías del yeso Supremo San Luis. En la figura 3.10 (a), se muestra la morfología de las partículas que son partículas con esquinas menos angulares, también se ilustran varios tamaños de partículas que van desde 35 μm hasta menos de 10 μm que corresponden con la medición de la distribución de la granulometría realizado en el apartado 3.1.3. Las figuras 3.10 (b), (c), (d) son micrografías obtenidas en modo de mapeo para identificar los elementos presentes en la muestra. Los únicos elementos que se detectaron fueron el S y el Ca. El azufre se detecta sólo en algunas partes de la micrografía, figura 3.10 (c), debido a que la muestra no es plana y también a que la orientación hacia el detector no pudo ser la correcta. La figura 3.10 (e) muestra el análisis químico por EDS y de los elementos detectados S, Ca, y O y C, El carbón no pertenece a la muestra por lo que la exposición de la muestra al medio ambiente puede ser afectado por este elemento.



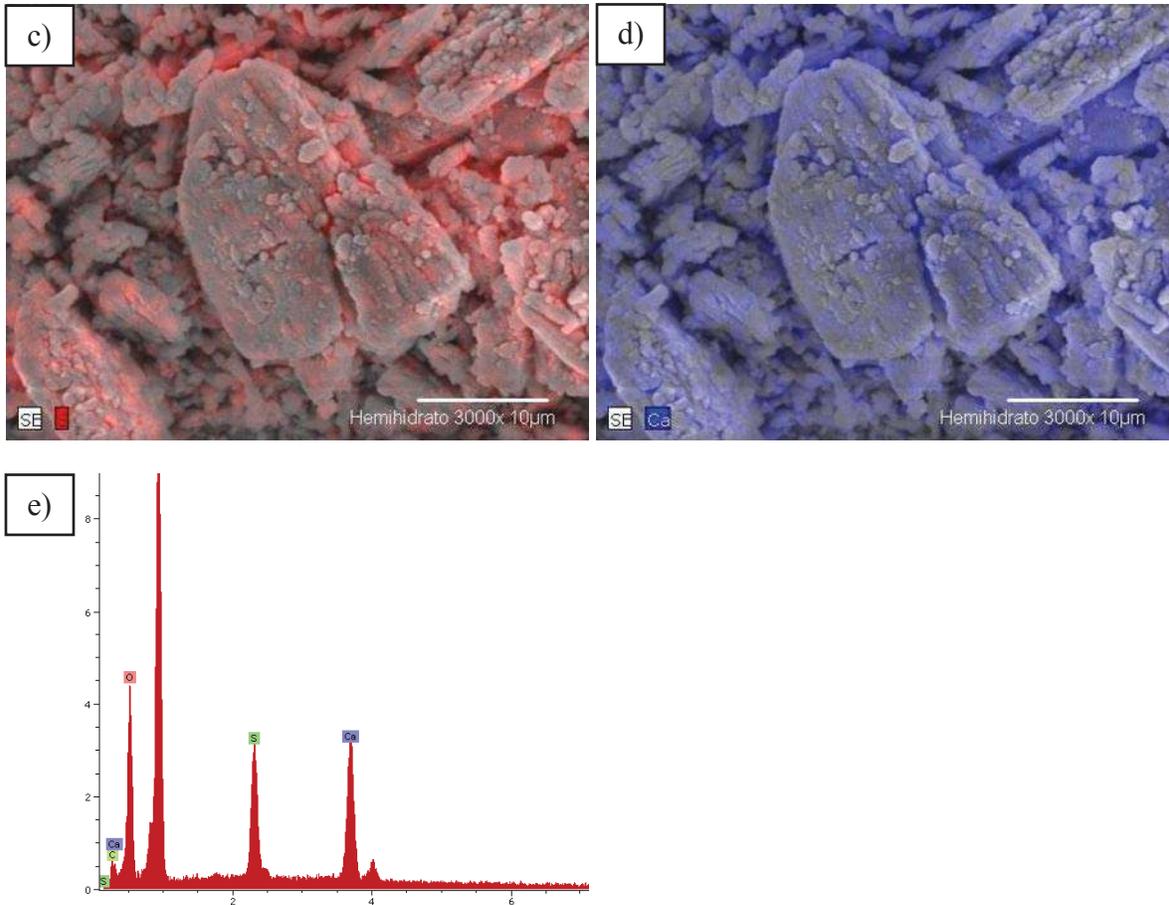


Figura 3.10.- Micrografías a 1000X y mapeo a 3000X del yeso Supremo San Luis.

La figura 3.11 muestra micrografías de la ceniza volante clase F. En la figura 3.11 (a) se ilustran varios diámetros de partícula las que varían en el rango desde 1 μm hasta 20 μm valores que concuerdan con los obtenidos en el apartado 3.1.3. En las figuras 3.11 (b), (c), y (d), se muestra un microanálisis químico puntual realizado sobre la partícula de ceniza volante (1), y también sobre la partícula (2) que se encuentra sobre la superficie de la ceniza volante. En el microanálisis realizado en (1), figura 3.11 (b), se detectaron K, Ca, Fe, Al, Si, O. El Si presenta la mayor intensidad seguido por el Al que son los principales elementos que constituyen la ceniza volante, el K y Fe son elementos que se presentan como componentes minoritarios lo que se corrobora con el análisis de fluorescencia de rayos X. En el microanálisis (2), figura 3.11 (b) y su correspondiente espectro figura 3.11 (d), se detectaron los mismos elementos y que corresponden a la química de la ceniza volante, también se corrobora que la fase presente en la ceniza no es mullita porque esta

crystaliza en forma de agujas y en la morfología no se observa este tipo cristal, por lo que se concluye que la fase que difracta es la silimanita que también se identificó con el análisis de DRX (figura 3.3).

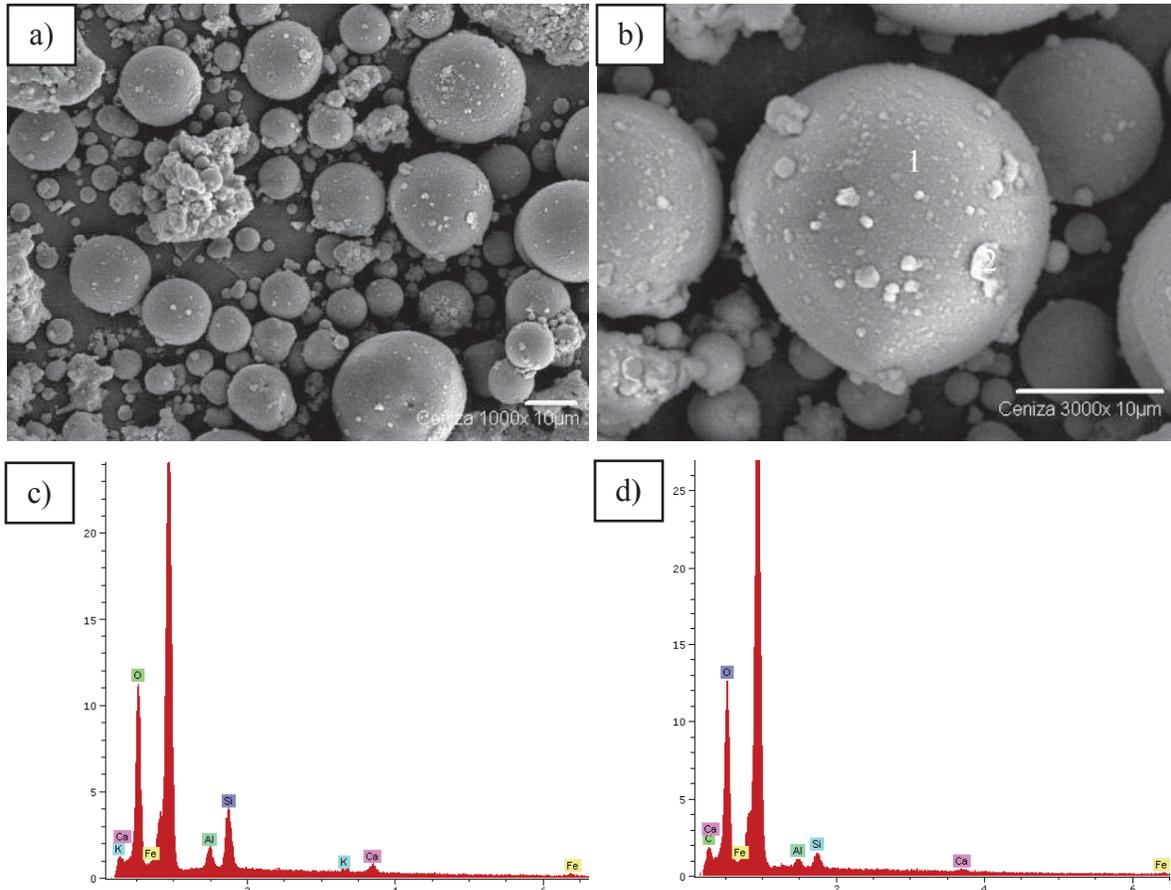


Figura 3.11.- Micrografías a) 1000X y b) microanálisis a 3000X de la ceniza volante clase F de la termoeléctrica de Petacalco Guerrero.

En la figura 3.12 se presentan micrografías de la fibra de vidrio E. En la figura 3.12 (a) se muestra que el diámetro de los filamentos de la fibra de vidrio, es de 10 μm . La figura 3.12 (b) muestra los números 1, 2 y 3 donde se realizaron microanálisis puntuales, para identificar la composición de la fibra. En figura 3.12 (c) muestra un mapeo que se realizó del silicio ya que es el principal elemento que constituye la fibra de vidrio E. En el microanálisis en 1, se identificaron el Si, O, Ca y Al. Todos ellos pertenecen a la química de la fibra de vidrio E. En el microanálisis en 2 se identificaron C, O, Si y Ca, figura 3.12 (e). El carbón puede ser debido a un elemento orgánico utilizado para mantener juntas los

filamentos de las fibras de vidrio E. En el microanálisis en 3, figura 3.12 (f) nuevamente se identificaron los mismos elementos químicos que se identificaron en el microanálisis 1, y es porque esta partícula es de fibra de vidrio E, en el proceso de cortar la fibra en longitudes de aproximadamente 1 cm pequeños trozos se adhieren a la superficie de la fibra de vidrio.

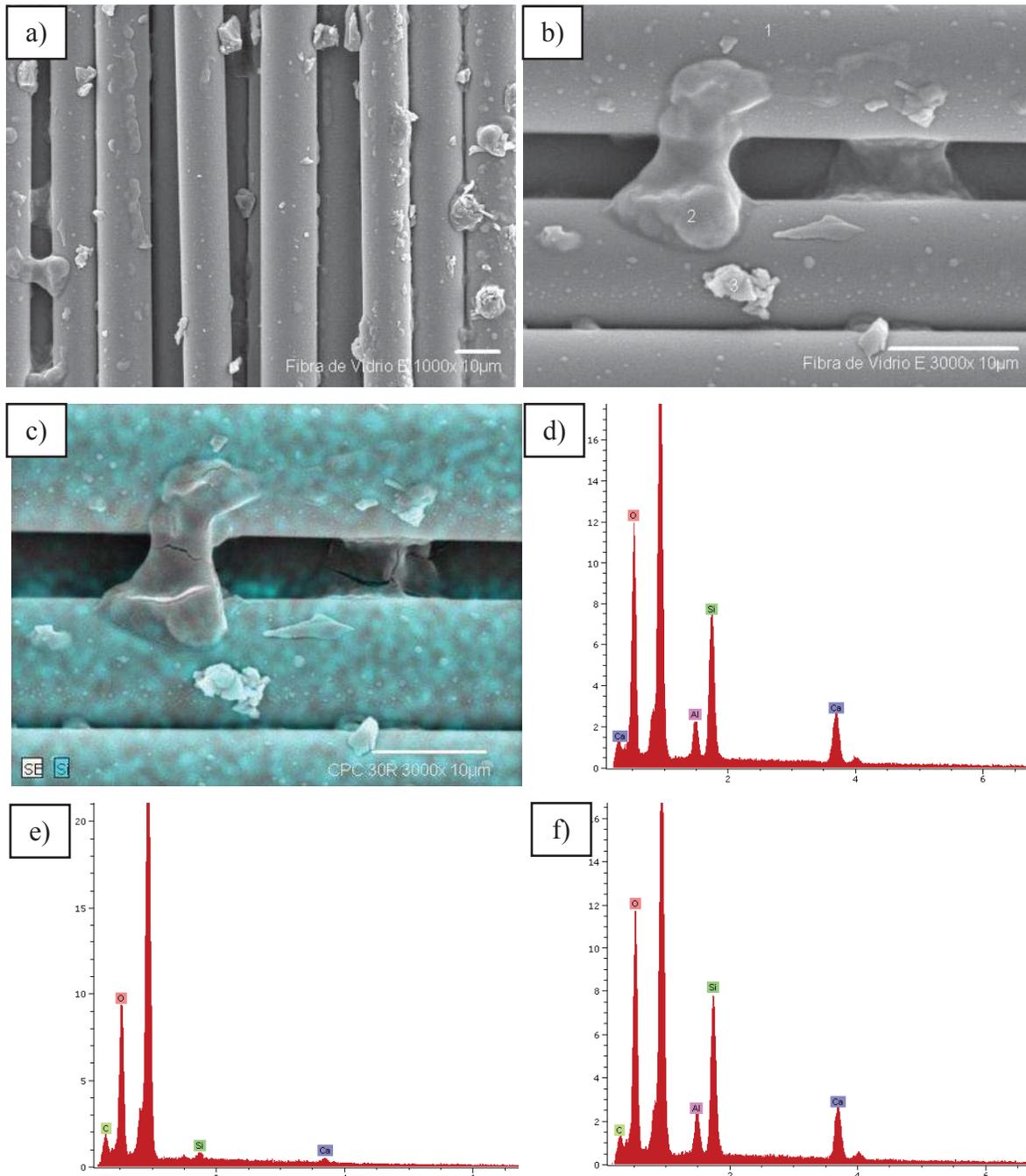


Figura 3.12.- Micrografía a 1000X y microanálisis a 3000X de la fibra de vidrio tipo E.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS.

3.2.1. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X.

Por difracción de rayos X, se detectaron las fases cristalinas presentes en las diferentes mezclas hidratadas. La evolución de la hidratación en el tiempo se presenta en las muestras hidratadas a 180 días, en las figuras 3.17 a 3.20. Las muestras se analizan solamente en una forma cualitativa. Por lo que se realizó el análisis por DRX solamente a 28 y 180 días de hidratación. En los difractogramas se presentan variaciones en las cantidades de las diferentes fases, pero no se formó ninguna nueva fase durante la hidratación. Las únicas fases que se pudieron identificar a 28 y 180 días de hidratación en las mezclas son las siguientes fases cristalinas: Y- yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), C-calcita (CaCO_3), P-portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y E-etringita $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$. Las letras en mayúscula pertenecen a la indexación en los difractogramas mostrados en las figuras 3.13 a las figuras 3.20. A causa de su bajo grado de cristalinidad del C-S-H, no se pudo detectar ningún pico en $28-33^\circ$ (0.27-0.31 nm) y tampoco uno más pequeño en 50.1° (0.182 nm) que se atribuyen a la presencia del C-S-H. Otra causa también se debe a que esta fase se traslapa con los picos de otras fases como la calcita. Después de 28 días las fases que se identifican son yeso, portlandita, calcita, y etringita. La calcita a 28 días se comienza a identificar en las muestras A2S (figura 3.13) indicando la formación del C-S-H, aunque esta última fase no se puede identificar porque ocurre el traslape de la calcita con esta fase. Sin embargo la portlandita se encuentra mejor cristalizada en las muestras AH-28 días (figura 3.14) comparándolas con las muestras AS-28, debido a que las muestras saturadas en agua se han hidratado mejor. La etringita en las muestras AH-28 también está mejor cristalizada debido a que esta fase necesita gran cantidad de agua en su estructura interna. Los picos del yeso disminuyen en intensidad debido a su concentración en el material. En las muestras a 180 días de hidratación AS (figura 3.17) y AH (figura 3.18), no se aprecian cambios de fases, sólo se observa que la etringita presenta una intensidad mayor en las muestras AH. Las muestras A3 y A4 a 180 días presentan una intensidad de difracción mayor que las demás fases, debido a una orientación preferencial de esta fase ya que las mismas muestras A3 y A4 presentan menores intensidades de difracción. En la muestra A5H a 180 días de hidratación se presenta el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ esto debido a una posible contaminación de la muestra durante la preparación.

En las muestras DS a 28 días (figura 3.15) se observa que la calcita de las muestra D2S hasta la muestra D5S esta mejor cristalizada, y el contenido del C-S-H incrementa, el contenido de portlandita se puede observar en la muestra D5S que disminuye respecto a las muestras D4S, y D3S debido a la reacción puzolánica generando más C-S-H. La etringita en la muestra D4S es mayor que en la demás muestras. El yeso va disminuyendo su intensidad como va variando en porcentaje en las muestras DS a 28 días de hidratación a temperatura ambiente. Las muestras DS a 180 días de hidratación (figura 3.19) se observan de igual manera el yeso, etringita, portlandita y calcita. La portlandita de las muestras D3S y D4S incrementó en la intensidad de los picos, la fase portlandita es un indicio de la hidratación del cemento portland y la cantidad de C-S-H, ya que está ultima fase no difracta por su naturaleza amorfa. En la muestra D5S a 180 días, la intensidad de la portlandita disminuye por la reacción puzolánica de la ceniza volante clase F. En la muestra D4S a 180 días la intensidad de los picos en etringita es mayor, pero las muestras no presentan superficial o grietas.

Las muestras húmedas de las mezclas DH a 28 y 180 días se presentan en las figuras 3.16 y 3.20. En las muestras a 28 días sumergidas en agua (figura 3.16), se identifican las mismas fases yeso, etringita portlandita y calcita. En la muestra D4H a 28 días la intensidad de los picos de la etringita es la mayor, y donde en las imágenes de las muestras no se observan grietas o daños superficiales como en la muestra D2H, por tanto el daño en las mezclas saturadas no es debido a la etringita formada si no al contenido de yeso en la matriz cementicia. La mayor intensidad de la portlandita se presenta en la muestra D4H a 28, debido a la hidratación del cemento Portland, por otro lado indica que la reacción puzolánica no ha tenido tanto efecto en esta mezcla. En la muestra D5H se muestra que la intensidad del pico de la portlandita ha disminuido debido a la reacción de la ceniza volante clase F con la Portlandita, generando más gel C-S-H. La mayor intensidad de difracción de la calcita se presenta en la muestra D5H, por lo que se han llevado a cabo las reacciones de hidratación de los silicatos dicálcico y tricálcico.

La figura 3.20 presenta el difractograma de las muestras DH a 180 días de hidratación y saturadas en agua. Difractan las siguientes fases cristalinas yeso, etringita, portlandita, y calcita. La mayor intensidad en el yeso se presenta en la muestra D2H a 180 días de saturación en agua debido al porcentaje de yeso como materia prima, y a la mejor

cristalización de esta fase. La etringita tiene la mayor intensidad en la muestra D4H-180 días de saturación en agua, mostrando una intensidad de pico mayor que las demás fases cristalinas, por lo que esta muestra debería presentar un incremento en volumen y agrietamiento más que las mezclas D2H, D3H, y D5H. La intensidad es debida a que son condiciones óptimas para la cristalización de la etringita. La mayor intensidad de la portlandita se presenta en la mezcla D5H a 180, donde el contenido de cemento Portland es de 100%, pero esta intensidad es menor que en las muestras A5H-180 (figura 3.18), y que la muestra D5S a 180 días de hidratación (figura 3.3.19). Esto se debe a la reacción puzolánica de la ceniza volante clase F, por lo que disminuye la intensidad de la portlandita. El mayor pico de difracción para la calcita se presenta en la muestra D5H, indicando que la cantidad del gel C-S-H producido por la hidratación del cemento Portland y de la reacción Puzolánica de la ceniza volante clase F es el mayor, por tanto la resistencia mecánica a la compresión debe de ser la mayor.

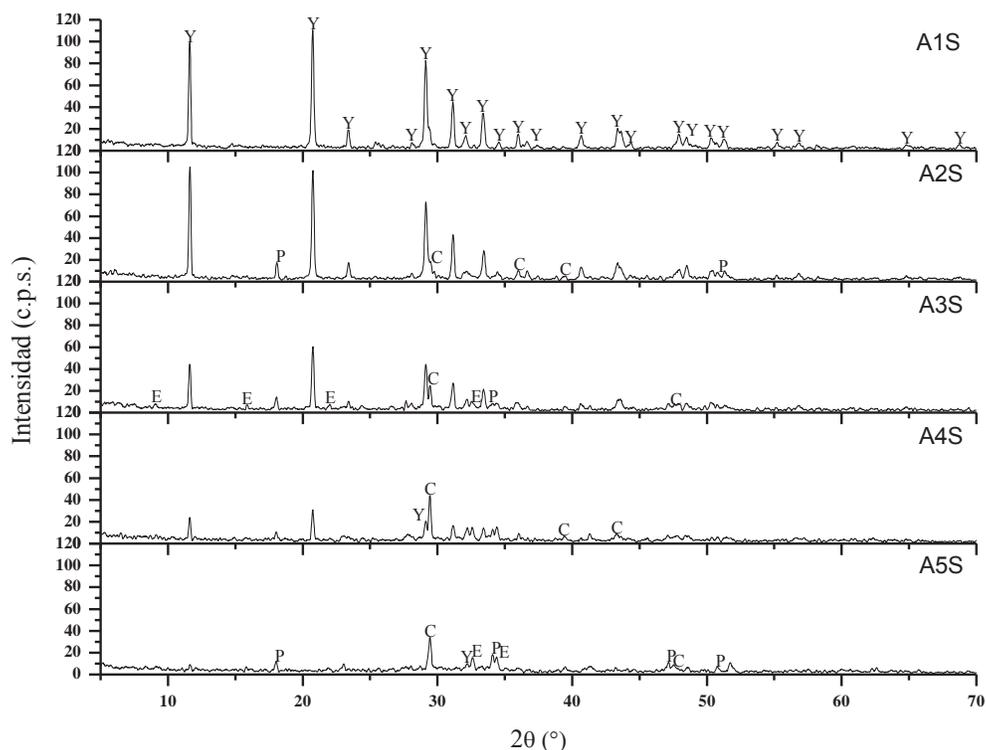


Figura 3.13.- Difractogramas de las muestras A, hidratadas 28 días a temperatura ambiente.

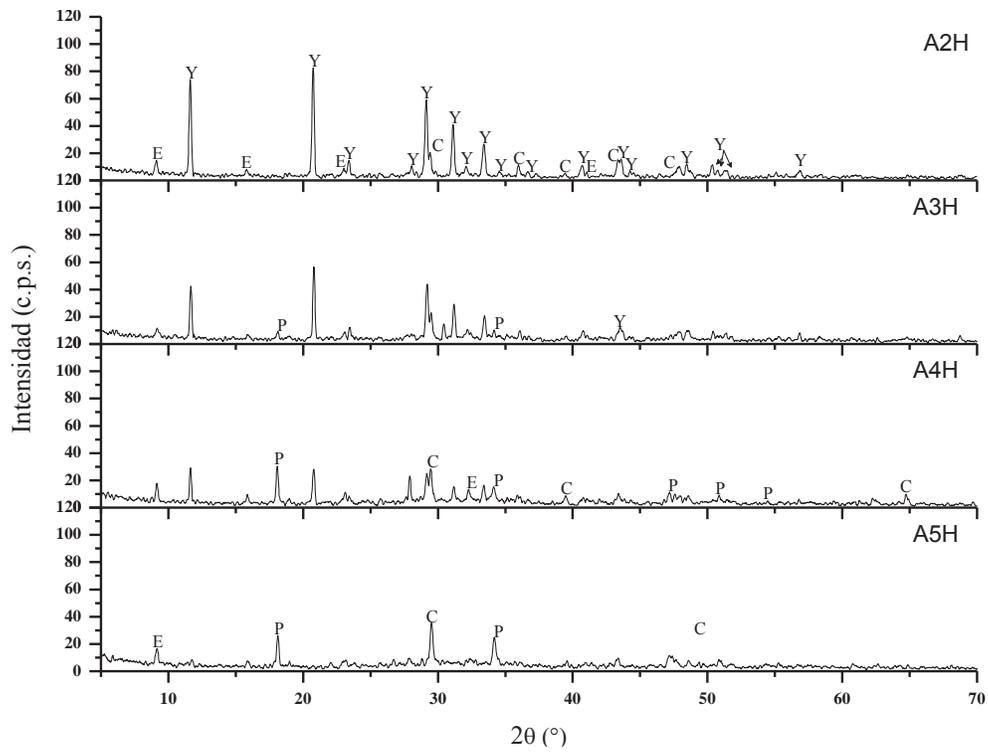


Figura 3.14.- Difractogramas de las muestras A, saturadas en agua durante 28 días.

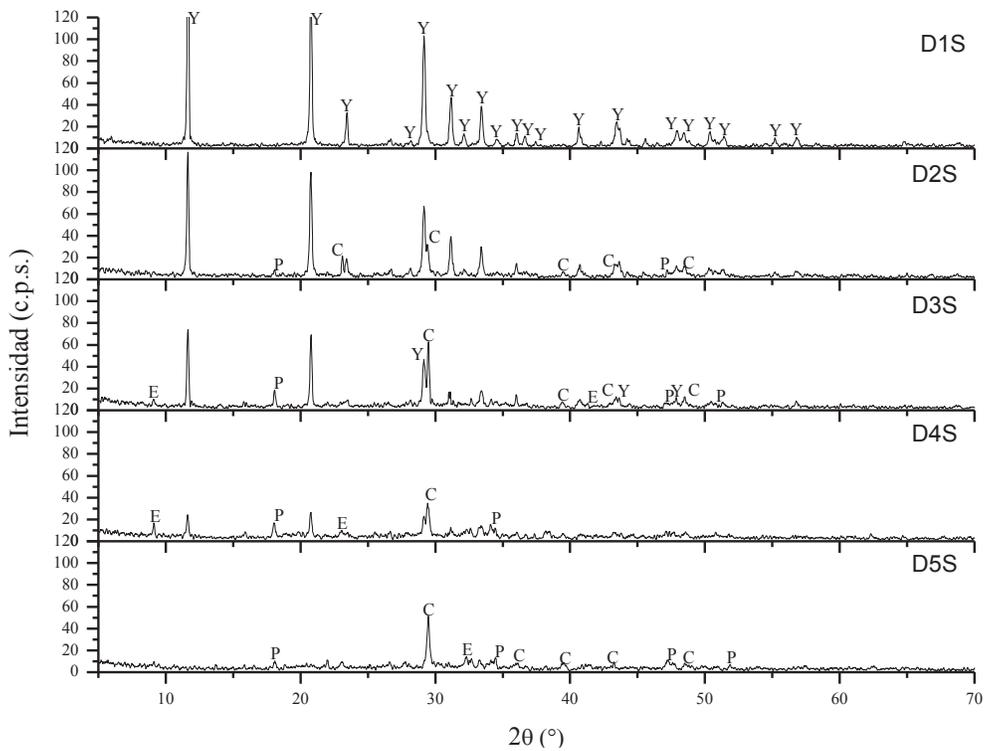


Figura 3.15.- Difractogramas de las muestras D, hidratadas 28 días a temperatura ambiente.

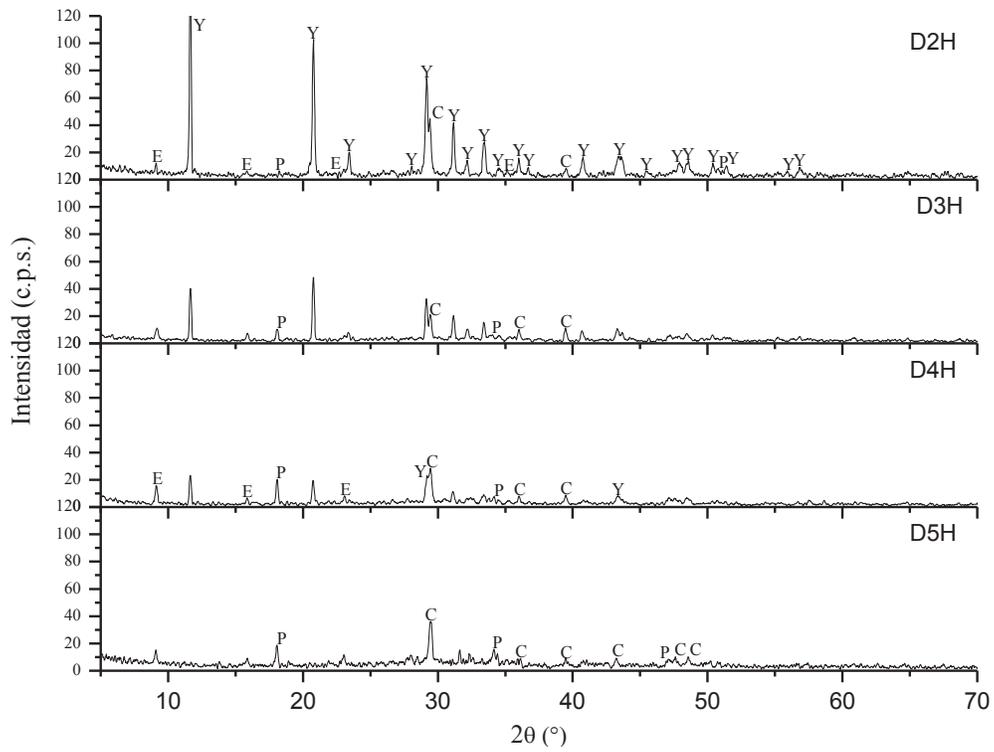


Figura 3.16.- Difractogramas de las muestras D, saturadas en agua durante 28 días.

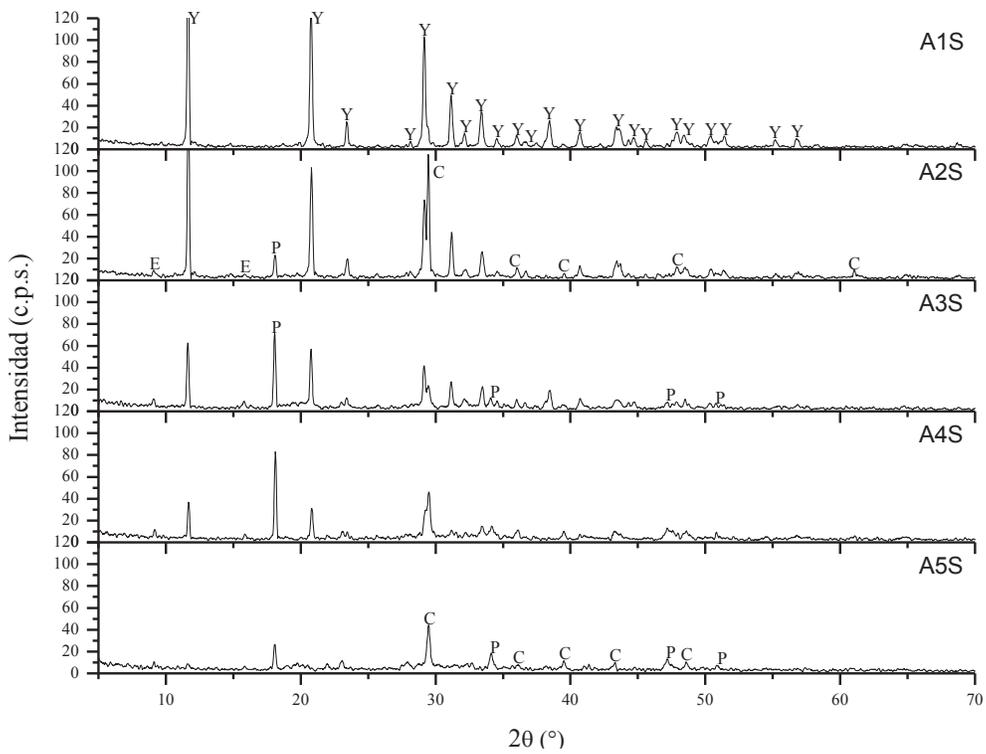


Figura 3.17.- Difractogramas de muestras A, hidratadas 180 días a temperatura ambiente.

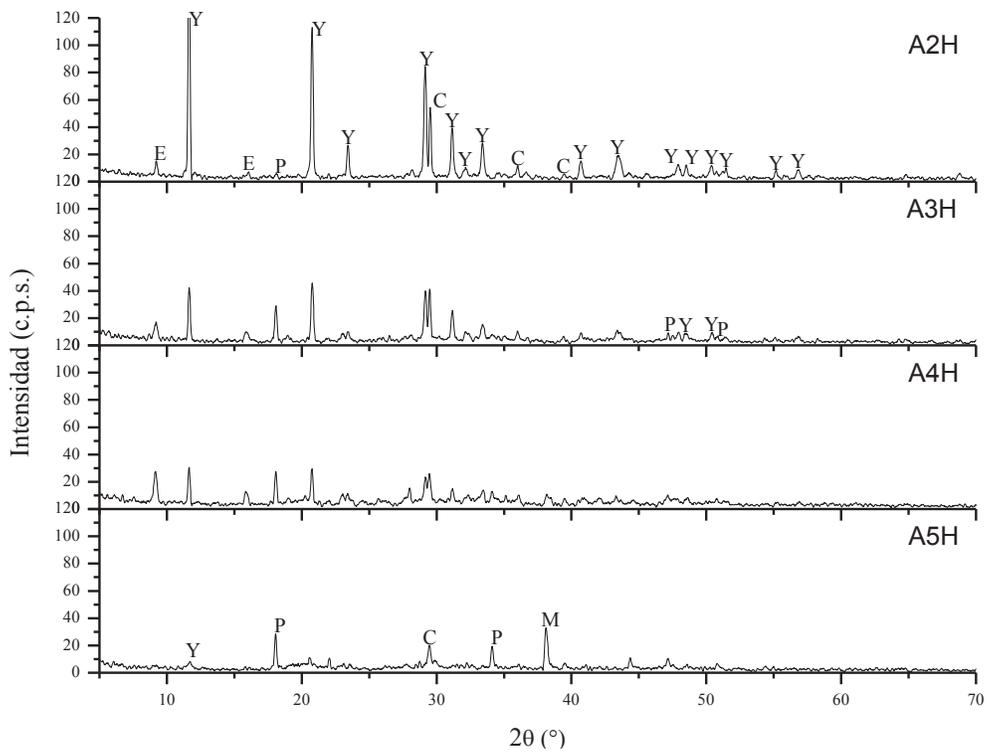


Figura 3.18.- Difractogramas de las muestras A, saturadas en agua durante 180 días.

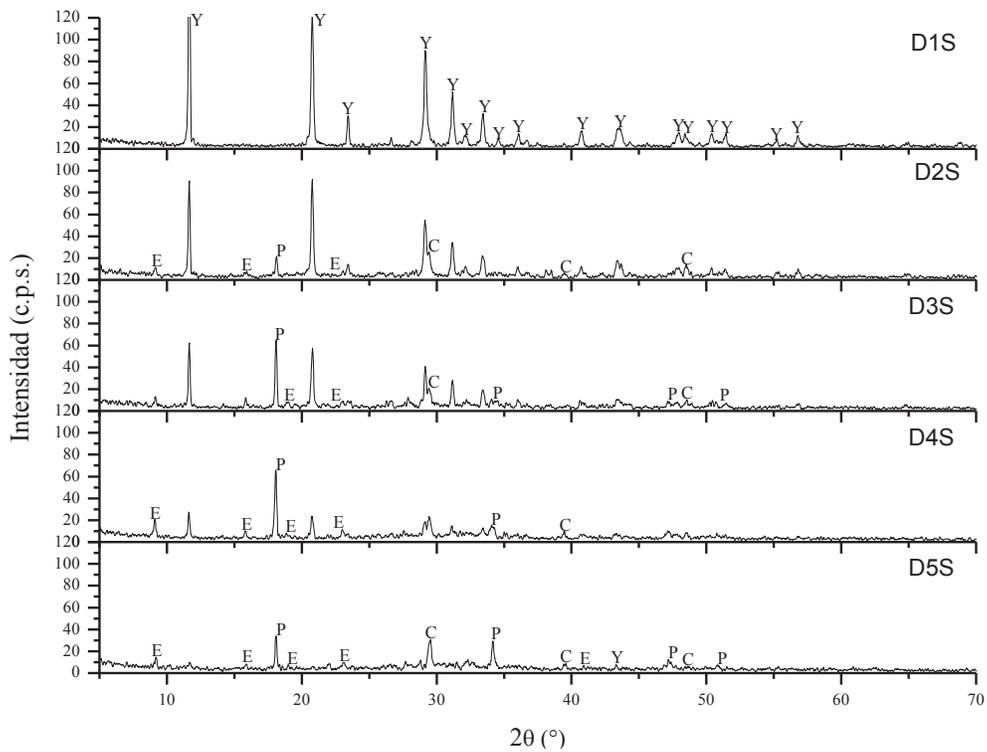


Figura 3.19.- Difractogramas de muestras D, hidratadas 180 días a temperatura ambiente.

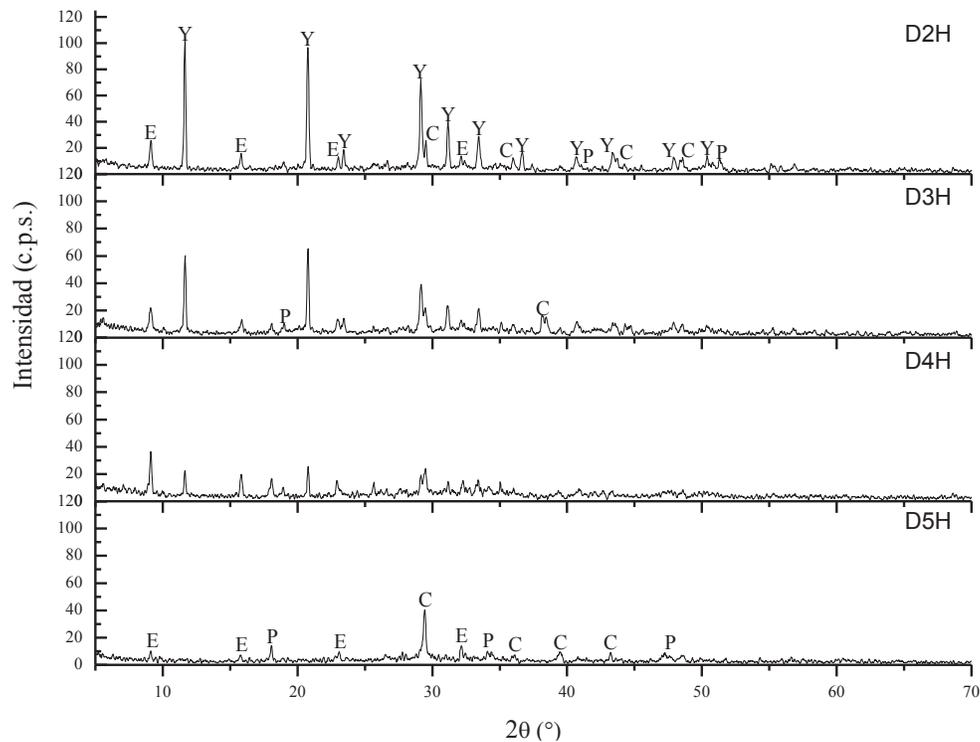


Figura 3.20.- Difractogramas de las muestras D, saturadas en agua durante 180 días.

3.2.2. ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER.

La espectroscopía IR se usó para identificar los diferentes compuestos químicos y determinar las especies moleculares en las fases hidratadas de las mezclas. Las muestras nuevamente sólo se analizaron en una forma cualitativa en los mismos intervalos de tiempo como se realizó DRX. En las figuras 3.21 a 3.24 se observan las bandas por espectroscopía infrarroja a 28 días de hidratación de los grupos funcionales silicatos, sulfatos, carbonatos, moléculas de agua y portlandita. Así también de las figuras 3.25 a 3.28 pertenecen a las muestras analizadas a 180 días. Las diferentes moléculas identificadas son:

Silicatos (SiO_4^{2-}).- La bandas de que aparecen en $974\text{-}985\text{ cm}^{-1}$ pertenecen a modos de vibrar de valencia asimétricos Si-O ν_3 y la posición de esta banda es asociada se asocia con el grado de condensación de las cadenas de silicato tetraédrico y la relación Ca/Si del gel C-S-H. El avance de la hidratación también se caracteriza por un movimiento de la banda de vibración de valencia asimétrica Si-O ν_3 a números de onda mayores, debido a la

polimerización de las unidades SiO_4^{2-} durante la formación de C-S-H. En el cemento anhidro, las fases de silicato producen una banda en $\sim 930 \text{ cm}^{-1}$, con la hidratación esta banda se mueve por más de 40 cm^{-1} . La velocidad de la hidratación es reflejada por el movimiento de la banda en 930 cm^{-1} . Las reacciones de hidratación pueden ser seguidas estudiando el cambio en intensidad relativa del modo de vibrar de deformación asimétrica ν_4 en 522 cm^{-1} y el modo de vibrar de deformación simétrica ν_2 en 448 cm^{-1} .

Portlandita Ca(OH)_2 .- La banda en 3640 cm^{-1} , cuya intensidad aumenta con el tiempo de hidratación se asigna a el modo de vibrar simétrico de valencia ν_1 del grupo hidroxilo en Ca(OH)_2 formada. Y es generalmente considerado como indicativo de la presencia de un compuesto hidratado cuya agua constitucional esta muy unida a la estructura molecular del compuesto [32, 33]. Así también la intensidad de esta banda se encuentra que corresponde a la concentración de ceniza volante [27].

Sulfatos (SO_4^{2-}).- Tres bandas de vibración asimétrico de valencia ν_3 S-O se observan en el rango entre 1100 y 1170 cm^{-1} [34]. Debido al traslape de estas bandas y resolución del equipo se presentó en el numero de onda de 1126 cm^{-1} , para las muestras hidratadas a 28 días y 1128 cm^{-1} para las muestras a 180 días. Las bandas en 670 y 604 cm^{-1} son modos de vibración de deformación asimétrico ν_4 y es indicativo de la presencia de yeso [31]. Y la banda en 464 cm^{-1} es debida a un modo de vibración de deformación simétrica ν_2 . Las bandas en 2240 y 2125 cm^{-1} son debidas a modos de segundo orden del SO_4 . La formación de etringita resulta en una banda en 1120 cm^{-1} , por lo que debido al solapamiento de las bandas es difícil diferenciar entre varias fases. Sin embargo en la muestra A5 después de 180 días de hidratación la banda se encuentra en 1123 cm^{-1} apunta a la presencia de etringita.

Carbonatos (CO_3^{2-}).- La banda en 1430 cm^{-1} es asignada a un modo de vibrar de valencia asimétrico ν_3 en la calcita y la banda en 875 cm^{-1} es un modo de vibrar de deformación simétrico ν_2 , y la banda en 714 cm^{-1} es un modo de vibrar de deformación asimétrico ν_4 de la molécula de carbonatos, todas estas bandas son características de la calcita, la cual resulta de la carbonatación como resultado de la hidratación a la intemperies de las mezclas, y no es posible prevenir la incorporación de CO_2 si la muestra es expuesta a la intemperie [35, 36]. La banda en 2515 cm^{-1} es una combinación de modos de vibrar de $\nu_2 + \nu_3$ en la calcita [37].

Moléculas de H₂O.- Los grupos de H₂O en el yeso muestran bandas IR de absorción en 3546 y 3406 cm⁻¹ y 3247 cm⁻¹ debidas a modos de vibrar de valencia simétricos ν_1 y las bandas en 1684 y 1624 cm⁻¹ pertenecen a modos de vibrar de deformación simétrica ν_2 H-O-H todas características en el yeso dihidrato. Estas dos últimas bandas IR para los modos de vibrar de deformación O-H en el espectro del yeso, la presencia de las dos bandas en el yeso indica que hay dos tipos de agua cristalográfica. Un tipo de agua está enlazada con los iones de sulfato por puente de hidrógeno, y la banda correspondiente a la frecuencia más baja (también debido al puente de hidrógeno) y de alta intensidad. El otro está directamente relacionado con los iones de calcio, y la banda en 1624 cm⁻¹ indica la presencia de sulfato en la forma deshidratada de sulfato de calcio [38]. Las bandas anchas y de intensidad media en alrededor de 3430 y 1640 cm⁻¹ se pueden asignar también a modos de vibrar de valencia y deformación simétrica ν_1 y ν_2 , relacionados a O-H en el agua. La banda en 1640 cm⁻¹ es generalmente considerada como indicativa de la presencia de un compuesto hidratado cuya constitución de agua está estrechamente enlazado a la estructura molecular del compuesto [32, 36].

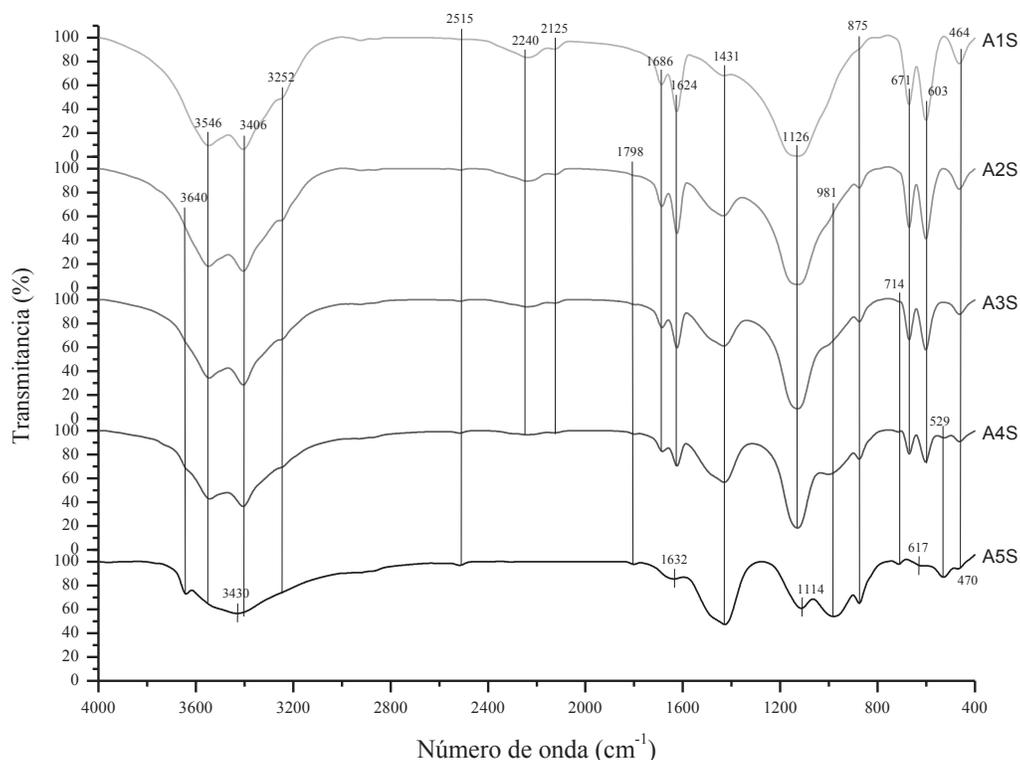


Figura 3.21.- Espectro IR de muestras A, hidratadas 28 días a temperatura ambiente.

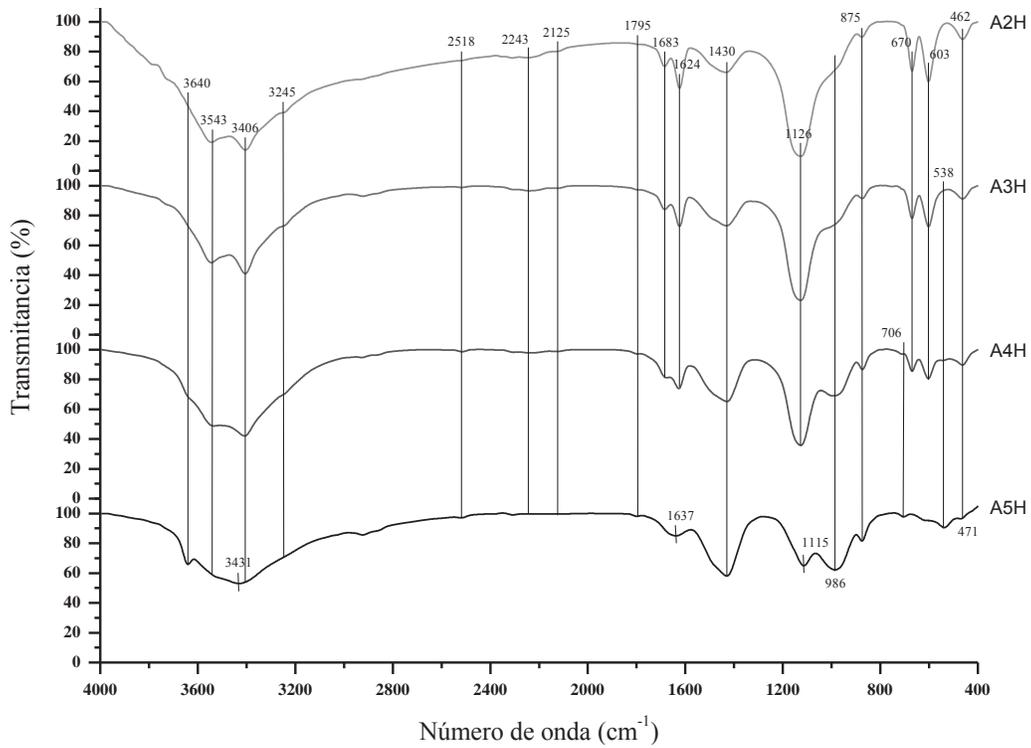


Figura 3.22.- Espectro IR de muestras A, saturadas en agua durante 28 días.

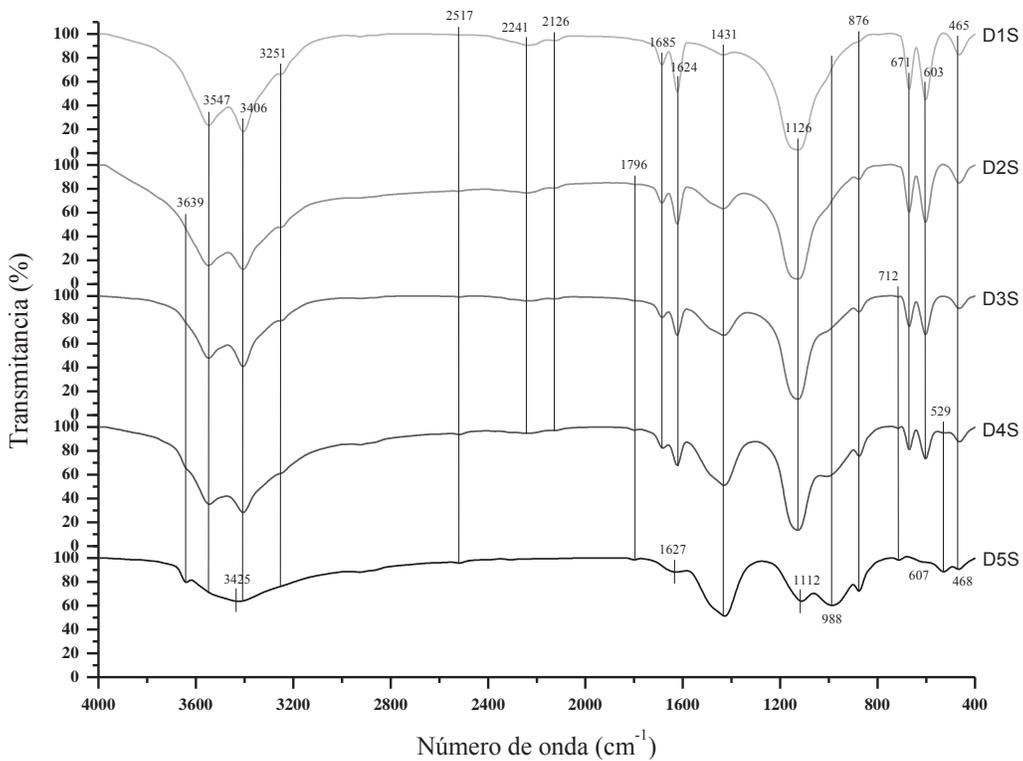


Figura 3.23.- Espectro IR las muestras D, hidratadas 28 días a temperatura ambiente.

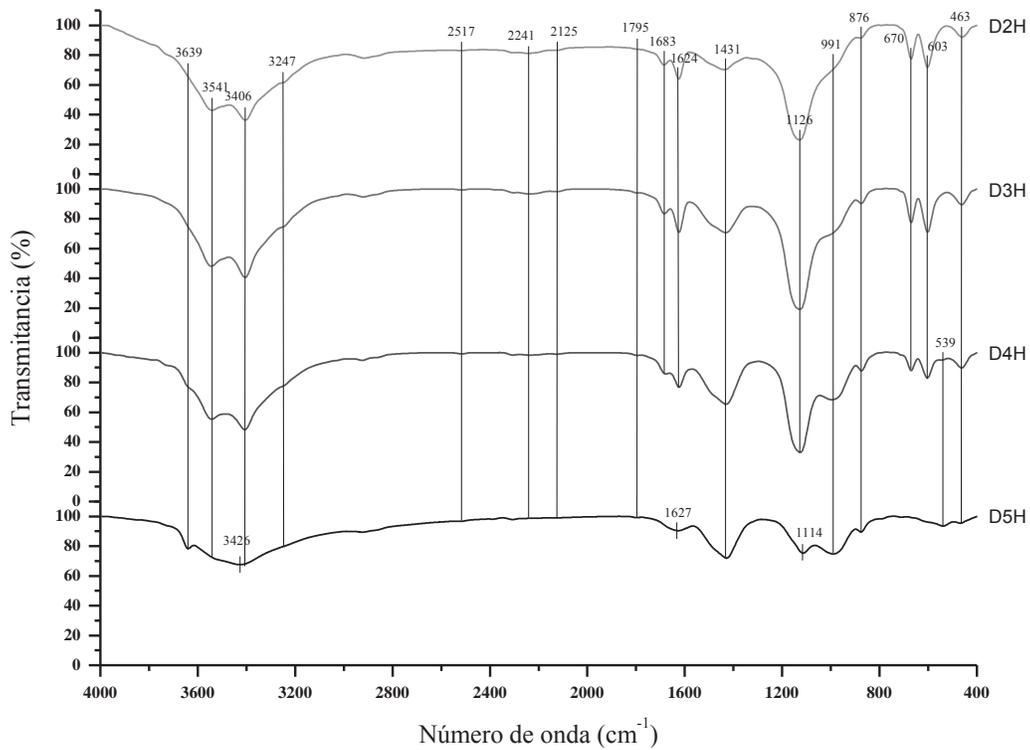


Figura 3.24.- Espectro IR de las muestras D, saturadas en agua durante 28 días.

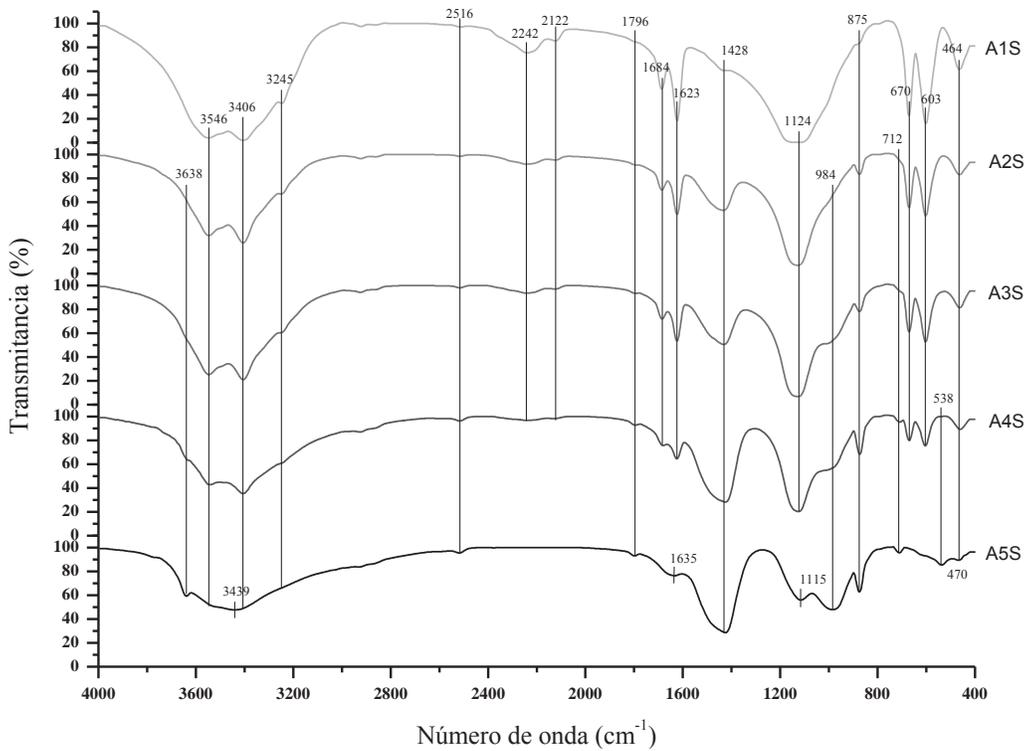


Figura 3.25.- Espectro IR de las muestras A, hidratadas 180 días a temperatura ambiente.

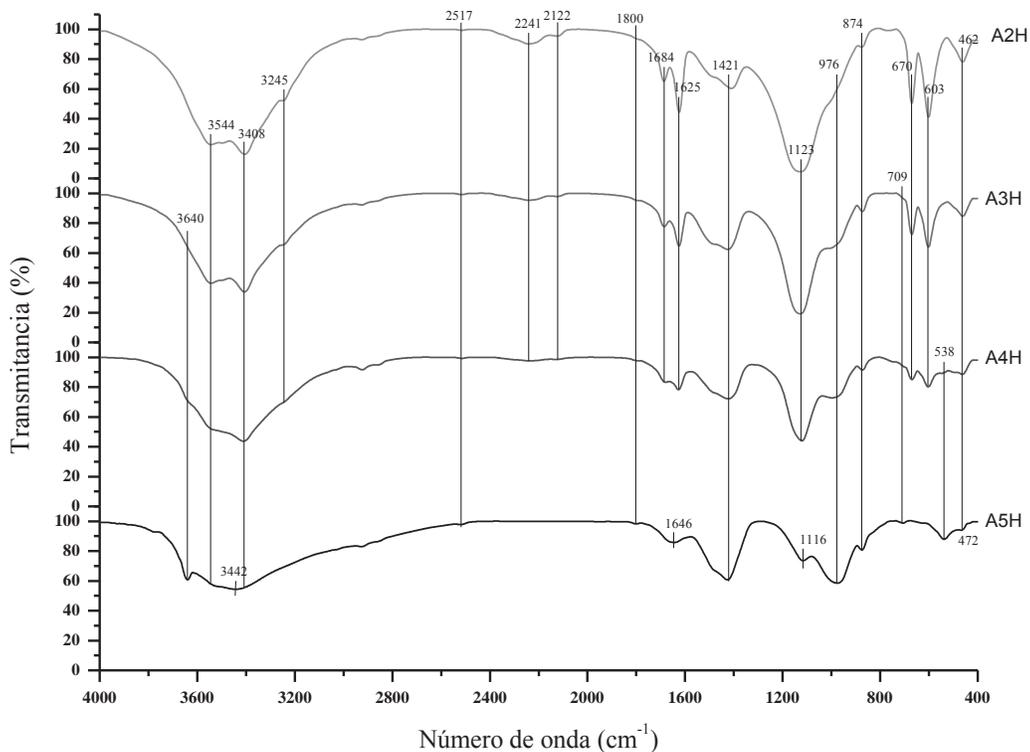


Figura 3.26.- Espectro IR de las muestras A, saturadas en agua durante 180 días.

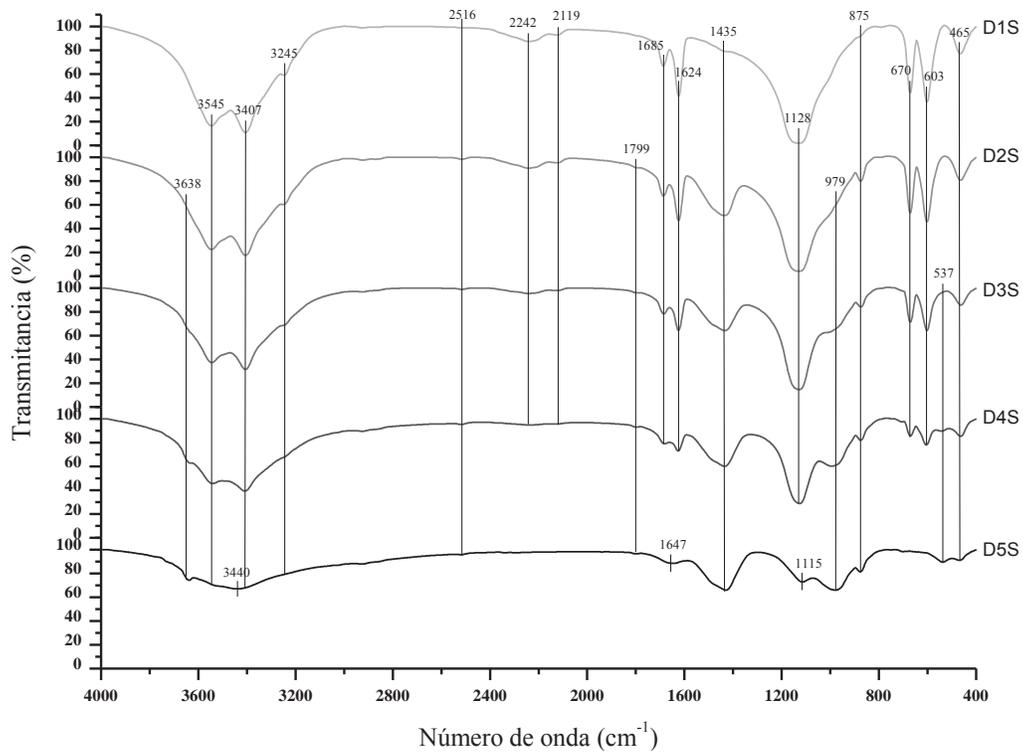


Figura 3.27.- Espectro IR de las muestras D, hidratadas 180 días a temperatura ambiente.

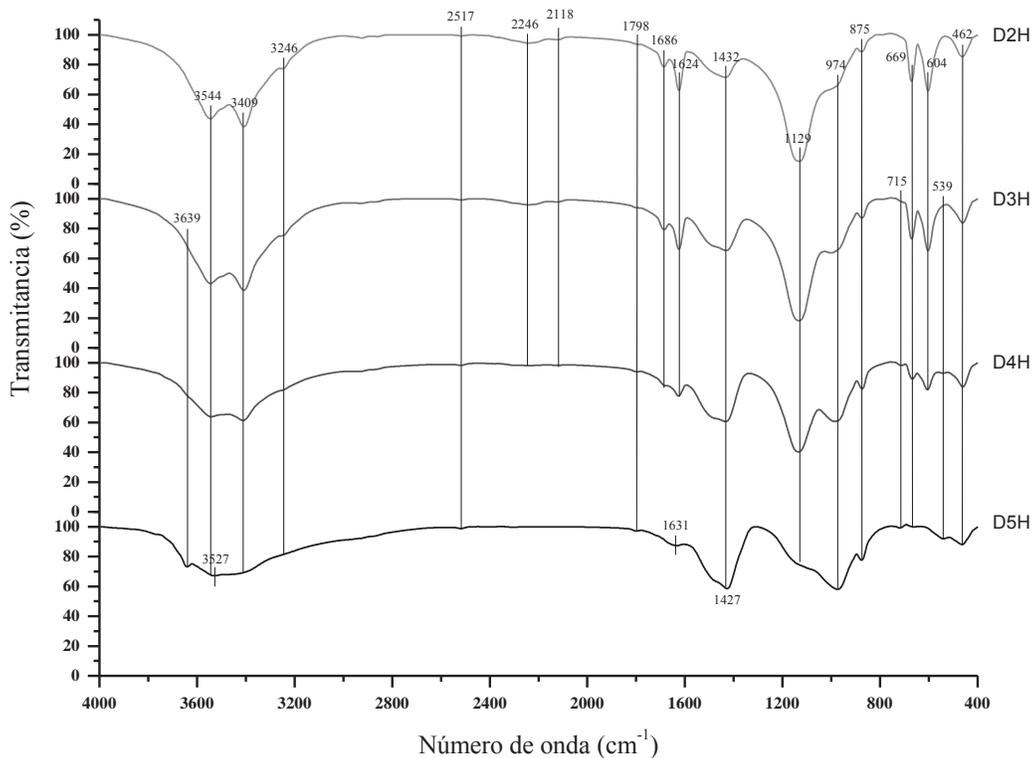


Figura 3.28.- Espectro IR de las muestras D, saturadas en agua durante 180 días.

3.2.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

La figura 3.29 muestra micrografías de las mezclas que sólo contienen yeso Supremo San Luis como material cementante a 28 días de la hidratación. La micrografía 3.29 (a) es de la mezcla A1S y se observan sólo cristales de yeso donde ha cristalizado principalmente en formas alargadas o aciculares la forma típica de cristalizar del yeso. La micrografía 3.29 (b) pertenece a la mezcla B1S de yeso reforzado con fibra de vidrio E, en la que la superficie de la fibra no presenta ningún tipo de daño superficial, por lo que el yeso no es agresivo hacia la fibra de vidrio a los 28 días de hidratación del yeso. La micrografía 3.29 (c) de la mezcla D1S y se observa una partícula de ceniza volante clase F (C), en donde se observa que la ceniza no tiene actividad puzolánica con el yeso a 28 días de la hidratación. En la micrografía 3.29 (d) de la mezcla E1S, ilustrando cristales de yeso, una fibra de vidrio clase F y partículas de ceniza volante. La adherencia entre fibra y el yeso se observa que es bueno. El usar ceniza volante y fibra de vidrio no incrementó la resistencia a la compresión a 28 días respecto a las mezclas A1S.

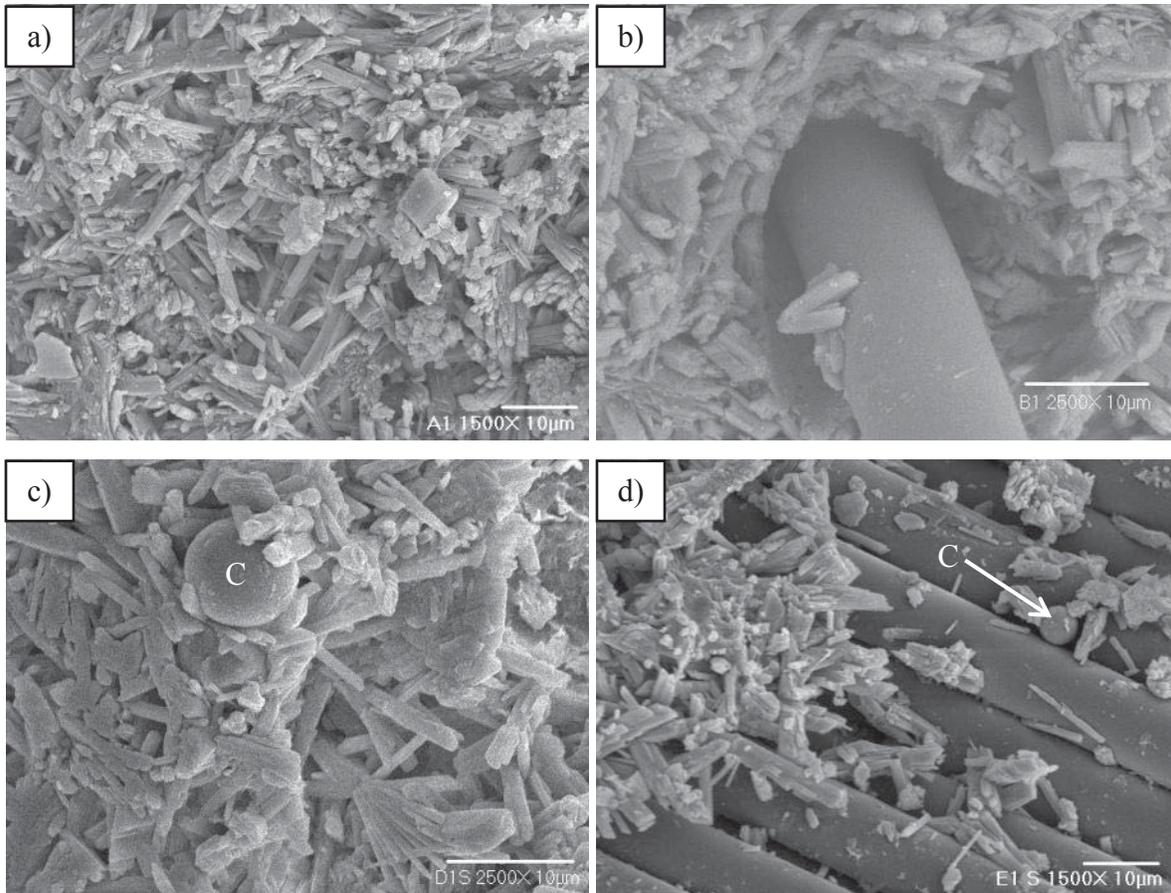


Figura 3.29.- Micrografía de barrido de las muestras A1S a 1500X, B1S a 2500X, D1S a 2500X y E1S a 1500X, hidratadas 28 días.

La figura 3.30 muestra micrografías de las mezclas A que únicamente contienen yeso como material cementante e hidratadas por 180 días a temperatura ambiente. En la micrografía 3.30 (a) se observan cristales de yeso de las mezclas A1S en formas alargadas y piramidales y que no han cambiado en la longitud, pero se observa una superficie más redonda en los extremos de los cristales comparándolas con las mezclas A1S a 28 días de hidratación. En la micrografía 3.30 (b) se observa la mezcla B1S, los cristales de yeso rodeando los filamentos generando una falla de desprendimiento de los filamentos también se observa la superficie de la fibra que permanece con la mayoría de la superficie sin ataque por parte del S y el Ca, por lo que el yeso no afecta la superficie de la fibra de vidrio E a 180 días de hidratación del yeso. En la micrografía 3.30 (c) se observa la mezcla D1S-180, donde se observan cristales de yeso en su forma acicular, también se observan partículas de ceniza volante clase F (C), donde hay interacción de la ceniza y la matriz de yeso, pero la ceniza

volante no ha reaccionado con el yeso ya que la superficie es lisa un indicio de que no hubo reacción puzolánica. También la adición de ceniza volante no afectó la forma de cristalización del yeso. En la micrografía 3.30 (d) se muestra la mezcla E1S, y se observan cristales de yeso, partículas de ceniza volante y fibra de vidrio tipo E, en la interface de la fibra de vidrio y el yeso se observa que no existen huecos que puedan afectar el comportamiento mecánico de la fibra de vidrio, también se observa que la superficie de la fibra no presenta ningún tipo de daño superficial.

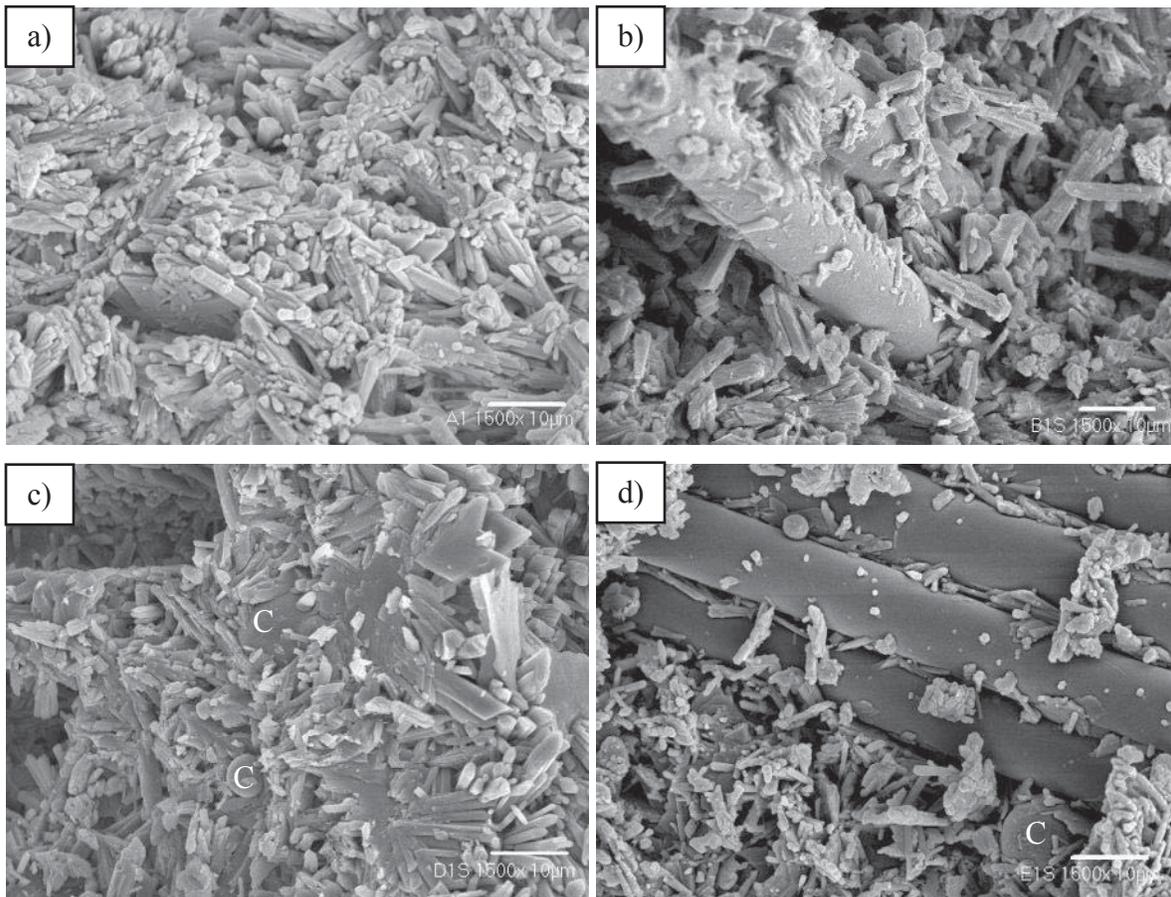


Figura 3.30.- Micrografía de barrido de las muestras A1S a 1500X, B1S a 1500X, D1S a 1500X y E1S a 1500X, hidratadas 180 días.

La figura 3.31 muestra micrografías de las mezclas A3S, B3S, D3S y E3S hidratadas por 28 días a temperatura ambiente a diferentes ampliaciones. La micrografía 3.31 (a) pertenece a la mezcla A3S donde se observan cristales de portlandita (P), cristales de yeso (Y) y también gel C-S-H en forma granular. Los cristales de yeso aun presentan forma

acicular y forma prismática definida que corresponde por los picos que son los que más difractan en el difractograma de la figura 3.13. La micrografía 3.31 (b) de la mezcla B3S donde se muestra producto de la hidratación del cemento y está incrustado en la unión de dos filamentos de la fibra de vidrio, evitando el desplazamiento de la fibra de vidrio. La micrografía 3.31 (c) pertenece a la mezcla D3S donde se observan cristales de yeso y C-S-H producto de la hidratación del cemento Portland y la matriz es una combinación de material cristalino y amorfo. La micrografía 3.31 (d) pertenece a la mezcla E3S y se aprecian cristales de yeso y C-S-H, también se observa que se ha depositado una capa de material sobre la superficie de la fibra de vidrio. A 28 días la reacción del cemento Portland se ha llevado a cabo esto se puede corroborar por la portlandita presente en la mezcla A3S, ya que tanto el C-S-H y la portlandita son productos de la reacción.

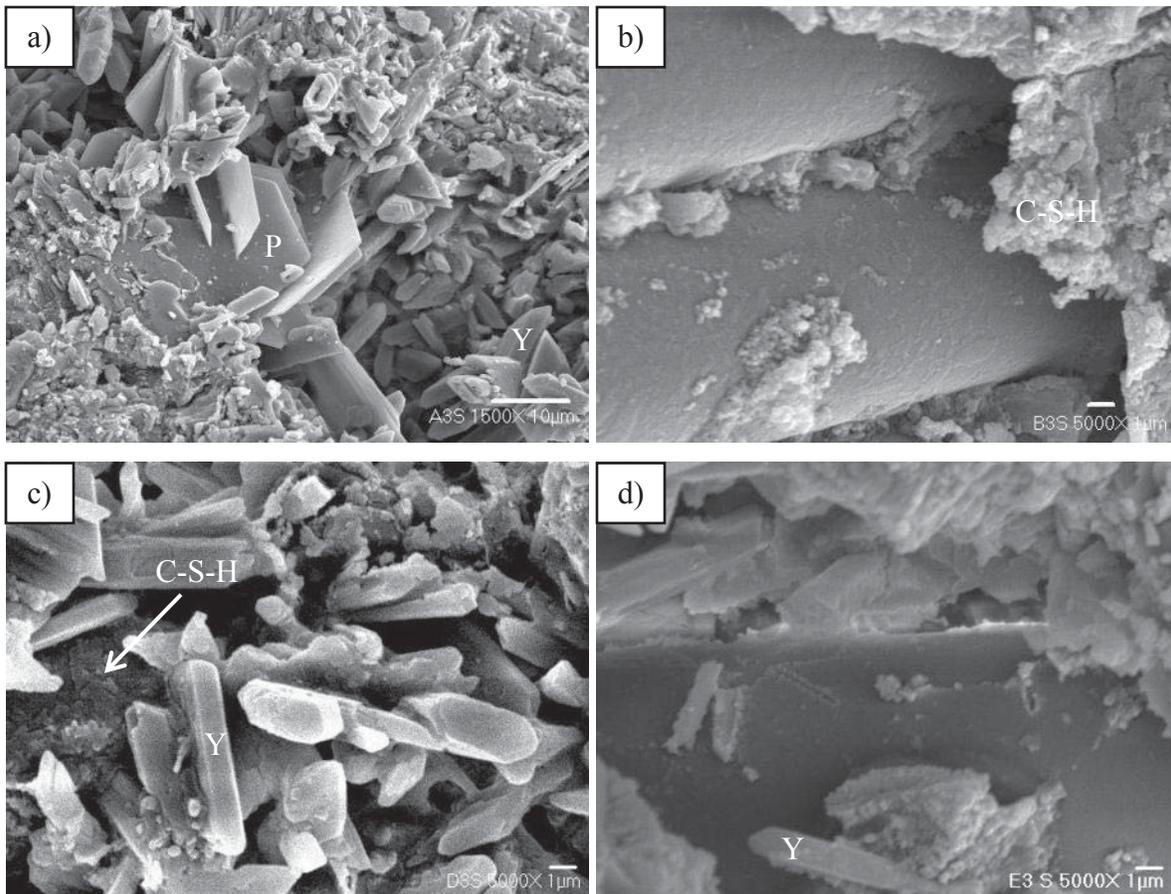


Figura 3.31.- Micrografía de barrido de las muestras A3S a 1500X, B3S a 5000X, D3S a 1500X y E3S a 5000X, hidratadas 28 días.

La figura 3.32 muestra micrografías de las mezclas A3S, B3S, D3S y E3S a 180 días de la hidratación. En la micrografía 3.32 (a) se observan cristales de yeso (Y), aunque la intensidad en el difractograma que pertenece a la portlandita en la figura 3.17 (A3S) es el más intenso, no se observa en la micrografía, debido a la cantidad de fases presentes en la muestra. La micrografía 3.32 (b) de la mezcla B3S, la superficie de la fibra de vidrio presenta depositación de material que contiene S, y éste es el único elemento detectado en el mapeo, por lo que no se puede concluir a que fase cristalina pertenece. La micrografía 3.32 (c) es de la mezcla D3S donde se puede observar una matriz compuesta de fases como: yeso (Y), C-S-H producto de la reacción, también se observa una partícula de ceniza volante y en su superficie hay material de la reacción puzolánica en forma granular. La micrografía 3.32 (d) de la mezcla E3S donde el material que más se deposita en la superficie de la fibra es material C-S-H, también se observa yeso (Y).

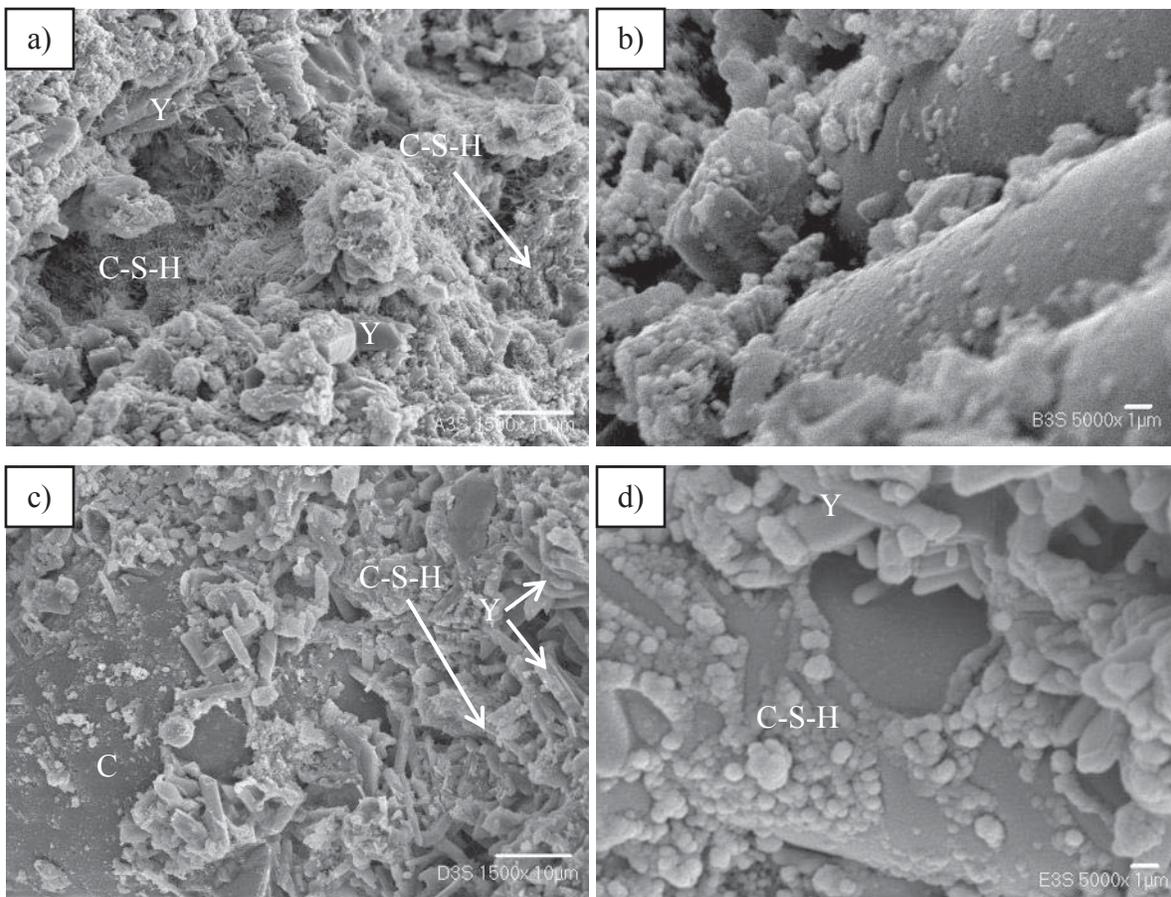


Figura 3.32.- Micrografía de barrido de las muestras A3S a 1500X, B3S a 5000X, D3S a 1500X y E3S a 5000X, hidratadas 180 días.

La figura 3.33, son micrografías de las mezclas A5S, B5S, D5S Y E5S a diferentes ampliaciones hidratadas 28 días. La micrografía 3.33 (a) muestra material de la reacción C-S-H en forma granular y la matriz de cemento se encuentra homogénea en la forma y tamaño del C-S-H. No se alcanzan a distinguir otras fases por la ampliación de la micrografía. La micrografía 3.33 (b) de la mezcla B5S mostrando depositación de material granular C-S-H sobre la superficie de la fibra. La micrografía 3.33 (c) de la mezcla D3S en la que se observan partículas de ceniza volante y ésta no ha reaccionado con la matriz de la ceniza volante ya que aún se observa una superficie lisa de ceniza. La micrografía 3.33 (d) de la mezcla E5S donde se aprecian partículas de ceniza volante, la partícula de parte superior de la micrografía se aprecia que no ha reaccionado de la misma manera que la partícula de ceniza de la parte inferior, la partícula presenta material de la reacción puzolánica también en la fibra no se aprecia daño superficial de la fibra de vidrio.

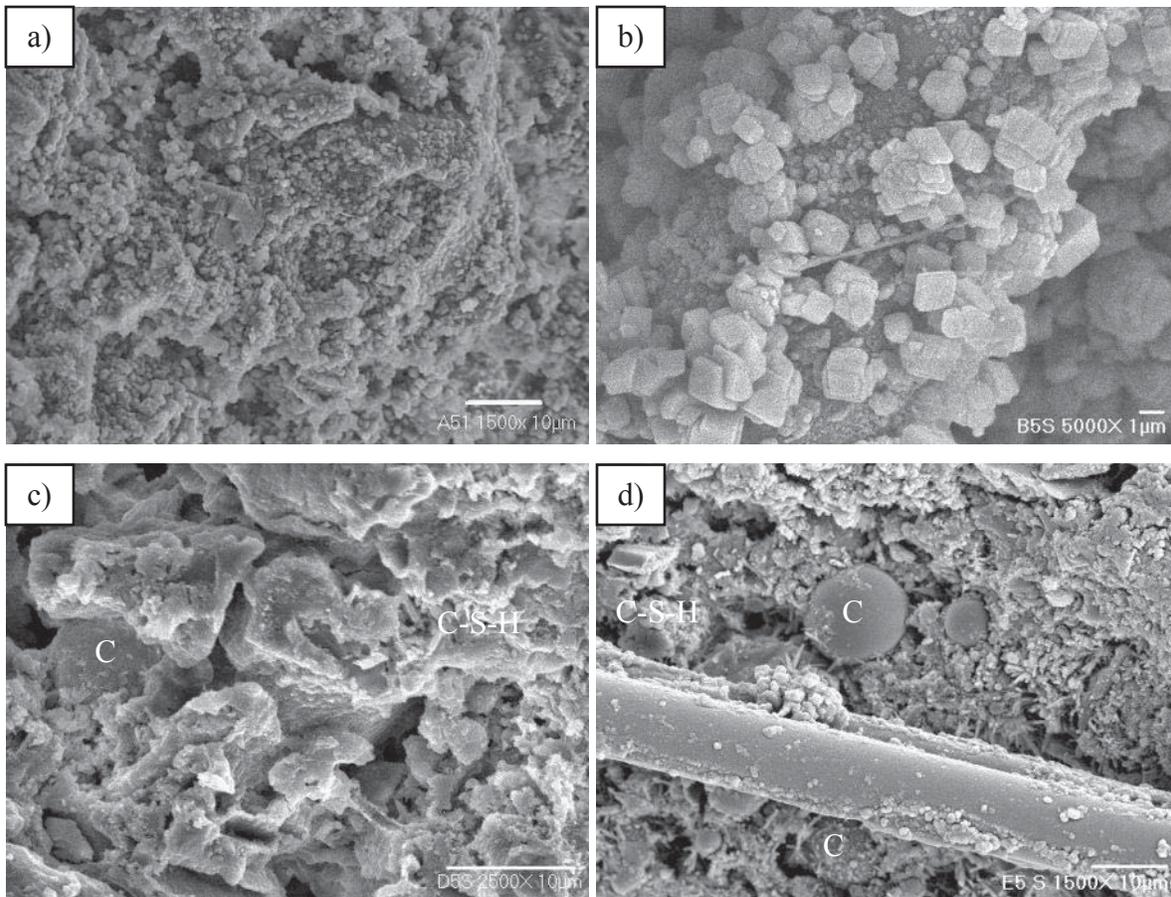


Figura 3.33.- Micrografía de barrido de las muestras A5S a 1500X, B5S a 5000X, D5S a 2500X y E5S a 1500X, hidratadas 28 días.

En la figura 3.34 se muestran micrografías de las mezclas A5S, B5S, D5S y E5S a 180 días de la hidratación. La micrografía 3.34 (a) muestra cristales de portlandita (P), también se presenta material C-S-H en forma de red tridimensional estos son los principales productos de la reacción de C_3S y $\beta-C_2S$ con el agua. La micrografía 3.34 (b) de la mezcla B5S muestra material C-S-H, y donde la fibra de vidrio está completamente rodeada por el material y donde la fibra no presenta ningún daño superficial. La micrografía 3.34 (c) pertenece a la mezcla D5S donde se observan partículas de ceniza cubiertas casi totalmente por material que contiene Si y Ca que pertenecen al C-S-H. La micrografía 3.34 (d) de la mezcla E5S se observa una matriz más densa, por lo que la resistencia a la compresión debe ser superior en comparación con las otras muestras, en el mapeo para estas muestras se detectaron picos con poca intensidad de los elementos por la inclinación de la muestra respecto al detector del MEB.

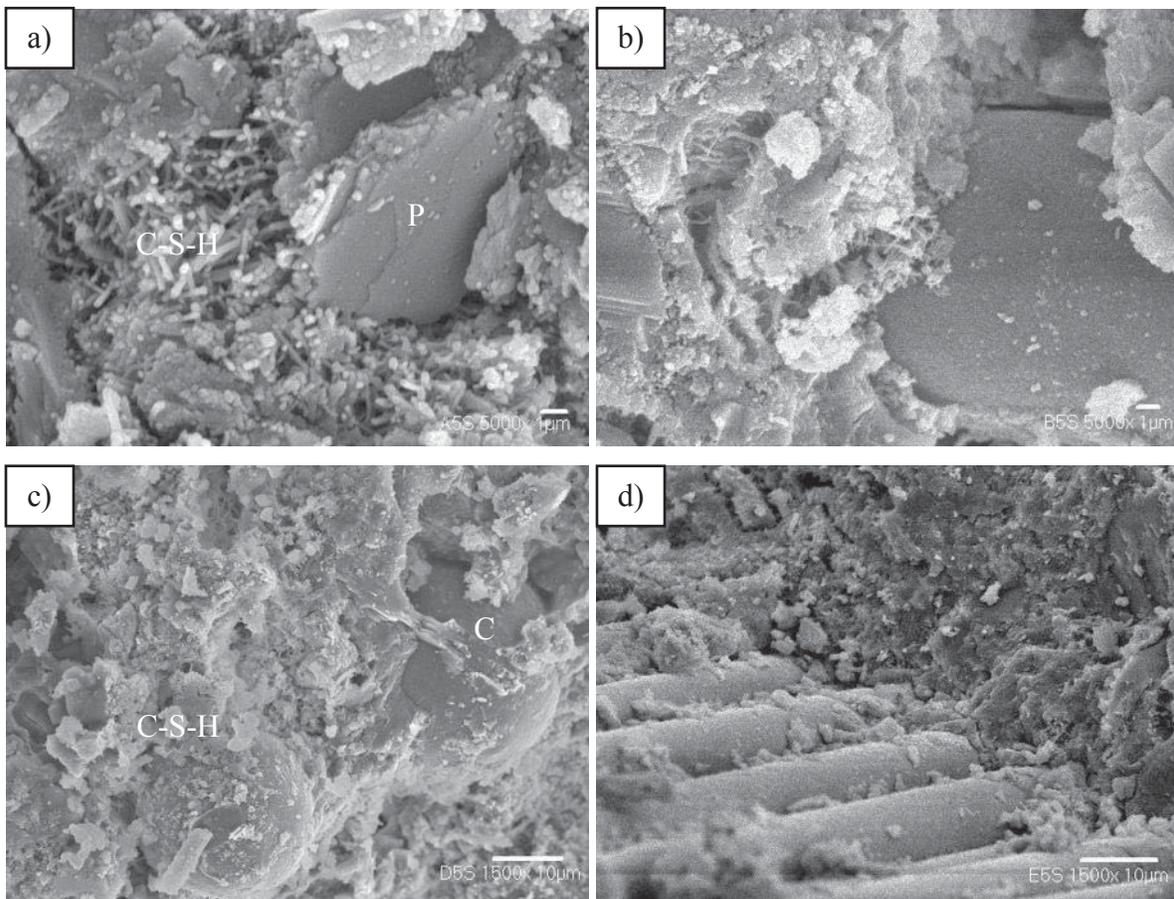


Figura 3.34.- Micrografía de barrido de las muestras A5S a 5000X, B5S a 5000X, D5S a 1500X y E5S a 1500X, hidratadas 180 días.

La figura 3.35 muestra micrografías de barrido de las mezclas A2H, B 2H, D2H y E2H saturadas en agua durante 28 días. En la micrografía 3.35 (a) de la mezcla A2H se observa una partícula de cemento en proceso de hidratación, también se observa material C-S-H. La micrografía 3.35 (b) de la mezcla A2H presenta yeso, el cual ya no presenta forma cristalina definida, también se observa material solidificado en la superficie de la fibra de vidrio. En la micrografía 3.35 (c) de la mezcla D2H presenta cristales de yeso y material C-S-H en forma granular. En la micrografía 3.35 (d) de la mezcla E2H, se observan cristales de yeso con una morfología menos definida que los cristales en las muestras A1S a 28 días, debido a la acción del agua sobre el yeso. También se observa material que solidificó sobre la superficie de la fibra. En este caso, de la saturación en agua afectó la forma de los cristales de yeso teniendo formas menos cristalinas. A 28 días de saturación las mezclas que contienen fibra presentan material adherido en la superficie de la fibra.

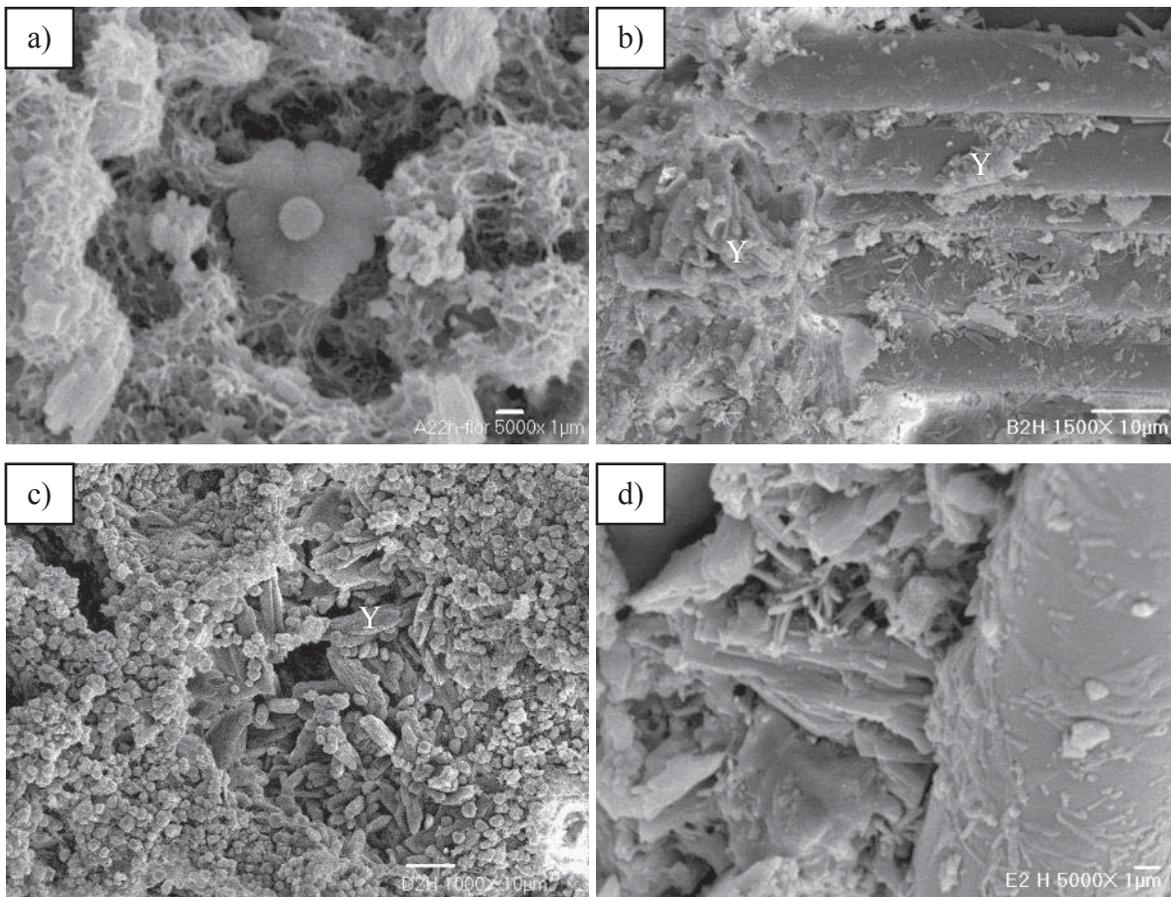


Figura 3.35.- Micrografía de barrido de las muestras A2H a 5000X, B 2H a 1500X, D2H a 1000X y E2H a 5000X, saturadas en agua por 28 días.

En la figura 3.36 se observan micrografías de las mezclas A2H, B2H, D2H y E2H a 180 días de saturación en agua. En la micrografía 3.36 (a) se observan cristales de yeso (Y) y C-S-H, los cristales de yeso no presentan su forma cristalina como en las muestras A1S-180 (figura 3.30), debido a la acción del agua sobre el yeso. La micrografía 3.36 (b) de la mezcla B2H se observa un filamento de la fibra de vidrio completamente rodeado por el C-S-H, y ningún cristal de yeso rodea al filamento, también la introducción de material de la hidratación dentro de los filamentos produce fragilización de las fibras. La micrografía 3.36 (c) de la mezcla D2H donde se identifican cristales de yeso (Y) y una partícula de ceniza volante (C), la partícula está cubierta por material que contiene Si, atribuido al C-S-H generado por la reacción puzolánica. La micrografía d) muestra el desprendimiento de filamentos de la fibra donde se observa como el material está solidificando entre los filamentos de la fibra de vidrio tipo E.

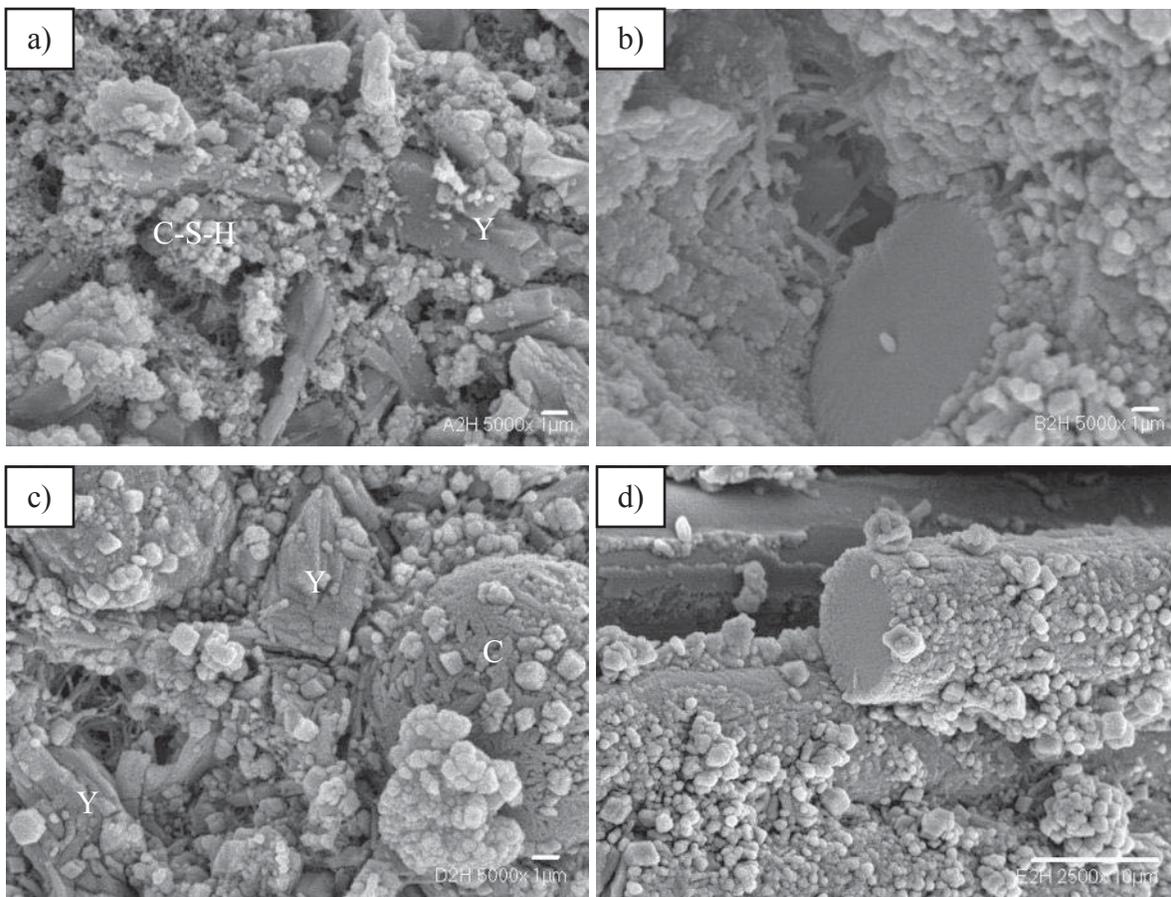


Figura 3.36.- Micrografía de barrido de las muestras A2H a 5000X, B2H a 5000X, D2H a 5000X y E2H a 2500X, saturadas en agua por 180 días.

La figura 3.37 muestra micrografías a diferentes aumentos de las mezclas A4H, B4H, D4H y E3H saturadas en agua por 180 días. La micrografía 3.37 (a) es de la mezcla A4H donde se muestra etringita, y cristales de yeso, la etringita junto con los cristales de yeso se observaron en una grieta porque la etringita sólo cristaliza donde hay fracturas y poros. La micrografía 3.37 (b) pertenece a la mezcla B4H y se aprecia portlandita en la interface de la fibra de vidrio y la matriz de cemento, se observa C-S-H en la matriz. La micrografía 3.37 (c) pertenece a la mezcla D4H, donde se aprecia portlandita (P) y una partícula de ceniza volante y dentro de la partícula se encuentra C-S-H como producto de la reacción puzolánica, yeso (Y), la matriz comienza a ser más densa por la acción de la reacción puzolánica. La micrografía 3.37 (d) pertenece a la mezcla E3H y se observan cristales de yeso (Y) y material depositado dentro de la fibra de vidrio evitando que tenga libre desplazamiento entre los filamentos.

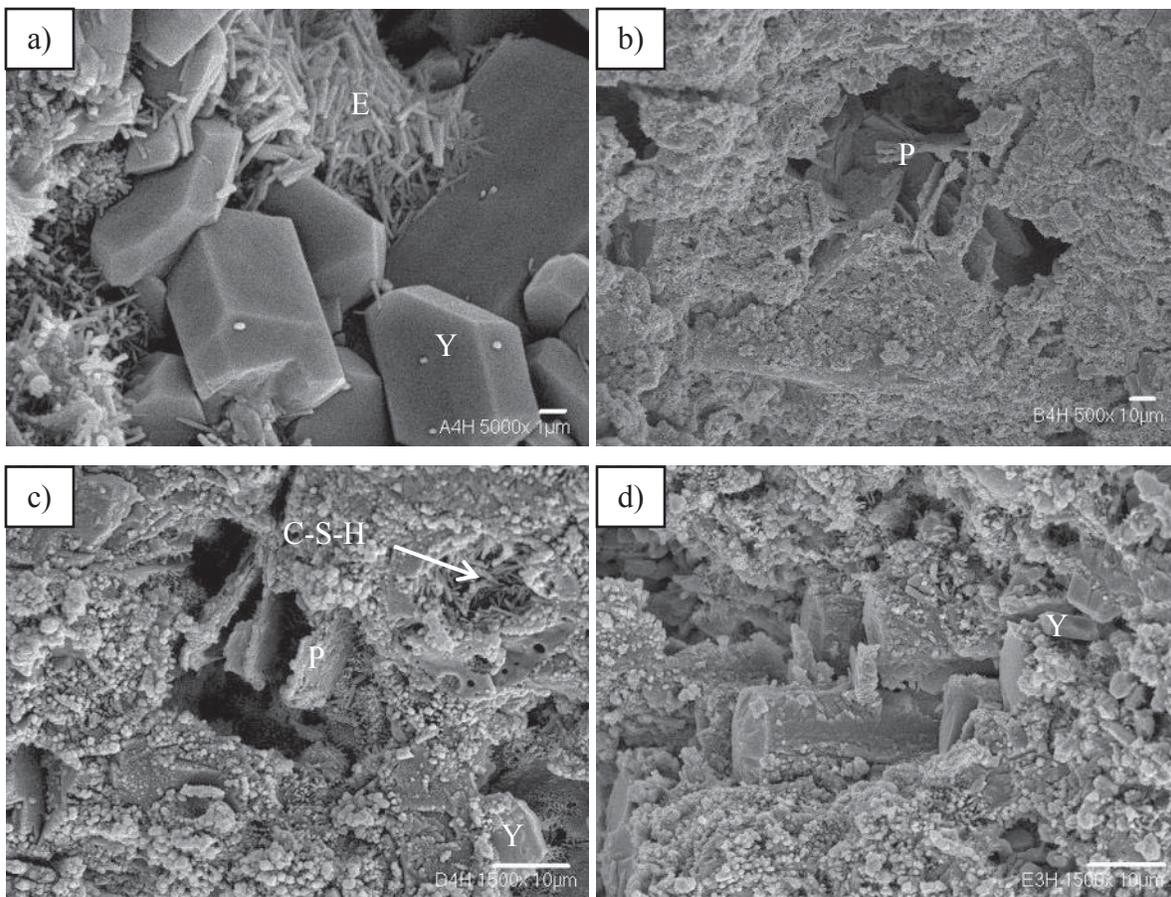


Figura 3.37.- Micrografía de barrido de las muestras A4H a 5000X, B4H a 5000X, D4H a 1500X y E3H a 1500X, saturadas en agua por 180 días.

La figura 3.38 muestra micrografías a diferentes ampliaciones de las mezclas A5H, B5H, D5H y E5H saturadas en agua por 28 días. La micrografía 3.38 (a) pertenece a la mezcla A5H y se observa C-S-H en forma granular y de naturaleza fibrosa y la matriz de ésta mezcla es más densa que la muestra AS5-28 debido a que hay agua disponible y las reacciones no han terminado. La micrografía 3.38 (b) pertenece a la mezcla B5H donde se observan cristales de etringita en su forma de agujas éstas se presentan en cavidades o poros. También muestra en la matriz C-S-H y sobre la fibra de vidrio, ésta no presenta daño superficial. La micrografía 3.38 (c) pertenece a la mezcla D5H y se observa principalmente C-S-H y etringita (E). La micrografía 3.38 (d) pertenece a la mezcla E5H y se observan cristales de portlandita depositados sobre la superficie de la fibra de vidrio, la depositación de la portlandita tiene una orientación preferencial que es un a forma de falla para los cementos reforzados con fibras de vidrio debido a que la portlandita tiene menor resistencia que el C-S-H.

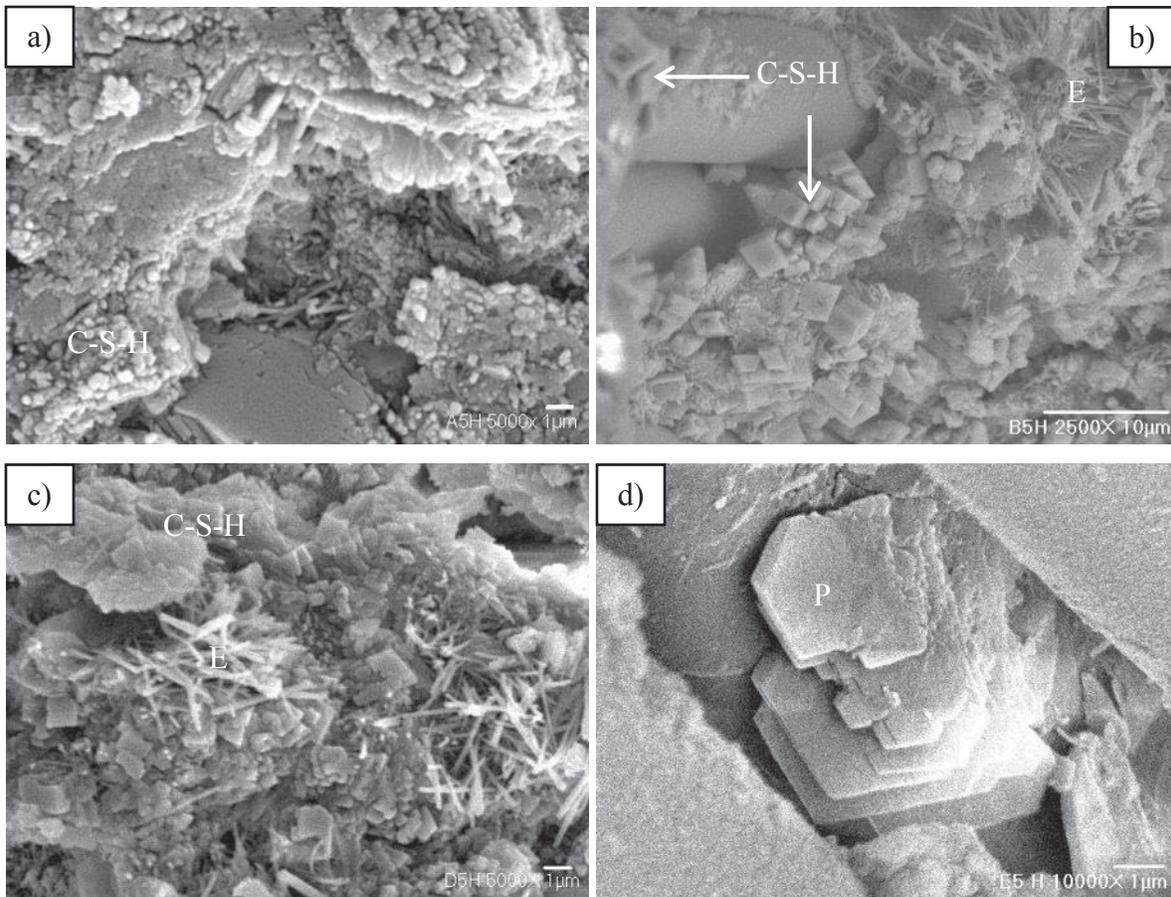


Figura 3.38.- Micrografía de barrido de las muestras A5H a 1500X, B5H a 2500X, D5H a 5000X y E5H a 10000X, saturadas en agua por 28 días.

La figura 3.39 son micrografías a diferentes ampliaciones de las mezclas A5H, B5H, D5H y E5H saturadas en agua por 180 días. La micrografía 3.39 (a) pertenece a la mezcla A5H y se observa un cristal de portlandita, y también C-S-H. La mezcla A5H presenta una matriz más densa que la mezcla a 28 días por lo que la resistencia es mayor a 180 días. La micrografía 3.39 (b) pertenece a la mezcla B5H y muestra fibra de vidrio la que presenta daño superficial en forma de picaduras y que fue visible a 5000X, también se observa C-S-H sobre la superficie de fibra. La micrografía 3.39 (c) pertenece a la mezcla D5H que muestra portlandita, C-S-H y partículas de ceniza volante (C) mostrando como reaccionaron. La micrografía 3.39 (d) pertenece a la mezcla E5H donde se muestra un filamento de la fibra de vidrio en la que se ha depositado alrededor una capa de C-S-H densificando la interfase entre la matriz y la fibra de vidrio, la superficie de la fibra de vidrio no presenta ningún daño superficial.

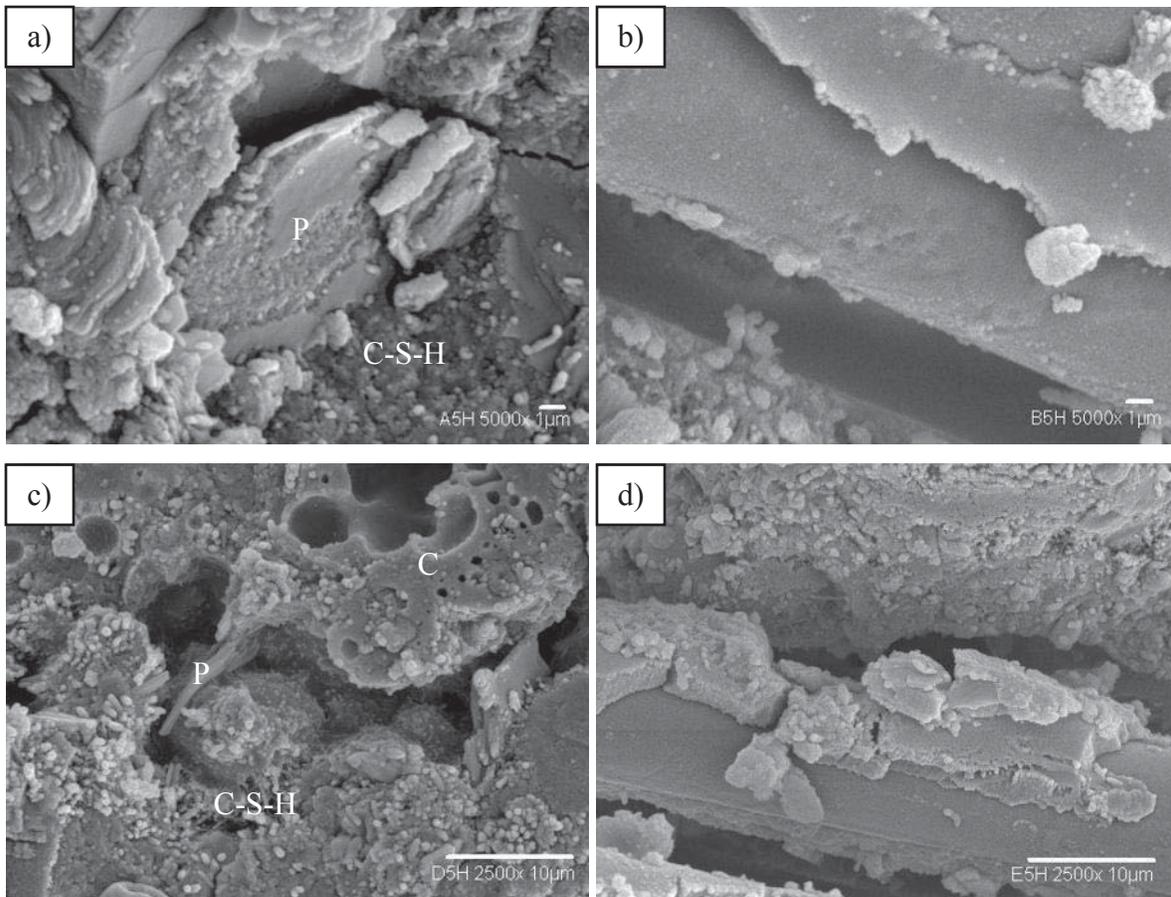


Figura 3.39.- Micrografía de barrido de las muestras A5H a 5000X, B5H a 5000X, D5H a 2500X y E5H a 2500X, saturadas en agua por 180 días.

3.3. PROPIEDADES MECÁNICAS.

3.3.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

La evolución de la resistencia mecánica con el tiempo de hidratación da a conocer bastante información sobre el proceso de hidratación. Con el fin de estudiar las propiedades mecánicas con respecto al tiempo de hidratación se elaboraron cubos y barras de diferentes mezclas y se analizaron en dos condiciones de curado: a temperatura ambiente y saturada en agua hasta la edad de ensayo. La resistencia a la compresión y a la flexión de las diferentes mezclas se gráfica en las figuras 3.40 a 3.51. Las resistencias se determinaron después de 1, 7, 28, 90 y 180 días de hidratación. Primero se muestran las gráficas de las mezclas hidratadas a temperatura ambiente, y después se muestran las gráficas de las mezclas saturadas en agua. En la figura 3.40 se muestra la resistencia a la compresión de las mezclas A hidratadas a temperatura ambiente. La mezcla A5 tuvo la mayor resistencia a 180 días de hidratación, siguiendo en resistencia por las mezclas A4 y A3, y las mezclas A1 y A2 tuvieron las menores resistencias siendo está casi la misma resistencia. La mayor resistencia de la mezcla A5 es debido al mayor contenido del gel C-S-H que concuerda con el difractograma de Rayos-X, donde se aprecia que la diferencia en calcita presente a 180 días es mayor que es indicativo de gel C-S-H, debido a que este no difracta por su naturaleza amorfa, pero el cual se puede corroborar en el espectro IR de las muestra A5 donde hay un desplazamiento de la banda de vibración de 981cm^{-1} hasta 984cm^{-1} debido al silicio en el gel C-S-H indicando un mayor grado de reacción de los silicatos presentes en el cemento anhidro. Esto concuerda con las resistencias de las mezclas A4, A3, A2 donde el incremento de la cantidad de cemento Portland resulta en un incremento de la resistencia debido a la cantidad de gel C-S-H producido. También corroborado por imágenes de barrido en la que las mezclas A5, presenta una matriz cementicia más densa que las mezclas A4, A3, A2 y A1. También se puede observar que a 1 y 7 días de hidratación la resistencia de las mezclas A1, A2 y A3 son mayores que las resistencias de las mezclas A4 y A5 esto debido a que el yeso adquiere su resistencia en un menor tiempo. En la figura 3.41, se muestra la resistencia a la compresión de las mezclas B, las cuales tienen fibra de vidrio tipo E. La mayor resistencia a la compresión la tiene la mezcla B5 a 180 días de hidratación a temperatura ambiente, seguida por la mezcla B4, y donde las mezclas B3 y B2 tienen casi la misma resistencia. La menor resistencia a la compresión la tienen la mezcla B1. A 180

días de hidratación las muestras que contiene cemento portland presentan una disminución en la resistencia a la compresión del compuesto observándose una mayor pendiente en la mezcla B5, esto debido a la mayor alcalinidad del cemento Portland. La portlandita a 180 días está mejor cristalizada en las mezclas que contienen cemento portland afectando las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio E, los espectros IR también muestran la banda de vibración asignada a la portlandita en 3640 cm^{-1} . La figura 3.42 muestra la resistencia a la compresión de las mezclas D que contienen ceniza volante clase F, donde la mayor resistencia la tiene la mezcla D5, seguida por las mezclas D4, D3 y D2, la menor resistencia a la compresión la tiene la mezcla D1. Comparando la resistencia de la mezcla D5 con la mezcla A5, la primera tiene una mayor resistencia a la compresión debido a la adición de la ceniza volante, donde la actividad puzolánica se observa en los difractogramas de Rayos-X de las mezclas D, también se observa el desplazamiento de la banda de vibración perteneciente al gel C-S-H. La adición de ceniza volante le dió una mayor estabilidad al sistema a la edad de prueba de 180 días debido al mayor contenido de gel C-S-H. En la figura 3.43 se observa la gráfica de resistencia a la compresión de las muestras E, las que contienen ceniza volante clase F y fibra de vidrio tipo E. La mayor resistencia a la compresión la presentan las mezclas E5 a 180 de hidratación, y las mezclas E4 tienen una resistencia parecida a las mezclas E5, las mezclas E3 y E2 tienen resistencias menores que las mezclas E4, y la menor resistencia la tienen la mezcla E1. La mayor resistencia de las muestra E5 y principalmente la reducción no tan drástica como en las muestras B5, se debe a la retención de las propiedades mecánicas de la fibra de vidrio. En todas las muestras la propiedades mecánicas a 180 días de hidratación del compuesto E se mantiene sin una disminución en la resistencia como en las muestras B, donde la disminución de la portlandita es el principal factor que beneficia la resistencia. La figuras de 3.44 a 3.47 muestran la resistencia a la compresión de las muestras saturadas en agua. La figura 3.44 muestra la resistencia a la compresión de las muestras AH, donde la mayor resistencia la tienen las muestras A5H, seguidas por las muestras A4H y A3H, la muestra que presenta la menor resistencia es la muestra A2H. La resistencia que presenta la muestra A5H es debida a la cantidad de gel C-S-H producido, esta resistencia comparada con la muestra A5S es superior ya que en condiciones saturadas la muestra tiene agua para los granos de cemento sin hidratar que quedan en el cemento, también se presenta la banda de vibración de los

silicatos presentes en el espectro IR de las muestras saturadas. La muestra A2H presenta la mayor pérdida de resistencia a la compresión debido a la acción del agua sobre el yeso. La figura 3.45 es la gráfica de resistencia a la compresión de las muestras B saturadas en agua, donde la mayor resistencia la tiene la muestra B5H, seguida por la muestra B4H y B3H, y la menor resistencia la tuvo la muestra B2H. Donde la mayor resistencia la tiene la muestra B5H, seguida por la muestra B4H y B3H, y la menor resistencia la tuvo la muestras B2H. Sin embargo, la resistencia a la compresión de la muestra B5H, es inferior a la muestra A5H concluyendo que el refuerzo de fibra de vidrio no incremento la resistencia a la compresión, esto también ocurren para las demás muestras B4H, B3H, B2H. Las muestra BH presentan una mayor estabilidad en el compósito a 180 días sumergidas en agua, presentando menores pérdidas de resistencia a la compresión. La figura 3.46 muestra las graficas de resistencia a la compresión de las muestras D saturadas en agua. La muestra D5H tuvo la mayor resistencia a la compresión seguida por la muestra D4H y D3H, y la muestra D2H presento la menor resistencia a la compresión. La mayor resistencia de la muestra D5H es debida al cantidad de gel C-S-H, presente en la muestra que se corrobora con la cantidad de calcita presente en DRX, mientras que en el espectro IR la banda se presenta en 974 cm^{-1} característicos de esta fase, otro indicio es el agua contenida en el gel C-S-H, donde la banda para las muestras D5S se presenta en 1647 cm^{-1} mientras que en las muestras D5H se presenta en 1631 cm^{-1} . Las muestras D4H, D3H y D2H presentan una menor cantidad de portlandita, esto indicando que la actividad de la reacción puzolánica fue más intensa en las muestras que se mantuvieron sumergidas en agua produciendo más gel C-S-H ganado estas muestras más resistencia a la compresión. En estas muestras se observa que la ceniza volante clase F, le dió más estabilidad al sistema no teniéndose pérdida en resistencia a 180 días de hidratación.

La figura 3.47 muestra la grafica de resistencia a la compresión de las muestras E saturadas en agua. La mayor resistencia la obtuvieron las muestras E5H, seguidas por las muestras E4H, Y E3H, así como la menor resistencia la obtuvieron las muestras E2H. La muestra E5H presenta una resistencia menor que las muestras D5H, mostrando que el porcentaje de refuerzo de fibra de vidrio no tiene efectos sobre la resistencia a la compresión, esto se puede observar en todas las muestras EH que contienen fibra de vidrio.

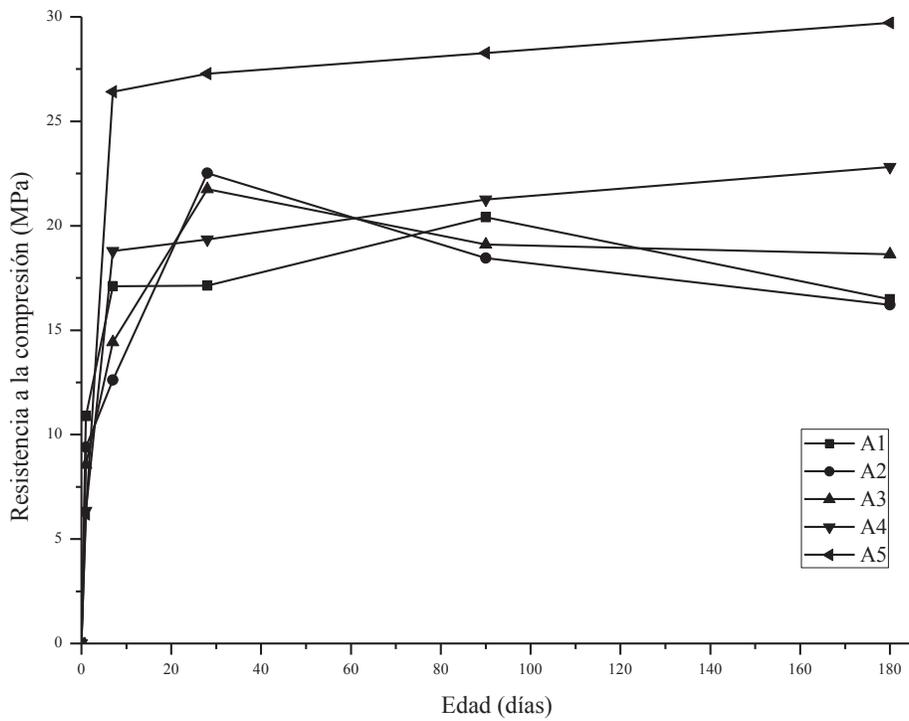


Figura 3.40.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras A.

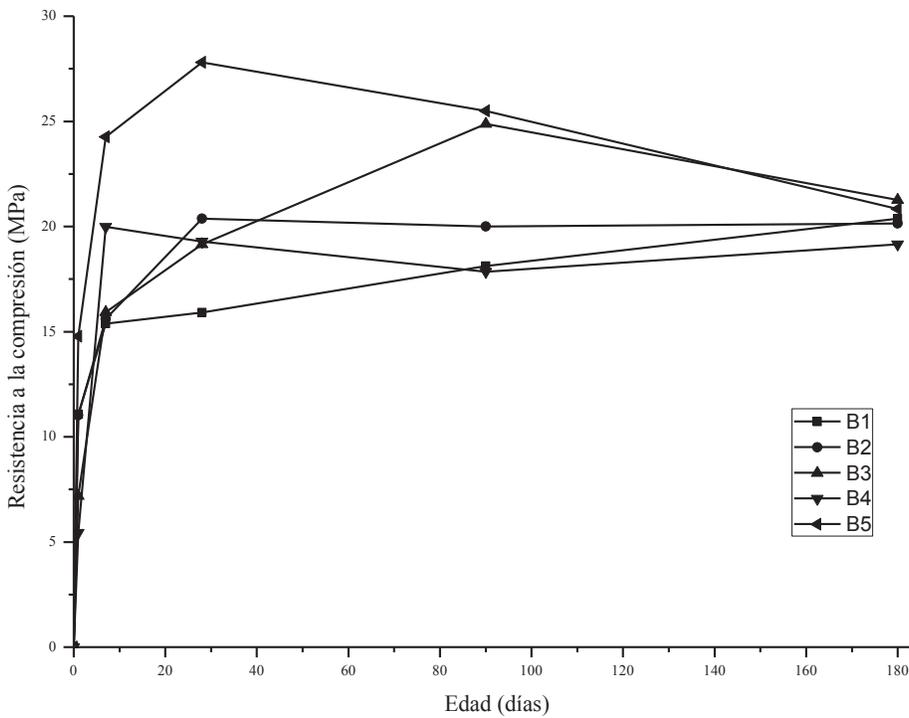


Figura 3.41.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras B.

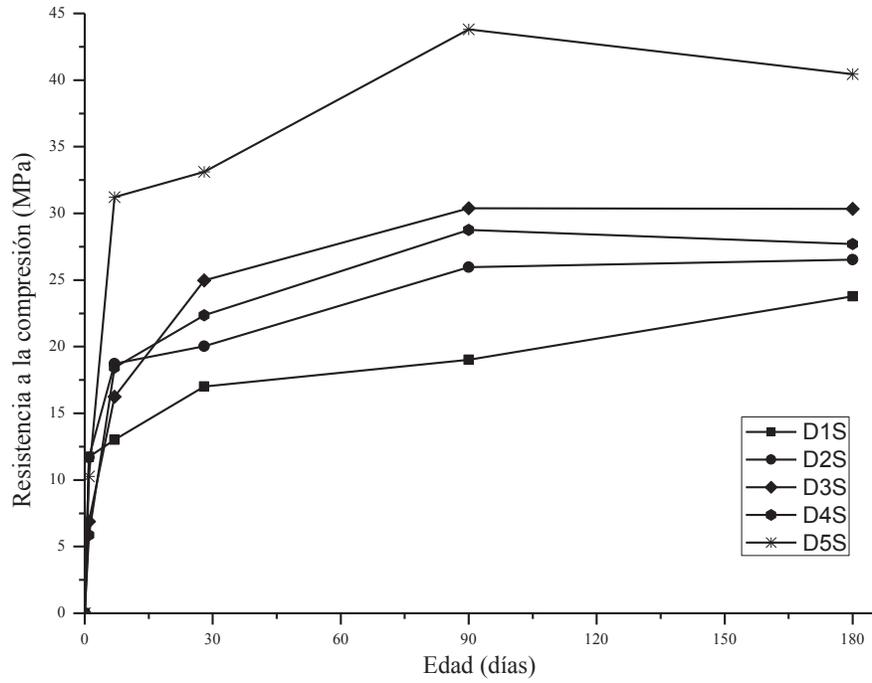


Figura 3.42.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras D.

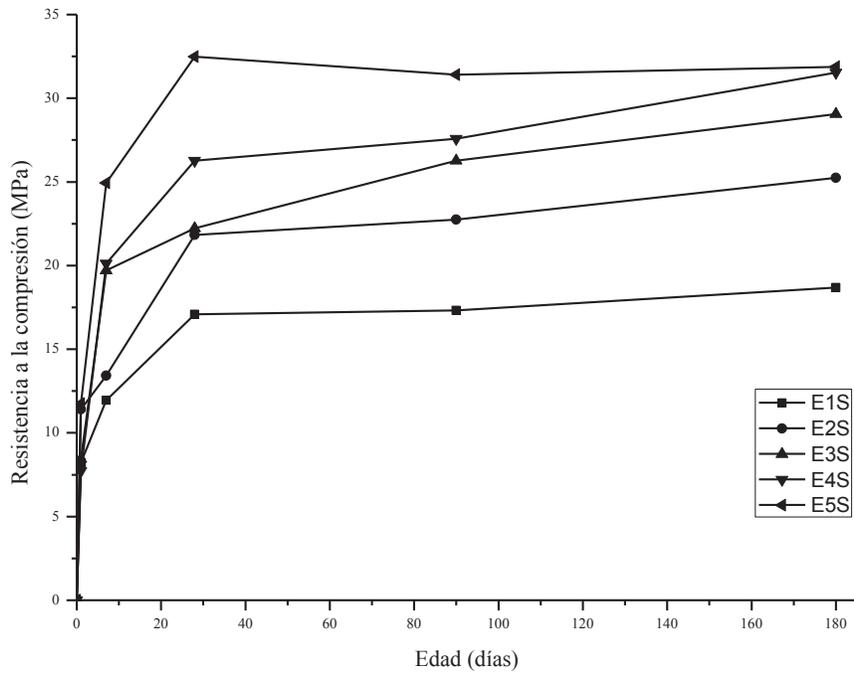


Figura 3.43.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras D.

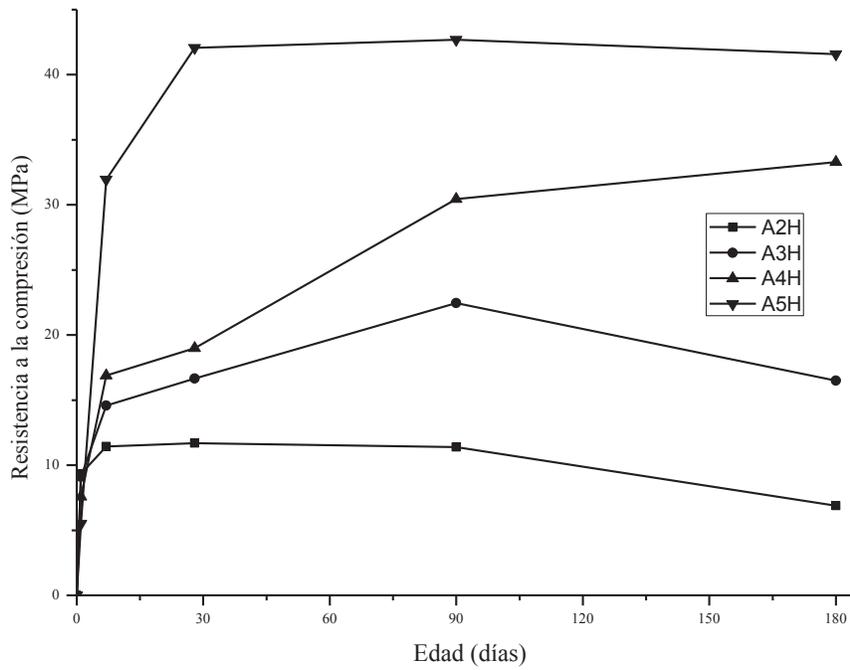


Figura 3.44.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras A saturadas en agua.

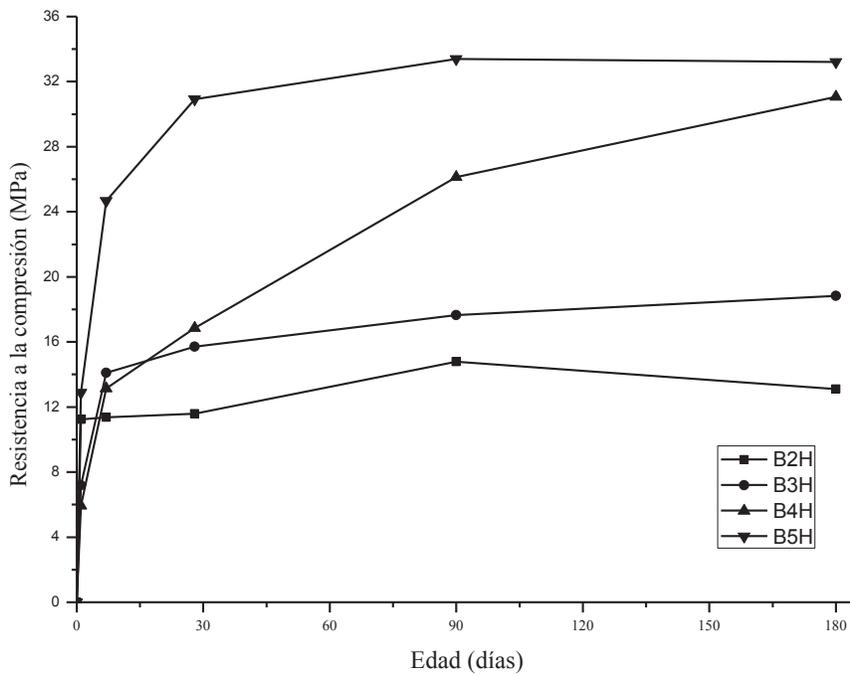


Figura 3.45.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras B saturadas en agua.

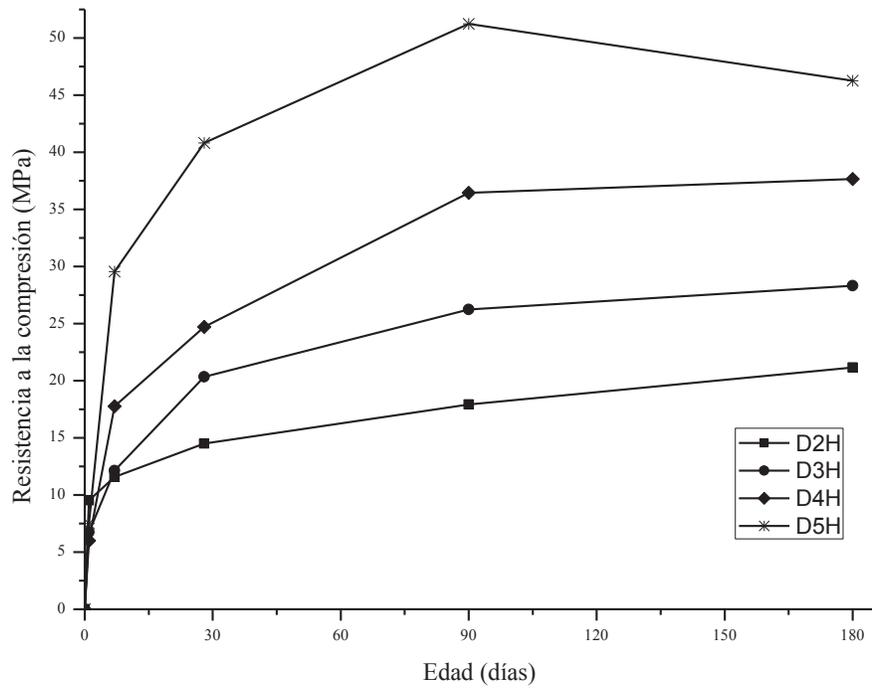


Figura 3.46.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras D saturadas en agua.

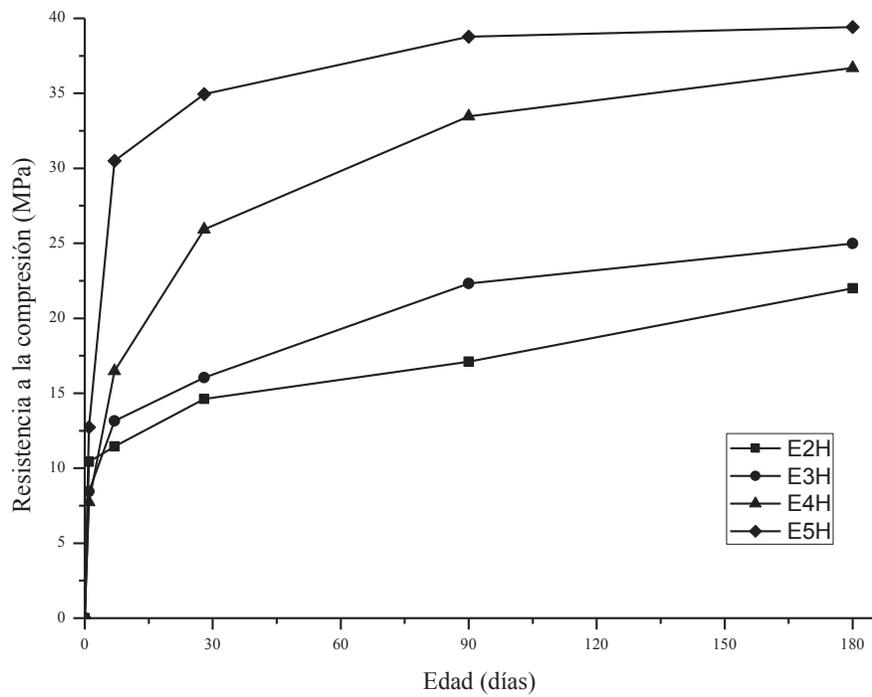


Figura 3.47.- Gráfica de resistencia a la compresión de muestras E saturadas en agua.

3.3.2. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN SIMPLE.

Para el ensayo de resistencia a la flexión solo se elaboraron probetas para analizarlas en condiciones saturadas en agua. Las figuras 3.48 a 3.51 muestran la resistencia a la flexión simple de las muestras AH, BH, DH, y EH. En la figura 3.48 se muestra la resistencia a la flexión de las muestras AH. La mayor resistencia la obtuvo la muestra A5H, seguida por las muestras A2H y A3H, y la menor resistencia la tuvo la muestra A2H. La muestra A2H presenta la mayor pérdida en resistencia a la flexión, debido al contenido de yeso presente en la muestra, y no es relacionado a la cantidad de etringita presente en la muestra, ya que los principales picos que difractan en DRX son de la misma intensidad, y a que la muestra A4H presenta mayor intensidad de estos picos y no presentan una pérdida tan apreciable como en las muestras A2H. La figura 3.49 presenta la gráfica de resistencia a la flexión de las muestras BH. Las muestras B5 presentan la mayor resistencia a la flexión, seguidas en resistencia por las muestras B4, B3, y las muestras B2 tuvieron la menor resistencia. La mayor resistencia a la flexión de las muestras B5 es debida al mayor contenido de cemento Portland. En todas las muestras BH se tiene una mayor estabilidad del sistema debido al refuerzo de la fibra de vidrio obteniéndose resistencias mayores con respecto a sus mezclas cementicias sin reforzar las muestras AH. La adición de fibra de vidrio incremento la resistencia a la flexión de las muestras B. Este incremento en la resistencia se puede observar en las muestras B2H donde a 180 días de saturación en agua se tiene una resistencia de 4 MPa, mientras que en la muestra A2 tiene una resistencia de 0.7 MPa. En la figura 3.50 se muestra la resistencia a la flexión de las muestras DH, en donde la muestra D5H tienen la mayor resistencia, las muestras D4H y D3H siguen en resistencia a las muestras D5H y la menor resistencia la tienen las muestras D2H. La mayor resistencia de las muestras D5H es debida a que ha reaccionado la ceniza volante con la portlandita produciendo más gel C-S-H. La resistencia de las muestras D2H de aproximadamente 2 MPa se debe al contenido de cemento y la adición de la ceniza volante, aquí se tiene una resistencia mayor y en el difractograma de Rayos-X de las muestras DH a 180 días de hidratación se tienen picos con una mayor intensidad que los debidos a las muestras AH, en tanto la acción del contenido de yeso es más perjudicial que la etringita formada en la matriz de cemento Portland.

En la figura 3.51 se tiene la gráfica de resistencia a la flexión de las muestras EH saturadas en agua, la muestra E5H tiene la mayor resistencia a 180 días de saturación en agua, seguidas en resistencia por las muestras E4H y E3H, las muestras E2H tuvieron la menor resistencia a la flexión a 180 días de saturación en agua.

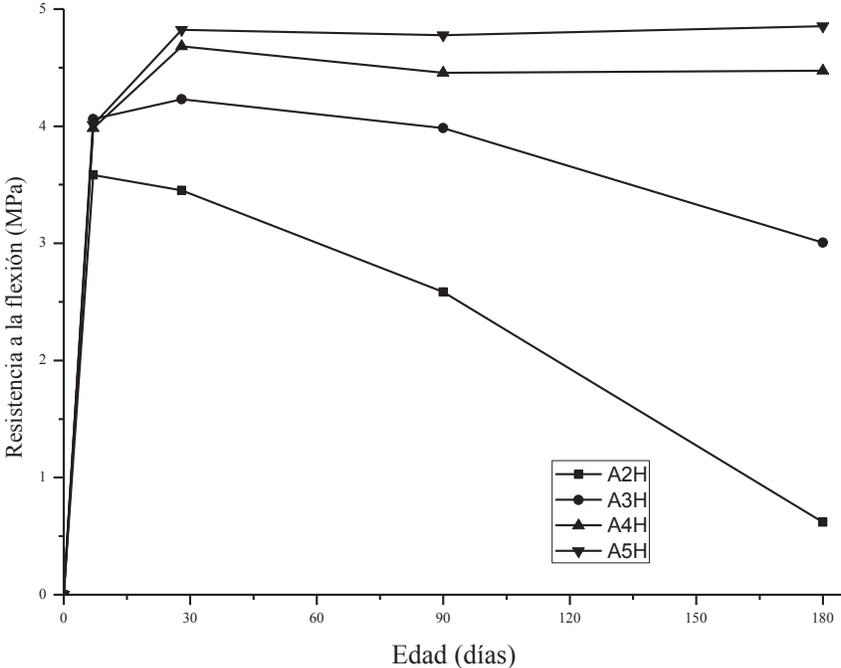


Figura 3.48.- Gráfica de resistencia a la flexión de las muestras A, saturadas en agua.

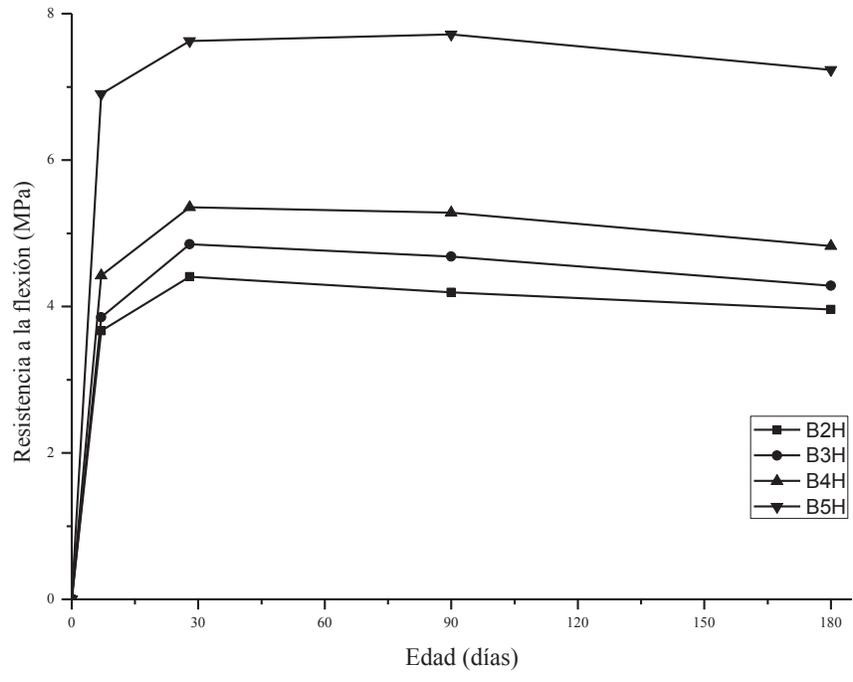


Figura 3.49.- Gráfica de resistencia a la flexión de las muestras B, saturadas en agua.

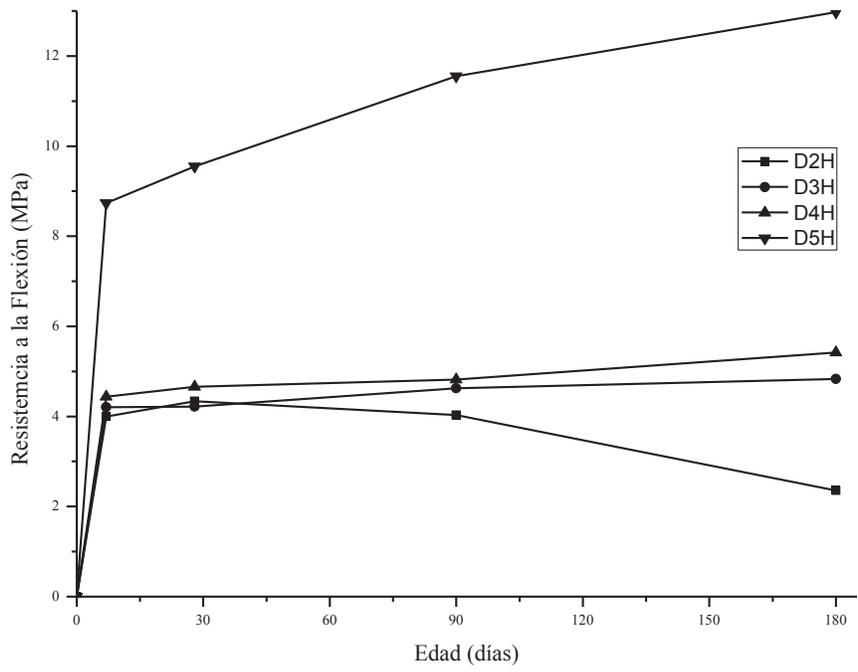


Figura 3. 50.- Gráfica de resistencia a la flexión de las muestras D, saturadas en agua.

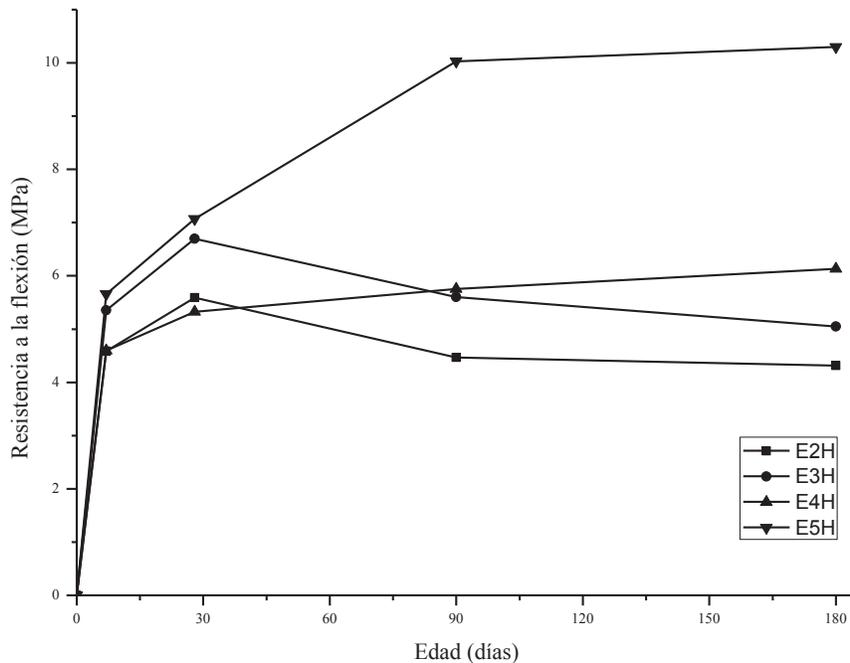


Figura 3.51.- Gráfica de resistencia a la flexión de las muestras E, saturadas en agua.

4. CONCLUSIONES.

El proyecto de investigación se ha llevado con éxito, y los principales objetivos se han alcanzado y finalmente se obtienen varias conclusiones en base a los resultados obtenidos y discusión. Por lo que a partir de la síntesis y caracterización micro y macro estructural de composites cerámicos elaborados con cementos inorgánicos reforzados con fibra de vidrio tipo E, se derivan las siguientes conclusiones:

- 1) Respecto a las propiedades mecánicas de compresión y flexión, se observó que el reemplazamiento de yeso por cemento Portland en la matriz produjo una pérdida de resistencia desde los 90 días de hidratación en función del porcentaje de cemento reemplazado por yeso.
- 2) La adición de ceniza volante clase F en la matriz de cemento Portland-yeso incrementó la resistencia a la compresión y flexión debido a la reacción puzolánica.

- 3) Mediante espectroscopia IR se ha logrado caracterizar la fase C-S-H, por medio del modo de vibrar perteneciente a Si-O, la cual no pudo ser identificada mediante DRX, por lo que esta técnica es útil en la caracterización de las fases amorfas presentes en el cemento Portland.
- 4) El uso de fibra de vidrio como material de refuerzo en la matriz incrementó la resistencia a la flexión.
- 5) El reemplazamiento de yeso en la matriz de cemento Portland CPC 30R, favorece la formación de la etringita.
- 6) La adición de ceniza volante clase F no afecta la cristalización de la fase etringita. Por lo que la etringita no depende del contenido de portlandita.
- 7) La expansión de las mezclas analizadas no depende de la etringita sino de la cantidad del porcentaje de yeso reemplazado por cemento Portland.
- 8) La reacción puzolánica requiere largos periodos de tiempo para que se lleve a cabo, e incrementa las propiedades mecánicas.
- 9) El uso de ceniza volante disminuyó la cantidad de portlandita generada en las muestras saturadas en agua.

RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO.

Al concluir la investigación se derivan estudios que deben complementar esta investigación para el entendimiento del reemplazamiento de yeso y la adición de la ceniza volante clase F en la matriz de cemento Portland. Se puede recomendar utilizar diferentes porcentajes de adición de ceniza volante clase F para identificar un máximo de adición. Utilizar diferentes porcentajes de refuerzo. También utilizar técnicas de micro indentación en la interfase

fibra-matriz de cemento para estudiar el efecto de la densificación. Utilizar espectroscopia Raman para el estudio de las reacciones de hidratación.

5. REFERENCIAS.

1. ONNCCE, in *Industria de la construcción-cementos hidráulicos-especificaciones y métodos de prueba*. 3232.
2. RAMACHANDRAN, V.S., *Concrete admixtures handbook*, in *Properties, science, and technology*, V.S. Ramachandran, Editor. 1995, Noyes Publications: New Jersey. p. 1112.
3. KOSMATKE, S.H., *Integrated Materials and Construction Practices for concrete Pavement*, in *FHWA HIF-07-004*, F.H. Administration, Editor. 2007, National Concrete Pavement Technology Center: Washington D.C.
4. TAYLOR, H.F.W., *The chemistry of cements*. 2nd ed, ed. A. Press. Vol. 1. 1964, New York. 459.
5. MEHTA, P.K. and P.J.M. MONTEIRO, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 2006: McGraw-Hill.
6. NURSE, R.W., *Proceedings of the Third International Symposium on the Chemistry of Cements*, in *Cement and concrete Association*. 1954: London.
7. LEA, F.M., *The Chemistry of Cement and Concrete*. 3 ed, ed. I. Chemical Publishing Company. 1971, New York.
8. KOSMATKA, S.H., et al., *Diseño y control de mezclas de concreto* 1 ra ed, ed. P.C. Association. Vol. 1. 2004, Mexico. 446.
9. Yu, Q.L. and H.J.H. Brouwers, *Microstructure and mechanical properties of [beta]-hemihydrate produced gypsum: An insight from its hydration process*. *Construction and Building Materials*, 2011. **25**(7): p. 3149-3157.
10. SMITH, W.F., ed. *FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA E INGENIERIA DE MATERIALES*. 2da ed., ed. McGraw-Hill. Vol. 1. 1993: México.
11. MARTHUR, P.C., *Study of cementitious materials using transmission electron microscopy*, in *Faculte des sciendes et techniques de Ingénieur* 2007, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne: Lausanne. p. 237.
12. KIRCHHEIM, A., et al., *Analysis of cubic and orthorhombic C3A hydration in presence of gypsum and lime*. *Journal of Materials Science*, 2009. **44**(8): p. 2038-2045.
13. FERNÁNDEZ BERTOS, M., et al., *A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO2*. *Journal of Hazardous Materials*, 2004. **112**(3): p. 193-205.
14. BONEN, D. and S. L. SARKAR, *The effects of simulated environmental attack on immobilization of heavy metals doped in cement-based materials*. *Journal of Hazardous Materials*, 1995. **40**(3): p. 321-335.
15. BUKOWSKI, J.M. and R. L. BERGER, *Reactivity and strength development of CO2 activated non-hydraulic calcium silicates*. *Cement and Concrete Research*, 1979. **9**(1): p. 57-68.

16. YOUSUF, M., et al., *An FTIR and XPS investigations of the effects of carbonation on the solidification/stabilization of cement based systems-Portland type V with zinc*. Cement and Concrete Research, 1993. **23**(4): p. 773-784.
17. JOHANNESSON, B. and P. UTGENANT, *Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar*. Cement and Concrete Research, 2001. **31**(6): p. 925-931.
18. HELMUTH, R.A., *Fly ash in cement and concrete in Portland Cement Association*. 1987, PCA: USA. p. 203.
19. BENTUR, A. and S. MINDESS, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Second ed. Vol. 1. 2007: Taylor and Francis. 625.
20. CALLISTER, D.W., *Fundamentals of Materials Science and Engineering* ed. W. Anderson. 2001, New Yorkj.
21. KAYALI, O., *Effect of high volume fly ash on mechanical properties of fiber reinforced concrete*. Materials and Structures, 2004. **37**(5): p. 318-327.
22. SAKAI, E., K. YAMADA, and A. OHTA, *Molecular Structure and Dispersion-Adsorption Mechanisms of Comb-Type Superplasticizers Used in Japan*. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004. **1**: p. 16-25.
23. MARTINEZ-RAMÍREZ, S., et al., *Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes*. 2005.
24. SARDI, F.G., *Caracteres Mineralogicos del CaSO₄-2H₂O y Consideraciones Geoquímicas Preliminares del S, in Arakuku*. 2009.
25. GHOSH, S.N. and A.K. CHATTERJEE, *Absorption and reflection infra-red spectra of major cement minerals, clinkers and cements*. Journal of Materials Science, 1974. **9**(10): p. 1577-1584.
26. HASSAAN, M.Y. and N. AB DEL-HAKEEM, *Study of anhydrous and hydrated Portland cement containing alkali ions by infrared spectroscopy*. Journal of Materials Science Letters, 1989. **8**(5): p. 578-580.
27. NASRAZADANI, S., D. MIELKE, and T. SPRINGFIELD, *Practical Applications of FTIR to Characterize Paving Materials*. May 18 2011. p. 163.
28. YLMÉN, R., et al., *Early hydration and setting of Portland cement monitored by IR, SEM and Vicat techniques*. Cement and Concrete Research, 2009. **39**(5): p. 433-439.
29. LECOMTE, I., et al., *(Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement*. Journal of the European Ceramic Society, 2006. **26**(16): p. 3789-3797.
30. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. and A. PALOMO, *Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure*. Microporous and Mesoporous Materials, 2005. **86**(1-3): p. 207-214.
31. HIDALGO LÓPEZ, A., et al., *Microstructural Evolution of Calcium Aluminate Cements Hydration with Silica Fume and Fly Ash Additions by Scanning Electron Microscopy, and Mid and Near-Infrared Spectroscopy*. Journal of the American Ceramic Society, 2008. **91**(4): p. 1258-1265.
32. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., et al., *Alkaline Activation of Blends of Metakaolin and Calcium Aluminate*. Journal of the American Ceramic Society, 2008. **91**(4): p. 1231-1236.

33. TREZZA, M.A., *Hydration study of ordinary portland cement in the presence of zinc ions*. *Materials Research*, 2007. **10**: p. 331-334.
34. Thirupathi, K., et al., *Effect of Fly Ash and Water in Hydrated Srpc-A Ftir Study*. *Journal of Applied Physics Research*, 2009. **1**(2).
35. PUERTAS, F., M. PALACIOS, and T. VÁZQUEZ, *Carbonation process of alkali-activated slag mortars*. *Journal of Materials Science*, 2006. **41**(10): p. 3071-3082.
36. YU, P., et al., *Structure of Calcium Silicate Hydrate (C-S-H): Near-, Mid-, and Far-Infrared Spectroscopy*. *Journal of the American Ceramic Society*, 1999. **82**(3): p. 742-748.
37. STEPKOWSKA, E.T., et al., *Hydration products in two aged cement pastes*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2005. **82**(3): p. 731-739.
38. GENESTAR, C. and C. PONS, *Earth pigments in painting: characterisation and differentiation by means of FTIR spectroscopy and SEM-EDS microanalysis*. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2005. **382**(2): p. 269-274.

ANEXOS.

Anexo A.- Resistencia a la compresión de las mezclas E expuestas a un estado saturado de hidratación.

Tabla IX.- Resistencia a compresión de las mezclas A expuesta a temperatura ambiente.

Hidratación (días)	Resistencia en MPa				
	Muestras				
	A1	A2	A3	A4	A5
0	0	0	0	0	0
1	10.89	9.40	8.57	6.35	6.20
7	17.10	12.61	14.43	18.79	26.41
28	17.13	22.52	21.76	19.35	27.27
90	20.40	18.45	19.102	21.26	28.27
180	16.48	16.21	18.64	22.82	29.716

Tabla X.- Resistencia a compresión de las mezclas B expuestas a temperatura ambiente.

Hidratación (días)	Resistencia en MPa				
	Muestras				
	B1	B2	B3	B4	B5
0	0	0	0	0	0
1	11.080	11.025	7.187	5.443	14.771
7	15.383	15.608	15.922	19.987	24.264
28	15.911	20.368	19.149	19.277	27.812
90	18.117	20.006	24.883	17.851	25.497
180	20.370	20.144	21.268	19.154	20.834

Tabla XI.- Resistencia a compresión de las mezclas D expuestas a temperatura ambiente.

Hidratación (días)	Resistencia en MPa				
	Muestras				
	D1	D2	D3	D4	D5
0	0	0	0	0	0
1	11.74	11.69	6.87	5.85	10.27
7	13.01	18.72	16.25	9.09	31.22
28	17.00	20.03	24.98	22.36	33.12
90	19.01	25.95	30.39	28.76	43.80
180	23.78	26.53	30.35	27.69	40.44

Tabla XII.- Resistencia a compresión de las mezclas E expuestas a temperatura ambiente.

Hidratación (días)	Resistencia en MPa				
	Muestras				
	E1	E2	E3	E4	E5
0	0	0	0	0	0
1	8.24	11.40	8.44	7.72	11.75
7	11.95	13.42	19.72	20.12	24.93
28	17.09	21.82	22.23	26.28	32.48
90	17.32	22.75	26.26	27.59	31.40
180	18.69	25.24	29.05	31.52	31.87

Tabla XIII.- Resistencia a flexión de las mezclas A expuestas a un estado saturado de hidratación.

Hidratación (días)	Resistencia en MPa			
	Muestras			
	A2H	A3H	A4H	A5H
0	0	0	0	0
1	9.33	9.10	7.57	5.50
7	11.43	14.57	16.88	31.96
28	11.69	16.65	18.99	42.07
90	11.39	22.46	30.46	42.69
180	6.88	16.49	33.30	41.58

Tabla XIV.- Resistencia a flexión de las mezclas B expuestas a un estado saturado de hidratación.

Hidratación (días)	Resistencia en MPa			
	Muestras			
	B2H	B3H	B4H	B5H
0	0	0	0	0
1	11.24	7.19	5.94	12.88
7	11.36	14.10	13.14	24.67
28	11.59	15.71	16.85	30.91
90	14.78	17.65	26.13	33.39
180	13.11	18.83	31.06	33.20

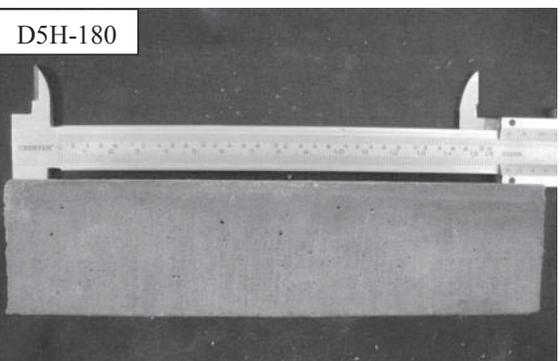
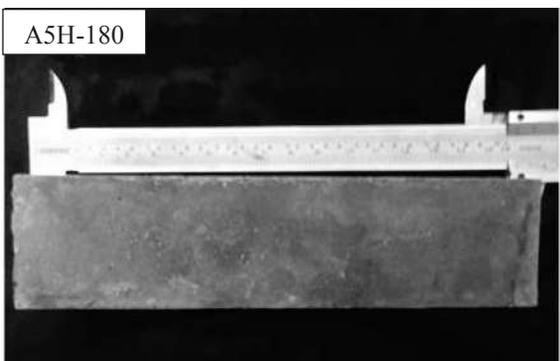
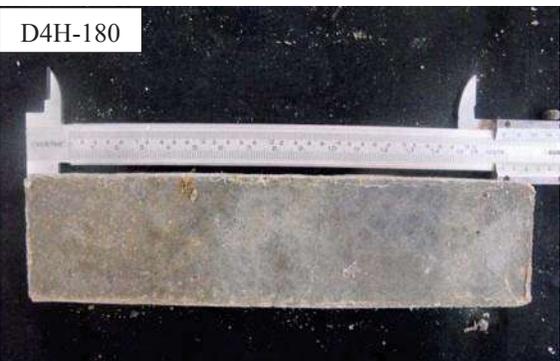
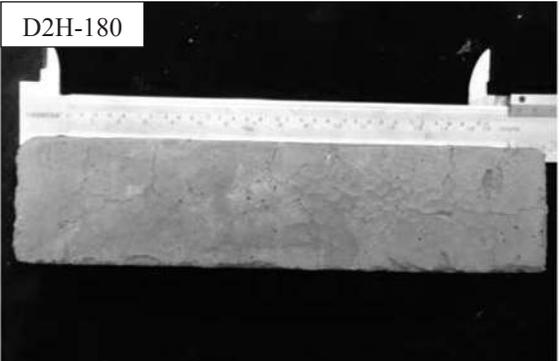
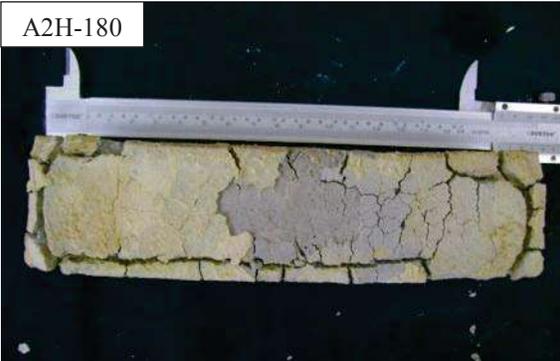
Tabla XV.- Resistencia a flexión de las mezclas D expuestas a un estado saturado de hidratación

Hidratación (días)	Resistencia en MPa			
	Muestras			
	D2H	D3H	D4H	D5H
0	0	0	0	0
1	9.54	6.73	6.00	7.49
7	11.57	12.13	17.77	29.55
28	14.51	20.34	24.70	40.81
90	17.92	26.23	36.44	51.23
180	21.15	28.33	37.66	46.26

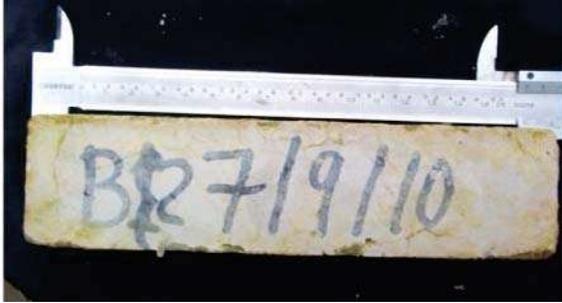
Tabla XVI.- Resistencia a flexión de las mezclas E expuestas a un estado saturado de hidratación.

Hidratación (días)	Resistencia en MPa			
	Muestras			
	E2H	E3H	E4H	E5H
0	0	0	0	0
1	10.43	8.44	7.75	12.73
7	11.46	13.16	16.48	30.49
28	14.61	16.04	25.93	34.94
90	17.10	22.31	33.46	38.77
180	21.99	24.99	36.70	39.42

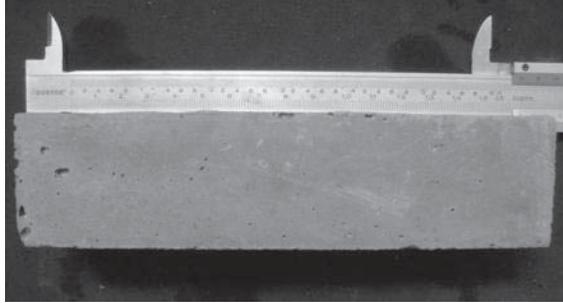
Anexo B.- Reporte fotográfico de las barras saturadas en agua.



A2H-180



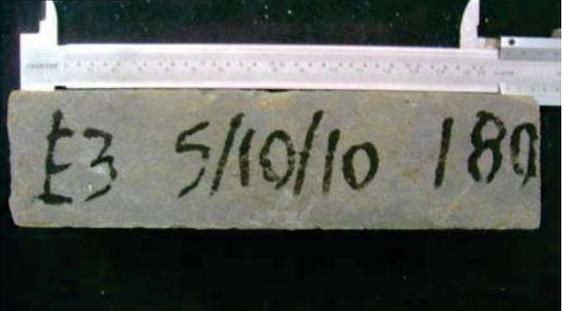
D2H-180



A3H-180



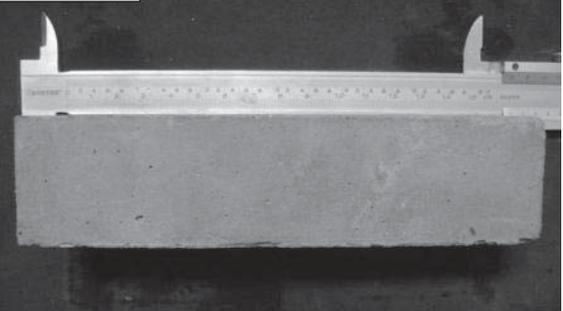
D3H-180



A4H-180



D4H-180



A5H-180



D5H-180

