

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS DOCTORAL

**EFFECTO SINÉRGICO DE LAS ADICIONES MINERALES Y DEL
CEMENTO PORTLAND EN MATERIALES CEMENTICIOS
BASE CEMENTO SULFO ALUMINOSO**

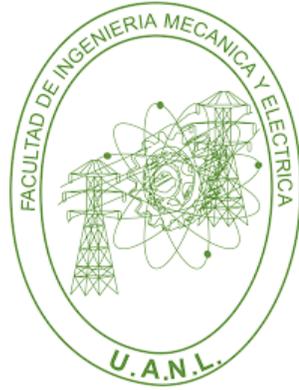
POR

LUCIO GUILLERMO LÓPEZ YÉPEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA DE MATERIALES

FEBRERO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS DOCTORAL

**EFFECTO SINÉRGICO DE LAS ADICIONES MINERALES Y DEL
CEMENTO PORTLAND EN MATERIALES CEMENTICIOS
BASE CEMENTO SULFO ALUMINOSO**

POR

LUCIO GUILLERMO LÓPEZ YÉPEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR INGENIERÍA DE MATERIALES

FEBRERO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "EFECTO SINERGICO DE LAS ADICIONES MINERALES Y DEL CEMENTO PORTLAND EN MATERIALES CEMENTICIOS BASE CEMENTO SULFOALUMINOSO", realizada por el estudiante Lucio Guillermo López Yopez, con número de matrícula 1836861, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

DRA. LAUREN YOLANDA GÓMEZ ZAMORANO
Director

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA
Co-director

DRA. DORA IRMA MARTÍNEZ DELGADO
Revisor

DR. EDÉN AMARAL RODRÍGUEZ CASTELLANOS
Revisor

DR. JUAN JACOBO RUÍZ VALDÉS
Revisor

DR. JORGE LEOBARDO ACEVEDO DÁVILA
Revisor

DR. CARLOS ENRIQUE CASTILLO LINTON
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 122608

Acta Núm. 301

Ciudad Universitaria, a 31 de enero de 2022.

Esta tesis está dedicada a mi viejo querido Lucio Erasmo López Rosero y a mi madre Clara Elisa por todo su apoyo incondicional para alcanzar mis sueños, a mi esposa querida Clara Inés, la mujer que más amo en la vida, por estar conmigo a mi lado apoyándome constantemente, por el amor que me expresa todos los días dándome ese aliciente para alcanzar mis objetivos de vida, a mi hijo Juan Lucas lo más hermoso de mi universo y a mis hermanas Natalia y Giovanna y mi hermano Mauricio.

CONTENIDO

Contenido.....	5
Agradecimientos.....	15
RESUMEN.....	17
1. INTRODUCCIÓN.....	19
2. MARCO TEORICO.....	24
2.1. CEMENTO.....	24
2.2.1 Tipos cementantes.....	24
2.1.2.1. Cemento Portland (CPO).....	24
2.1.2.2. Cemento sulfoaluminoso de calcio (CSA).....	27
2.1.2.3. Materiales cementicios suplementarios (MCS).....	30
2.1.2.4. Sistema CSA +CPO y combinaciones con MCS.....	35
2.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y DURABILIDAD.....	37
3. JUSTIFICACIÓN.....	45
4. HIPÓTESIS y OBJETIVOS.....	49
4.1. HIPÓTESIS.....	49
4.2. OBJETIVO GENERAL.....	49
4.3. OBJETIVOS.....	49
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	50
5.1 FASE 1 - CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	50
2.2.1 Ensayos químicos en las materias primas.....	51
5.1.2.1. Fluorescencia de rayos X.....	51
5.1.2.2. Difracción de rayos X.....	52
5.1.2.3. Microscopia electrónica de barrido.....	53
3.2.1 Ensayos físico - mecánicos en las materias primas.....	54
5.1.3.1. Distribución de tamaño de partícula.....	54
5.1.3.2. Densidad de los cementantes por frasco de Le Chaterlier y por picnómetro de helio.....	54

5.1.3.3.	Finura de los cementantes por medio de la malla N325.....	55
5.1.3.4.	Consistencia de los cementos.....	56
5.1.3.5.	Índice de actividad resistente de los MCS.....	57
5.1.3.6.	Densidades y absorciones de los agregados gruesos y finos.....	58
5.1.3.7.	Pesos unitarios sueltos y compactados de los agregados.....	58
5.1.3.8.	Parámetros de la granulometría de los agregados finos y gruesos.....	59
5.2	FASE 2 – PASTAS DE CEMENTO.....	59
5.2.1	Etapa 1 – Pastas de cemento – (CSA+CV), (CSA+CV+CL) y (CPO+CV+CL).....	60
5.2.3	Etapa 3 – Pastas de cemento – (CO-COCV-COCL-COEH-COMS-COPV-COMK)....	64
5.2.1.4.1	Etapa 4 – Estudio de la consistencia, tiempos de fraguado, temperatura, retracción por secado y calorimetría isotérmica de conducción en pastas de cemento.	65
5.2.4.1	Trabajabilidad de las pastas.....	65
5.2.4.2	Tiempos de fraguado de pastas.....	66
5.2.4.3	Retracción por secado de pastas de cementante.....	68
5.2.4.4	Temperatura de las pastas de cementante.....	69
5.3	FASE 3 – MORTEROS BASE CSA+CPO+MCS.....	70
5.3.1	Resistencia a la compresión.....	73
5.3.2	Durabilidad del mortero base cementos sulfoaluminoso.....	74
5.3.2.1	Resistividad eléctrica superficial.....	74
5.3.2.2	<i>Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)</i>	75
5.3.2.3	Carbonatación en morteros base cemento CSA.....	75
5.4	FASE 4 – CONCRETOS BASE CSA+CV Y CSA+CV+SAP.....	76
5.4.1	Resistencia a la compresión de concretos.....	78
5.4.2	Retracción por secado del concreto.....	79
5.4.3	Resistividad eléctrica superficial del concreto.....	80
5.4.4	Velocidad de Pulso Ultrasónico superficial del concreto.....	81
5.4.5	Carbonatación del concreto.....	81
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	82
6.1	FASE 1- CARACTERIZACIÓN QUÍMICA- FÍSICA DE LOS MATERIALES.....	82
6.1.1	Cemento de Sulfoaluminoso de Calcio.....	82
6.1.2	Cemento Portland Ordinario.....	85
6.1.3	Caliza.....	87
6.1.4	Ceniza Volante.....	90

6.1.5	Escoria de alto horno.....	93
6.1.6	Puzolana Volcánica (PV).....	95
6.1.7	Microsílice.....	98
6.1.8	Metacaolín.....	100
6.1.9	Polímero superabsorbente de uso en suelos.....	102
6.1.10	Aditivo superplastificante reductor de alto rango.	103
6.1.11	Agregado fino N4.....	103
6.1.12	Agregado grueso.....	104
6.2	FASE 2 - Pastas base cemento sulfoaluminoso.....	105
6.2.1	Compresión en pastas de cemento sulfoaluminoso.....	105
6.2.1.1	Etapa 1 – Mezclas de pastas bases CSA-CV-CL y CPO-CV-CL.....	105
6.2.1.2.	Etapa 2 – Mezclas de pastas bases CSA-CV-CL-EH-MS-PV.....	107
6.2.1.3.	Etapa 3- Mezclas de pastas base CO-COCV-COCL-COEH-COMS-COPV y COMC.	112
6.2.1.4	Etapa 4 - Consistencia de pastas, tiempos de fraguado, temperatura, retracción por secado en pastas de cemento.....	115
6.2.1.4.2	Tiempos de fraguado de pastas.....	119
6.2.1.4.2	Retracción por secado de pastas.....	122
6.2.1.4.2	Temperatura de las pastas de cemento y cementantes.....	125
6.3.	FASE 3- Morteros base cemento sulfoaluminoso.....	126
6.3.1.	Resistencia a la compresión de morteros.....	126
6.3.2.	Resistividad eléctrica superficial de Morteros.....	129
6.3.3.	Velocidad de Pulso Ultrasónico en Morteros.....	131
6.3.4.	Carbonatación de morteros base cemento CSA.....	133
6.4	FASE 4 - Concretos base cemento sulfoaluminoso.....	138
6.4.1.	Resistencia a la compresión concretos base cemento sulfoaluminoso.....	138
6.4.2.	Retracción por secado de concretos base cemento sulfoaluminoso.....	141
6.4.3.	Resistividad de concretos base cemento sulfoaluminoso.....	143
6.4.4.	Carbonatación de concretos base cemento sulfoaluminosos.....	145
6.5.	Difracción de rayos X en pastas.....	147
6.6.	Micrografías de productos hidratados en el cemento sulfoaluminoso.....	148
6.7.	Discusión general de resultados.....	153
6.7.1.	Caracterización química- física de los materiales.....	153

6.7.2.	Pastas base cemento sulfoaluminoso	156
6.7.3.	Morteros base cemento sulfoaluminoso.....	158
6.7.4.	Concretos base cemento sulfoaluminoso	159
6.7.5.	Microscopia electrónica de barrido en pastas.....	160
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	162
7.1.	Pastas base cemento sulfoaluminoso.	162
7.1.1.	Etapa 1- Resistencia a la compresión de pastas base CSA-CV-CL y CPO-CV-CL.	162
7.1.2.	Etapa 2- Resistencia a la compresión de pastas base CSA-CV-CL-EH-PV-CM ..	162
7.1.3.	Etapa 3- Resistencia a la compresión de pastas base CO-COCV-COCL-COEH-COMS-COPV y COMC.	163
7.1.4.	Consistencia de pastas.	163
7.1.5.	Tiempos de fraguado de pastas.....	164
7.1.6.	Retracción por secado de pastas.....	164
7.1.7.	Temperatura de las pastas de cemento y cementantes.....	164
7.2.	Morteros base cemento sulfoaluminoso.....	164
7.2.1.	Resistencia a la compresión de morteros	164
7.2.2.	Resistividad eléctrica en morteros	165
7.2.3.	Velocidad de pulso ultrasónico.....	165
7.2.4.	Carbonatación en morteros	165
7.3.	Concretos base cemento sulfoaluminoso	165
7.3.1.	Resistencia a la compresión de concretos	165
7.3.2.	Retracción por secado de concretos.....	165
7.3.3.	Resistividad en concretos	166
7.3.4.	Carbonatación en el concreto.....	166
8.	REFERENCIAS.	168

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de formación de la alita del cemento Portland en horno rotatorio y emisión del CO ₂ . [5].....	20
Figura 2. Proceso de fabricación del cemento sulfoaluminoso, adaptado [12][13][6]	22
Figura 3. Distribución de fases en el proceso de fabricación del cemento. [17]	25
Figura 4. Curva de evolución del calor de hidratación del cemento Portland. [17][20]	27
Figura 5 Modelo termodinámico de hidratación del CSA de dos tipos de cementos sulfoaluminoso, adaptado de referencia. [44]	30
Figura 6. Diagrama ternarios de MCS y cementos. [48][49].....	32
Figura 7. Modelo termodinámico matrices CSA+CPO+Yeso o Anhidrita, tomada de referencia [68]	36
Figura 8. Comparación de retracción autógena con diferentes tipos de cemento, tomada de referencia [65]	38
Figura 9. Modelo de vida útil de Tuutti para corrosión del acero, Tomado referencia 68)..	40
Figura 10. Métodos de medida de resistividad eléctrica. (a) Resistividad Bulk, (b) resistividad Wenner. Tomada de referencia 70.	42
Figura 11. Comparación de la resistividad eléctrica entre diferente tipos de cementos y combinaciones cementantes. Tomada de referencia [79].....	43
Figura 12. Producción mundial de cemento 2015 por región y países principales (4.6 billones de toneladas).....	46
Figura 13. Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X . [86]	51
Figura 14. Principio de la Fluorescencia de rayos . [110].....	52
Figura 15. Difractómetro y principio de los rayos X.....	52
Figura 16. Microscopio electrónico de barrido SEM Hitachi serie SU 8020.	53
Figura 17. Analizador de partículas Microtrac S3500.....	54
Figura 18. Densidad de los cementantes mediante: (a) frasco de Le Chaterlier, (b) Picnómetro de helio.....	55
Figura 19. Finura de los cementantes mediante la malla 325.	56
Figura 20. Consistencia del cemento.....	56

Figura 21. Tiempos de fraguado inicial y final de los cementos.....	57
Figura 22. Diagrama de flujo etapa 1.....	60
Figura 23. Ensayo de resistencia a la compresión de pastas de cementantes.....	62
Figura 24. Diagrama de flujo etapa 2.....	62
Figura 25. Diagrama de flujo de combinación CSA+OPC+MCS.....	64
Figura 26. Ensayo de perdida de extensibilidad de las pastas de cemento.....	65
Figura 27. Ensayo de tiempos de fraguado de las pastas de cemento.....	67
Figura 28. Cambios volumétricos por secado las pastas de cemento.....	68
Figura 29. Montaje de temperatura de las pastas de cemento.....	70
Figura 30. Curado por inmersión.....	72
Figura 31. Curado cuarto de curado.....	72
Figura 32. Curado al aire.....	73
Figura 33. Resistividad eléctrica superficial. a) Método de Wenner b) Método Bulk.....	74
Figura 34. Velocidad de pulso Ultrasónico.....	75
Figura 35. Carbonatación de morteros.....	76
Figura 36. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto.....	79
Figura 37. Retracción por secado de barras de concreto.....	80
Figura 38. Resistividad eléctrica superficial. a) Método de Wenner b) Método Bulk.....	80
Figura 40. Carbonatación acelerada del concreto.....	81
Figura 41. Difracción de rayos X del cemento de sulfoaluminato de calcio.....	83
Figura 42. Distribución de tamaño de partícula cemento CSA.....	83
Figura 43. Morfología de las partículas de CSA.....	84
Figura 44. Rietveld del cemento Sulfoaluminoso CSA.....	84
Figura 45. Difracción de rayos X del cemento Portland CPO 40 R.....	86
Figura 46. Distribución de tamaño de partícula cemento CPO.....	86
Figura 47. Morfología del cemento CPO.....	87
Figura 48. Difracción de rayos X de la Caliza.....	88
Figura 49. Distribución del tamaño de partícula de la caliza.....	89
Figura 50. Imagen de la partícula de caliza.....	89
Figura 51. Difracción de rayos X de la ceniza volante.....	91
Figura 52. Distribución de tamaño de partículas de la ceniza volante.....	91
Figura 53. Morfología de las partículas de la ceniza Volante.....	92
Figura 54. Difracción de rayos X de la escoria de alto horno.....	93

Figura 55. Distribución de tamaño de partícula de la escoria de alto horno.....	94
Figura 56. Morfología de las partículas de la escoria de alto horno.....	94
Figura 57. Difracción de rayos X de la escoria de la puzolana natural.....	96
Figura 58. Distribución de tamaño de partícula de la escoria de alto horno.....	96
Figura 59. Morfología de las partículas de la puzolana natural	97
Figura 60. Difracción de rayos X de la microsíllice.....	98
Figura 61. Distribución de tamaño de partícula de la microsíllice.....	99
Figura 62. Morfología de las partículas de la microsíllice.....	99
Figura 63. Difracción de rayos X del metacaolín	101
Figura 64. Distribución de tamaño de partícula del metacaolín.....	101
Figura 65. Morfología de las partículas del metacaolín.....	102
Figura 66. Morfología de las partículas del SAP.	103
Figura 67. Granulometría del agregado fino.	104
Figura 68. Granulometría del agregado fino.	104
Figura 69. Resistencia a la compresión etapa 1.....	106
Figura 70. Resistencia a la compresión etapa 2.....	109
Figura 71. % de incremento/decremento de los MCS en el CSA.....	111
Figura 72. Resistencia a la compresión etapa 3.....	114
Figura 73. Extensibilidad de las pastas.	118
Figura 74. Tiempos de fraguado de las pastas.	121
Figura 76. Temperatura de las pastas.	125
Figura 77. Resistencia a la compresión del mortero	128
Figura 78. Resistividad eléctrica superficial Wenner del mortero.	131
Figura 79. Velocidad de pulso ultrasónico del mortero a 28 días de curado.	132
Figura 80. Profundidad de carbonatación (a) Carbonatación en sistemas binarios y ternarios base CSA, OPC y CL.....	136
Figura 81. Profundidad de carbonatación (a) Carbonatación en sistemas ternarios base CSA, OPC, CV y PV	137
Figura 82. Resistencia a la compresión del concreto.....	140
Figura 83. Retracción por secado del concreto.....	142
Figura 84. Resistividad eléctrica superficial Wenner y Bulk del concreto	144
Figura 85. Carbonatación del concreto	146
Figura 86. Difractogramas de pastas CSA+CPO+MCS.....	147

Figura 87. Micrografía del cemento sulfoaluminoso a los 90 días.....	149
Figura 88. Micrografía de productos de hidratación a los 90 días de curado en un sistema 70CSA+30 Escoria de alto horno. (c) partículas anhidras, (Es) Estratlingita.....	149
Figura 89. Micrografía del sistema CSA + Puzolana natural. Estratlingita (Es), Etringita (E) y CSA anhidro (c). (90 días de curado).....	150
Figura 90. Micrografía combinación 50% CSA y 50% CPO. (90 días de curado).....	151
Figura 91. Imagen SEM combinación 50%CSA + 25% CPO + 25% CV (90 días de curado).	151
Figura 92. Micrografía combinación 50% CSA, 25% CPO y 25% PV. (90 días de curado) .	152
Figura 93. Micrografía combinación 50% CSA , 25% CPO y 25% CL. (90 días de curado).	152
Figura 94. DRX de materias primas.	154



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre los cemento CSA y CPO.....	21
Tabla 2. Materiales cementicios suplementarios en el concreto.....	32
Tabla 3. Proporcionamiento sistema CCVCL55	59
Tabla 4. Nomenclatura de las mezclas de la etapa 1.....	60
Tabla 5. Nomenclatura de las mezclas de la etapa 2.....	63
Tabla 6. Nomenclatura de las mezclas de la etapa 3.....	64
Tabla 7. Mezclas analizadas para trabajabilidad de pastas.....	66
Tabla 8. Mezclas analizadas para tiempos de fraguado inicial y final.	68
Tabla 9. Mezclas analizadas para temperatura de pastas.	69
Tabla 10. Mezclas de morteros base CSA.	70
Tabla 11. Mezclas para morteros.....	71
Tabla 12. Procedimiento de mezclas de morteros base CSA para el sistema de referencia.....	71
Tabla 13. Mezclas de concreto	77
Tabla 14. Proporciones de mezclas de concreto	77
Tabla 15. Procedimiento de mezclado del concreto de referencia.....	78
Tabla 16. Composición química del cemento de cemento CSA.	82
Tabla 17. Propiedades físico-mecánicas del cemento CSA.....	85
Tabla 18. Composición química del cemento de cemento CPO.....	85
Tabla 19. Propiedades físico-mecánicas del cemento CPO	87
Tabla 20. Composición química de la caliza	88
Tabla 21. Propiedades físico-mecánicas de la caliza.	90
Tabla 22. Composición química del cemento de la ceniza volante	90
Tabla 23. Propiedades físico-mecánicas de la ceniza volante.....	92
Tabla 24. Composición química del cemento de la escoria de alto horno.	93
Tabla 25. Propiedades físico mecánicas de la EH.....	95

Tabla 26. Composición química de la puzolana volcánica.....	95
Tabla 27. Propiedades físico mecánicas de la puzolana volcánica	97
Tabla 28. Composición química del cemento de la micrisilice	98
Tabla 29. Propiedades físico mecánicas de la microsíllice	100
Tabla 30. Composición química del metacaolín.	100
Tabla 31. Propiedades físico mecánicas de la metacaolín.....	102
Tabla 32. Propiedades físico del agregado fino	103
Tabla 33. Propiedades físicas del agregado grueso.....	104
Tabla 34. Resistencia a la compresión fase1	105
Tabla 35. Resistencia a la compresión fase 2	108
Tabla 36. Resistencia a la compresión fase 3	113
Tabla 37. Consistencia de pastas	117
Tabla 38. Tiempos de fraguado de pastas.....	120
Tabla 39. Retracción por secado de pastas.....	123
Tabla 40. Resistencia a la compresión de morteros.....	127
Tabla 41. Resistividad eléctrica superficial por el método de Wenner	130
Tabla 42. VPU de morteros base cemento Sulfoaluminoso	132
Tabla 43. Carbonatación de morteros base Cemento Sulfoaluminoso.....	134
Tabla 44. Resistencia a la compresión del concreto	139
Tabla 45. Retracción por secado del concreto.....	141
Tabla 46. Resistividad del concreto método de Wenner	143
Tabla 47. Resistividad del concreto método Bulk.....	144
Tabla 48. Carbonatación del concreto	145
Tabla 49. Compocisión de materiales	153

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por las bendiciones que me ha dado, por otorgarme la fuerza para que todos los días me permita perseguir mis sueños, le agradezco por mi familia y mis amistades.

Un especial agradecimiento a la Dra. Lauren Gómez Zamorano y al Dr. Alejandro Duran Herrera por su enseñanza diaria y constante retroalimentación para formarme como Doctor, investigador y docente, por sus apoyos personales y académicos, por brindarme la oportunidad de ser parte de la Universidad Autónoma de Nuevo León como estudiante y como maestro. Muchas gracias a ustedes mis asesores por todo lo brindado para alcanzar mi doctorado.

Agradezco a todas las personas que contribuyeron en mi formación a través de este doctorado a mis profesores del Doctorado en Ingeniería de Materiales, por todas las enseñanzas recibidas que contribuyeron a mi formación y a mi tesis.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por permitirme formarme como Doctor en Ingeniería de Materiales.

A la Facultad de Ingeniería Civil y a su Director Dr. Ricardo González Alcorta, por permitirme hacer parte de su Facultad como maestro, hecho que contribuyó de manera importante en la integralidad de mi formación como Doctor, docente e investigador, agradezco de igual manera por su apoyo incondicional para realizar gran parte de mis ensayos doctorales en sus instalaciones.

Al personal del Departamento de Tecnología del Concreto, quienes me recibieron como uno más de ustedes generando el mejor de los ambientes académicos para aprender tanto desde el punto de vista académico como profesional. Gracias al Dr. Alejandro Durán, Rogelio Dávila, Iliana Garza, Dr. Jorge Rivera, Rodolfo Araiza, Jesús González, Erick Villanueva, Catarino Ortiz y a Alberto Rubio.

Al laboratorio de materiales de construcción de la FIC y a su coordinador por el constante apoyo para ejecutar los ensayos de mi tesis. A Señor Gumaro Tovar, a Iris Alanís y al Dr. Ismael Flores Vivian.

Al Instituto de Pesquisas Tecnológicas de Sao Paulo Brasil y a la Escuela Politécnica de la Universidad de Sao Paulo, por su apoyo en la consecución de diferentes pruebas para mi tesis doctoral. Al Profesor Dr. Vanderly John, a Dr. Marco Quattrone, al

Dr. Valdecir Angelo Quarcioni, al Dr. Roberto Cesar de Oliveira Romano y a Marcel Hark Maciel por su colaboración.

A mis compañeros del grupo de cementos de la Dra. Lauren Gómez, con quienes compartí muchas veces desde lo personal como en lo académico, a Aldo Campos, a Erika Llano, Carolina Carranza, a Javier Ziga, a Loth Rodríguez , a Adriagni Barbosa, a Amy Farías y a Sooria.

Al Grupo de Cementos Chihuahua, por el generoso donativo del cemento Sulfoaluminoso por parte de la Dra. Carolina Prieto Gómez.

A Sika Mexicana por la donación de los aditivos a través del Ingeniero Juan Manuel Rodríguez.

A Euclip Group Eucomex, por su apoyo en la donación de aditivos para el concreto a través del Ingeniero Benito Maya Cepeda.

RESUMEN

Lucio Guillermo López Yépez

Candidato para obtener el grado de Doctor en Ingeniería de Materiales.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título de la tesis:

EFFECTO SINÉRGICO DE LAS ADICIONES MINERALES Y DEL CEMENTO PORTLAND EN MATERIALES CEMENTICIOS BASE CEMENTO SULFO ALUMINOSO.

Número de páginas: 174.

Este proyecto de tesis doctoral busca conocer los efectos que pueden generarse al realizar reemplazos de materiales cementicios suplementarios (Ceniza volante, Escoria granulada de alto horno, Metacaolín, Microsilice, Puzolana volcánica, Caliza), en matrices binarias y ternarias con cemento sulfoaluminoso y cemento Portland, para las cuales se buscó evaluar el efecto de los materiales cementicios suplementarios en el desarrollo de las resistencias en este tipo de sistema, de igual forma se valoró el efecto de sistemas ternarios CSA+CPO+MCS en morteros de bajo impacto ambiental, por medio de ensayos de resistencia a compresión y durabilidad, y finalmente se evaluó el efecto del uso de polímeros superabsorbentes en sistemas binarios con alta cantidad de ceniza volante mediante ensayos de resistencia a la compresión y de durabilidad en concretos de bajo impacto ambiental. Para el desarrollo de la tesis se planteó un procedimiento experimental en el cual se desarrollaron ensayos de tiempos de fraguado, retracción por secado y temperatura los cuales permitieron conocer los diferentes efectos producidos sobre la pastas de cemento estudiadas, de igual forma se evaluaron morteros para los cuales se planteó el análisis el efecto de distintas formas de curado en la combinaciones cemento sulfoaluminoso y cemento Portland, en estos sistemas se estudió mediante ensayos de durabilidad como la resistividad eléctrica y carbonatación como se vieron afectados estos sistemas por el tipo de curado, finalmente se evaluó como se vio afectada la durabilidad del concreto base cemento sulfoaluminoso con altos reemplazos de ceniza volante al cual se le adiciono polímeros superabsorbentes, a

este tipo de material se le realizaron ensayos de resistividad, carbonatación y retracción por secado los cuales mostraron los efectos de la ceniza volante en las propiedades analizadas.

Mediante esta tesis se pudo definir que el uso de los materiales cementicios en combinación con el cemento sulfoaluminoso afecta las propiedades en estado fresco y endurecido tanto en pastas, morteros y concretos, salvo para combinaciones con adiciones minerales como la ceniza volcánica, al igual que con el cemento Portland, de igual forma se pudo observar que las adiciones minerales afectan de manera importante la durabilidad del concreto cuando se utilizan en porcentajes altos tanto en morteros y concretos. De igual forma las adiciones minerales mejora la estabilidad volumétrica en el cemento sulfoaluminoso.

Lauren Y. Gómez Zamorano

Dr. Alejandro Durán Herrera

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los efectos del cemento en el medio ambiente ha venido cada año tomando mayor relevancia en la industria de la construcción, esto debido a imposiciones legales y sociales a nivel mundial, lo que ha obligado a los diferentes sectores a trabajar en nuevas formas constructivas y a la aplicación de materiales más eficientes desde el punto de vista ambiental.

En ese sentido, conociendo que las emisiones antropogénicas, es decir, aquellas resultantes de las acciones humanas, de dióxido de carbono a la atmósfera provienen de tres fuentes principales: (i) oxidación de combustibles fósiles, (ii) deforestación y cambios en el uso de la tierra, y (iii) por la descomposición de carbonatos, fuente en donde el cemento es el principal aportante de emisiones producto de la descomposición de carbonatos[1] generados por la producción de cerca de 4.1 Gigatoneladas de cemento por año[2], lo que representa alrededor del 36% de las 7.7 Gt de CO₂ emitidas a nivel mundial por la industria de la construcción, hecho que lo posiciona como un material al cual se le debe poner atención en la búsqueda de las iniciativas gubernamentales y privadas que tengan como objetivo la reducción de emisiones en todos los procesos industriales.

De igual forma debido a que el cemento Portland (CPO) por la facilidad en la consecución de los recursos naturales para su producción, se ubica como el principal material aglutinante a nivel mundial gracias a su versatilidad al momento de usarlo, así como también por su bajo costo y adquisición a nivel mundial, es posible definir que se ha convertido en el material dominante en la industria respecto a los otros materiales de construcción tales como el acero y la madera[3], usados habitualmente.

En ese orden de ideas se conoce que en los últimos 65 años el consumo de cemento ha tenido un incremento en su producción en un factor de multiplicación de diez lo que lo ubica en un nivel de consumo que está muy por encima de los otros materiales de la industria [4], lo que permite indicar una clara incidencia de los materiales de construcción en los problemas medio ambientales que se observan a futuro por la gran cantidad de dióxido de carbono que la industria de la construcción emite por año, ya que entre más aumente la demanda de esta material mayor será el efecto de la industria sobre el medio ambiente.

Desde el punto de vista del cemento Portland, debido a que en el proceso de fabricación la alita es el principal componente en cuanto al total de material, es posible de acuerdo a esto tomar como referencia que 1t de C_3S es producida por la quema 1,32 t de carbonato cálcico y 0,26 t de dióxido de silicio en un horno rotatorio a una temperatura aproximada de 1450 °C necesitando además de 0,15 t de combustible; de lo anterior es posible decir que en la fabricación del cemento portland se produce 1.02 t de CO_2 de las cuales 0,44 t proceden de la combustión del combustible y 0,58 t se liberan por la calcinación del carbonato de calcio (de las materias primas CO_2)[5] (ver figura 1). García Mate [6] dice que para 1 t de Clinker compuesto por 65% en peso de C_3S , 15% de C_2S , 10% de C_3A y 10% de C_4AF se libera 0.54 t de dióxido de carbono.

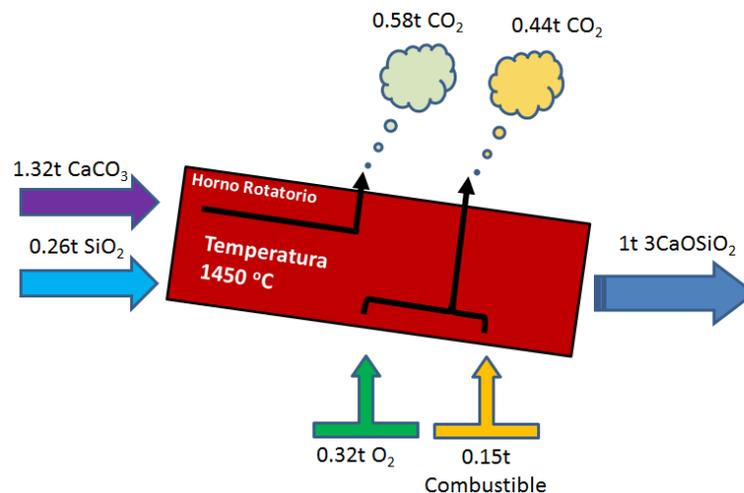


Figura 1. Proceso de formación de la alita del cemento Portland en horno rotatorio y emisión del CO_2 . [5]

De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta los altos niveles de CO_2 que produce la industria cementera, en este trabajo se enfocará en trabajar con un tipo de cemento llamado cemento sulfoaluminoso, material que en comparación con el cemento portland tiene menor incidencia en la huella de carbono, esto debido a que 1 t de Clinker CSA (compuesto por 65% en peso de C_2A_3S (Yelimita), 20% de C_2S (Belita), 9% de CS (Sulfato de calcio) y 5% de C_4AF (Felita) en peso) liberan 0.27 t de CO_2 [6](ver figura 2), este valor puede variar dependiendo del porcentaje de las fases yelimita y belita en el CSA, Gartner [7] muestra que para un cálculo de un CSA belítico en el cual se tiene un contenido de 38% de belita y 35 % de yelimita mas aluminoferrita cálcica y yeso se puede producir una descarbonatación de la caliza de cerca de 0.3 t por tonelada de cemento; hechos que permiten catalogarlos como uno de los productos de la industria que a futuro se convertirá en una de las mejores alternativas de aplicación para construcciones sostenibles debido a las menores

emisiones de CO₂ producidas durante su proceso de fabricación respecto al cemento usado tradicionalmente.

Aunado a lo anterior el CSA en comparación al cemento Portland muestra características ambientalmente adecuadas tales como: a) requerimiento de caliza en alrededor de un 60% menos que el CPO lo que genera menor generación de CO₂ y menor entrada térmica en el horno[8], b) obtención de clínquers CSA a temperaturas entre 150 y 200 °C más bajas que los 1450 °C que necesita el CPO lo que reduce la cantidad de combustible que se utiliza en la clinkerización, de igual manera este tipo de clínquer requiere de menor energía de molienda, c) disoluciones del clínquer mas grandes con la adición de sulfato de calcio[9] y d) mayor posibilidad de uso de subproductos industriales como componentes de alimentación del horno (por ejemplo, cenizas volantes de carbón, yeso de desulfuración de gases de combustión, residuos de lecho fluidizado, escorias de altos hornos, lodo rojo, polvo de alúmina, lodo de anodización, desechos de plantas de fertilizantes, cenizas volantes de incineración de residuos sólidos municipales[8]).

En la tabla 1, se muestra un resumen comparativo entre los dos tipos de cemento en donde se enumeran diferentes características del CSA y el CPO desde diferentes parámetros analizados.

Tabla 1. Comparación entre los cemento CSA y CPO.[5]

Parámetros	Cemento Portland Ordinario (CPO)	Cemento Sulfoaluminoso (CSA)
Fases principales	C ₃ S, C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF	C ₄ A ₃ Ŝ, C ₂ S, CŜ
Materias primas	Caliza, arcilla	Caliza, Bauxita Yeso(anhidro o hemidrato)
Temperatura de clínquerización	≈ 1450 °C	≈ 1250 °C a 1350 °C
liberación de CO ₂ de la materias primas	C ₃ S → 1.8 g/mL	C ₄ A ₃ Ŝ → 0.56 g/mL
Molienda	Media	Fácil
Adición de Yeso	≈ 4-8% peso total	≈ 15-25% peso total
Relación a/c para la hidratación total	≈ 0.4	≈ 0.6
Principales productos de hidratación	CSH, Portlandita, etringitra, fases AFm	Etringita, fases AFm, Al(OH) ₃ , Estratlingita

Por otro lado es tipo de material de tercera generación llamado cemento sulfoaluminoso, presenta como características principales la retracción compensada y una alta velocidad en el fraguado, lo que lo convierte también en un producto

altamente aplicable en pavimentos rígidos, pisos industriales, revestimiento de túneles, construcción bajo tierra[10] y obras de rehabilitación, también puede ser utilizado en morteros autonivelantes y en compuestos reforzados con fibras de vidrio de alto desempeño, todo lo anterior teniendo en cuenta la formación rápida de etringita, su propiedad expansiva y la baja alcalinidad de la solución de poros en su matriz cementante.[11]

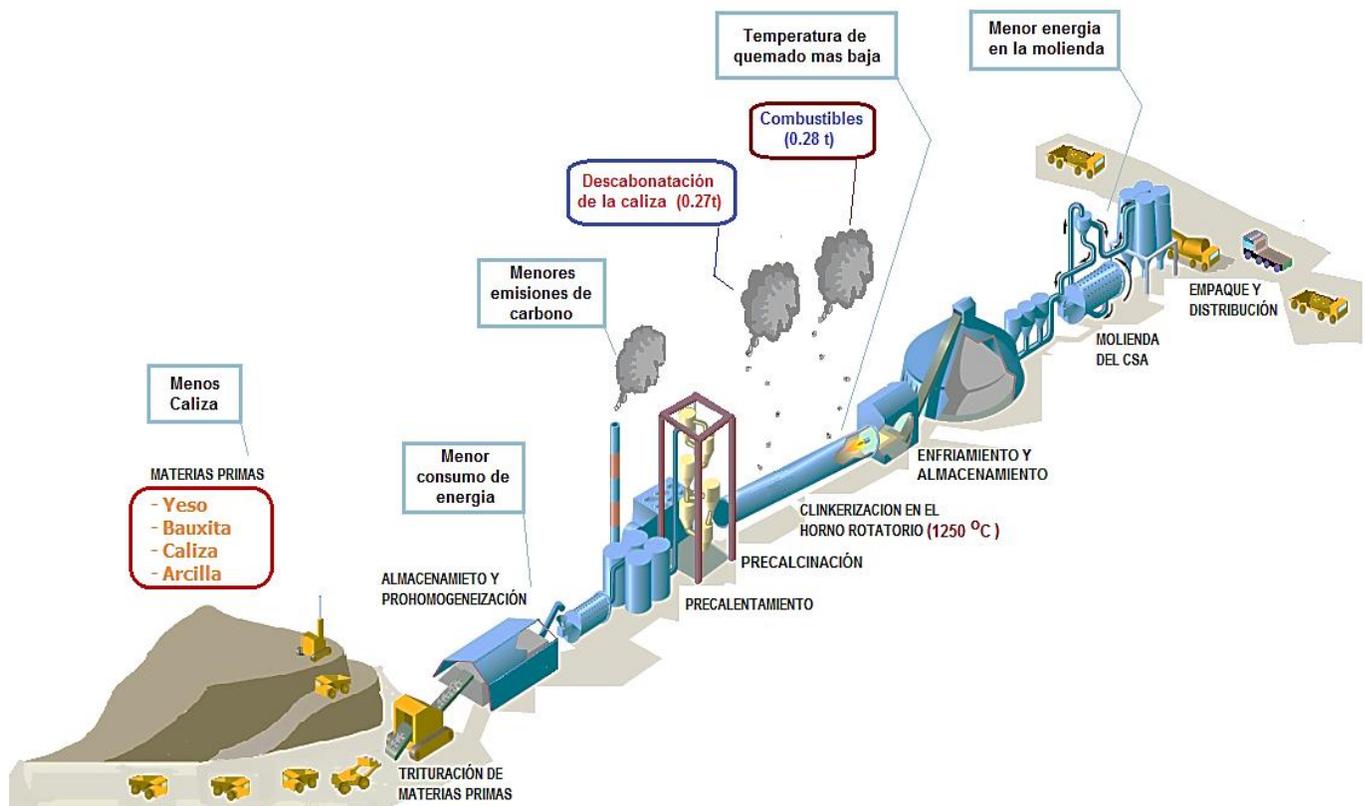


Figura 2. Proceso de fabricación del cemento sulfoaluminoso, adaptado[12][13][6]

Teniendo en cuenta que para la industria de la construcción es importante la reducción de la emisiones de dióxido de carbono, otra alternativa que se vuelve importante es el uso los materiales cementicios suplementarios (MCS) en el proceso de fabricación del cemento Portland[14][15], estos productos pueden utilizarse también como adición o sustituto del cemento en matrices cementantes de morteros o concreto mejorando muchas propiedades en estos materiales, en ese sentido en esta investigación se incorporó este tipo de materiales con el fin de lograr una mayor sostenibilidad en la matrices estudiadas con el fin de buscar una mayor contribución ambiental desde la investigación.

A continuación, se realiza una breve descripción de los capítulos de esta tesis con el objetivo que el lector pueda darse una idea de lo que va a encontrar a lo largo de esta investigación. En el capítulo 2, se podrá encontrar toda la información referente al marco teórico de la tesis, el cual muestra el estado del arte de los cementos utilizados, los materiales cementicios suplementarios, de las propiedades medidas tanto desde el punto físico-químico-mecánico, como de durabilidad. En el capítulo 3 se describirá la justificación del estudio enfocándose en la sostenibilidad ambiental. En Capítulo 4 se podrá observar la descripción de la hipótesis y de los objetivos. En el Capítulo 5, la metodología llevada a cabo en el proceso de investigación describiendo 4 etapas principales las cuales se sintetizan en la caracterización de todos los materiales usados, la fabricación y evaluación de pastas de cemento, morteros y concretos. El capítulo 6 describe los resultados y el análisis de lo mismo referido a las pruebas a que fueron sometidas cada uno de los materiales estudiados. El capítulo 7 habla sobre las conclusiones finales del estudio.

Finalmente, con esta investigación se pudo conocer el efecto del uso de los MCS en combinación con el cemento sulfoaluminoso y el cemento Portland generando mezclas binarias y ternarias de pastas, morteros y concretos los cuales estuvieron sometidos a diferentes pruebas en estado fresco y endurecido pudiéndose extraer conclusiones al respecto con resultados en algunos casos positivos para ciertos parámetros analizados.

2. MARCO TEORICO.

Para acercarse al planteamiento de los objetivos a llevarse a cabo, a continuación, se realiza un análisis de la bibliografía en lo referente al cemento Portland (CPO), el sulfoaluminoso (CSA), los materiales cementicios suplementarios (MCS) y diferentes propiedades en estado fresco como endurecido.

2.1. CEMENTO.

Material finamente dividido que, en su forma básica está compuesto por materias primas tales como la arcilla y caliza o en algunos casos bauxita (alúmina), las cuales son sometidas a temperaturas entre 1200 y 1450 °C en un horno rotatorio para formar un material llamado clínker, el cual en ciertos casos en combinación con yeso, es pulverizado para formar un material de construcción capaz de ligar diferentes compuesto al ser hidratado con agua conduciendo a la adquisición finalmente de un material con propiedades estables de endurecimiento y durabilidad.

2.2.1 Tipos cementantes.

En la industria de la construcción se puede hablar de diferentes tipos de cemento, sin embargo en este trabajo se hablará brevemente del cemento portland y más ampliamente del cemento sulfoaluminoso, cementos que presentan diferencias importantes entre ellos, debido a su composición anhidra y a las fases formadas una vez son hidratados.

2.1.2.1. Cemento Portland (CPO)

Es el material de construcción, más utilizado a nivel mundial, tal vez por la fácil consecución de las materias primas (caliza, arcilla y yeso) en su proceso de producción, por su fácil adquisición o por la facilidad para ser usado con otros materiales para generar compuestos como el mortero o el concreto, materiales que tienen como características principales una alta estabilidad química, resistencia y durabilidad a través del tiempo.

El cemento Portland es producido a partir de la formación del Clinker por un proceso de piroprocesamiento dentro del horno rotatorio, en el cual las materias primas una vez sometidas a un incremento de la temperatura se transforman generando compuestos que finalmente se estabilizan al llegar a temperaturas entre 1350 y 1450 °C, este material originado después de alcanzar las temperaturas antes

menciona se combina con el sulfato de calcio para formar lo que se conoce como cemento portland.

Las materias primas para formar el Clinker tienen como compuestos los óxidos de silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), calcio (CaO) y Hierro (Fe_2O_3), con las abreviaciones pseudo-químicas S, A, C y F respectivamente; estas una vez que son combinados a altas temperaturas forman cuatro minerales que se conocen como las fases mayoritarias del cemento Portland cuya composición química se encuentra relacionada respecto a silicatos y aluminatos tal y como se muestran en las siguientes ecuaciones 1-4:

Silicato tricálcico	➔ Alita	➔ $(\text{SiO}_2 \cdot 3\text{CaO})$	➔ C_3S (1)
Silicato dicálcico	➔ Belita	➔ $(\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO})$	➔ C_2S (2)
Aluminato tricálcico	➔ Celita	➔ $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO})$	➔ C_3A (3)
Ferroaluminato tetracálcico	➔ Felita	➔ $(4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3)$	➔ C_4AF (4)

La alita es un polimorfo monoclinico impuro el cual constituye entre el 50 al 70% del cemento Portland en masa, también es el responsable de gobernar la hidratación y la resistencia a edades tempranas así como de ser el responsable de la formación del Silicato de calcio hidratado (CSH)[16]. En la figura 3, se muestra el cambio que tiene las materias primas en el proceso de transformación de los óxidos que la componen hasta llegar a la formación de las fases cristalinas mencionadas anteriormente; también se puede observar como el carbonato de calcio de la calcita sufre un fuerte proceso de descarbonatación a temperaturas alrededor de los 800 °C, generando las emisiones más altas de dióxido de carbono durante el proceso de fabricación del cemento.

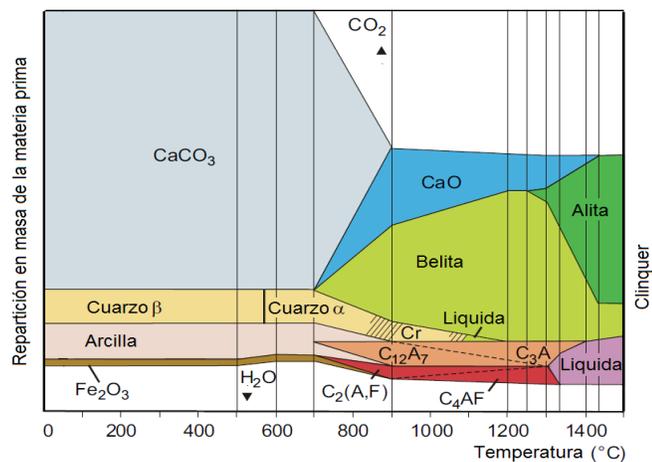


Figura 3. Distribución de fases en el proceso de fabricación del cemento.[17]

El proceso de fabricación del cemento Portland continúa después de la clinkerización con la adición del sulfato de calcio, el cual funciona como formador de etringita y como reductor de la velocidad de reacción del aluminato tricálcico una

vez el material es hidratado razón por la cual se le confiere nombre de regulador de fraguado del cemento.

Cinética de hidratación del cemento Portland Ordinario.

Se relaciona con el cambio de estado de los productos de reacción del cemento Portland bajo condiciones de hidratación.

La hidratación del cemento involucra una colección de procesos químicos acoplados, cada uno de los cuales ocurre a una velocidad determinada tanto por la naturaleza del proceso como por el estado del sistema en ese instante.[16] mas sin embargo debido a la alta complejidad para conocer los efectos en la hidratación que se genera en todo el cemento hidratado, la comunidad científica se ha visto en la necesidad de aceptar un conocimiento parcial de la cinética de los procesos que se presentan de forma múltiple en la hidratación del cemento portland estableciendo estudios sobre los componentes por separado dando lugar a un análisis que provee una aproximación razonable para entender los fenómenos ocurridos en el CPO. Para esto se toma como aproximación el estudio de la alita ya que se considera la fase más dominante dentro de los componentes mayoritarios del material, permitiendo evaluar el comportamiento de esta fase que desde el punto de vista de la reacción exotérmica que se presenta una vez se hidrata el componente, dando lugar una curva de evolución de calor tal y como se puede observar en la figura 4, esta gráfica permite identificar por medio de cinco periodos las secuencias de las reacciones ocurridas de ahí que estos periodos se describen a continuación.

Período de pre-inducción. Caracterizado por la reacción rápida de C_3S una vez que es hidratado, la cual se evidencia con una reacción exotérmica importante.[16]

Período de inducción. Zona de reacción lenta, en donde se presenta una estabilización de la reacción exotérmica durante un periodo antes de que se genere una aceleración en los procesos de hidratación generado del alcance de un punto limite en donde se acelera la tasa de nucleación y el crecimiento de los productos de hidratación.[16] En este periodo la formación de las fases AFt y AFm pueden influir en la trabajabilidad, mas sin embargo la formación del CSH en esta zona conduce a que presente el inicio del fraguado normal.[18] Esta zona de inactividad se considera de gran importancia práctica, ya que proporciona un tiempo en el que el concreto puede transportarse y colocarse antes del fraguado. [19]

Período de aceleración. Se caracteriza por un alto desprendimiento de calor de hidratación, en este periodo la velocidad de hidratación está relacionada con la nucleación heterogénea y el crecimiento del gel CSH en la alita y quizás en algunas otras superficies minerales.[16] La formación de los hidratos producen una reducción de la porosidad por la densificación de la matriz, desde el punto de vista físico se genera el cambio de consistencia plástica a rígida lo que se asocia al fraguado inicial y final del compuesto cementicio.

Período de desaceleración. Período en donde la velocidad de reacción se disminuye continuando una formación de productos de hidratación (CSH y Portlandita) por difusión. En esta fase se renueva la hidratación de aluminatos para originar fase AFm, AFt, las cuales pueden disolverse y/o recristalizarse.[18]

Periodo de estado estable. Este periodo es controlado por una difusión lenta y una estabilización de la evolución del calor de hidratación.

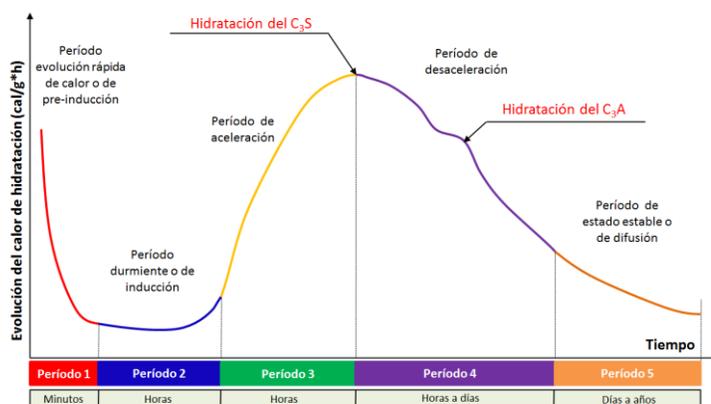


Figura 4. Curva de evolución del calor de hidratación del cemento Portland.[17][20]

2.1.2.2. Cemento sulfoaluminoso de calcio (CSA)

Este tipo de cemento tuvo su primer origen cuando el establecimiento Poliet & Chausson solicitó primera patente en 1935,[21] llamado también “cemento de tercera generación” tiene como principal componente la yelimita o sal de Klein [22][23], compuesto desarrollado ya en cementos expansivos por Alexander Klein en la década de los 60s, el cual le otorga al CSA sus propiedades expansivas. Este tipo de material fue desarrollado para aplicaciones estructurales en china a mediados de los 70s [21][24], a través de una investigación realizada por la Academia China de Materiales de Construcción al optimizar una formulación basada de un Clinker con yelimita, belita ferrita y anhidrita.[25]

Fases en el cemento sulfoaluminoso de calcio.

El cemento sulfoaluminoso es fabricado mediante la combinación de caliza, yeso y generalmente bauxita o arcilla aluminosa, materiales que son llevados a temperaturas aproximadas de 1250-1350 °C para formar un Clinker sulfoaluminoso. [25][26][27]

Las fases presentes en este tipo de cementos dependen de la clase de cementos sulfoaluminoso que se esté estudiando por ende a continuación se describirá las fases según el tipo de cemento:

Cemento sulfoaluminoso de calcio (CSA), en este tipo de cementos se presenta la Yelimita (C_4A_3S) en mayor proporción (50-80 pt%)[28] respecto a las otras fases y se puede considerar como la fase principal. Este compuesto es el que le otorga el endurecimiento temprano al cemento hidratado. Otras fases importantes son el silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) y el sulfato de calcio anhidro (CS).[29] También es posible encontrar en este tipo de cemento en bajas proporciones calcita($CaCO_3$), gehlinita(C_2AS), Mayenita ($C_{12}A_7$), Ternisita (C_5S_2S), periclasa (MgO), sulfato de calcio di hidratado(CSH_2) como adición[30][31]

Cemento sulfoaluminoso belítico (CSAB), También llamado sulfobelítico, en este tipo de cementos las fases principales serán la belita (βC_2S) la cual se encuentra en mayor porcentaje en peso con relación a los otros componentes, seguida de la yelimita y otros componentes minoritarios tales como la ferrita, el sulfato de calcio. Los porcentajes de las fases pueden oscilar entre el 40-60% para la belita y del 20-30 pt% para la yelimita [28],[32],[33], en este tipo de cemento se puede mencionar los cementos sulfoaluminosos belíticos ricos en hierro (CSABF) y los cementos sulfoaluminosos ricos en aluminio (CSABA) con heptaaluminato dodecálcico ($C_{12}A_7$)y aluminato de calcio (CA) como fases adicionales.[28]

Se conoce que el grado de hidratación completa de los CSA está alrededor de 0.78 cuando se tiene como fase principal anhidra la yelimita, en el caso del tipo de cemento CSA belítico utilizado en esta tesis la relación estequiometrica para la hidratación completa es diferente debido que la demanda de agua cambia de acuerdo con los contenidos de yelimita y belita presentes en el CSA[34].

Cemento sulfoaluminoso alítico. Este tipo de cemento contiene alita en un porcentaje mucho más alto respecto a la yelimita coexistiendo de manera estable en los productos de reacción mejorando la resistencia a edades medianas y tardías. [35][36]

Hidratación del cemento de sulfoaluminoso de calcio.

Siendo la etringita ($Ca_6[al(OH)_6]_2((SO_4)_326H_2O)$) el principal componente formado en la hidratación del CSA es importante mencionar que este tipo de compuesto presenta características que hacen que este tipo de cemento se comporte de manera distinta en la hidratación respecto al CPO hidratado, entre estas se puede mencionar una alta energía de superficie y área específica así como un excelente capacidad ligante y un desarrollo de resistencias tempranas, además de asociarla a fenómenos expansivos.[37]

La expansión de la etringita es posible relacionarla con una alta velocidad de nucleación que implica una gran generación de partículas muy pequeñas al comienzo del proceso de hidratación de ahí se puede mencionar dos teorías que explican dicho fenómeno, la primera es la teoría del hinchamiento la cual consiste en que las

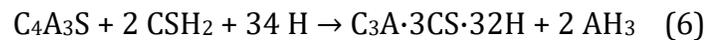
partículas de etringita con un área superficial alta y de tamaño coloidal promueve la expansión debido a la absorción de moléculas polares de agua, lo que resulta en repulsión e hinchamiento entre partículas. [37],[38],[39], la segunda teoría llamada de crecimiento de cristales plantea que los esfuerzos en la pasta y el incremento del volumen puede producirse por el crecimiento confinado de numerosos cristales de etringita los cuales desarrollan una presión de cristalización sobre la matriz sólida circundante y por la multiplicidad de núcleos precipitados de la solución de poros.[37] [40]

La etringita y el aluminato de calcio hidratado, son las principales fases formadas durante el proceso de hidratación, de igual forma cuando la belita reacciona después de 7 días también se forma una fase adicional llamada estratlingita[41]; el proceso de hidratación depende también en gran medida de la cantidad de sulfato de calcio presente en el cemento, el cual varía hasta un máximo alrededor de 30% del total. El proceso de reacción en el CSA se describe a continuación de la siguiente manera:[5][42]

Al hidratarse el C_4A_3S se forma monosulfato y hidróxido de aluminio tal y como se observa a continuación.

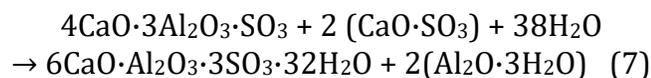


De igual manera el C_4A_3S reacciona con el yeso o la anhidrita para formar etringita (producto que se forma como agujas primáticas en menos de 48 horas[27]) e hidróxido de aluminio hasta que el sulfato de calcio es consumido, enseguida se forma monosulfato tal y como lo muestra la ecuación.[5]

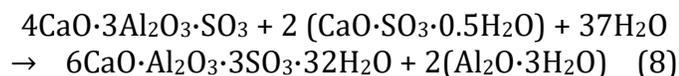


La reacción anterior se presenta comparable teniendo en cuenta que existe variación en la cantidad de agua necesaria para que se forme la fase completamente cuando esta se da bien sea por sulfato de calcio o con la anhidrita tal y como se puede observar a continuación su forma extendida:[27]

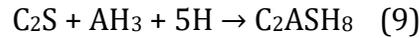
Yeelimita + Anhidrita:



Yeelimita + hemidrato:



El hidróxido de aluminio se presenta como una fase amorfa similar a un gel. Este tipo de cementos pueden contener fases como la belita, la ferrita o el aluminato de calcio (CA) que pueden conducir a reacciones de hidratación adicionales como la estratlingita (C_2ASH_8), hidratos de aluminato de calcio o geles CSH. Para la estratlingita se muestra a continuación la reacción sucedida. Entre las fases hidratadas de este tipo de cemento se tiene la estratlingita la cual se precipita a altos valores de relación agua/CSA y a largos tiempos de hidratación.[34][43]



En las reacciones anteriores la deficiencia del sulfato de calcio puede generar una tendencia a la formación de monosulfoaluminato y el exceso de sulfato calcio puede conducir a sistemas de expansión inestables.[27]

Winnefeld [5], establece el modelo termodinámico mostrado en la figura 5, en el cual se pueden observar la fases hidratadas de dos tipos de cemento CSA los cuales fueron hidratados con dos relaciones agua cemento CSA1-0.72 y CSA2-0.80, para los cuales se puede apreciar las fases de hidratación descritas en las ecuaciones mostradas anteriormente.

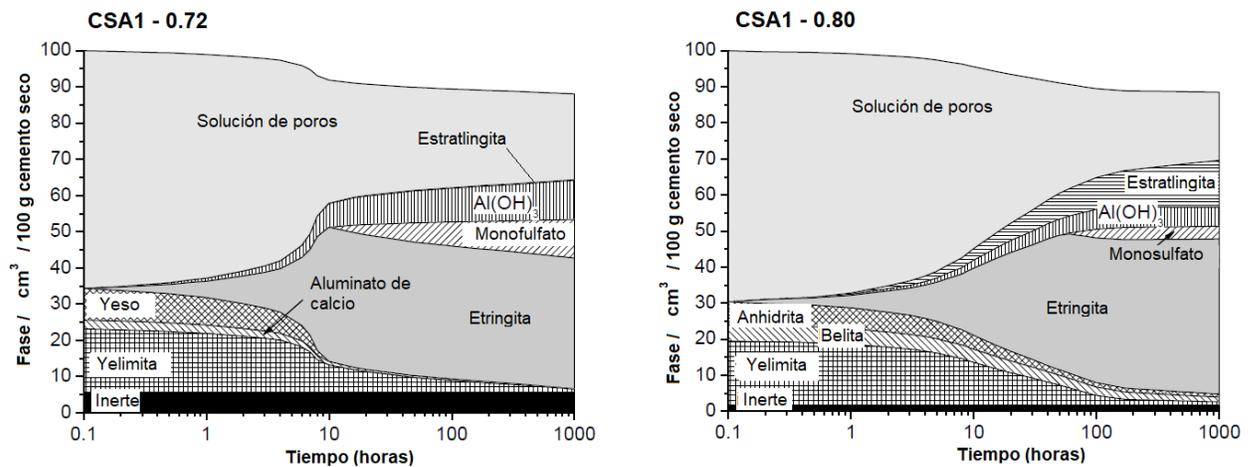


Figura 5 Modelo termodinámico de hidratación del CSA de dos tipos de cementos sulfoaluminoso, adaptado de referencia.[44]

2.1.2.3. Materiales cementicios suplementarios (MCS)

Presentan reacciones de hidratación y de reactividad química que les permiten influir en las propiedades del concreto tanto en estado plástico como endurecido supeditadas con base a su composición. Entre estos se pueden clasificar como materiales cementicios suplementarios latentes y no latentes, los primeros contienen convencionalmente calcio y silicatos reactivos, los cuales pueden reaccionar en combinación con el agua sin necesidad de tener una interacción con el

cemento para formar un compuesto capaz de adquirir cierto grado de resistencia. Los segundos contienen mayores cantidades de sílice y reaccionan con los productos de hidratación de la combinación entre el cemento y el agua.[45]

Las iteraciones de los materiales cementicios suplementarios con el cemento influyen en los procesos de hidratación de acuerdo a los efectos siguientes: [46][47]

Efecto de disolución. Se da cuando se realiza un reemplazo de cierto porcentaje de cemento por la adición mineral lo que provoca un aumento de la relación agua/cemento efectiva, efecto que se da por la reducción de la cantidad de cemento, lo que conlleva a que para un mismo grado de hidratación del material cementicio haya menor volumen de productos de hidratación del cemento.

Efectos físicos. Se presentan cuando los materiales cementicios suplementarios se llevan a tamaños micrométricos generando un mejoramiento en el empaquetamiento de las partículas cuando estos materiales se ubican en la porosidad de la matriz actuando como un filler y de igual forma produciendo sitios de nucleación heterogénea ayudando en la densificación de la matriz cementicia.

Efecto químico. Se genera por la reacción que se produce entre el MCS y el hidróxido de calcio presente una vez ocurren las reacciones de hidratación. Desde el punto de vista del filler de caliza hay una reacción de este material con el C_3A para formar carboaluminato de calcio hidratado, más sin embargo no existe reacción con el hidróxido de calcio para formar CSH.

Es importante mencionar que si se utilizan de manera correcta estos subproductos de la industria en su gran mayoría funcionan de manera adecuada con el cemento, permitiendo por la composición presente, generar compuestos estables y durables; en la Figura 6. Diagrama ternarios de MCS y cementos.[48][49], es posible observar un diagrama ternario $SiO_2-CaO-Al_2O_3$, para diferentes adiciones minerales y para distintos tipos de cementos, lo que permite relacionar los óxidos presentes en estos materiales de manera fácil y sencilla conduciendo a un mejor entendimiento sobre las posibles reacciones que se pueden producirse al combinar dichos materiales en la producción de compuestos modificados mejorados.

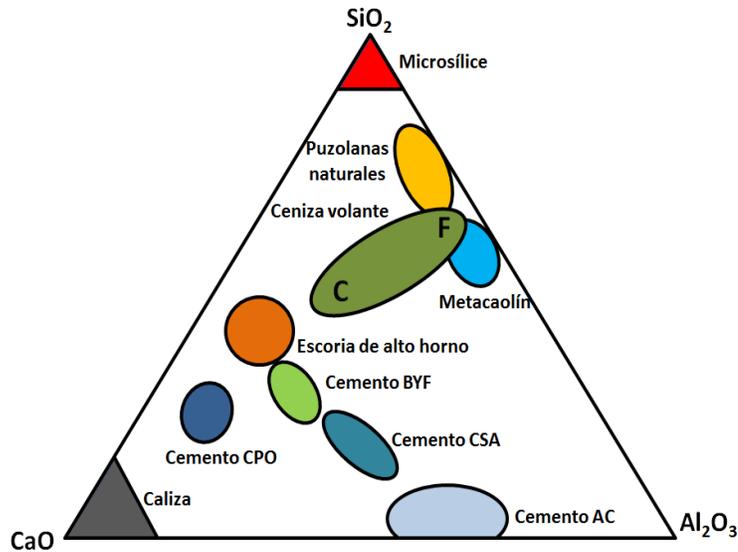


Figura 6. Diagrama ternarios de MCS y cementos.[48][49]

Las puzolanas como se describió anteriormente pueden mejorar o afectar el comportamiento de los morteros o concretos dependiendo de cómo se incorporen en la matriz del material compuesto, es de ahí que en la tabla 2, se muestran diferentes adiciones minerales utilizadas habitualmente en la construcción y distintos factores que indican la mejor manera de utilizar este tipo de materiales.

Tabla 2. Materiales cementicios suplementarios en el concreto.[50]

Tipo de Material Cementicio Suplementario	Reemplazo potencial de cemento*	Reactividad	Demanda de agua
Ceniza volante tipo F	10 a 30	Baja†	Reducción
Ceniza volante tipo C	10 a 40	Moderada a alta	Reducción
Puzolana natural‡	10 a 20	Baja a moderada	Aumento moderado a mayor
Cemento de escoria	25 a 50	Moderada	Neutral
Humo de sílice	5 a 8	Alta	Aumento mayor
Metacaolín	5 a 15	Alta	Aumento mayor

* Estos valores pretenden ayudar a contextualizar el uso de los MCS. En la investigación desarrollada los mismos fueron utilizados fuera de estos rangos.

†Bajo a edades tempranas.

‡ Las puzolanas naturales incluyen una amplia gama de materiales con un espectro de propiedades.

En el caso de la ceniza volante (CV), esta se comienza a utilizar como aplicación en el concreto hacia 1934 por Mc Millan y Power. [51] y se cataloga como un subproducto de las termoeléctricas, industrias en las cuales se utiliza el carbón como materia prima para generar energía eléctrica, el carbón una vez cumple su función principal produce un polvo fino volante el cual es captado y depositado para diversos uso según el grado de finura que se tenga.

La reacción generada entre el cemento y el MCS, parte de la interacción que hay entre el producto de reacción del cemento (hidróxido de calcio) y la reactividad de la CV, lo que genera que edades tardías se presente un mejoramiento de las propiedades mecánicas del compuesto ligante, esta interacción se puede observar descrita en la siguiente ecuación.



El uso de ceniza volante en combinación con el cemento CSA en sustitución genera dos efectos en las propiedades mecánicas de los morteros entre los cuales cabe mencionar el efecto relleno, el cual produce un aumento leve de las resistencias a la compresión y el efecto de disolución, el cual predomina con reemplazos altos generando efectos negativos.[34], de igual manera en sistemas CSA+CV se espera que la disolución de la ceniza volante sea más lenta respecto a los sistemas en donde esta MCS es combinado con el CPO, esto debido a que los valores del PH en la solución de poros del CSA es más baja en los sistemas CPO, también es cierto que en la hidratación del CSA generalmente no aparece el hidróxido de calcio lo que disminuye la probabilidad de que reaccione la CV con el CSA, ya que este compuesto de hidratación es el que en combinación con la adición mineral reacciona para producir mayor material cementante, sin embargo en el caso de que el CSH esté presente en el CSA hidratado, el compuesto podría suministrar iones calcio generándose un CSH con un menor relación Ca/Si, parecida a la que se presente en mezcla CPO+CV. [52]Desde el punto de vista de los productos de reacción, la CV promueve la formación temprana de etringita y se evidencia estratlingita a edades tardías (180 días) con relaciones agua / cemento altas.[34]

Por otro lado otro de los materiales cementicios más conocidos en la industria de la construcción es la microsílíce (MS) la cual es una adición mineral subproducto de la industria de producción del silicio elemental o aleaciones que contienen silicio en hornos de arco eléctrico, la cual se da debido a que alrededor de 2000°C la reducción de cuarzo de alta pureza a silicio produce vapor de dióxido de silicio, que se oxida y condensa a bajas temperaturas para producir el humo de sílice[53]. Este tipo de MCS, se presenta con partículas vítreas esféricas y extremadamente finas con diámetros promedios entre 0.1 y 0.2 micras, posicionándose respecto al tamaño de las partículas del cemento aproximadamente 100 veces más pequeña.[54]

Otra de las adiciones estudiadas en este proyecto fue la puzolana volcánica (PV) la cual el American Concrete Institute 116 por sus siglas en inglés ACI, la define como un material natural sin procesar o calcinado que tiene propiedades puzolánicas; entre ellas se puede mencionar la ceniza volcánica, la pumisita, el chert opalino, esquistos, tufas y algunas tierras deatomáceas[55]. Entre las más utilizadas esta la pumisita, la cual en aplicaciones industrializadas se conoce que se utilizó como puzolana en la construcción de la presa Friant en California USA en 1942[56].

Este material natural de origen volcánico es producido por la liberación de gases durante el enfriamiento y solidificación de la lava, el cual se presenta in situ como una piedra con estructura porosa que se forma por los gases en la lava fundida que quedan atrapados durante el enfriamiento.[57]

El metacaolín (MC) es otro MCS, que se trata térmicamente a partir del caolín, el cual es llevado a temperaturas alrededor de los 700 °C, con el fin de transformar su estructura cristalina cuando se genera la calcinación del material. Este aluminosilicato en el cemento Portland reacciona con el hidróxido de calcio libre del proceso de hidratación, generando un silicato dicálcico secundario el cual produce CSH, gehlinita y en algunos casos hidrogranates, productos que mejoran las propiedades mecánicas del nuevo compuesto formado.[58] En la siguiente ecuación 11 se muestra la ecuación de la reacción:



Investigadores como Copola[59] establece comportamientos negativos del uso del metacaolín en sistemas en donde se combina CSA y el MC

Es también importante en los materiales cementicios suplementarios mencionar la escoria de alto horno (EH), subproducto industrial obtenido a partir de la producción de hierro, formado de la escoria fundida generada de los altos hornos, la cual se obtiene cuando por densidad de productos esta flota como masa fundida dentro del alto horno, este material es extraído, enfriado y molido para después ser usado en el cemento, en morteros y en los concretos. Desde el punto de vista del cemento sulfoaluminoso Danying[60], establece que al combinar el CSA con la EH la tasa de hidratación y el calor de hidratación total se reducen con el aumento del contenido de escoria de 0% a 30%, de igual forma establece que desde la resistencia a la flexión disminuye al aumentar el contenido de escoria de 0 a 40%, este autor establece que se genera un aumento en el tamaño de los poros al incrementar los niveles de EH de 0 a 30%. Copola [59] en su investigación del efecto en morteros de un retardante base ácido tartárico en sistemas ternarios (CPO y CSA) con distintos MCS, entre ellos la EH pudo mostrar disminuciones (30%) importantes en la resistencia a la compresión para algunos de los sistemas estudiados que contenían escoria de alto horno. El mismo autor en otra investigación sobre el uso de acelerantes, establece reducciones en las resistencias a la compresión, así como también aumentos en la profundidad de carbonatación de los morteros estudiados que tenían EH como material de reemplazo del CSA [61]. Reemplazos mayores del 30% de EH puede generar efectos de reducción de resistencia en sistemas binarios CSA+EH esto por una mayor porosidad en las muestras así como también por la baja extensión entre la reacción entre el C₂S y el MCS[62].

Por último, se tiene caliza (CL) la cual se conoce como un filler en el cemento portland en donde dependiendo del tipo de cemento se permite hasta un 35% de reemplazo según la norma utilizada, desde el punto de vista de su acción con este

tipo de cemento esta tiende a formar sitios de nucleación adicionales que ayudan a formación del CSH conduciendo esto a mejores resistencias.

Desde el punto de vista del CSA el estudio de esta adición no ha sido ampliamente investigado referenciado estudios en donde se puede exponer que el efecto del uso de la caliza y el cuarzo como reemplazo en este tipo de cemento influye en el tiempo de fraguado acelerándolo en comparación con el cuarzo, esto debido a la hidratación temprana mejorada. La caliza de igual forma también mejora el comportamiento de la resistencia a la compresión a edades tardías respecto al uso de cuarzo[63][64].

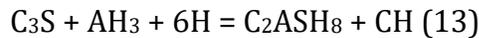
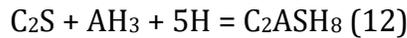
2.1.2.4. Sistema CSA +CPO y combinaciones con MCS.

Los sistemas binarios cemento sulfoaluminoso y cemento Portland han sido bien estudiados, se conoce que en este tipo de mezclas forman compuestos de hidratación como el CSH, la estratlingita o el hidrogranate, que la precipitación del AFt durante el proceso de hidratación del CSA es el responsable del endurecimiento temprano, el fraguado rápido y de la compensación de retracción[65], en este tipo de sistemas el CSA libera gran cantidad de calor durante las primeras horas, generando de igual forma una aceleración en el endurecimiento del material, produciendo en el primer día la hidratación de su principal producto anhidro(yelimita) la cual se transforma en etringita al generarse dentro del sistema una alto consumo de agua. Desde el punto de vista del CPO en este tipo mezclas la alita reacciona entre los 7 y 28 días presentando una reacción ligeramente tardía en su hidratación junto con la belita debido posiblemente a la baja cantidad de agua en la matriz, producto del agua consumida durante la hidratación de la etringita[66], en cuanto a la portlandita como producto de reacción del CPO se sospecha que esta reacciona con los recursos de aluminio y sulfato de los cementos que conforman la mezcla para generar monosulfoaluminato[67].

La hidratación de sistemas CSA+CPO, también pueden verse afectados por la fuente del sulfato utilizado si se trabajaran muestras ternarias, bien sea que éste producto esté como yeso o como anhidrita, Pelletier [68] estableció que aunque las reacciones sean las mismas para este tipo de mezclas la disolución de la anhidrita es más lenta en comparación con el yeso. En esta investigación los autores establecen que la fracción amorfa de los hidratos se componen principalmente de hidróxido de aluminio y de estratlingita, cuando se tiene anhidrita este tipo de combinación puede tener algo más de monosulfato debido al menor consumo de la anhidrita en comparación al yeso, a edades posteriores el contenido de hidróxido de aluminio en la fracción amorfa disminuye y se forman monosulfoaluminatos adicionales y una fase tipo CSH. El modelo termodinámico para las mezclas estudiadas descrito por Pelletier establece que las principales diferencias se presentan en el primer día describiendo que para el caso del yeso , el proceso comienza con la formación de AFt y AH₃ a partir de la hidratación del C₄A₃S; el contenido de AFt aumenta durante la primeras horas luego se mantiene más o menos constante y finalmente disminuye a edades posteriores, de igual manera el contenido de AH₃ disminuye y un día después

comienza a formarse monosulfoaluminato[69] . En cuanto a la muestra con anhidrita se expone que podría estar formándose poca AFt dentro de la primera hora de hidratación hasta llegar entre las 5 y las 15 horas que en donde se formara la mayor cantidad de AFt , este contenido disminuye a edades posteriores. [68]

Wolf [70], establece que siendo las reacciones del CPO bien conocidas, en el caso de la portlandita se debe tener en cuenta que ésta no es estable en presencia de hidróxido de aluminio y siendo este el caso el que se presenta en la hidratación de la ye limita puede reaccionar de manera adicional para forma otras fases hidratadas, ahora como se dijo anteriormente las principales fases formada en el CSA son la etringita y el hidróxido de aluminio ($C_4A_3S + 2 CSH_2 + 34 H \rightarrow C_3A \cdot 3CS \cdot 32H + 2 AH_3$) o el monosulfato y el hidróxido de aluminio ($C_4A_3S + 18 H \rightarrow C_3A \cdot 3CS \cdot 12H + 2 AH_3$), fases AH_3 que pueden reaccionar con mayor cantidad de etringita impulsada por la hidratación del C_2S y C_3S del cemento Portland ordinario, los cuales sirven como fuente de calcio, al igual que los sulfatos de calcio sirven como fuente de sulfato, generando $AH_3 + 3CH + 3CS + 32H \rightarrow C_3A * 3CS * 32H$ y $C_4A_3S + 8CSH_2 + 6CH + 74H \rightarrow C_3A * 3CS * 32H$ por lo que estos sistemas CSA+CPO+ sulfato de calcio pueden presentar importantes cantidades de etringita en la pasta. En la ausencia del sulfato de calcio como es el caso de este trabajo, la fase etringita se puede formar a partir de la reacción de silicatos de calcio bajo el consumo de los hidróxidos de aluminio generados por la hidratación de la yelimita. (ver ecuaciones 12 y 13) [70].



En la figura 7, es posible observar el modelo termodinámico en donde aparecen fases como el CSH y la etringita las cuales aparecen a edades más tardías a lo mostrado en la figura.

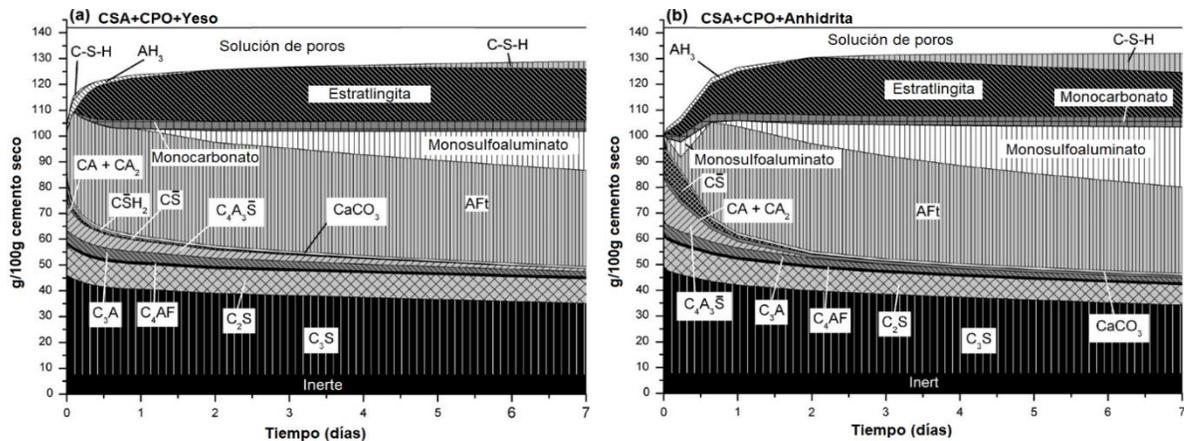


Figura 7. Modelo termodinámico matrices CSA+CPO+Yeso o Anhidrita, tomada de referencia[68]

Park [69] indica que la hidratación del C_3S , se ve retrasada en mezclas binarias CSA/CPO, respecto a sistemas únicos de CPO, lo que conduce a formaciones

tardías de portlandita y silicatos de calcio hidratados generando efectos en la resistencias de este tipo de mezclas.

Desde el punto de vista de las adiciones minerales la interacción entre el CSA y los MCS presentan diferentes comportamientos desde la resistencia a la compresión y desde la durabilidad. Zhang [71] reporta el efecto de la combinación de diferentes combinaciones de puzolanas como la microsilíce, la ceniza volante y la escoria de alto horno en propiedades como la resistencia a la compresión las en la cuales dependiendo el porcentajes de reemplazo se obtuvieron resistencias importantes al comparar las diferentes combinaciones con dos referencias una con 100% cemento Portland y otro con el 100 % de cemento sulfoaluminoso con relaciones agua/cemento de 0.3. Los mejores comportamientos se dieron para la combinaciones de 10% de uso de microsilíce en reemplazo del CSA obteniendo mejores resistencia a la compresión que la muestra de solo CPO, sin embargo para el caso de la CV en los mismo 15 de reemplazo los investigadores alcanzaron valores inferiores a las dos referencias; al generar combinaciones ternarias (80%CSA+10%MS+10%CV) y cuaternarias (70%CSA+10%MS+10%CV+10%EH) en un total de reemplazo del 20% y 30% respetivamente por cemento Portland, fue posible observar afectaciones importantes respecto la resistencia, lo que permite de acuerdo a este estudio definir que la adiciones minerales a edades de 28 días no contribuyen de manera significativa en la obtención valores de resistencias a la compresión mayores a los que presentan las referencias. De esta misma investigación se observa que la ley constitutiva expresada por Abrams sobre el efecto del aumento en la cantidad agua en combinación con el CSA aumenta de manera importante los valores de resistencia a la compresión

2.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y DURABILIDAD

Todos los materiales base cemento tiene como principios básicos presentar buenas resistencias y adecuada estabilidad. En ese sentido es importante establecer que la resistencia a la compresión como medida del control de calidad de los concretos se vuelve uno de los parámetros más estudiados ya sea en matrices de pastas, de morteros o de concretos, esto debido a que esta medida define la capacidad del concreto ante una carga uniaxial la cual en el diseño de estructuras se convierte en el valor de referencia para diseñar los elementos estructurales. En ese orden de ideas para el caso materiales fabricados con cemento CSA la resistencia a la compresión medida en matrices 100 % CSA presenta valores similares a las que se muestran con el cemento Portland siguiendo la misma ley constitutiva sobre la relación agua/cemento la cual expone que entre mayor cantidad de agua menor es la resistencia a la compresión obtenida a pesar de que el grado de hidratación con este tipo de cementos este por encima del CPO.

Por otro lado, también es importante para este tipo de cemento revisar su estabilidad volumétrica, entendiéndose que para el CPO esto se relaciona con la

retracción que presenta este tipo de cemento en el tiempo, este fenómeno se puede presentar por secado, por carbonatación, en forma de retracción química o como retracción autógena produciendo efectos directos en la resistencia a la compresión del concreto y en la durabilidad del mismo; sin embargo para el caso de los materiales fabricados con el CSA el fenómeno mencionado anteriormente puede presentarse de manera menos complicada respecto al CPO y en algunos casos no se presentaría, esto debido a la naturaleza expansiva del CSA, esto producto de la etringita generada durante la hidratación. Investigadores como Sirtoli [65] muestran una fuerte tendencia de los sistemas basados en CSA a auto-deseccarse, indicando de igual manera que sus sistemas estudiados basados en CSA experimentaron aumento de masa y expansión después de ser expuestos a un ambiente al 90% de humedad relativa. De igual manera Sirtoli especifica que al comparar probetas de CSA, CPO y una muestra combinada (50CSA+50CPO) los sistemas CSA muestra alta retracción autógena en comparación con el CPO pero de igual manera los cambios volumétricos a edades tempranas puede mitigarse si se utiliza combinaciones CSA+CPO (ver figura 8).

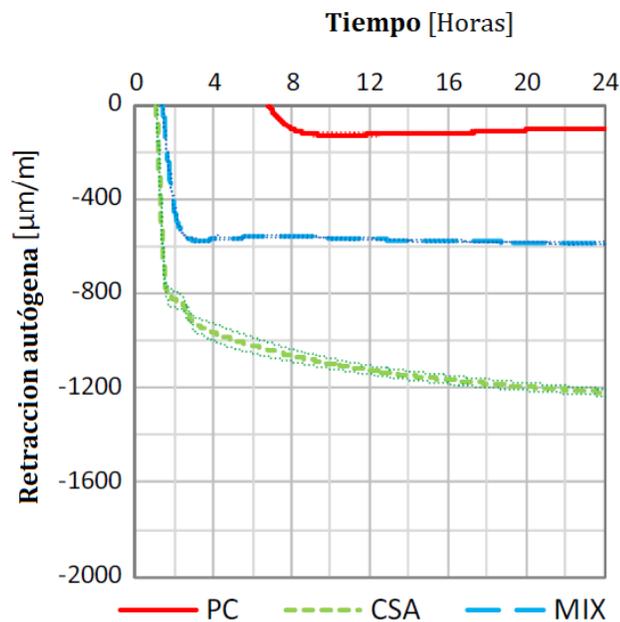


Figura 8. Comparación de retracción autógena con diferentes tipos de cemento, tomada de referencia [65]

El concreto es uno de los materiales de construcción más durables de hoy en día si se compara con materiales como el acero y la madera cuyo uso es bastante habitual como solución de edificación, sin embargo esa durabilidad puede verse influenciada por factores como procedimientos constructivos deficientes, relaciones agua/cementante altas, inclusión de agregados reactivos, uso inadecuado de las edificaciones o el nivel de agrietamiento que puede presentarse en su superficie por

posibles problemáticas de retracción, lo que establece que durante su fabricación y servicio se le debe prestar la debida atención al control de calidad tanto en su estado fresco como endurecido para evitar posibles afectaciones durante su vida útil. En ese sentido se hace importante definir el concepto de durabilidad la cual según el ACI 201[72] la describe como la habilidad del material para resistir la acción de la intemperie, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro manteniendo su forma, calidad y condiciones de servicio originales cuando es expuesto a medio ambiente.

Con base a lo anterior y para entender cada uno de los ensayos al respecto planteados en este trabajo se tratará sobre los factores que pueden producir deterioro en el material, para los cuales puede mencionar:

- Factores físico-mecánicos. Estos son inherentes a la calidad de los diferentes procesos constructivos, ya que si se siguió un adecuado proceso de diseño, de producción del concreto y de mantenimiento, se producirá un buen comportamiento a lo largo de su vida útil de servicio, en caso contrario el concreto tendrá una disminución en su durabilidad. Otro factor importante que genera concretos poco durables es el sometimiento de las estructuras de concreto a sollicitaciones excesivas y, que no fueron tenidas en cuenta durante los cálculos y diseños previos, provocando posibles fisuras y deformaciones que pueden causar una disminución en la vida útil de la edificación.[73]
- Ataques químicos y biológicos. El concreto puede sufrir ataques por ácidos al cemento en estado plástico y endurecido lo que puede producir deterioro acelerado del material; de igual forma, el concreto puede ser susceptible a reacciones químicas por carbonatación y cloruros provocando problemas posteriores de corrosión. Los sulfatos también se pueden denominar como agentes nocivos para el concreto ya que generan expansión en el material. Todos los anteriores efectos nocivos son de naturaleza exógena, es decir son producidos desde afuera hacia el interior del hormigón. De la misma forma, existen ataques químicos endógenos que tienen un efecto altamente nocivo para las estructuras, es decir, se producen desde el interior de la matriz del material. Una de estas es la reacción álcali-sílice, la cual provoca una expansión interna del concreto causando la desintegración del mismo. Finalmente el concreto también está propenso a ataques biológicos por interacción directa con aguas residuales o ambientes que contengan microorganismos como bacterias u hongos.[73]

En ese sentido es importante mencionar que todas las edificaciones de concreto reforzado puede ser afectadas por los ataques antes mencionados reduciendo la vida útil de las construcciones fabricadas con este material el cual una vez en servicio comienzan deteriorarse por el efecto de los agentes exógenos como la carbonatación

y los cloruros los cuales durante cierto tiempo avanzan a través de la matriz de concreto hasta llegar al acero de refuerzo despasivandolo para dar inicio un periodo de propagación de la afectación por el proceso de corrosión del acero, el cual avanza hasta producir una perdida en la seguridad funcional del elemento afectado. K. Tuutti[74] muestra mediante su modelo de vida útil (ver figura 9) el avance del deterioro de una estructura de concreto ante los efectos de la carbonatación y de los cloruros.

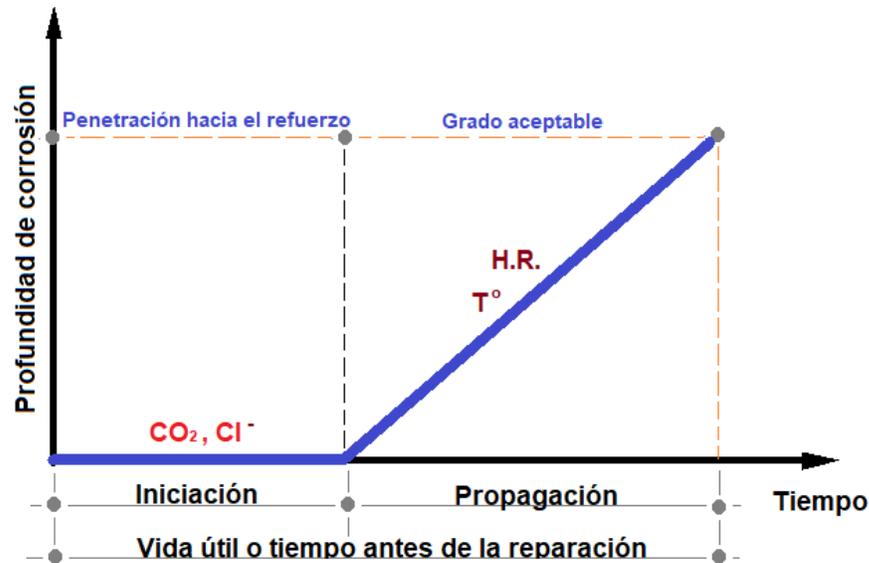


Figura 9. Modelo de vida útil de Tuutti para corrosión del acero, Tomado referencia 68).

La afectación por cloruros y carbonatación se presenta por la permeabilidad vinculada a la porosidad inherente del concreto la cual permite que los fluidos como el agua o la combinación de los agentes deletéreos disueltos en agua tales como los iones cloro y el dióxido de carbono puedan moverse a través de la red poros permitiendo las reacciones con el material generando las afectaciones al concreto reforzado.

En ese sentido se hace importante mencionar que el transporte de los agentes agresores en el caso del ataque por cloruro y carbonatación se da por difusión en la cual cualquier ion puede pasar a través del concreto saturado sin necesidad que exista flujo de agua. La difusión es impulsada por los gradientes de concentración, es decir, si una solución fuerte está en contacto con una solución débil los iones migraran entre las soluciones hasta que ambas tengan igual concentración. Este fenómeno se presenta en todos los tipos de concreto independientemente si este fabricado con cementos Portland o con cementos sulfoaluminosos. En el caso de este último el riesgo de corrosión en el acero de refuerzo bien sea por cloruros o por carbonatación es altamente posible debido a su bajo pH que presente el CSA lo que

puede conducir a una despasivación del acero de refuerzo provocando finalmente la corrosión del material.

La corrosión del acero por cloruro se da por acción electroquímica, la cual se produce cuando dos metales distintos están en contacto eléctrico en presencia de humedad y oxígeno. Este proceso también ocurre en el acero que está solo, debido a diferencias en el potencial electroquímico de superficie, el cual forma zonas catódicas y anódicas, conectadas por electrólitos en forma de solución salina en el cemento hidratado. Los iones ferrosos con carga positiva Fe^{++} en el ánodo pasan a la solución, mientras que los electrones libres cargados negativamente pasan a lo largo del acero dentro de los cátodos donde son absorbidos por los componentes del electrólito y combinados con agua y oxígeno, para formar iones hidroxilo $(OH)^{-}$, los cuales se combinan con los iones ferrosos para formar hidróxido férrico, que a su vez se convierte en herrumbre. Como se dijo anteriormente los cloruros destruyen la capa de pasivación, generando que la superficie del acero se vuelva localmente activa para formar el ánodo y con la superficie pasiva se forma el cátodo, lo que produce una corrosión por picaduras localizadas. El acero al oxidarse aumenta su sección transversal y traslada el problema al concreto fisurándolo de manera paralela al hierro, hasta llegar al descascaramiento del concreto.

Desde el punto de vista de la durabilidad, la resistividad eléctrica del concreto es un importante parámetro para relacionar el material con el riesgo de corrosión que pueda presentarse, este parámetro puede relacionarse con la migración de iones cloro en la porosidad microestructural del concreto y con la tortuosidad del mismo.[75] Esta se puede describir como la capacidad del material para resistir la transferencia de iones sometidos a un campo eléctrico.[76] La resistividad eléctrica puede medirse de diferentes maneras siendo las más utilizadas en la industria de la construcción, la resistividad eléctrica bulk y la superficial (RES) las cuales consisten en generar circuitos eléctricos equivalentes mediante electrodos metálicos. La primera consiste en generar un circuito al cual se le mide la caída del potencial entre los electrodos al aplicarse corriente alterna [76] lo que nos permite finalmente mediante la relación $k = A/L$ determinar el factor geométrico de la probeta siendo A el área de la sección transversal perpendicular a la corriente y L igual a la longitud de la muestra; a partir de este factor la resistividad ρ será igual $k * R$ (resistencia del concreto), el arreglo eléctrico para esta medida se puede observar en la figura 10. Por otro lado la otra forma de medir la resistividad es por medio del método de Wenner el cual consiste en medir mediante 4 electrodos separados a una misma distancia el potencial eléctrico (V) a través de dos electrodos internos (ver figura 10) cuando los electrodos externos producen corriente alterna que pasa por el concreto.

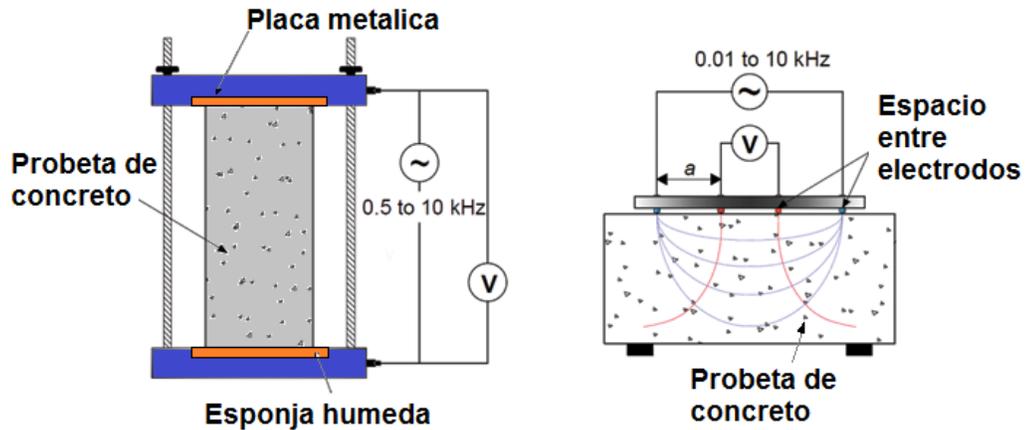


Figura 10. Métodos de medida de resistividad eléctrica. (a) Resistividad Bulk, (b) resistividad Wenner. Tomada de referencia 70.

Las medidas de resistividad mostradas anteriormente son altamente correlacionables entre sí, al igual que con otras técnicas que miden la penetración de cloruros como el método RCPT expuesto en la norma ASTM C1202 y la migración de cloruro de la ND 492. Todas estas técnicas están relacionadas con la durabilidad del concreto, al igual que el potencial de media celda. Kalogridis [77] definió que en concretos base cemento sulfoaluminoso expuestos a soluciones de 3.5% NaCl se ven altamente afectados presentando indicios de corrosión severa en medidas de potencial de media celda para matrices con exposición continua e interrumpida de cloruro de sodio. Por otro lado Duan [78] después de evaluar mezclas con 50% de CSA y 50 % de CV con una relación agua/cemento de 0.41 pudo obtener comportamientos en la medida de coeficiente de migración de cloruros menor respecto al del cemento CPO, esto indica que entre menor sea la penetración del cloruro mayor densidad de la matriz y por ende mayor durabilidad, para este investigador a edades tardías el CSA tiene mejor desempeño que el CPO debido a la reacción puzolánica de la CV, la cual densifica la matriz otorgándole menor porosidad y por tanto mayor durabilidad. Afroughsabet[79] indica buenos comportamientos de matrices 100% CSA respecto a matrices binarias 50/50 entre CSA y CPO, ternarias (25% CPO+50%CSA+25%Escoria) y 100% CPO en la medida de resistividad eléctrica. Desde el punto de vista electroquímico Afroughsabet indica que las matrices en donde se combina el CPO o una puzolana con el CSA tienden a presentar problemas de corrosión, esto se le puede atribuir a los álcalis de la carbonatación debido a la descomposición de los cristales de etringita así como a la reducción de la alcalinidad en la solución de poros los que subsecuentemente incrementa el riesgo de corrosión. En la figura 11, es posible observar valores de resistividad menores para las muestras combinadas.

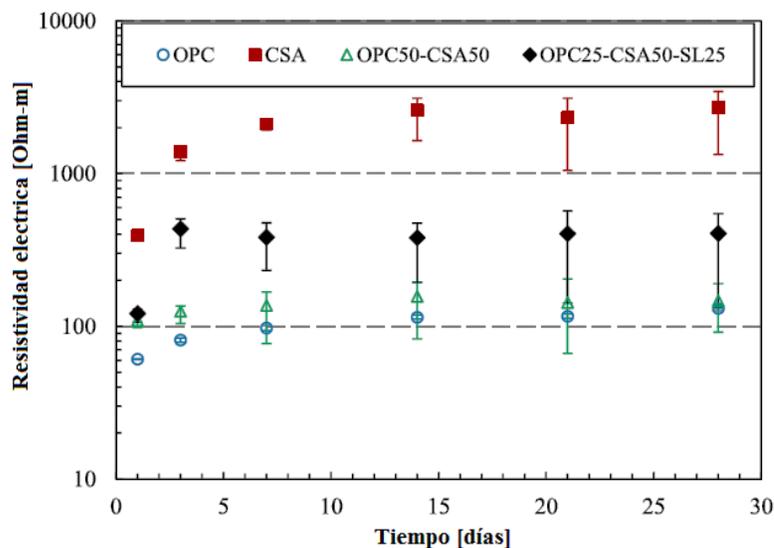


Figura 11. Comparación de la resistividad eléctrica entre diferente tipos de cementos y combinaciones cementantes. Tomada de referencia [79].

Desde el punto de vista del efecto del dióxido de carbono sobre el concreto esta reacción se da por el ingreso del CO_2 atmosférico a la matriz porosa interconectada del concreto reforzado en donde el gas deletéreo primero pasa por los poros grandes de la matriz difundiendo a través del agua disuelta en dichos poros generando una reacción de carbonatación con los productos de hidratación en toda la superficie del poro pasando después a los poros pequeños [80] produciendo un frente de carbonatación que disminuye el pH del concreto ($\text{pH}=12.0$) a valores que oscila entre 8 y 9 lo que conduce a que en el acero de refuerzo se genere la despasivación del metal lo que provoca el inicio de la corrosión hasta llegar al deterioro excesivo del concreto. La carbonatación es una problemática inherente al CO_2 ambiental la cual se presenta en cualquier estructura expuesta al medio ambiente produciéndose en unos casos de manera lenta y en otros casos con una tasa de avance del frente de carbonatación muy importante en ambientes urbanos, debido a la gran cantidad de emisiones que se presentan en este tipo de lugares. La carbonatación es un fenómeno químico en el cual en presencia de humedad el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reacciona con el CO_2 para formar CaCO_3 tal y como se muestra en la siguiente ecuación:



Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado en morteros y concretos con cemento Portland, lo que ha permitido entender a profundidad el fenómeno dado en concretos fabricados con este material, sin embargo en el caso del concreto base cemento sulfoaluminoso la afectación del CO_2 sobre el concreto todavía necesita de mayor investigación sobre todo en combinaciones con MCS, Sherman [81], definió que matrices de CSA expuestas al efecto de dióxido de carbono de manera acelerada

se ven afectadas por la conversión de la etringita a carbonato de calcio por la carbonatación, generando una disminución de la resistencia a la compresión. Zhang muestra que la carbonatación en concretos con CSA es mayor entre mayor sea la relación agua/cemento y esto lo relaciona con el aumento en los tamaños de poros, de igual manera el mismo autor establece que para concretos binarios con reemplazos del 20% de escoria y CV se presenta mejores comportamiento en la referencia de 0% de reemplazo, teniendo mejor desempeño la escoria que la ceniza volante. Socrates [82] compara diferentes tipos concretos con distintos tipos de cemento entre ellos el CSA, los cuales fueron sometidos a ensayos de carbonatación acelerada mostrando un pobre comportamiento de este tipo de cemento al ataque exógeno del CO_2 , esto debido a que este cemento forma pocos hidróxidos alcalinos, sumado a su bajo pH inicial con los pocos hidróxidos presentes carbonatados rápidamente provocan si se dan las condiciones adecuadas el incremento de la carbonatación.

Desde el punto de vista de la durabilidad además de los agentes exógenos antes mencionados en el concreto base cemento Portland puede también presentarse el ataque por sulfatos, el cual afecta este tipo de concretos generando expansiones que fisuran de manera importante el material, para el caso del cemento sulfoaluminoso esto no es un inconveniente debido a la ganancia de resistencias a edades tempranas este tipo de cemento ofrece buenos comportamientos ante agentes exógenos al concreto, especialmente ante los sulfatos esto debido a que las fases en donde se encuentra como producto el aluminato se liga como sulfoaluminatos provocando ausencia del mismo en el proceso de hidratación a edades tempranas disminuyendo la posibilidad para que estos reaccionen con los sulfatos externos los cuales finalmente son los que provocan posibilidades de expansión en matrices cementicias con cemento portland.[27] Previamente Socrates también al comparar cemento CSA, CPO y cemento con escoria, con relaciones agua/cemento de 0.5 pudo definir mejores comportamiento del CSA respecto a los otros analizados, Alapati [83] después de analizar diferentes tipos de cementos en morteros y concretos con relaciones a/c 0.45 y 0.4 respectivamente, las muestras con cemento CSA se carbonatan mucho más rápido que las de CPO además de presentar una más alta reducción del pH llegando a valores inferiores a 9 unidades, teniendo pH iniciales antes de la carbonatación que oscilan entre 9 y 11 en el CSA y mayores a 13 en el CPO.

3. JUSTIFICACIÓN

La tecnología de los materiales avanza cada año en pro del crecimiento de la humanidad. Estos adelantos se dan en diferentes campos del saber, tales como en la medicina, la biología y la química entre otros. Dichos avances pueden ser utilizados además en ciencias aplicadas como la ingeniería, lo que ha permitido crear nuevos materiales de construcción capaces de brindar soluciones a problemas específicos inherentes a cada material.

Cuando se habla de un nuevo material en el sector de las edificaciones, siempre se describe la posibilidad de ofrecer mayores resistencias ante cargas externas, mejores comportamientos ante agentes que pueden causar degradación temprana y mejores desempeños en estados iniciales de construcción. En la industria de la construcción se debe mencionar al acero, la madera, la mampostería y el concreto, es último compuesto que inicialmente se concibió como la combinación entre el cemento, los agregados (fino y gruesos) y el agua siendo este capaz de resistir muy bien un estado de cargas a compresión pero de bajo comportamiento si es sometido a fuerzas internas de tensión.

Hoy en día es posible encontrar concretos muy distintos a los concretos de principios del siglo XX, debido a la gran cantidad de cambios producidos en la tecnología de los cementos y de los aditivos, los cuales le han proporcionado al material mejores desempeños en durabilidad y resistencias.

Entre los nuevos tipos de concretos se tiene: los de altas resistencias cuya propiedad fundamental es alcanzar una resistencia a la compresión ($f'c$) de 100 MPa; los de polvos reactivos que tienen resistencias que van desde los 200 MPa a los 800 MPa; los concretos auto reparables los cuales tienen la capacidad según la técnica (agentes de reparación y encapsulación) usada de auto repararse ante ciertos tipos de fisuras; los concretos autolimpiantes, cuya propiedad fundamental consisten degradar por medio de la reacción foto catalítica entre el dióxido de titanio y la radiación UV4 de ciertos compuestos orgánicos que producen manchas en el concreto. También es posible hablar de los concretos autocompactantes que son aquellos concretos que sin presentar segregación o exudación pueden ser colocados sin ninguna compactación mecánica y los concretos de baja huella de carbono entre otros, materiales que muestran un claro avance en el estado del arte y del uso del concreto en la tecnología del concreto la cual ha desarrollado soluciones a las diferentes desventajas (la poca manejabilidad, el agrietamiento, su inestabilidad volumétrica, la exudación y segregación) que presentan los concretos convencionales.

Teniendo en cuenta que en todos los países latinoamericanos existen gran variedad de factores (distintos tipos velocidades de viento, climas y humedades relativas) que afectan la tasa de evaporación del agua superficial del concreto, los cuales reducen la durabilidad de la infraestructura pública y privada, es de vital importancia comenzar a introducir nuevas tecnologías que ayuden a generar estructuras con mejores desempeños. Una de las problemáticas más reconocidas en el concreto se relaciona con la retracción, la cual se define como el cambio de volumen del concreto ya sea por el efecto de la falta de curado del material, por acción química interna de los componentes del concreto o por efectos del dióxido de carbono. Estos factores finalmente generan fuerzas internas de tensión que repercuten en fisuración de los elementos estructurales y por ende en la disminución de su capacidad resistente y en una reducción de la vida útil de las estructuras.

Los procedimientos de curado para evitar los efectos del no curado, ya están establecidos a nivel mundial sin embargo en el desarrollo de la infraestructura de concreto estos son cumplidos estrictamente en proyectos de rango alto y no generalmente en la construcción de nivel medio y bajo, hecho que impacta directamente en el tiempo de servicio de las estructuras de concreto de las clases medias y bajas en las sociedades latinoamericanas.

El concreto como material presenta ciertos problemas que a través del tiempo se han venido solucionando utilizando diferentes tipos de cementos, aditivos, agregados, adiciones o compuestos que al incluirlos dentro de la matriz del material, modifican el comportamiento de éste con el fin de mejorar su desempeño. Sin embargo desde el punto de vista ambiental, este material presenta aún grandes inconvenientes, por la emisión de CO₂. La asociación europea del cemento (Cembureau) en su reporte de 2015 indica una producción mundial de cemento de 4.6 billones de toneladas las cuales se subdividen tal y como lo muestra la figura 12.

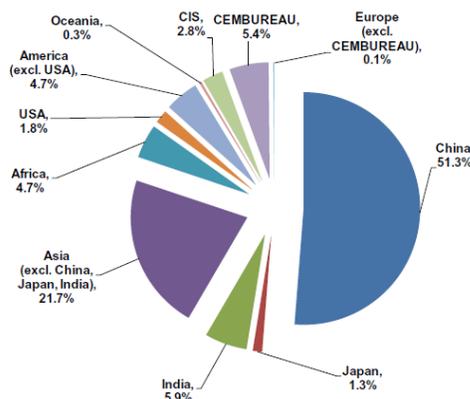


Figura 12. Producción mundial de cemento 2015 por región y países principales (4.6 billones de toneladas).

La cifra anterior muestra un panorama de la gran incidencia de este material en la infraestructura y de sus posibles efectos ambientales en el futuro próximo, esto debido a que el uso de este material siempre va muy ligado al crecimiento de las necesidades de vivienda de una población mundial que se espera llegue a los 9.2 billones de personas para el 2050,[84] aunado a que para el 2018 el 55% de la población mundial residía en zonas urbanas y se proyecta que para el 2050 esta cifra pueda estar alrededor del 68%. En el caso de Latinoamérica, el Caribe y Norteamérica se espera que el nivel de urbanización alcance al 2050 el 90% de los residentes de esta región.[85] Hechos que incidirán directamente en la demanda de soluciones habitacionales y por ende en los materiales de construcción lo que puede provocar si no se atiende debidamente la problemática de emisiones de CO₂, que hoy el mundo está sufriendo inconvenientes de sostenibilidad que a futuro serán muy complejos de atenderse.

La industria del cemento es la responsable de más del 5% de las emisiones de CO₂ de origen humano, de las cuales alrededor del 60% de estas emisiones provienen de las materias primas utilizadas en el proceso de fabricación de cemento y cerca del 40% de la energía necesaria para la reacción química de formación del clínquer la cual se traduce a temperaturas aproximadas de 1450 °C.

Lo anteriormente expuesto que se están generando consensos entre los países líderes en la producción de cemento para reducir las emisiones de CO₂ en un 80% para el 2050, esto obligará a la industria del cemento y del concreto a generar políticas de producción que conlleven en un futuro próximo a fabricar materiales con cero emisiones de carbono.

Una de las formas de reducir la cantidad de emisiones de CO₂ sería mediante la producción de Clinker de cemento con bajo carbono, el cual es posible obtenerlo fabricando clínquer con menor contenido de caliza lo que redundaría en una menor energía de producción y por ende en menor cantidad de CO₂, un ejemplo de este tipo de material es posible obtenerlo en la fabricación de Clinker de cemento sulfoaluminoso el cual para su producción necesita niveles más bajos de piedra caliza y altos contenidos de alúmina.

Dichas emisiones también son posibles reducirlas con algunos tipos de silicatos de calcio que pueden reaccionar bajo ciertas condiciones con el CO₂ para formar carbonatos, los cuales puede tener propiedades similares en estado endurecido al CSH del cemento portland, o con cementos que usan formas mineralizadas de CaO, los cuales tienen como limitante la baja disponibilidad de estos materiales en la naturaleza.

Es por eso que en este proyecto se busca fabricar mortero y concretos de bajo impacto ambiental haciendo uso de adiciones minerales y de cemento sulfoaluminoso con el fin de conocer los efectos de las diferentes combinaciones entre este tipo de cemento y los materiales cementicios suplementarios, en busca de

un concreto que aporte a la reducción de emisiones de CO₂ y que además tenga buen comportamiento tanto mecánico como de durabilidad.

De igual forma el curado es extremadamente importante y desafortunadamente es casi nulo en las edificaciones que no tienen supervisión técnica durante la etapa de construcción, lo que conduce directamente a retracciones plásticas y por secado, provocando efectos en el desempeño del concreto.

Dichas retracciones se ven afectadas por condiciones ambientales tales como: velocidad del viento, humedad relativa, radiación solar y la temperatura ambiente y juegan un papel muy importante con la calidad del material en términos de estabilidad volumétrica y periodo de vida útil.

Con el fin de dar solución a las consecuencias expuestas por la falta de restitución de agua por errados procedimientos de curado en este proyecto se quiere concebir un tipo de mortero y concreto que por su composición sea capaz de no ser afectado por la retracción independientemente del curado aplicado para eso se trabajara con un cemento de menor efecto en la huella de carbono llamado cemento sulfoaluminoso y materiales cementicios suplementarios (caliza, ceniza volante, escoria de alto horno, microsílíce, ceniza volcánica y metacaolín) para la producción de un mortero y concreto que genere menor impacto ambiental y que dé solución por su característica expansiva a los efectos de los cambios volumétrico en la resistencia y en la durabilidad de estos materiales base cemento.

4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

4.1. HIPÓTESIS

Mediante la sinergia entre los materiales cementicios suplementarios (microsilíce, ceniza volante, escoria de alto horno, puzolana volcánica, escoria de alto horno, metacaolín, caliza) el cemento sulfoaluminoso y el cemento Portland, es posible generar compuestos cementantes (morteros y concretos) con adecuados comportamientos de resistencia y de estabilidad a través del tiempo ante agentes que pueden producir afectación al material desde la durabilidad.

4.2. OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la sinergia entre los materiales cementicios suplementarios y el cemento portland en matrices base cemento sulfoaluminoso desde su estado endurecido y durabilidad.

4.3. OBJETIVOS

- Evaluar el efecto de los materiales cementicios suplementarios en el desarrollo de las resistencias a la compresión en sistemas binarios y ternarios de pastas de cemento portland ordinario y cemento sulfoaluminoso
- Valorar el efecto de sistemas ternarios CSA+CPO+MCS en morteros de bajo impacto ambiental, por medio de ensayos de resistencia a compresión y durabilidad.
- Evaluar el efecto del uso de polímeros superabsorbentes en sistemas binarios con alta cantidad de ceniza volante mediante ensayos de resistencia a la compresión y de durabilidad en concretos de bajo impacto ambiental.

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe la metodología utilizada para obtener la caracterización de materiales y el procedimiento experimental ejecutado para la obtención de las mezclas producidas en el desarrollo de esta investigación.

5.1 FASE 1 - CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.

En este trabajo se decidió investigar la incidencia de los materiales cementicios suplementarios para lo cual el primer paso fue conocer las propiedades presentes en cada una de las materias primas utilizadas, las cuales se enuncian a continuación:

- Cementantes
 - Cemento Portland Ordinário –CPO 40R CEMEX (CPO)
 - Cemento Sulfoaluminoso belético GCC -(CSA)
 - Ceniza volante (CV)
 - Caliza (CL)
 - Escoria de alto horno (EH)
 - Microsílice (MS)
 - Puzolana Volcánica (PV)
 - Metacaolín (MC)
- Aditivo reductor de agua de alto rango – Eucomex - (SP)
- Ácido cítrico (AC)
- Polímeros superabsorbente (SAP)
- Agregado fino No 4
- Agregado grueso TM 3/4 in

Las materias primas fueron caracterizadas realizando ensayos químicos y físico-mecánicos, los cuales se describen a continuación:

2.2.1 Ensayos químicos en las materias primas.

Desde el punto de vista químico las materias primas se caracterizaron mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y difracción de rayos X (DRX).

5.1.2.1. Fluorescencia de rayos X.

El primer ensayo de caracterización utilizado fue la técnica analítica de espectroscopia de fluorescencia de rayos X, empleada para conocer la composición química de los materiales bien sea en estado sólido, plástico o en polvo, en el caso de los materiales utilizados en el análisis se realizó en polvos y tuvo como objetivo conocer los óxidos presentes en cada uno de los cementantes utilizados, para esto lo que se hizo fue preparar las muestras tal y como lo describe Castillo [86], el cual menciona la preparación de una pastilla en polvo, en la que se usa 6 g de material cementante molido por 2 minutos, junto con 0.06 g de ácido esteárico y 0.3 g de natrozol, una vez alcanzado el periodo de molienda el material es llevado a una prensa para formar una pastilla producto de 15 toneladas de presión. De igual manera para este análisis también se preparan pastillas de vidrio mezclando 5 g de tetraborato de litio con una cantidad determinada del material cementante con el objeto de generar una fusión entre los materiales a una temperatura de 1150 °C, una vez alcanzada dicha temperatura la pastilla de vidrio es enfriada y llevada al análisis de FRX. Para el desarrollo de la técnica se usó un equipo Phillips Sample Changer PW2450 (ver figura 13)



Figura 13. Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X .[86]

La técnica consiste en irradiar la muestra con rayos X generando que se produzca una vacancia en una capa atómica, la cual es llenada por un electrón de una capa más externa liberando una energía como un fotón de rayos X por fluorescencia, finalmente la radiación electromagnética es caracterizada de acuerdo a la energía de cada elemento (ver figura 14).

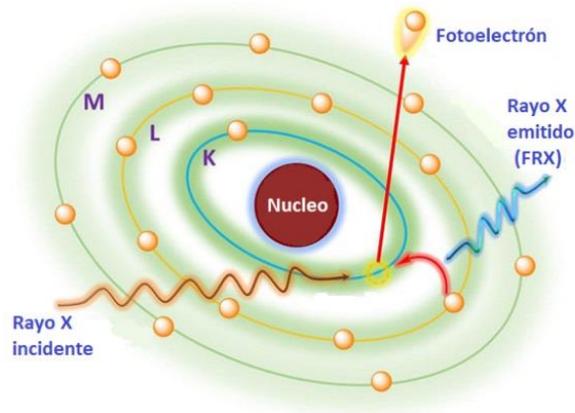


Figura 14. Principio de la Fluorescencia de rayos .[110]

5.1.2.2. Difracción de rayos X .

La difracción de rayos X, es una de las técnicas de análisis microestructural más utilizada hoy en día en el estudio de los cementantes, debido a que por medio de la misma se tiene la posibilidad de identificar y cuantificar (Rietveld) las fases cristalinas presentes en este tipo de materiales. En esta tesis el proceso de evaluación de los minerales presentes, se realizó pasando primero los polvos a través de un tamiz 60, luego se procedió a colocar el polvo presionándolo en un recipiente de muestra con el fin de compactarlo, para finalmente llevarlo al difractómetro de rayos x (Ver figura 15).

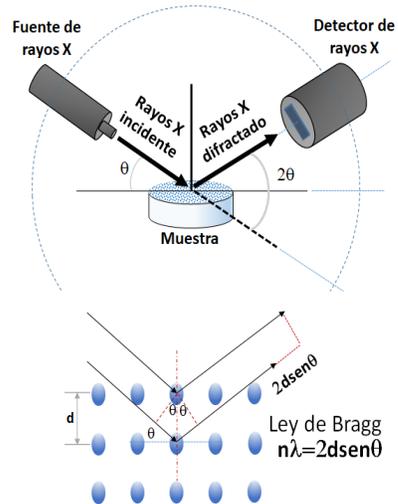


Figura 15. Difractómetro y principio de los rayos X.

Una vez la muestra de polvos están en el equipo, se genera un haz que incide sobre el cual a su vez difracta hacia un detector después de un procesamiento un patrón de difracción del material cristalino, con el cual se caracteriza la muestra estudiada. Este patrón de difracción se ve representado mediante de picos de diferentes intensidades en ángulos de difracción característicos. El ángulo de difracción o la posición de los picos está determinado por la simetría y el tamaño de la celda unitaria mediante la ley de Bragg, mientras que las intensidades de los picos se relacionan con la naturaleza y la disposición de los átomos dentro de la celda unitaria del material cristalino (ver figura 15) De esta manera, XRD produce patrones de posiciones de picos e intensidades relativas que caracterizan diferentes estructuras cristalinas y permiten identificar su presencia en muestras desconocidas. [87] Los patrones de difracción de rayos X (XRD) de los sistemas se obtuvieron usando un difractómetro de polvo PANalytical - X'PERT PRO MPD que opera en geometría Bragg-Brentano con Cu-K α (40 kV y 30 mA) y monocromatización secundaria. La recolección de datos se llevó a cabo en el rango 2θ de 10-70°, con un tamaño de paso de 0.02 °, una rendija divergente de 1.0° y un tiempo de permanencia de 10 segundos. La identificación de fases se realizó mediante la búsqueda de compuestos inorgánicos en la base de datos del archivo de difracción de polvos ICDD, con la ayuda de archivos JCPDS.

5.1.2.3. Microscopia electrónica de barrido.

Para conocer la morfología de las partículas en la caracterización de los cementantes en polvo se colocó la muestra sobre una cinta de grafito, la cual estuvo adherida a un porta muestras metálico durante todo el ensayo, una vez el cementante quedo depositado se procedió a quitar el exceso de polvo por medio de un soplete para finalmente introducir el portamuestras al microscopio electrónico de barrido (Ver figura 16).



Figura 16. Microscopio electrónico de barrido SEM Hitachi serie SU 8020.

Este equipo entra en vacío y a continuación se genera un haz de electrones que incide sobre la probeta produciendo reacciones con los átomos de la muestra generando que algunos electrones que escapan de la muestra son detectados para producir variaciones de señal por el efecto de la superficie de la muestra y de la aceleración de los átomos la imagen de la muestra.

3.2.1 Ensayos físico - mecánicos en las materias primas.

Con el fin de conocer el comportamiento físico mecánico de las materias primas utilizadas en esta investigación se procedió a realizar ensayos que se describen a continuación.

5.1.3.1. Distribución de tamaño de partícula.

Con el fin de conocer la granulometría de los materiales cementantes utilizados en esta tesis, se procedió a llevar el material en polvo a un analizador de tamaño de partículas Microtrac modelo S3500 (ver figura 17), colocando la muestra dentro del equipo en una solución de alcohol isopropílico, dicha muestra a tres diodos láser rojos colocados con precisión permitieron detectar los tamaños de partículas de los materiales para después procesarlo en el software Microtrac Flex V10.6.1.



Figura 17. Analizador de partículas Microtrac S3500.

5.1.3.2. Densidad de los cementantes por frasco de Le Chaterlier y por picnómetro de helio.

La densidad de los cementantes utilizados en este trabajo con el fin de ser usadas en los procesos de diseño de mezclas para morteros y concretos, esta

propiedad se obtuvo mediante la metodología descrita en la ASTM C188 - 09 (Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement), en la cual el material se lleva a un frasco de Le Chatelier graduado, cuyo interior tiene kerosene hasta un nivel volumétrico predeterminado, el cual cambia cuando se agrega cierta cantidad de material, al ocurrir este fenómeno físico se puede obtener por el volumen de la muestra siguiendo el principio de Arquímedes, de tal forma que conociendo la masa del material utilizado en el ensayo y el volumen que ocupa dentro del ensayo se puede calcular la densidad de la muestra (ver figura 18), los resultados de este ensayo se corroboraron con el picnómetro de helio, el cual utiliza la ley de Boyle-Marriotte aplicada al comportamiento de los gases ideales, este procedimiento se realiza midiendo la caída de presión producida cuando a un gas ideal que está dentro de una cámara de referencia, se le permite fluir a otra cámara con la muestra a ensayar. Conociendo previamente el volumen de ambas cámaras se plantea que hay una relación entre la caída de presión y el volumen de la muestra estudiada, permitiendo mediante este principio obtener la densidad del material. Los valores obtenidos mediante las dos técnicas resultaron ser muy similares.



Figura 18. Densidad de los cementantes mediante: (a) frasco de Le Chaterlier, (b) Picnómetro de helio.

5.1.3.3. Finura de los cementantes por medio de la malla N325.

Para determinar la finura de los materiales cementantes se siguió el procedimiento descrito en la normativa ASTM C430 - 17 (Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μm (No. 325) Sieve), el procedimiento de ensayo consiste en colocar 1 g del material dentro de una malla 325 totalmente seca, a la cual posteriormente se le suministra un roseado de agua a una presión de 69 ± 4 kPa, generando una acción de lavado del material, después de este paso de termina el lavado con 50 ml de agua destilada para finalmente llevar al horno el tamiz con el objeto de conocer el peso del material que queda en la malla y así obtener mediante los cálculos respectivos al finura del cementante (ver figura 19).



Figura 19. Finura de los cementantes mediante la malla 325.

5.1.3.4. Consistencia de los cementos.

Con el fin de conocer la consistencia del cemento CPO y CSA se procedió a tomar el procedimiento descrito en la ASTM C187 - 16 (Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste), la cual indica que para obtener este parámetro se debe mezclar la pasta de cemento según lo establece la ASTM C305 - 20 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, una vez que se mezcló la pasta se procedió a llevar este material a un anillo cónico para formar una probeta que sirvió para obtener la consistencia normal del cemento, la cual se obtuvo penetrando la pasta de esta probeta troncocónica con la sonda de Tetmayer 10 mm, indicando esto, que se tuvo el agua óptima para que la pasta tenga consistencia normal (ver figura 20).



Figura 20. Consistencia del cemento.

El tiempo de fraguado de los cementos se obtuvo siguiendo la ASTM C191 - 19 (Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle), en esta normativa se establece que para obtener el tiempo de fraguado inicial y final de los cementos estudiados, se deberá penetrar una pasta de cemento fabricada según la ASTM C305 con el aguja de 1 mm de diámetro del aparato de Vicat 25 mm para definir el fraguado inicial y alrededor de cero milímetros para obtener el fraguado final (ver figura 21).



Figura 21. Tiempos de fraguado inicial y final de los cementos.

Para caracterizar los cementos, una de las propiedades más importantes es la resistencia a la compresión. Para obtenerla se tomó como base la norma ASTM C109 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimen)) para la cual se fabricó el mortero siguiendo el procedimiento de mezclado de la ASTM C305. Una vez se obtuvo la mezcla se continuó con la medida de fluidez y la fabricación de los especímenes, para después curar las muestras las cuales finalmente se llevan al ensayo de resistencia a la compresión uniaxial a los 7 y 28 días de curado.

5.1.3.5. Índice de actividad resistente de los MCS.

Para llevar a cabo los índices de actividad resistente se siguieron las recomendaciones de las normativas ASTM según el material cementicio suplementario (MCS) a estudiar, en el caso de la ceniza volante, el metacaolín, la caliza, y puzolana volcánica se siguió la norma ASTM C311/C311M - 13 (Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete), para la escoria de alto horno, se siguió la C989/C989M - 14 (Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars) y para la Microsílice se siguió la ASTM C1240 - 15 (Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures). Cada una de estas normativas se adoptaron para determinar el IAR, el cual consistió básicamente en fabricar morteros con el cemento

sulfoaluminoso y el MCS en los reemplazos especificados por la normativas ASTM C1240, 618 y 989, y, los cuales fueron del 10%, 20% y del 50% respectivamente. Una vez que se fabricó la mezcla de mortero se procedió a buscar la fluidez de acuerdo a las normativas anteriormente mencionadas para finalmente fabricar los cubos de mortero de 5x5x5 cm. Estas probetas se sometieron a curado hasta el día de su falla que para obtener el IAR fue de 7 y 28 días. Una vez que se obtuvieron las resistencias se procedió aplicar la ecuación 15, para obtener el IAR:

$$\text{Indice de actividad resistente del cemento} = \frac{A}{B} \times 100 \quad (15)$$

De donde:

A= Promedio de resistencias de las probetas del material cementicio suplementario en MPa.

B= Promedio de resistencias de las muestras de la referencia (cemento) en MPa.

5.1.3.6. Densidades y absorciones de los agregados gruesos y finos.

Para obtener las densidades y las absorciones de los agregados finos y grueso se siguieron las recomendaciones de las ASTM C128 – 15 (Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate) y ASTM C127 - 15 (Standard Test Method for Relative Density Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate). Para las cuales se preparó la muestra primero dejándola 24 horas antes en saturación para después llevar cierta cantidad de masa a estado saturado superficialmente seco, después esta muestra se llevó al horno para con el fin de obtener el peso seco, con el objeto de obtener los valores para los cálculos de absorción de los agregados, por otro lado, durante el procedimiento de los ensayos el material se llevó a un estado masa saturada lo que proporcionó la posibilidad de obtener la densidad.

5.1.3.7. Pesos unitarios sueltos y compactados de los agregados.

Para obtener el peso unitario suelto y compactado de los agregados, se siguió lo descrito en la ASTM C29 (Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate). Con base a esta normativa en el caso del peso unitario suelto se llenó el recipiente con el material y se tomó el valor del peso que ocupa ese recipiente de cierto volumen conocido para obtener este parámetro. Para el peso unitario compactado antes de la prueba previamente determino el volumen del recipiente del ensayo para después proceder a llenar el equipo con tres capas del agregado, compactando cada capa con 25 penetraciones con una varilla de 5/8 in de diámetro y punta redondeada, una vez realizada se terminó con la tercera capa se procedió a tomar la masa que ocupó el agregado en el volumen conocido para obtener el peso unitario compactado de los agregados.

5.1.3.8. Parámetros de la granulometría de los agregados finos y gruesos.

En el caso de la granulometría se siguió las especificaciones de la normativa ASTM C33/C33M-13 (Standard Specification for Concrete Aggregates) y de la ASTM C136 / C136M - 19 (Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates), en las cuales describen los límites para cada uno de los parámetros del control de calidad de los agregados y el procedimiento para obtener la curva granulométrica de los dos tipos de agregados. De la información obtenida de las normativas anteriores se puede determinar el módulo de finura de la arena y el tamaño máximo y máximo nominal.

Al haberse caracterizado toda la materia prima a utilizarse en esta tesis doctoral, se procedió con los siguientes pasos de este trabajo que consistió en elaborar mezclas de pastas de cementantes, morteros y concretos que fueron evaluados ante diferentes parámetros tanto desde el punto de vista de su estado plástico como endurecido.

5.2 FASE 2 – PASTAS DE CEMENTO.

En esta fase se realizó un estudio para conocer la sinergia entre el cemento sulfoaluminoso y distintos materiales cementicios suplementarios en sistemas binarios y ternarios, además también se estudió el efecto en diferentes propiedades en sistemas ternarios en donde además de los MCS se utilizó CPO.

El proporcionamiento para cada una de las mezclas de esta fase se realizó por peso, definiendo siempre las cantidades de cada uno de los materiales de la mezcla con base al porcentaje de reemplazo definido, es así que cuando un sistema tenía un reemplazo del 15% de ceniza volante, la cantidad total de cementante se multiplicaba por ese porcentaje para obtener la cantidad en peso de CV, tal y como se muestra en el ejemplo de la dosificación(CCVCL155) que se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3. Proporcionamiento sistema CCVCL55

Mezcla C80% + CV15% + CL5%	
Material	Peso
CSA	800 g
Ceniza Volante	150 g
Caliza	50 g
Agua	400 g
Cantidad de cementante	1000 g
Relación Agua/Cemento	0.4

5.2.1 Etapa 1 – Pastas de cemento – (CSA+CV), (CSA+CV+CL) y (CPO+CV+CL)

En esta etapa 1, se trabajaron 7 sistemas con diferentes relaciones agua/material cementante (0.4 y 0.5) en las cuales se combinó cemento CSA y diferentes niveles de reemplazo de Ceniza Volante y Caliza, de igual manera, en esta fase también se quiso conocer la incidencia de la CV y de la CL en la resistencia del CPO para las mismas relaciones A/Cte estudiadas en el CSA. En la figura 22, se puede observar el diagrama de flujo de la fase 1.

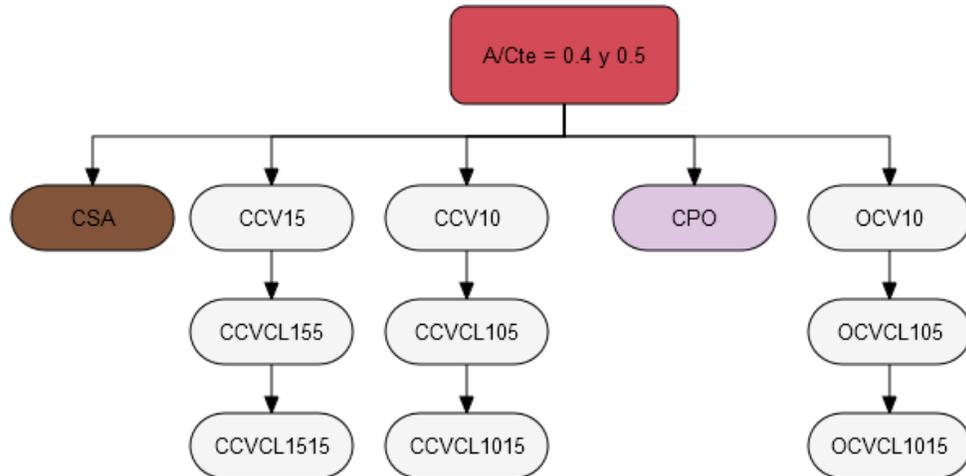


Figura 22. Diagrama de flujo etapa 1.

La nomenclatura de las mezclas fabricadas en la fase 1 se puede observar en la tabla 4.

Tabla 4. Nomenclatura de las mezclas de la etapa 1.

Mezcla	Composición de la mezcla
CSA	Cemento sulfoaluminoso 100% CSA
CCV15	85% CSA+ 15% CV
CCVCL155	80% CSA+ 15% CV + 5%CL
CCVCL1515	70% CSA+ 15% CV + 15%CL
CCV10	90% CSA+ 10% CV
CCVCL105	85% CSA+ 10% CV + 5%CL
CCVCL1015	75% CSA+ 10% CV + 15%CL
CPO	Cemento Portland Ordinario 100% CPO
OCV10	90% CPO + 10% CV
OCVCL105	85% CPO + 10% CV + 5%CL
OCVCL1015	75% CPO + 10% CV + 15%CL

CV: Ceniza Volante
CL: Caliza

En esta fase del proyecto se investigó la sinergia entre el cemento de sulfoaluminoso de calcio y los materiales cementicios suplementarios, esto desde el punto de vista de la resistencia a la compresión, pruebas que a continuación se describirán de manera más detallada.

En cuanto a la resistencia a la compresión este estudio se basó en primer lugar en conocer cómo era la interacción entre el cemento CSA, la caliza y la ceniza volante para dos relaciones agua/material cementante, para esto se procedió a preparar las materias primas para su uso. En el caso del cemento CSA y la caliza estos no requirieron de ninguna preparación previa, caso contrario para usar la ceniza volante se tuvo primero que pasar este material por la malla número 100 con el objeto de quitarle las partículas de carbón superiores a este tamaño de malla. Una vez que las materias primas estuvieron listas se procedió a homogeneizar los polvos mezclando a velocidad baja (140 ± 5 r/min) durante 4 minutos, luego se dejó en reposo la homogeneización por un tiempo de 2 minutos, lapso en el cual se mezcló a mano para revolver los polvos del fondo del recipiente, al finalizar este tiempo se mezcló por 4 minutos adicionales. Una vez homogeneizado el material se procedió a fabricar cubos de 5cm x 5 cm x 5 cm adaptando la misma metodología de mezclado de la ASTM C305. En cuanto a forma de compactación se siguió la forma de compactar morteros de cemento descrita en la ASTM C109, al terminarse el proceso de fabricación los cubos de pastas de cemento estos recubrieron con una película de plástico por 24 horas a 23 ± 3 °C, al finalizar el pre curado las muestras se llevaron a un recipiente plástico para suminístrales el curado permanente hasta el día del ensayo.

Una vez las probetas prismáticas cumplían la edad de ensayo las muestras eran extraídas del tanque de curado, se tomaba las medidas de sus lados y se las cubrió con un trapo húmedo hasta el momento del ensayo, esto para evitar pérdida excesiva de humedad de la muestra, luego era llevadas una máquina de compresión (ver figura 23) la cual aplicaba una carga uniaxial de 950 N/s hasta el momento de la falla. El valor obtenido de carga última fue dividido entre el área de incidencia de la carga, que para este caso fue de alrededor de 25 mm^2 con el objeto de obtener el esfuerzo a compresión de las pastas de cemento (f_p)(Ecuación 16). Para obtener el valor promedio de la resistencia a la compresión se tomaron 4 valores resistencia de probetas hermanas, dichos resultados puede ser observados en el capítulo 5 correspondiente.

$$f_p = \frac{\text{Carga de Falla}}{\text{Área de incidencia de la carga}} \quad [MPa] \quad (16)$$



Figura 23. Ensayo de resistencia a la compresión de pastas de cementantes.

5.2.2 Etapa 2 – Pastas de cemento – (CSA-CV-CL-EH-MS-PV)

Para esta etapa se realizaron diferentes combinaciones entre el CSA y distintos materiales cementicios suplementarios con el fin de conocer la iteración que se presenta entre los MCS y el cemento estudiado respecto a la resistencia a la compresión de pastas (ver figura 24).

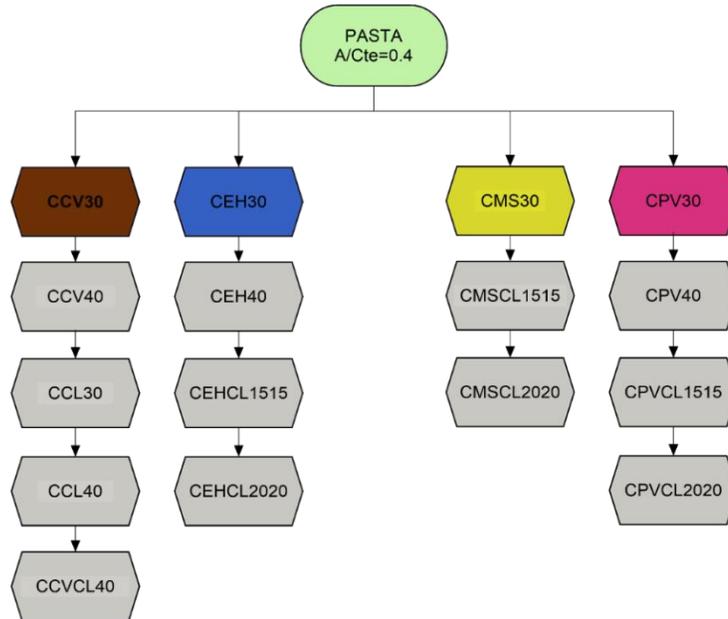


Figura 24. Diagrama de flujo etapa 2.

La nomenclatura de los sistemas analizados en esta fase se muestra en la tabla 5. En la cual se observa combinaciones del cemento sulfoaluminoso con 4 materiales cementicios suplementarios en sistemas binarios de 30 y 40 % de reemplazo del cemento en peso y mezclas ternarias de cada uno de los MCS en compañía de CSA y la caliza en reemplazos totales de 15%MCS y 15% caliza y 20% MCS y 20% caliza, esto se hizo con el objeto de conocer la interacción de la caliza con la MCS en diferentes porcentajes.

Tabla 5. Nomenclatura de las mezclas de la etapa 2.

Mezcla	Composición de la mezcla
CCV30	70% CSA+ 30% CV
CCV40	70% CSA+ 30% CV
CCL30	70% CSA+ 30% CL
CCL40	70% CSA+ 30% CL
CCVCL2020	70% CSA+ 20% CV + 20% CL
CCV10	90% CSA+ 10% CV
CEH30	70% CSA+ 30% EH
CEH40	70% CSA+ 40% EH
CEHCL1515	70% CSA+ 15% EH + 15% CL
CEHCL2020	70% CSA+ 20% EH + 20% CL
CMS30	70% CSA+ 30% MS
CMSCL1515	70% CSA+ 15% MS + 15% CL
CMSCL2020	70% CSA+ 20% MS + 20% CL
CPV30	70% CSA+ 30% PV
CPV40	70% CSA+ 40% PV
CPVCL1515	70% CSA+ 15% PV + 15% CL
CPVCL2020	70% CSA+ 20% PV + 20% CL

CV: Ceniza Volante
 CL: Caliza
 EH: Escoria de alto horno
 MS: Microsilíce
 PV: Puzolana Volcánica

Para las mezclas mostradas en la anterior tabla, se evaluaron 4 edades (1,3,7 y 90) para conocer la evolución de la resistencia a la compresión de cubos de 5x5x5 cm, siguiendo la misma metodología de mezclado pre curado y curado desarrollado en los especímenes de la fase 1.

5.2.3 Etapa 3 - Pastas de cemento - (CO-COCV-COCL-COEH-COMS-COPV-COMK)

En la etapa 3 se estudió el efecto en mezclas ternarias de la combinación CSA+OPC+MCS tal y como se puede observar en la figura 25.

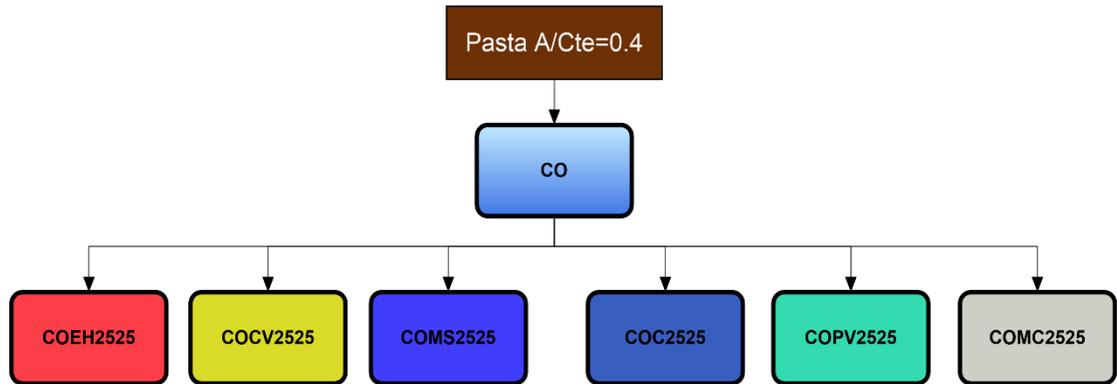


Figura 25. Diagrama de flujo de combinación CSA+OPC+MCS.

Para la cual se fabricaron cubos con una relación agua material cementante de 0.4, siguiendo los mismos procedimientos de las fases 1 y 2, estas muestras se fallaron a los 1, 7, 28 y 90 días. La composición de cada una de los sistemas estudiados se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Nomenclatura de las mezclas de la etapa 3.

Mezcla	Composición de la mezcla
CO	50% CSA + 25% CPO
COEH2525	50% CSA + 25% CPO +25 EH
COCV2524	50% CSA + 25% CPO +25 CV
COMS2525	50% CSA + 25% CPO +25 MS
COC2525	50% CSA + 25% CPO +25 C
COPV2525	50% CSA + 25% CPO +25 PV
COMC2525	50% CSA + 25% CPO +25 MC

CV: Ceniza Volante
 CL: Caliza
 EH: Escoria de alto horno
 MS: Microsílice
 PV: Puzolana Volcánica
 CPO: Cemento Portland ordinario
 MC: Metacaolín

5.2.1.4.1 Etapa 4 - Estudio de la consistencia, tiempos de fraguado, temperatura, retracción por secado y calorimetría isotérmica de conducción en pastas de cemento.

Una vez se realizaron los análisis de los resultados de resistencia a la compresión se procedió a estudiar ciertas mezclas de pasta desde su consistencia, tiempos de fraguado y la retracción por secado con el fin conocer su comportamiento ante este tipo de parámetros.

5.2.4.1 Trabajabilidad de las pastas.

Para determinar la extensibilidad de las mezclas respecto a los efectos del reemplazo de la puzolanas estudiadas y del cemento CPO por CSA, se trabajaron los sistemas que se pueden observar en la tabla 7, en la cual se observa mezclas en donde se usó ácido cítrico como retardante de fraguado y un aditivo superplastificante base policarboxilato por cada sistema. Una vez que se definió el proporcionamiento de los materiales, se procedió a homogenizar los polvos y a mezclar cada uno de los sistemas tal y como se describe en la ASTM C305, es importante aquí mencionar en el ácido cítrico fue combinado con el agua antes del mezclado y que el plastificante se agregó durante el periodo de reposo.



Figura 26. Ensayo de pérdida de extensibilidad de las pastas de cemento.

Al finalizar esta etapa se comenzó con el proceso de vaciado de la pasta llenando en una sola capa un anillo cónico (tiempo de fraguado) de diámetro superior e inferior de 60 y 70 mm respectivamente, con una altura de 40 mm, al llenarse el molde se enrasaba y se procedía a levantarlo lentamente a los 5 minutos después del primer contacto del cementante con el agua de mezcla, en este punto se midió la extensibilidad y la altura entre la superficie del superior de la anillo y la pasta de

cemento (ver figura 26) para conocer su asentamiento a los 5 minutos, al terminar este proceso la pasta se devolvía a la olla de mezclado y era remezclada por 30 segundos para volver a tomar datos de extensibilidad, este procedimiento se estableció para la toma de datos respecto a los tiempos de 5, 15, 25, 35, 45 y 60 minutos.

Tabla 7. Mezclas analizadas para trabajabilidad de pastas.

Mezcla	Composición de la mezcla
C-AC	100% CSA (AC)
C-(AC+SP)	100% CSA ((AC+SP))
CCL-AC	70% CSA + 30% CL (AC)
CCL-(AC+SP)	70% CSA + 30% CL (AC+SP)
CMS-AC	70% CSA + 30% MS (AC)
CMS-(AC+SP)	70% CSA + 30% MS (AC+SP)
CPV-AC	70% CSA + 30% PV (AC)
CPV-(AC+SP)	70% CSA + 30% PV (AC+SP)
CCV-AC	70% CSA + 30% CV (AC)
CCV-(AC+SP)	70% CSA + 30% CV (AC+SP)
CO-AC	50% CSA + 50% OPC (AC)
CO-(AC+SP)	50% CSA + 50% OPC (AC+SP)
COMS-AC	50% CSA +25% OPC + 25% MS (AC)
COMS-(AC+SP)	50% CSA +25% OPC + 25% MS (AC+SP)
COC-AC	50% CSA +25% OPC + 25% CL (AC)
COC-(AC+SP)	50% CSA +25% OPC + 25% CL (AC+SP)
COPV-AC	50% CSA +25% OPC + 25% PV (AC)
COPV-(AC+SP)	50% CSA +25% OPC + 25%PV (AC+SP)
COCV-AC	50% CSA +25% OPC + 25%CV (AC)
COCV-(AC+SP)	50% CSA +25% OPC + 25%CV (AC+SP)
COEH-AC	50% CSA +25% OPC + 25%EH (AC)
COEH-(AC+SP)	50% CSA +25% OPC + 25%EH (AC+SP)
COMC-AC	50% CSA +25% OPC + 25%MC (AC)
COMC-(AC+SP)	50% CSA +25% OPC + 25%MC (AC+SP)

AC: Ácido cítrico (0.3% del peso del cemento)

SP: Superplastificante (4 cm³/kg del peso del cemento)

5.2.4.2 Tiempos de fraguado de pastas.

Para los tiempos de fraguado en las pastas se siguió la metodología establecida en la norma ASTM C 191, estándar que consiste en fabricar una mezcla de pasta de cemento siguiendo la metodología de mezclado de la ASTM C305, teniendo en cuenta la

misma forma de adición del ácido cítrico y del súper plastificante utilizada en el ensayo de trabajabilidad de pastas. Una vez que se tiene la pasta, esta mezcla se coloca en el anillo cónico y se penetra con la aguja de 1 mm de diámetro del aparato de Vicat hasta que se obtiene 25 mm de penetración, en este punto se tiene tiempo de fraguado inicial, en caso del tiempo de fraguado final, este se obtuvo cuando la aguja dejó una huella casi perceptible en la superficie endurecida de la pasta de cementante (ver figura 27).



Figura 27. Ensayo de tiempos de fraguado de las pastas de cemento.

Por la rapidez el fraguado de los sistemas estudiados, las medidas de penetración se tomaron cada 5 minutos, tiempo que se redujo cuando se estaba próximo a obtener fraguado inicial y final.

En la tabla 8, se pueden observar las mezclas a las cuales se le realizó el análisis de tiempos de fraguado, para este ensayo se obtuvieron los tiempos de fraguado inicial y final para mezclas si ningún tipo de aditivo químico o retardante, de igual manera se analizó mezclas con únicamente ácido cítrico y una mezcla con ácido cítrico y superplastificante.

Tabla 8. Mezclas analizadas para tiempos de fraguado inicial y final.

Mezcla	Composición de la mezcla
CSA	100% CSA
CCL	70% CSA + 30% CL
CMS	70% CSA + 30% MS
CPV	70% CSA + 30% PV
CCV	70% CSA + 30% CV
CO	50% CSA + 50% OPC
COMS	50% CSA + 25% OPC + 25% MS
COC	50% CSA + 25% OPC + 25% CL
COPV	50% CSA + 25% OPC + 25% PV
COCV	50% CSA + 25% OPC + 25% CV
COEH	50% CSA + 25% OPC + 25% EH
COMC	50% CSA + 25% OPC + 25% MC

5.2.4.3 Retracción por secado de pastas de cementante.

Con el objeto de conocer la incidencia de los diferentes sistemas que se pueden observar en la Tabla 8. Mezclas analizadas para tiempos de fraguado inicial y final. en cuanto a los cambios volumétricos a través del tiempo, se procedió a fabricar barras de pastas de cemento de 2.5 cm x 2.5 cm x 28.5 cm, la cuales sometieron a un proceso de inmersión por 10 días para posteriormente llevarla a un proceso de secado durante 28 días, en las cuales se midió el cambio de longitud de las barra llevándolas a un comparador de longitud tal y como se puede observar en la figura 28. En cada una de las medidas se controló la temperatura a 23 ± 2 °C y a $50 \pm 3\%$ de humedad relativa.



Figura 28. Cambios volumétricos por secado las pastas de cemento

5.2.4.4 Temperatura de las pastas de cementante.

Con el fin conocer las temperaturas que puede alcanzar el cemento sulfoaluminoso con diferentes variaciones con los MCS y el CPO, se procedió a realizar un montaje en donde por 24 horas se obtuvo registros del incremento de temperatura a través del tiempo. En este montaje se usó un termopar tipo K (níquel-aluminio), el cual se insertó en recipientes de 16 onzas de poliestireno expandido. Una vez que la pasta de cemento era fabricada de acuerdo a las disposiciones del ASTM C305 con la adición del AC y el SP, se procedió a colarla en los recipientes y sellar los mismos para garantizar que el termopar se quedara fijo en el centro de la probeta de tal manera que se pudiera obtener registros adecuados de temperatura. Los moldes de poliestireno fueron colocados dentro de una caja del mismo material, caja que se relleno con perlita de polietileno antes de proceder a sellarla. Las lecturas de temperaturas se adquirieron con una tarjeta de adquisición de datos NI-9213 con 16 canales de 24 bits de National Instruments, la cual se conectaba a un equipo de cómputo portátil para poder tratar los datos por medio de Labview. El montaje de este ensayo se puede observar en la figura 29.

En la tabla 9 se muestran las mezclas a las cuales se le realizaron los ensayos de temperatura.

Tabla 9. Mezclas analizadas para temperatura de pastas.

Mezcla	Composición de la mezcla
CSA	100% CSA
CCL	70% CSA + 30% CL
CMS	70% CSA + 30% MS
CPV	70% CSA + 30% PV
CCV	70% CSA + 30% CV
CO	50% CSA + 50% OPC
COMS	50% CSA + 25% OPC + 25% MS
COCL	50% CSA + 25% OPC + 25% CL
COPV	50% CSA + 25% OPC + 25% PV
COCV	50% CSA + 25% OPC + 25% CV

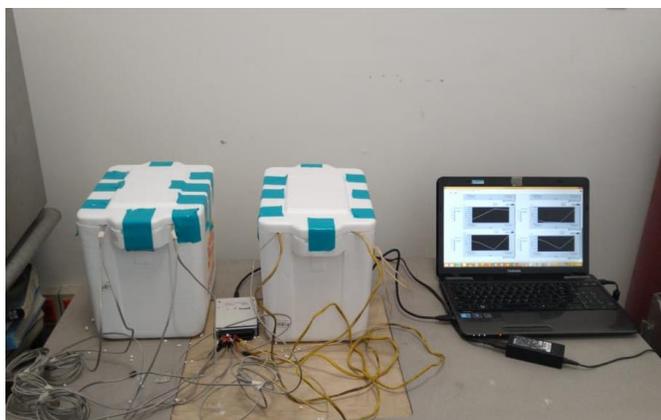


Figura 29. Montaje de temperatura de las pastas de cemento.

5.3 FASE 3 – MORTEROS BASE CSA+CPO+MCS.

En la segunda etapa de este estudio se concentra en la fabricación de morteros estudiando la resistencia y durabilidad.

En esta tesis se fabricaron morteros en combinaciones binarias y ternarias con el fin de conocer el comportamiento de este material ante diferentes tipos de curado y ante distintas propiedades de durabilidad. En la tabla 10, se muestran las diferentes combinaciones estudiadas.

Tabla 10. Mezclas de morteros base CSA.

Mezcla	Composición de la mezcla
CSA	Cemento sulfoaluminoso 100% CSA
CO50	20% CSA+ 20% CPO
CCL30	50% CSA+ 50% CPO
COCL2525	50% CSA+ 25% CPO + 25%CL
CCV30	70% CSA+ 30% CV
COCV2525	50% CSA+ 25% CPO+ 25%CV
CPV30	70% CSA+ 30% PV
COCV2525	50% CSA+ 25% CPO + 25%PV

En ese sentido, se realizó un diseño de mezclas el cual se basó siguiendo las especificaciones de morteros de la ASTM C109 en lo referido a la relación cemento:arena (1:2.75) especificado en los morteros bajo esta normativa. De igual forma se definió una relación agua/cemento de 0.4 para todas las mezclas estudiadas. En la tabla 11, se puede observar las cantidades finales de los materiales en peso obtenidas para un metro

cubico de mortero, dosificación que fue obtenida por volumen respecto a la fijación de la cantidad de cemento usado en el mortero fabricado.

Tabla 11. Mezclas para morteros.

Materiales	Mezcla (kg/m ³)							
	CSA	CO	CCL30	COCL2525	CCV30	COCV2525	CPV30	COPV2525
Cemento CSA	531	266	372	266	372	266	372	266
Cemento OPC	-	266	-	133	-	133	-	133
CL	-	-	159	133	-	-	-	-
CV	-	-	-	-	159	133	-	-
PV	-	-	-	-	-	-	159	133
Arena	1461	1461	1461	1461	1461	1461	1461	1461
Agua	212	212	212	212	212	212	212	212
Plastificante (L)	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12
Retardante (kg/m³)	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59

Al obtenerse las dosificaciones respectivas, se procedió fabricar el mortero siguiendo la metodología de mezclado mostrada en la tabla 12.

Tabla 12. Procedimiento de mezclas de morteros base CSA para el sistema de referencia.

Pasos	Tiempo		Procedimiento paso a paso
	(minutos : segundos)		
	Parcial	Acumulado	
1	00:00		Adicionar el agregado fino y aproximadamente el 50% del agua de mezcla.
2	01:00	01:00	Homogeneizar los agregados con el agua en la mezcladora
3	02:00	03:00	
4	02:00	05:00	Mezclar agregando el cemento y el resto del agua
	03:00	08:00	Periodo de reposo y adicionar el superplastificante
			Mezclado final del mortero
Final del proceso de mezclado			Descargar el mortero en una carreta y homogenizarlo para realizar los ensayos del mortero en estado fresco y para proceder a la fabricación de especímenes

En la tabla anterior se muestra cada uno de los pasos seguidos desde el momento en el cual se adiciona los materiales a la mezcladora, hasta cuando se comienza con la fabricación de los especímenes.

Una vez fabricadas las probetas, estas se sometieron a un proceso de precurado a 23°C y 50% de humedad relativa por 24 horas para

Curado al aire (CA) bajo condiciones ambientales. En este tipo de curado las muestras se dejaron expuestas al aire hasta el día del ensayo (ver figura 32)



Figura 32. Curado al aire

Curado un día de curado en inmersión y curado al aire (C1A). Al aplicar este tipo de curado se sometieron las probetas a un curado de un día en inmersión bajo las condiciones mencionadas anteriormente y después se sometieron las probetas a un curado al aire hasta el día del ensayo (ver figura 32).

Los ensayos realizados para evaluar el tipo de curado y las combinaciones binarias y ternarias entre el CSA, los MCS y el CPO en cada uno de los sistemas fabricados se describen a continuación:

5.3.1 Resistencia a la compresión.

En esta sección se estudió la resistencia a la compresión de morteros binarios y ternarios cuyos especímenes tiene como dimensiones 5 cm de diámetro por 10 cm de alto. Los cilindros se fabricaron en bachadas de 30 L siguiendo la metodología expuesta en la tabla 12.

Al cumplirse la edad de ensayos se cabeceó el espécimen para llevarlo a la falla.

5.3.2 Durabilidad del mortero base cementos sulfoaluminoso.

Con el fin de conocer el comportamiento de los morteros binarios y ternarios sometidos a diferentes tipos de curado desde el punto de vista de la durabilidad los especímenes fabricados se sometieron a diferentes ensayos tal y como se describen a continuación.

5.3.2.1 Resistividad eléctrica superficial.

La medida de resistividad eléctrica superficial (RES) se tomó de acuerdo a lo descrito por la AASHTO TP 358-15 (Standard method of test for Surface resistivity indication of concrete's ability to resist Chloride ion penetration), describe la manera para obtener la medida de resistividad superficial por el método de Wenner (o de las cuatro puntas) con una distancia entre puntas de 38 mm, la cual se obtiene en probetas de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud. Para la toma de medidas, las probetas se marcaron con líneas longitudinales que sirvieron como guías para la toma de datos, una vez se tuvo el cilindro marcado se colocó el equipo de resistividad sobre la superficie de la probeta de mortero con el fin de obtener la medida de RES la cual es mostrada en el display del equipo. En este ensayo se hace importante el tipo de curado del espécimen por tanto la evaluación de este parámetro eléctrico se tomó únicamente para las probetas que estaban sometidas al curado por inmersión y al curado en el cuarto de curado (ver figura 33).



Figura 33. Resistividad eléctrica superficial. a) Método de Wenner b) Método Bulk

Por otro lado, también se tomó medidas de la resistividad por el método bulk adaptando la norma ASTM C1876, para la cual fue posible utilizar la misma probeta que se usa en el método de Wenner. El ensayo consistió colocar la probeta entre dos placas metálicas las cuales cierran el circuito pudiéndose de esta manera conocer la resistividad del material estudiando a través del display del equipo de medición de resistividad.

Esta medida tiene en función de la geometría del material por lo sigue la siguiente ecuación

$$\rho = k * R \quad (17)$$

De donde ρ es la resistividad eléctrica, k es un factor geométrico que depende del tamaño y forma de la muestra, así como también de la distancia entre puntas en el dispositivo de ensayo y R es la resistencia del concreto.

Para los dos ensayos mencionados anteriormente se utilizó un equipo Resipod de Proceq con un rango de medida de 1 kOhm-cm a 1000 kOhm-cm.

5.3.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU), se midió siguiendo las recomendaciones de la ASTM C597 - 16 (Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete). Para el caso de este estudio la VPU se obtuvo en probetas de 10 x 20 cm sometidas a los cuatro tipos de curado antes mencionados anteriormente. Básicamente el ensayo consistió primero en calibrar el equipo para ofrecer confiabilidad de los datos a obtenerse, una vez realizada la calibración se procedió a colocar los transductores uno en frente del otro para tomar una medida directa del tiempo que demora la onda en pasar del transductor emisor al receptor, dicho valor se ve reflejado en el display de equipo y es el que se utilizó para calcular la VPU teniendo en cuenta la distancia entre los transductores (ver figura 34).



Figura 34. Velocidad de pulso Ultrasónico.

5.3.2.3 Carbonatación en morteros base cemento CSA.

Para medir la carbonatación del morteros binarios y ternarios sometidos a diferentes condiciones de curado, se adoptó la normativa EN13295:2004 (Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - determination of resistance to carbonation), en esta investigación se definió como temperatura del

ensayo 23°C, una concentración de CO₂ de 8% y una humedad relativa de 60±10 %, para todas las edades (7,14,21 y 28 días) del ensayo, el procedimiento de ensayo consistió en fabricar probetas prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm las cuales fueron llevadas a una cámara de carbonatación a la cual se le suministra el dióxido de carbono que incide en la durabilidad de las mezclas. Una vez se cumple la edad de ensayo se procedió a sacar las probetas y cortarlas manualmente con un cincel golpeando en las 4 caras hasta fracturar la probeta para después de 5 minutos agregar fenolftaleína, la cual nos permite a través del pH del material conocer la profundidad de carbonatación del sistema analizado (ver figura 35)



Figura 35. Carbonatación de morteros.

5.4 FASE 4 – CONCRETOS BASE CSA+CV Y CSA+CV+SAP.

Para la tercera etapa se estudiaron 6 mezclas de concreto en las cuales se combinó el cemento sulfoaluminoso y la ceniza volante teniendo en cuenta la fácil consecución de esta en el mercado, además se introdujo un polímero superabsorbente de uso comercial en estabilización de suelos, con el fin de observar las posibilidades de este tipo de material como agente de curado a edades muy tempranas de precurado esto debido a que comercialmente se especifica que se debería curar hasta 2 horas después de su fabricación y su incidencia en las propiedades estudiadas.

En la tabla 14, podemos observar las mezclas trabajadas en la fase 3. Una vez definida estas mezclas se procedió a realizar el diseño de mezcla

para este tipo de cemento obteniendo las cantidades mostradas en la tabla 13.

Tabla 13. Mezclas de concreto

Mezcla	Composición de la mezcla
CSA	Cemento sulfoaluminoso 100% CSA
CCV30	70% CSA+ 30% CV
CCV50	50% CSA+ 50% CV
CSAS	100% CSA + SAP
CCV30S	70% CSA+ 30% CV + SAP
CCV50S	50% CSA+ 50% CV + SAP

En la tabla 14, es posible observar la inclusión del polímero superabsorbente en un porcentaje de 0.3% del peso del cemento, este polímero tuvo una absorción de agua del 7 veces su peso, dato importante para obtener la cantidad de agua adicional, de igual manera la cantidad de retardante se utilizó a un 0.3 del peso del cemento.

Tabla 14. Proporciones de mezclas de concreto

Materiales	Mezcla (kg/m³)					
	CSA	CCV30	CCV50	CSAS	CCV30S	CCV50S
Cemento CSA	480	336	240	480	336	240
Ceniza Volante	-	144	240	-	144	240
Agua	192	192	192	202	202	202
Agregado Grueso	786	759	741	786	759	741
Agregado fino	886	856	836	886	856	836
SAP	-	-	-	1.44	1.44	1.44
Plastificante (L)	1.92	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12
Retardante (kg/m³)	1.44	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59

Después de obtener las proporciones se procedió a mezclar siguiendo la metodología de mezclado mostrada en la tabla 15. Al terminar el proceso de mezclado se procedió a realizar los ensayos de revenimiento de los concretos utilizando la norma ASTM C143/C143M (Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete), la cual consiste en llenar un cono (Cono de Abrams) en tres capas compactando cada capa con 25 penetraciones, para después subir el cono y medir el asentamiento que ha tenido el concreto entre

el centro desplazado del material y la altura del cono de Abrams utilizado en el ensayo.

Tabla 15. Procedimiento de mezclado del concreto de referencia

Pasos	Tiempo		Procedimiento paso a paso
	(minutos : segundos)		
	Parcial	Acumulado	
1	00:00		Adicionar los agregados gruesos, finos y aproximadamente el 50% del agua de mezcla.
2	01:00	01:00	Homogeneizar los agregados con el agua en la mezcladora
3	03:00	04:00	Mezclar agregando el cemento y el resto del agua
4	02:00	06:00	Periodo de reposo y adicionar el superplastificante
5	03:00	09:00	Mezclado final del mortero
Final del proceso de mezclado			Descargar el concreto en una carreta y homogenizarlo para realizar los ensayos del concreto en estado fresco y para proceder a la fabricación de especímenes

Desde el punto de vista de ensayos al concreto en estado endurecido de realizo ensayos de propiedades mecánicas y de durabilidad tal y como se va a describir a continuación.

5.4.1 Resistencia a la compresión de concretos.

Para la tercera etapa se estudiaron mezclas de concreto con la inclusión de un polímero superabsorbente de uso comercial en estabilización de suelos. Para evaluar el efecto de altos reemplazos de ceniza volante y la inclusión del SAP, el primer ensayo realizado fue el de la resistencia a la compresión para el cual se elaboraron cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, este ensayo se llevó a cabo tomando los procedimientos plateados por la normativa ASTM C31 (Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field), dejando los cilindros en un precurado de 24 horas a 23°C, para después someterlos a condiciones curado en el cuarto de humedad controlada (cuarto de curado) a una humedad relativa mayor al 95% y a una temperatura de 23°C, hasta el día (7, 28, 56 y 485 días) del ensayo de resistencia.

Una vez cumplida la edad de ensayo los especímenes se cabecearon tomando los procedimientos descritos en la ASTM C617 (Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens) con mortero de azufre para después llevarse el ensayo de resistencia a la compresión

según la ASTM C39 (Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens) (ver figura 36).



Figura 36. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto.

5.4.2 Retracción por secado del concreto.

Con el fin de conocer el cambio de longitud de los concretos estudiados en esta investigación se procedió a someter barras prismáticas de concreto de 7.5 cm x 7.5 cm x 28.5 cm al ensayo de retracción por secado adoptando la normativa ASTM C157/C157M-17 (Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete), para la cual se fabricaron la barras de dimensiones antes mencionadas en la cuales se dejaron inmersa puntas de acero inoxidable uniaxiales al centroide geométrico de la sección transversal las cuales ayudaran en toma del cambio de longitud de la barras, una vez fabricadas se dejaron en precurado por 24 horas para después someterlas a inmersión por 28 días, al terminar este periodo de curado la muestras de sacaron del tanque de curado y se movieron a un cuarto de secado con el fin de tomar la primera lectura de secado, las muestras se dejaron en este cuarto con el fin de seguir tomando lecturas a los 7,14,28, 56 y 485 días de edad del concreto. Las condiciones de toma de datos se mantuvieron una temperatura y humedad relativa de $23\pm 3^{\circ}\text{C}$ y 50% respectivamente (ver figura 37).



Figura 37. Retracción por secado de barras de concreto

5.4.3 Resistividad eléctrica superficial del concreto.

Para conocer este parámetro de durabilidad del concreto se fabricaron cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de longitud, a los cuales se les midieron a diferentes edades (28, 56 y 485 días) la resistividad eléctrica superficial por el método de Wenner y bulk tal y como se describió en la medida de resistividad del mortero del literal 5.3.2.1 de esta tesis (ver figura 38).

Los cilindros siempre estuvieron sometidos a curado por inmersión en un tanque de curado en el cual se le controló la temperatura a 23 ± 3 °C.



Figura 38. Resistividad eléctrica superficial. a) Método de Wenner b) Método Bulk

5.4.4 Velocidad de Pulso Ultrasónico superficial del concreto.

La velocidad de pulso ultrasónico del concreto se midió en los cilindros de 10 x 20 cm siguiendo el mismo procedimiento adoptado para cilindros de mortero del literal 5.3.2.2 de esta tesis (ver figura 39).



Figura 39. Velocidad de pulso ultrasónica del concreto.

5.4.5 Carbonatación del concreto.

Con el fin de conocer el efecto del CO_2 en el concreto, se procedió a someter probetas prismáticas de 7.5x7.5x28.5 cm a un ensayo de carbonatación acelerada con condiciones de temperatura de $23\pm 3^\circ\text{C}$, humedades relativas de 50 a 60% y a una concentración de CO_2 de 8 %, durante 28 días de ensayo, en el transcurso de la prueba se tomaron lecturas de profundidad de carbonatación usando fenolftaleína a los 7,14, 21 y 28 días de edad (ver figura 40).



Figura 40. Carbonatación acelerada del concreto

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A continuación, se muestra los resultados y el análisis de los mismos, del trabajo realizado en la fase 1 (caracterización de los materiales), en la fase 2 (Ensayos en pastas), en la fase 3(Ensayos en morteros) y en la fase 4(Ensayos en concretos) de esta tesis de investigación doctoral.

6.1 FASE 1- CARACTERIZACIÓN QUÍMICA- FÍSICA DE LOS MATERIALES.

A continuación, se muestra el análisis químico de los materiales haciendo uso de distintas técnicas de caracterización micro estructural con las cuales se pudo obtener diferentes parámetros que fueron usados para definir las potencialidades y desventajas de los materiales usados de igual forma también se caracterizó los materiales físicos mecánicamente, lo que condujo a la definición de proporciones en cada una de las mezclas estudiadas.

6.1.1 Cemento de Sulfoaluminoso de Calcio.

Para la elaboración de pastas, morteros y concreto, se utilizó cemento FRAGUAMAX del Grupo Cementos Chihuahua (ver ficha técnica anexo 1), para el cual desde el punto de vista de su composición química se sometió a la prueba fluorescencia de rayos X, obteniéndose en función de óxidos, los resultados se muestra en la tabla 16.

Tabla 16. Composición química del cemento de cemento CSA.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
% peso	14.73	16.29	0.94	47.66	1.42	14.17	0.21	0.57	0.63	0.1	0.04

De la tabla anterior es posible observar que a diferencia del cemento Portland convencional, este por las fases descritas anteriormente, presenta mayor cantidad en porcentaje de SO₃, lo que le permite en el proceso de fabricación contribuir en mayor medida en la generación de la fase yelimita mostrada en los patrones de difracción.

La caracterización por difracción de rayos X, muestra dos fases importantes la belita y la fase yelimita la cual puede encontrarse en los

ángulos 2theta 33.73, 41.63, 56.56 y 67.50 del difractograma mostrado en la Figura 41. Difracción de rayos X del cemento de sulfoaluminato de calcio, en donde de igual forma también fue posible definir otras fases que componen este tipo de cemento.

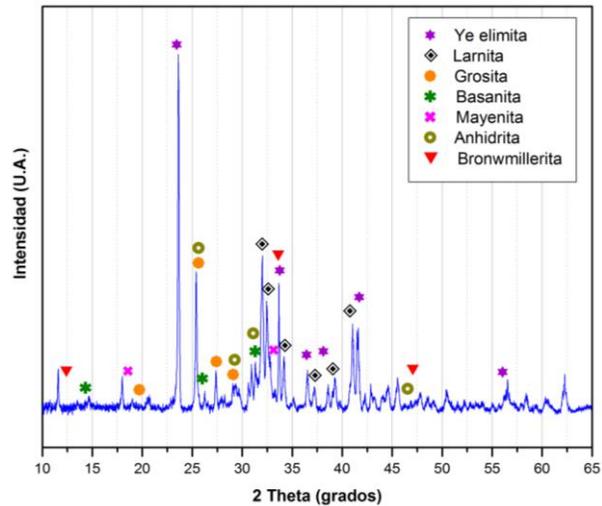


Figura 41. Difracción de rayos X del cemento de sulfoaluminato de calcio.

De igual manera, el con el objetivo de conocer el tamaño de partícula de este tipo de cemento, se realizó un análisis de distribución de tamaño de partículas (DTP), ver la figura 42, para el cual es posible observar que el 50 % de las partículas de cemento están alrededor de las 13micras, su D90 y D10 están aproximadamente en las 52 y 3 micras respectivamente.

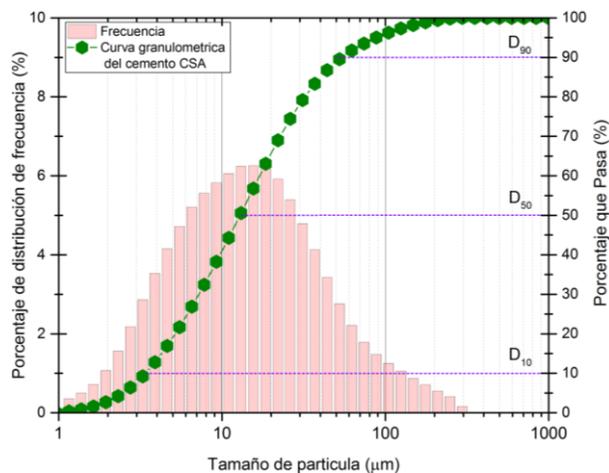


Figura 42. Distribución de tamaño de partícula cemento CSA.

El análisis anterior se acompaña de la figura 43, que muestra la morfología del cemento CSA, obtenida mediante microscopia electrónica

de barrido. En esta imagen se puede observar que el cemento CSA, presenta forma irregular, áspera redondeada.

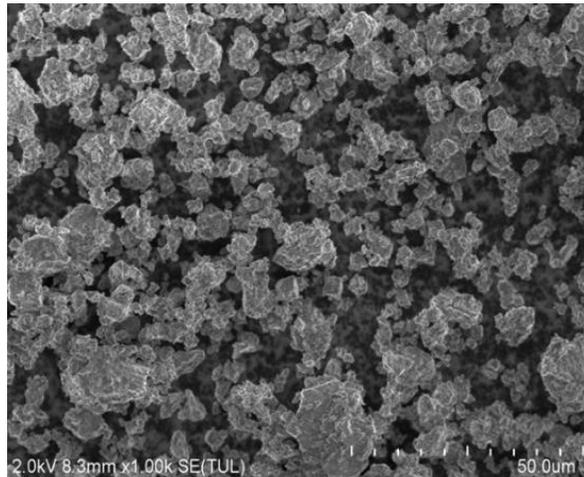


Figura 43. Morfología de las partículas de CSA.

En la figura 44 se puede observar la cuantificación de las fases presentes en el Cemento Sulfoaluminoso, lo que permite clasificarlo como un CSA belítico, debido al mayor porcentaje de belita respecto a la yelimita.

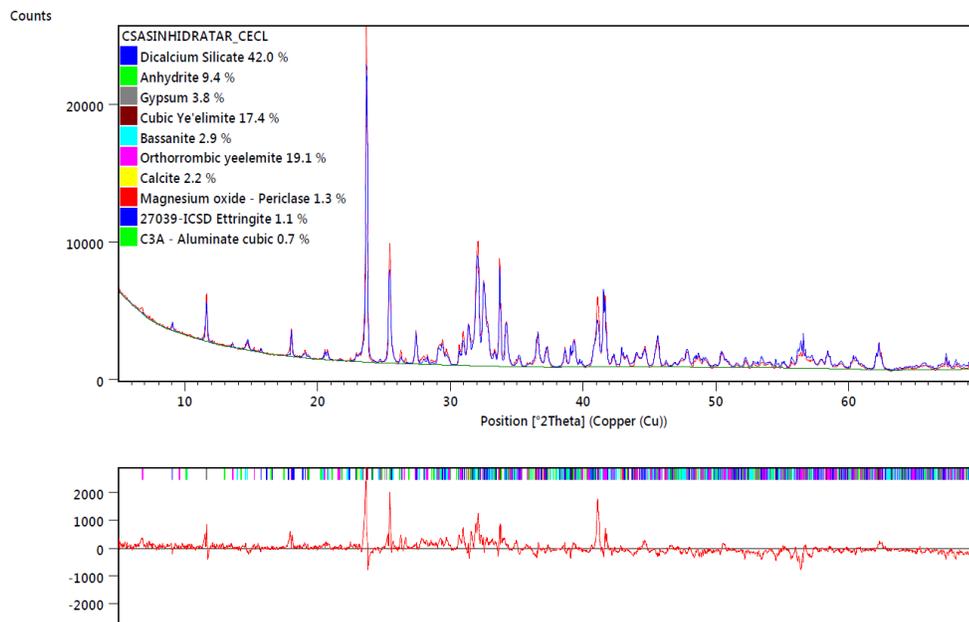


Figura 44. Rietveld del cemento Sulfoaluminoso CSA.

En la tabla 17 se observan las propiedades físico-mecánicas del cemento CSA, las cuales describen una densidad menor que las reportadas

por las fichas técnicas, esto posiblemente debido a una hidratación previa del cemento antes de los ensayos.

Tabla 17. Propiedades físico-mecánicas del cemento CSA

Material	Propiedad	
CSA	Densidad (g/cm ³)	2.91
	Finura Tamiz No 325	80
	Resistencia a la compresión (MPa)	
	7 días	44
	28 días	45
	Consistencia (%)	28
	Tiempos de fraguado (minutos)	
	Inicial	15
Final	25	

6.1.2 Cemento Portland Ordinario.

Con el objeto de conocer las características del cemento utilizado en la fase 2 de esta tesis, se procedió a realizar diferentes tipos de análisis de esta materia prima cuya denominación comercial es Cemento Portland CPO 40R de la compañía Cemex.

Para conocer la composición química en óxidos de este tipo de cemento, se realizó un análisis por fluorescencia de rayos X, en el cual se puede observar porcentajes similares a los que son reportados teóricamente para este tipo de cemento (ver tabla 18)

Tabla 18. Composición química del cemento de cemento CPO.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
% peso	19.82	4.97	1.99	61.47	1.48	4.53	0.5	0.81	0.24	0.1	0.04

De igual manera, para conocer las fases que componen el cemento Portland anhidro usado en esta investigación, se utilizó la técnica de difracción de rayos X, pudiéndose obtener el difractograma mostrado en la figura 45, en el cual se puede observar las fases (alita, belita, celita y felita) predominantes mayoritarias de este tipo de cementos.

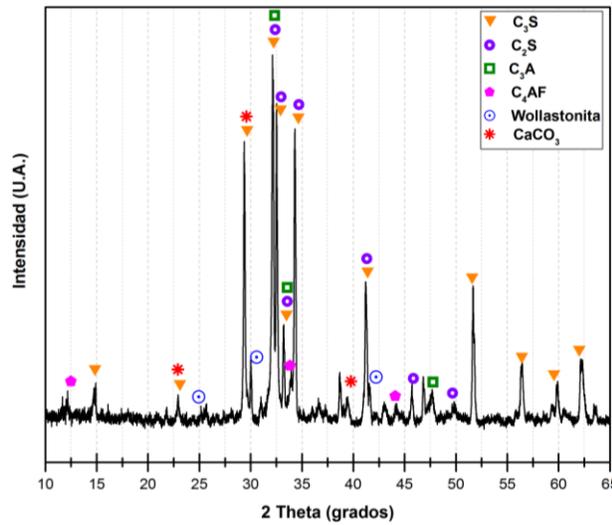


Figura 45. Difracción de rayos X del cemento Portland CPO 40 R.

En la figura 46 se muestra el análisis de distribución de tamaño de partícula del CPO. Para la cual se puede observar que más del 51 % de las partículas pasaron por el tamiz de 18.5 micras y que su D10 y D90 están entre 3.89 y 52 micras respectivamente.

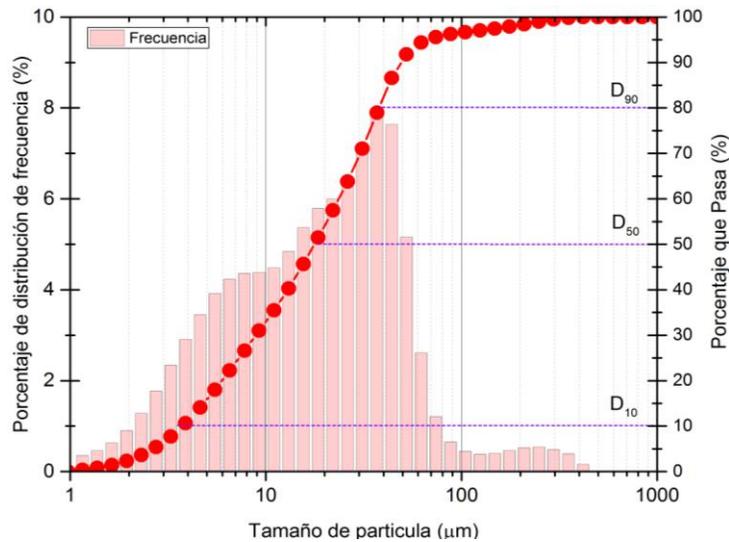


Figura 46. Distribución de tamaño de partícula cemento CPO.

El CPO desde el microscopio electrónico de barrido, muestra forma irregular alargada, tal y como es posible observar en la figura 47.

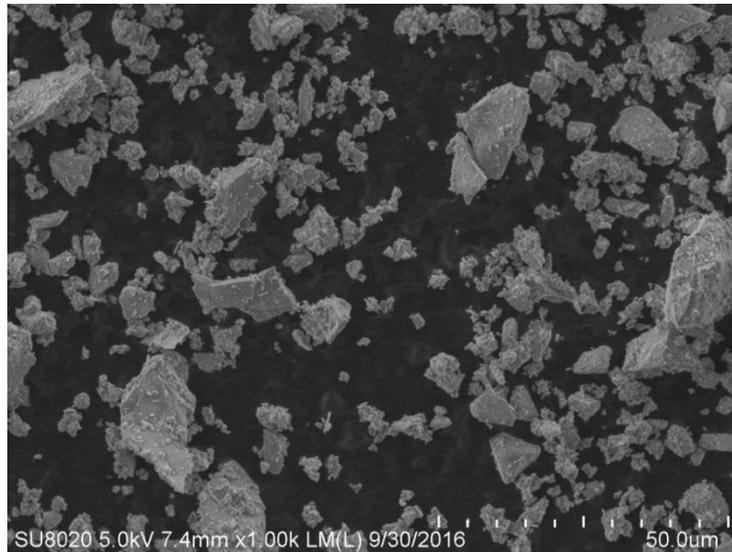


Figura 47. Morfología del cemento CPO

Tabla 19. Propiedades físico-mecánicas del cemento CPO

Material	Propiedad	
CPO	Densidad (g/cm ³)	3.01
	Finura Tamiz No 325	80
	Resistencia a la compresión (MPa)	
	7 días	40
	28 días	41
	Consistencia (%)	27
	Tiempos de fraguado (minutos)	
	Inicial	240
Final	360	

En la tabla 19, se muestra las propiedades físico-mecánicas del cemento Portland para las cuales se observa comportamientos normales de este tipo de cementos respecto a los reportados en las aplicaciones de campo.

6.1.3 Caliza.

Se utilizó como filler caliza (CL) de color blanco pasa tamiz 200, para la cual al igual que los anteriores materiales se le realizó una evaluación de la cantidad de óxidos presentes en peso por medio de FRX la cual indico la composición química mostrada en la tabla 20.

Tabla 20. Composición química de la caliza

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
% peso	0.3	0.06	0.03	56.57	0.34	-	-	-	-	0.01	-

De la tabla anterior se puede decir que el material presente tiene una alta cantidad de pérdidas por ignición, esto debido a la desaparición del carbonato de calcio producto de la alta temperaturas a la cual es sometida la muestra cuando se realiza el ensayo. También se puede evidenciar como óxido mayoritario único al óxido de calcio CaO.

Por otro lado, también se realizó el análisis por difracción de rayos X, cuyos resultados muestran como única fase principal la calcita (CaCO₃), esto es posible observarlo en la figura 48.

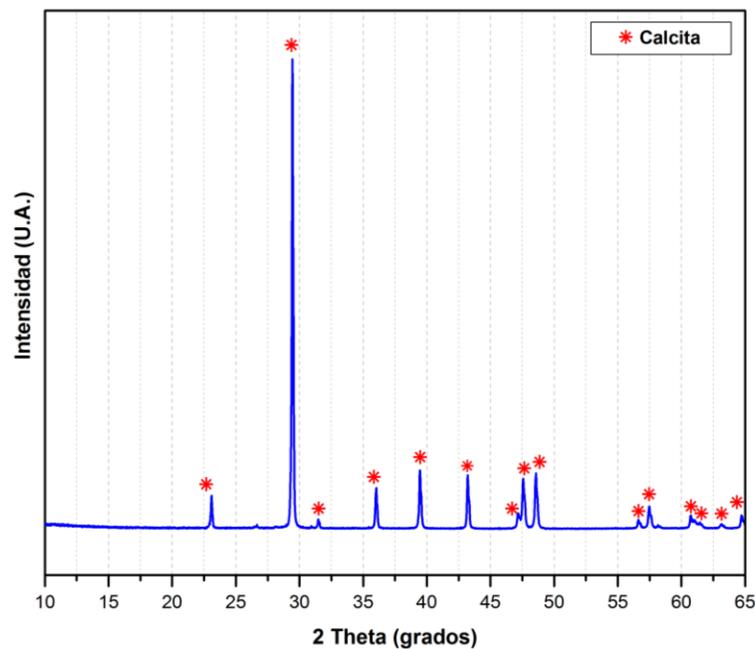


Figura 48. Difracción de rayos X de la Caliza.

Para este tipo de material se realizó un análisis del tamaño de partícula para la cual se muestra que el 50 % de las partículas que pasan están alrededor de 12 micras (ver figura 49), de igual manera es posible definir que sus tamaños D90 y D10 están entre 22 y 3 micras respectivamente.

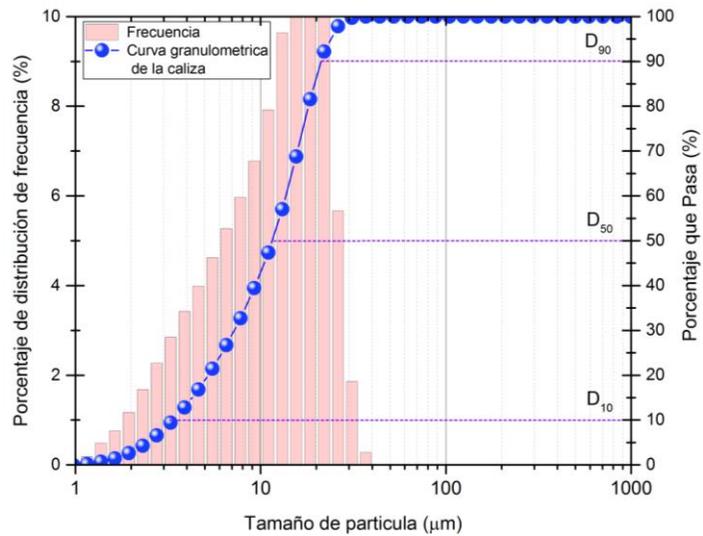


Figura 49. Distribución del tamaño de partícula de la caliza.

En el caso de la morfología de las partículas se puede observar en la figura 50, formas irregulares redondeadas con ciertas esquinas angulares.

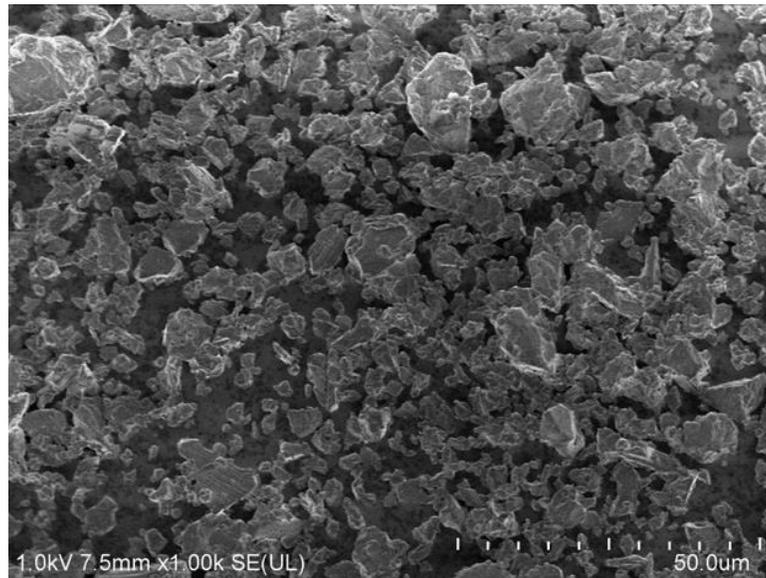


Figura 50. Imagen de la partícula de caliza.

Para este material se obtuvieron las propiedades físico mecánicas mostradas en la tabla 21, la cual muestra un índice de actividad resistente que cumplió con la especificación del 75% del índice de actividad resistente (IAR) que se define en la normativa ASTM C311, por lo que se

podría decir que este tipo de caliza tiene una buena compatibilidad con el CSA utilizado.

Tabla 21. Propiedades físico-mecánicas de la caliza.

Material	Propiedad	
Caliza	Densidad (g/cm ³)	2.67
	Finura Tamiz No 325	92
	Índice de Actividad Resistente (IAR) (%)	
	7 días	72
	28 días	76

6.1.4 Ceniza Volante.

Siendo la ceniza volante (CV), uno de los principales materiales cementicios suplementarios utilizados a nivel mundial en esta investigación se utilizó esta puzolana debido a que es uno de los materiales de más fácil consecución para ser utilizado como material puzolánico con el cemento. Para caracterizar este material a continuación se describe los siguientes ensayos que permite describir el tipo de ceniza con la cual se trabajó.

El material se caracterizó químicamente mediante fluorescencia de rayos X, arrojando como resultado que la ceniza tiene en la sumatoria de sus óxidos principales (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) un resultado de 88.14 % en peso, por lo que se la puede clasificar como clase F, lo que supera el mínimo establecido por la norma de 70 %, también se puede deducir de la tabla 22, que la ceniza utilizada en este estudio cumple con 0.42 % el máximo de SO₃ expuesto por la normativa ASTM C 618 de 5%.

Tabla 22. Composición química del cemento de la ceniza volante

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
% peso	59.9	24.3	3.98	2.72	0.78	0.42	0.54	0.54	0.86	0.04	0.01

Por otro lado, para este material se pudo definir mediante difracción de rayos X, la composición de la CV para la cual se puede observar en la figura 51, que la puzolana está compuesta por dos fases importantes la mulita y el cuarzo, lo que presenta concordancia con la información de la fluorescencia que se muestra teóricamente.

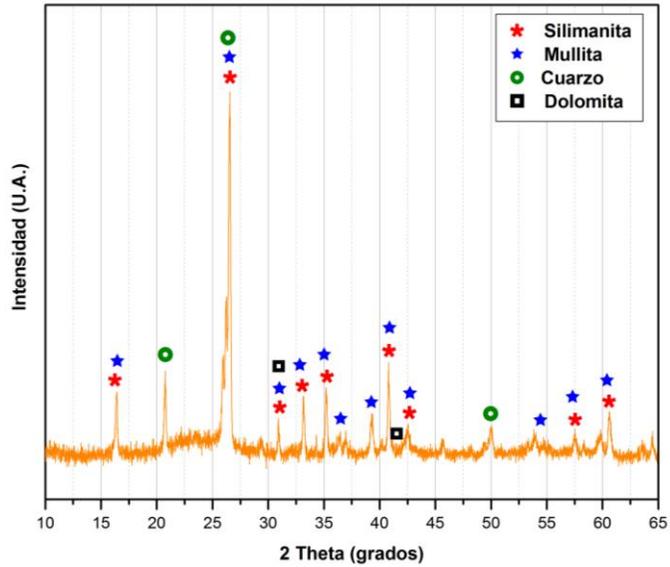


Figura 51. Difracción de rayos X de la ceniza volante.

De igual manera con el objeto de conocer el tamaño de partícula con la que se contaba respecto a la FA, esta se llevó a un ensayo de distribución de tamaño de partícula para la cual se obtuvo que el 50 % de las partículas está bajo las 37 micras, esto se puede evidenciar en la figura 52. De igual manera también se puede decir que el D10 y D90 se encuentra en las 11 y 88 micras respectivamente.

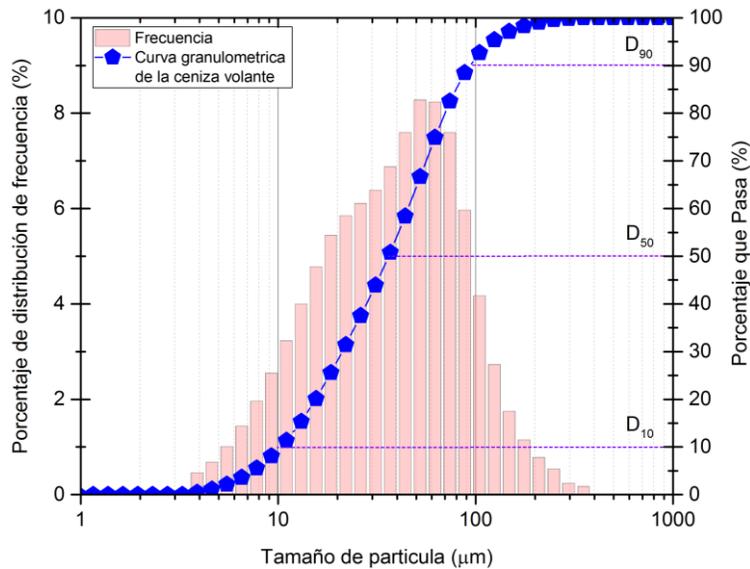


Figura 52. Distribución de tamaño de partículas de la ceniza volante.

La ceniza volante presenta en cuanto a su forma partículas redondeadas con esfericidad total, tal y como se puede ver en la figura 53.

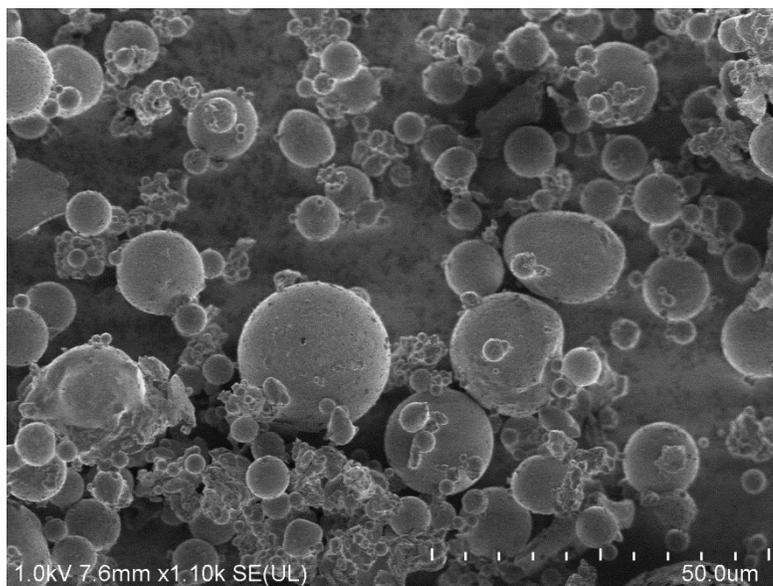


Figura 53. Morfología de las partículas de la ceniza Volante.

Por otro lado, en cuanto a las propiedades físico mecánicas de la ceniza volante, en la tabla 23 se presenta la densidad y la finura la cuales están dentro de lo mostrado convencionalmente en la teoría de la puzolanas, en el caso del IAR se puede observar un índice por debajo del 75% lo que indica una posible falta de reactividad de este material con el CSA, sin embargo es posible aseverar, que esta falta de sinergia presentada a edades tempranas, cambia a edades tardías mostrando una gran potencialidad en la resistencia a la compresión.

Tabla 23. Propiedades físico-mecánicas de la ceniza volante.

Material	Propiedad	
Ceniza Volante	Densidad (g/cm³)	2.01
	Finura Tamiz No 325	80
	Índice de Actividad Resistente (IAR) (%)	
	7 días	71
	28 días	72

6.1.5 Escoria de alto horno.

Siendo este tipo de escoria de escoria de alto horno (EH) una de las más utilizadas en los procesos de producción del cemento y uno de las de mayor incorporación en la formación cementantes que respondan con adecuados comportamientos cuando se combina con el Cemento Portland a continuación se describen sus características más utilizadas.

En la tabla 24 se muestran los porcentajes de composición química de la EH en óxidos.

Tabla 24. Composición química del cemento de la escoria de alto horno.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
% peso	39.36	9.11	0.81	37.47	5.02	2.91	0.52	0.91	2.63	0.01	0.99

La caracterización química de la EH, continúa con la figura 54, en la cual se muestra una clara amorficidad del material.

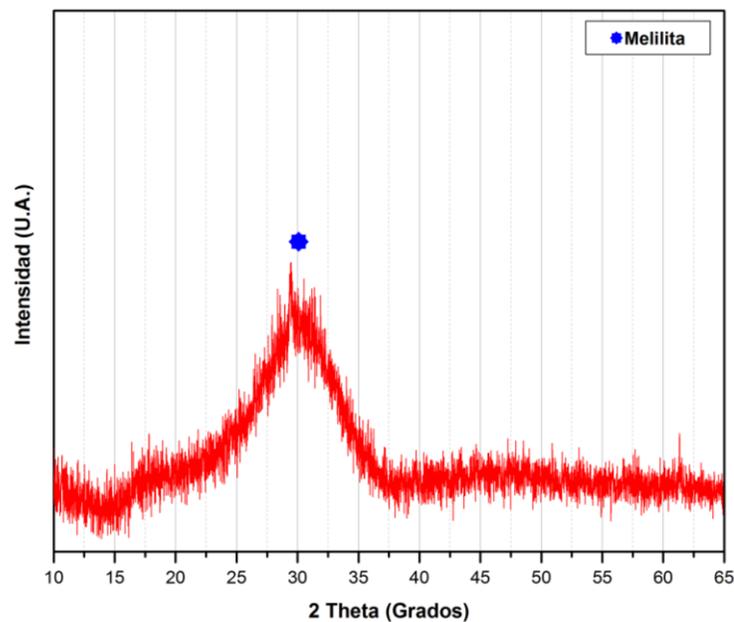


Figura 54. Difracción de rayos X de la escoria de alto horno.

Desde el punto de vista del tamaño de las partículas del material se tiene que el 50% del porcentaje que pasa este alrededor de las 24 micras tal y como se puede observar en la figura 55, de igual manera el D90 se encuentra en 74 micras y el D10 en 5.0 micras.

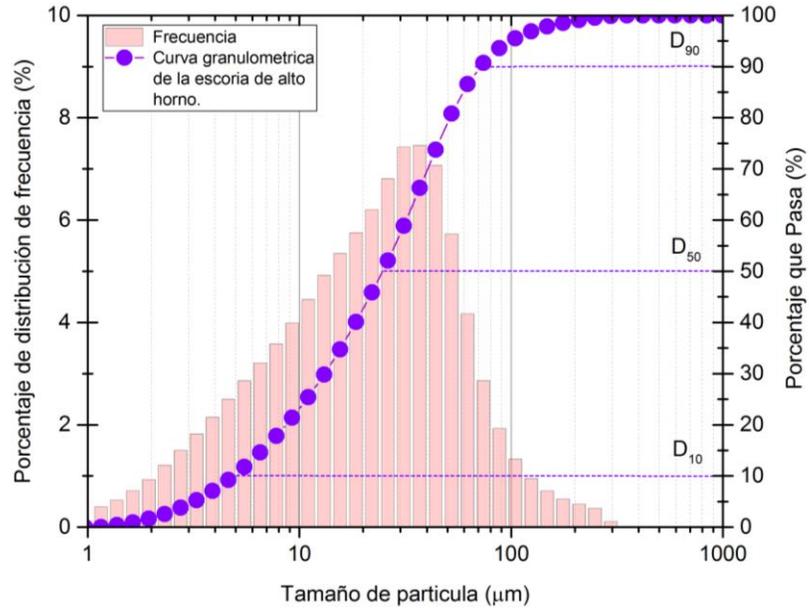


Figura 55. Distribución de tamaño de partícula de la escoria de alto horno.

En la figura 56, se puede observar la morfología de la escoria de alto horno, le cual muestra gran cantidad de partículas alargadas, de textura ligeramente lisa y forma angular.

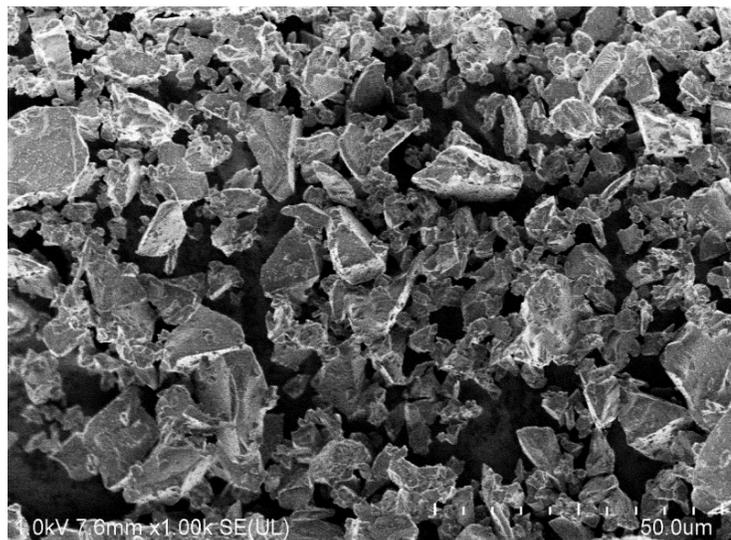


Figura 56. Morfología de las partículas de la escoria de alto horno.

Tabla 25. Propiedades físico mecánicas de la EH.

Material	Propiedad	
Escoria de Alto Horno	Densidad (g/cm ³)	2.85
	Finura Tamiz No 325	80
	Índice de Actividad Resistente (IAR) (%)	
	7 días	31
	28 días	36

En la tabla 25, se puede observar un índice de actividad resistente mucho menor al mínimo de 75%, respecto al cemento CSA, lo que indica una baja posibilidad puzolánica de este material al utilizarse en combinación con el cemento sulfoaluminoso.

6.1.6 Puzolana Volcánica (PV).

La puzolana volcánica (PV), se obtuvo a partir de la molienda de la pumisita volcánica en un molino de bolas en un tiempo de 90 minutos, tiempo en el cual se pudo obtener un material que combinado con el cemento tiene la posibilidad producir compuesto cementicios con altas prestaciones de resistencia. A continuación, se muestra su caracterización.

En la tabla 26 se muestra la composición en óxidos de este material para cual se puede observar la alta cantidad de óxidos

Tabla 26. Composición química de la puzolana volcánica

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
% peso	65.2	14.9	3.5	3.2	2.1	0.3	3.8	3.7	-	-	-

La figura 57 muestra las fases presentes en este tipo de puzolana, la cual muestra a la albita, silicio y al cuarzo en la mayor intensidad del difractograma encontrándose ubicados alrededor de los 28 grados.

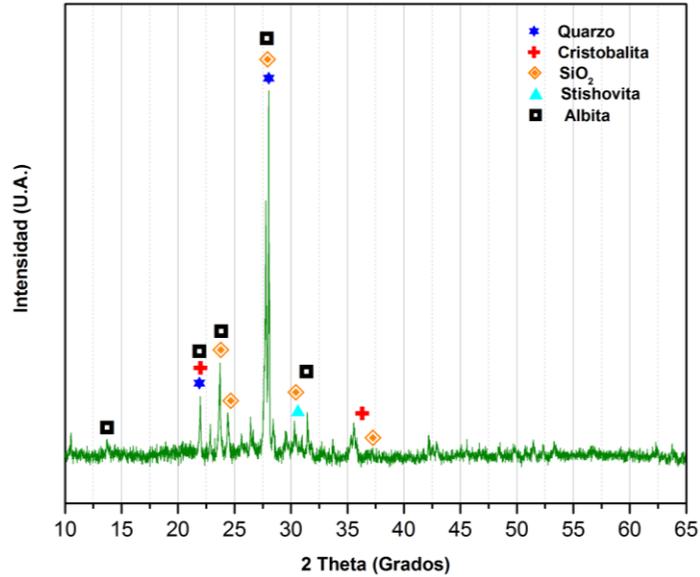


Figura 57. Difracción de rayos X de la escoria de la puzolana natural

Continuando con la caracterización de este material la figura 58 muestra la distribución del tamaño de partículas del material cementicio suplementario, en esta se puede observar que el 50% del porcentaje que pasa este alrededor de las 10 micras, el D₉₀ es de 31 micras y el D₁₀ está en 3.0 micras.

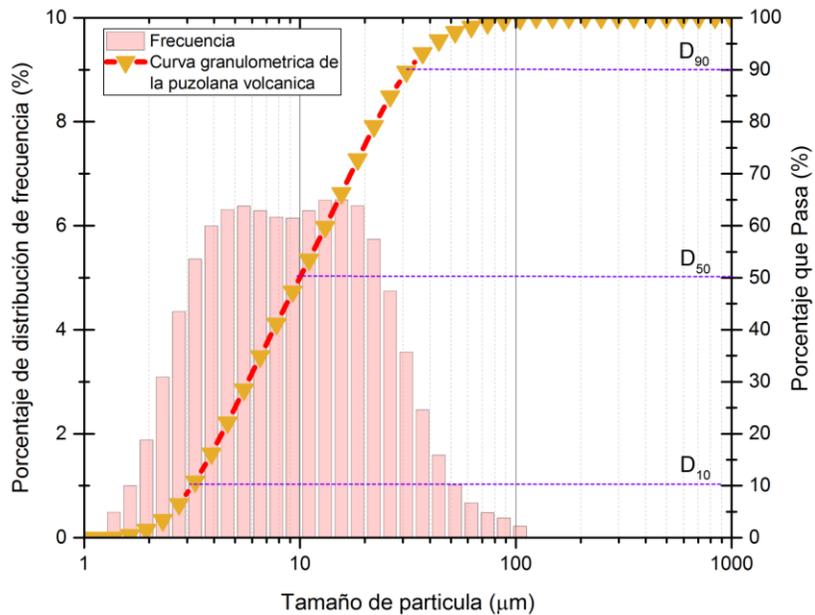


Figura 58. Distribución de tamaño de partícula de la escoria de alto horno.

En complemento a la información anterior en la figura 59, se muestra la micrografía de la PV, para la cual se puede describir formas irregulares angulares y textura semi rugosas.

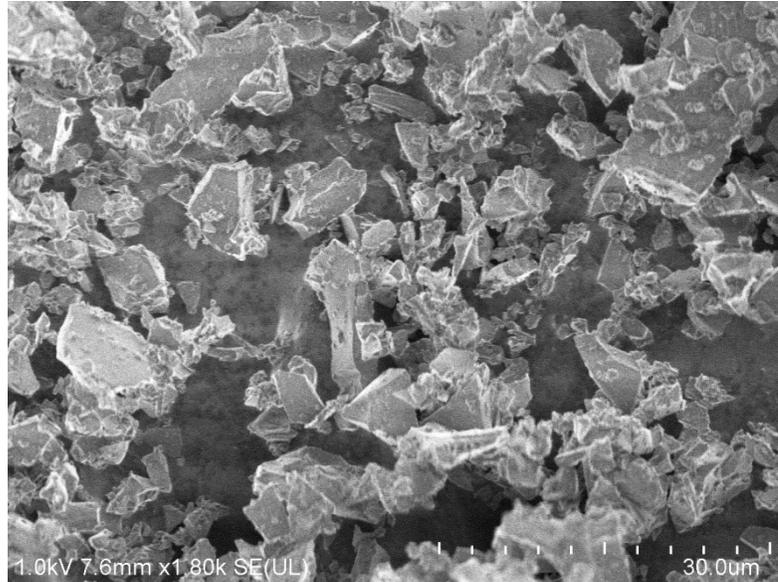


Figura 59. Morfología de las partículas de la puzolana natural

La tabla 27 muestra la caracterización físico mecánica de la puzolana volcánica, en ella se puede observar que este material presenta un cierto grado de puzolanidad con el cemento CSA, lo que permite inferir un adecuado desarrollo del producto cementante en los relacionado a la resistencia a la compresión.

Tabla 27. Propiedades físico mecánicas de la puzolana volcánica

Material	Propiedad	
Puzolana Volcánica	Densidad (g/cm³)	2.4
	Finura Tamiz No 325	80
	Índice de Actividad Resistente (IAR) (%)	
	7 días	74
	28 días	75

6.1.7 Microsílice.

Siendo la microsíllice (MS), una de las puzolanas más efectivas en el mejoramiento de las propiedades en sistemas cementicios base cemento, en este proyecto se decidió conocer su sinergia con el cemento sulfoaluminoso caracterizándola de la siguiente manera:

Desde el punto de vista químico el humo de sílice utilizado presentó la composición mostrada en la tabla 28.

Tabla 28. Composición química del cemento de la microsíllice

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
% peso	98.564	0.383	0.04	0.06	-	0.75	-	0.154	-	-	-

De igual manera para conocer las fases anhidras de la MS, en la figura 60, se puede observar presencia de SiO₂, CSi y CaO₂ como fases cristalinas, sin embargo también se observa una muy alta amorfisidad del material.

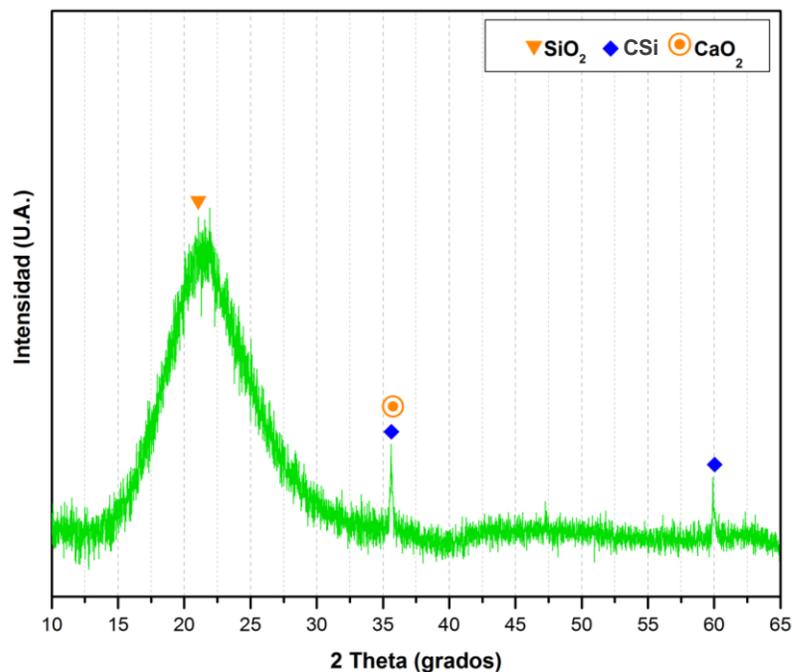


Figura 60. Difracción de rayos X de la microsíllice.

Por otro lado, al material se le realizó un análisis granulométrico tal y como se puede observar en la figura 61, esto con el fin de conocer los tamaños de las partículas de la MS. El análisis muestra que la partícula de alrededor de las 48 micras están el 50 por ciento del porcentaje que pasa, lo que la caracteriza como el material más grueso respecto a los materiales utilizados en este estudio, esto va en contravía con los que generalmente se reporta en la bibliografía acerca de este material, esto posiblemente se dio por una aglomeración de las partículas lo que produjo un aumento del tamaño detectado por el equipo de análisis de tamaño de partículas.

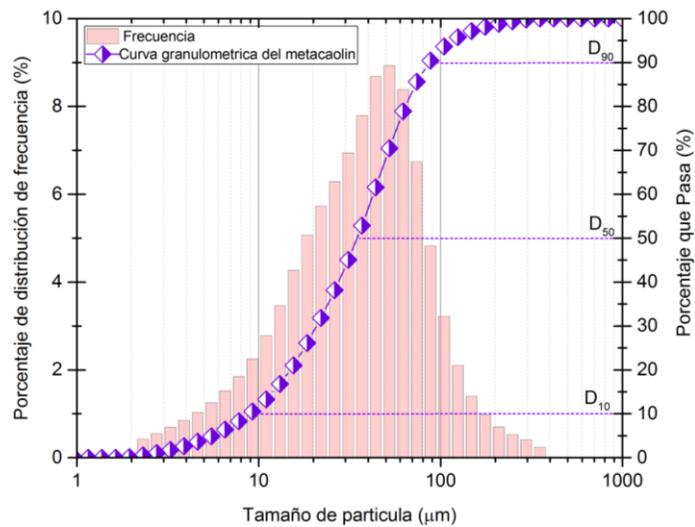


Figura 61. Distribución de tamaño de partícula de la microsíllice.



Figura 62. Morfología de las partículas de la microsíllice.

En la figura 62 se muestra la morfología de las partículas para las cuales se puede observar formas redondeadas con textura ligeramente rugosa.

En cuanto las propiedades físico mecánicas en la tabla 29 se muestra buen índice de actividad resistente en combinación con el cemento CSA, lo que la posiciona con la puzolana con mejores resultados de compatibilidad respecto a los demás materiales cementicios suplementarios utilizados en este estudio.

Tabla 29. Propiedades físico mecánicas de la microsílíce

Material	Propiedad	
Microsílíce	Densidad (g/cm ³)	2.22
	Finura Tamiz No 325	80
	Índice de Actividad Resistente (IAR) (%)	
	7 días	83
	28 días	87

6.1.8 Metacaolín.

El metacaolín (MC), fue obtenido de manera artificial a través de un proceso de calcinación a partir del caolín de color rosado el cual se elevó a una temperatura de 800°C durante 8 horas para convertirlo en metacaolín, una vez sintetizado el material fue caracterizado de la siguiente manera:

Desde el punto químico la tabla 30 muestra la composición en óxidos del material estudiado.

Tabla 30. Composición química del metacaolín.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
% peso	63.24	30.67	1.47	0.32	-	0.46	-	1.27	1.12	0.13	0.03

En el mismo sentido, la figura 63 muestra el difractograma del MC, para el cual se puede observar 2 fases cristalinas definidas el cuarzo y la cristobalita.

Por otro lado, en la figura 64 se muestra el análisis granulométrico del metacaolín, es importante mencionar que más del 50% del material supera las 35 micras.

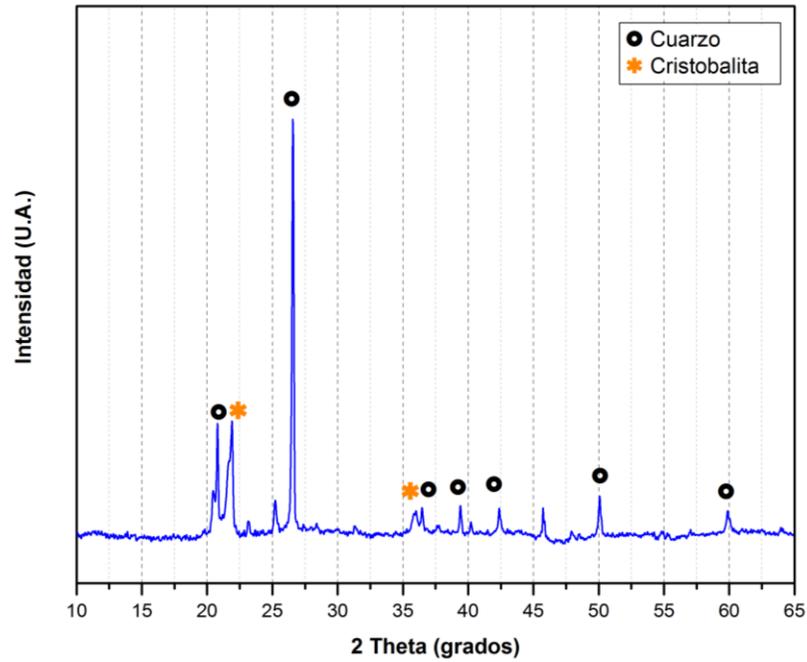


Figura 63. Difracción de rayos X del metacaolín

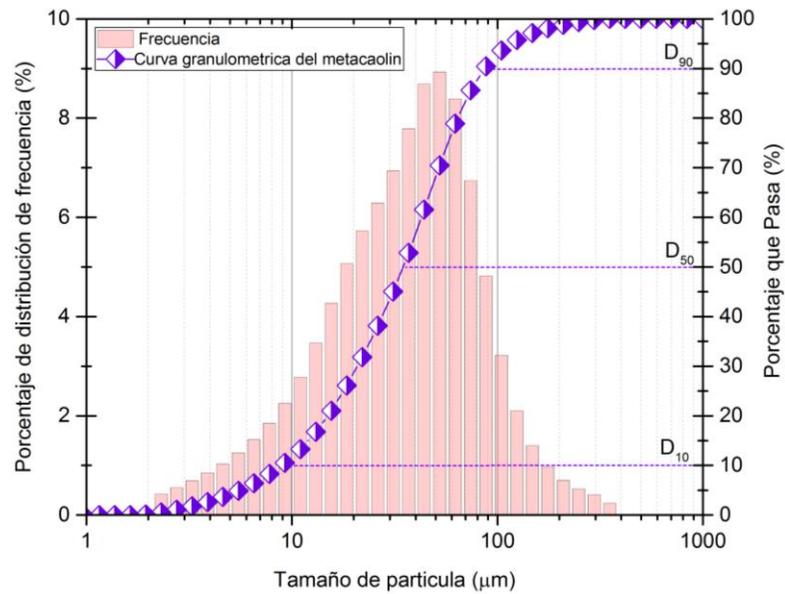


Figura 64. Distribución de tamaño de partícula del metacaolín

Desde el punto de vista de la forma y textura del metacaolín el material presente formas ligeramente redondeadas con textura rugosa, tal y como se puede observar en la figura 65.

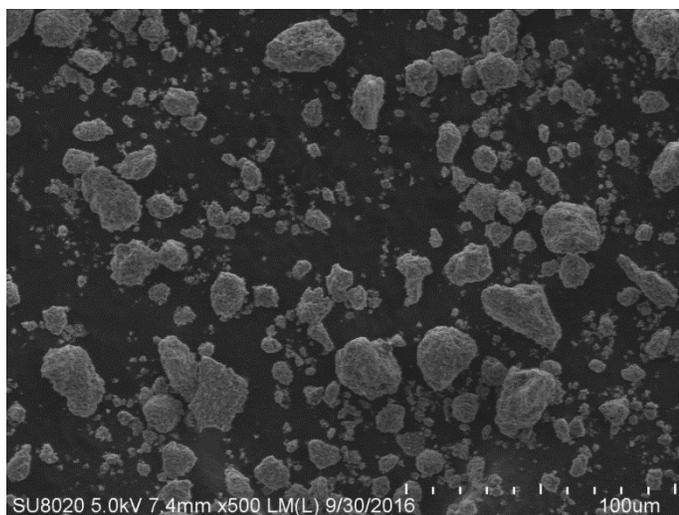


Figura 65. Morfología de las partículas del metacaolín.

En cuanto a las propiedades físicas mecánicas, en la tabla 31 se puede observar que el MC, presenta un IAR menor al 75% mínimo esperado, lo que indica que podría generarse inconvenientes al ser usado con el CSA.

Tabla 31. Propiedades físico mecánicas de la metacaolín

Material	Propiedad	
Metacaolín	Densidad (g/cm ³)	2.59
	Finura Tamiz No 325	80
	Índice de Actividad Resistente (IAR) (%)	
	7 días	60
	28 días	70

6.1.9 Polímero superabsorbente de uso en suelos.

El polímero superabsorbente (SAP), usado es un producto de uso comercial de color blanco, el cual se define como un polímero base poliacrilato de sodio CH₂CH(CO₂Na), con forma y textura irregular tal y como se puede observar en la figura 66. Por análisis de imagen los tamaños de las partículas están rodeando dimensiones entre la 40 y 100 micras.

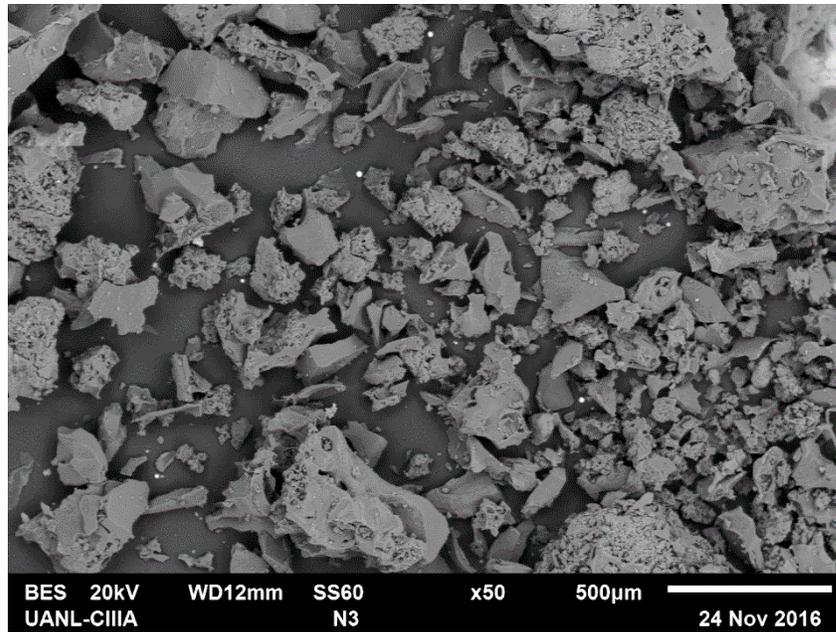


Figura 66. Morfología de las partículas del SAP.

6.1.10 Aditivo superplastificante reductor de alto rango.

Para otorgarle mayor fluidez a las mezclas se usó Plastol Precast Plus de Eucomex como aditivo superplastificante de alto rango (SP), el cual tiene como características el color ambar, una densidad de 1.1 gr/cm³, y un porcentaje de sólidos de 50.4%

6.1.11 Agregado fino N4.

La arena N4 utilizada tiene como principales características físicas las mostradas en la tabla 32 y en la figura 67.

Tabla 32. Propiedades físico del agregado fino

Material	Propiedad	
Arena No 4	Densidad (g/cm ³)	2.67
	Absorción (%)	2.04
	Módulo de finura	3.15
	Peso unitario suelto (kg/cm ³)	1680

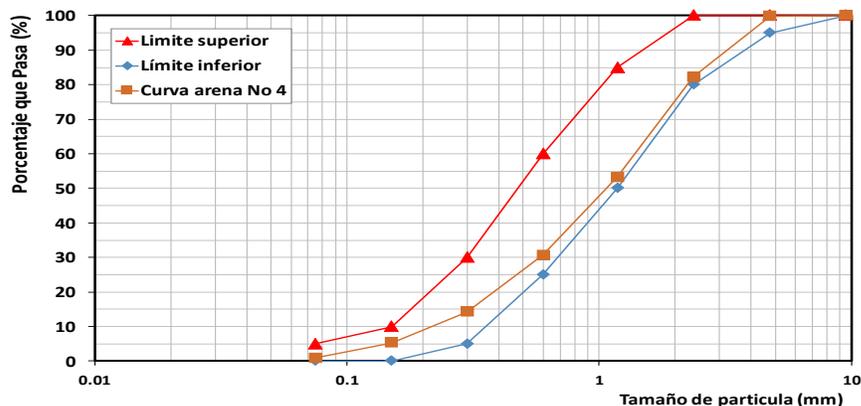


Figura 67. Granulometría del agregado fino.

6.1.12 Agregado grueso.

En esta tesis se utilizó grava triturada de tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ in, de textura rugosa y de forma irregular, las características físicas se pueden observar en la tabla 33 y en la figura 68.

Tabla 33. Propiedades físicas del agregado grueso

Material	Propiedad	
Grava	Densidad (g/cm ³)	2.7
	Absorción (%)	1.15
	Tamaño máximo nominal	$\frac{1}{2}$ in
	Peso unitario suelto (kg/cm ³)	1491
	Peso unitario compactado (kg/cm ³)	1634

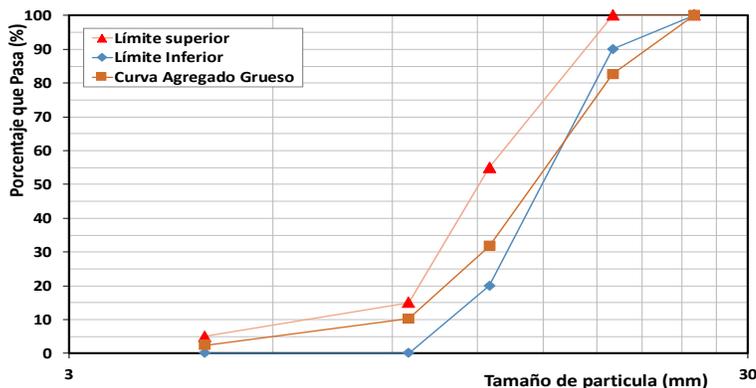


Figura 68. Granulometría del agregado grueso.

6.2 FASE 2 - Pastas base cemento sulfoaluminoso.

En esta sección se muestra evaluación de diferentes propiedades analizadas en pastas de cemento sulfoaluminoso.

6.2.1 Compresión en pastas de cemento sulfoaluminoso.

A continuación, se muestra los valores de resistencia a la compresión obtenidos en pastas de cemento, en la cuales se combinaron diferentes tipos de materiales cementantes.

6.2.1.1 Etapa 1 – Mezclas de pastas bases CSA-CV-CL y CPO-CV-CL.

En esta etapa se observa los resultados de resistencia a la compresión en pastas (f'_{pr}) para las cuales se combinó los cementos CSA y OPC con ceniza volante y caliza, trabajándose 2 relaciones a/cte, con lo cual se obtuvo los siguientes valores de resistencia observados en la tabla 34 y la figura 69. En la tabla 34 se pueden observar los valores de resistencia de las mezclas de la fase 1, cuya f'_{pr} fue evaluada a las edades de 3, 7, 28 y 90 días, para dos relaciones agua/material cementante 0.4 y 0.5.

Tabla 34. Resistencia a la compresión etapa1

	Mezcla		Relación Agua/Cementante							
			0.4				0.5			
			Tiempo (Días)							
			3	7	28	90	3	7	28	90
Etapa 1	CSA	f'_{pr} (MPa)	59	66	67	71	38	36	36	38
		s	6.8	2.3	2.5	1.1	2.6	4.9	2.6	0.7
	CCV15	f'_{pr} (MPa)	52	48	48	55	35	35	36	40
		s	11.9	4.9	1.6	3.7	0.7	4.8	2.9	0.8
	CCVCL155	f'_{pr} (MPa)	44	44	55	44	34	32	42	35
		s	11.2	5.8	3.9	2.1	1.5	3.9	6.6	0.4
	CCVCL1515	f'_{pr} (MPa)	38	39	49	45	21	23	25	31
		s	3.8	2.8	4.0	1.1	5.5	1.8	1.3	2.9
	CCV10	f'_{pr} (MPa)	57	47	60	47	34	28	40	41
		s	3.4	5.4	7.3	2.9	5.1	2.3	3.9	2.1
	CCVCL105	f'_{pr} (MPa)	55	53	56	71	27	23	25	31
		s	4.1	2.8	2.8	6.5	2.9	4.7	2.8	5.2
	CCVCL1015	f'_{pr} (MPa)	47	45	51	66	27	21	23	24
		s	1.9	13.5	11.8	0.4	7.9	3.8	2.3	3.8
	CPO	f'_{pr} (MPa)	48	58	61	65	33	41	53	59
		s	0.8	2.3	1.7	6.3	3.0	3.0	3.8	6.2
	OCV10	f'_{pr} (MPa)	43	54	58	74	41	49	52	72
		s	2.3	1.2	0.2	8.8	2.4	1.3	1.8	3.1
	OCVCL105	f'_{pr} (MPa)	43	45	52	57	39	45	49	59
		s	3.6	4.6	2.6	6.9	0.3	2.2	2.1	0.4
OCVCL1015	f'_{pr} (MPa)	51	57	75	82	30	45	50	60	
	s	0.9	1.5	1.4	4.2	4.0	0.3	1.4	2.0	

En la figura 69 se observa, en la parte superior una comparación entre las relaciones A/cte y las diferentes combinaciones entre el cemento CSA, la ceniza volante y la caliza en distintos niveles de reemplazo.

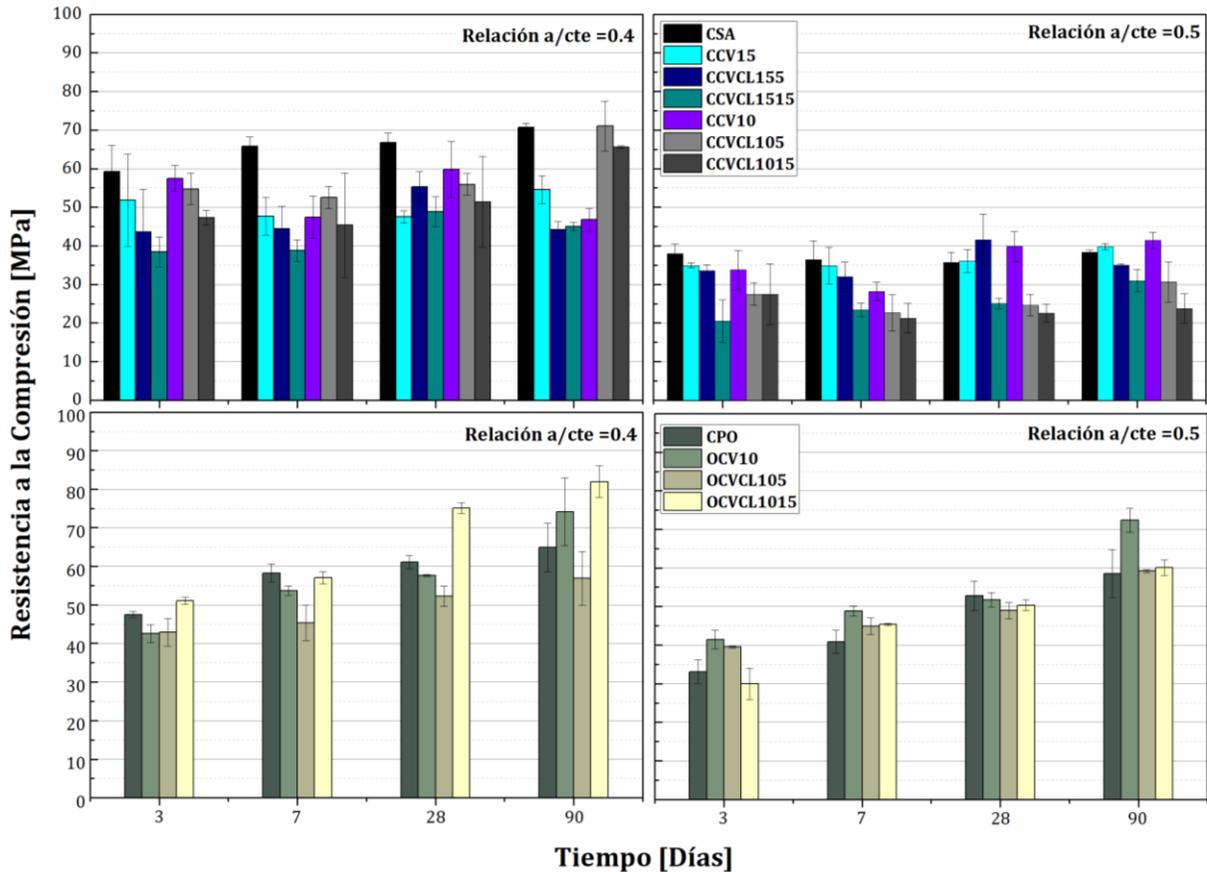


Figura 69. Resistencia a la compresión etapa 1

En la parte inferior de la figura anterior, se puede observar la comparación de valores de resistencia a la compresión para las mismas relaciones agua/cemento, pero con la combinación entre el cemento CPO, ceniza volante y caliza en diferentes niveles de reemplazos.

De la tabla 34 y de la figura 69 es posible establecer una clara incidencia de la relación agua material cementante, la cual sigue la ley constitutiva de Abrams tanto en las probetas base cemento CSA como en las de CPO. De la figura 69, se observa que al comparar las resistencias a la compresión del CSA para las dos relaciones agua/material cementante (0.4 y 0.5), en probetas a edades de 90 días, presenta reducciones para la muestras de 0.5 que van de un rango que oscila del 11% al 64%. Para el caso de la mezcla CCVCL1015 además de la mayor cantidad de agua, también

se debe al incremento en la cantidad de filler calizo de la mezcla lo que genera menor cantidad de material cementante para reaccionar.

A edades tardías (90d) para el caso de los sistemas de relación a/cte de 0.4, se puede observar en la gráfica, que la mezcla CCVCL105(85CSA+10CV+5CL) muestra valores similares a la de la referencia, lo que indica que bajo estas condiciones es posible reemplazar hasta un 15 % del total de cemento CSA por adiciones minerales no latentes, para generar una mayor contribución en la reducción de la huella de carbono que deja la industria cementera sin causar detrimento en las resistencias.

Es posible también referir que, al comparar reemplazos de ceniza volante en combinación con caliza en sistemas ternarios, los reemplazos del 10% de CV respecto a los del 15% presentan mejores comportamientos de resistencia a la compresión a edades tardías llegando a mostrar incrementos del 61 y 46 % para las mezclas CCVCL105 y CCVCL1015 respectivamente, esto debido a la mayor cantidad de cemento en las mezclas.

Respecto a la referencia, las mezclas con reemplazo de CV de 10% presentan reducciones que oscilan entre 0, 7 y 34% en las muestras CCVCL105, CCVCL1015 y CCV10 respectivamente, el comportamiento mostrado en las combinaciones binarias y ternarias con uso de 10% de ceniza volante indica que la caliza genera un efecto importante en combinación con la ceniza volante al punto de mostrar resistencia similares a la referencia, en el caso de los reemplazos del 15% los decrementos están alrededor del 36.5%, lo que indica que a esto niveles de sustitución las combinaciones de los materiales cementicios no proporcionan una sinergia adecuada que resulte en mejoramientos en la resistencia. De acuerdo a lo anterior se puede definir como mezcla optima la del sistema CCVCL1015, esto debido a que su reducción respecto a la referencia en f'_{pr} estuvo alrededor del 7%, además de eso el nivel de reemplazo estuvo en el 25% lo que la hace muy atractiva desde el punto de vista de sostenibilidad.

Por otro lado, en el caso de los reemplazos de CV y CL en el cemento Portland para las dos relaciones agua cementante estudiadas, se puede observar mejores comportamientos de resistencia a la compresión de estas adiciones con este tipo de cementos quizás por la mayor compatibilidad de los MCS con el CPO cuando se generan los productos de hidratación.

6.2.1.2. Etapa 2 – Mezclas de pastas bases CSA-CV-CL-EH-MS-PV.

En esta fase se planteó como objetivo incrementar el porcentaje de reemplazo de las adiciones minerales en sistemas binarios y ternarios que tenían como base el CSA, para esto se estudiaron 4 distintos materiales cementicios suplementarios en diferentes niveles de reemplazo respecto al cemento sulfoaluminoso para una relación a/cte de 0.4, para los cuales se obtuvieron los efectos mostrados a continuación. En la tabla 35 se puede observar el efecto de los reemplazos binarios y ternarios de los materiales cementicios suplementarios en diferentes edades de evaluación de f'_{pr} , para las cuales hay clara de

incidencia de reducción en la resistencia a la compresión de los sistemas analizados, cuando se reemplaza CSA por adiciones minerales como la ceniza volante, la escoria de alto horno, la microsílíce y una puzolana volcánica respecto a las mezcla de referencia a los 90 días ($f'_{pr} = 71$ MPa) mostrada en la fase anterior.

Tabla 35. Resistencia a la compresión etapa 2

	Mezcla	Relación Agua/Cementante			
		0.4			
		Resistencia a la compresión (MPa)			
		1d	3d	7d	90d
Etapa 2	CCV30	38	39	36	58
	S	4.0	2.6	2.4	1.1
	CCV40	24	30	32	40
	S	1.9	2.8	1.8	2.5
	CCL30	36	31	37	50
	S	2.8	3.0	2.0	0.7
	CCL40	23	27	28	32
	S	2.7	1.8	1.6	1.6
	CCVCL2020	25	30	27	36
	S	3.3	0.9	1.3	4.9
	CEH30	35	37	38	50
	S	1.5	0.6	1.2	3.4
	CEH40	24	25	31	42
	S	1.5	0.4	0.9	2.1
	CEHCL1515	32	29	32	38
	S	1.1	2.9	2.0	2.9
	CEHCL2020	26	29	30	28
	S	1.5	1.8	3.6	3.6
	CPV30	31	34	36	54
	S	1.3	2.0	4.8	3.0
	CPV40	27	27	28	49
	S	1.8	1.7	4.9	1.7
	CPVCL1515	30	34	35	60
	S	2.8	2.3	4.4	1.5
	CPVCL2020	25	25	29	56
	S	1.2	2.0	2.4	5.6
	CMS30	28	24	29	41
	S	2.5	1.0	2.4	5.2
	CMSCL1515	29	32	33	41
	S	3.0	3.6	2.4	5.0
CMSCL2020	21	25	25	31	
S	1.6	1.8	0.8	2.8	

En la figura 70, se puede observar las gráficas de resistencia a la compresión para cada uno de los MCS estudiados comparados respecto a la referencia. En la parte superior

izquierda se muestra la influencia de reemplazos de ceniza volante y caliza en niveles más altos respecto a los estudiados en la fase 1, reemplazando el 30 y 40% de ceniza volante y de caliza en sistemas binarios y el mismo porcentaje en sistema ternarios, los mismo niveles de sustitución se manejaron para las otras adiciones a excepción de la microsílíce para la cual no se pudo trabajar con el 40% de reemplazo por la falta de trabajabilidad de la mezclas en el momento de la fabricación de especímenes.

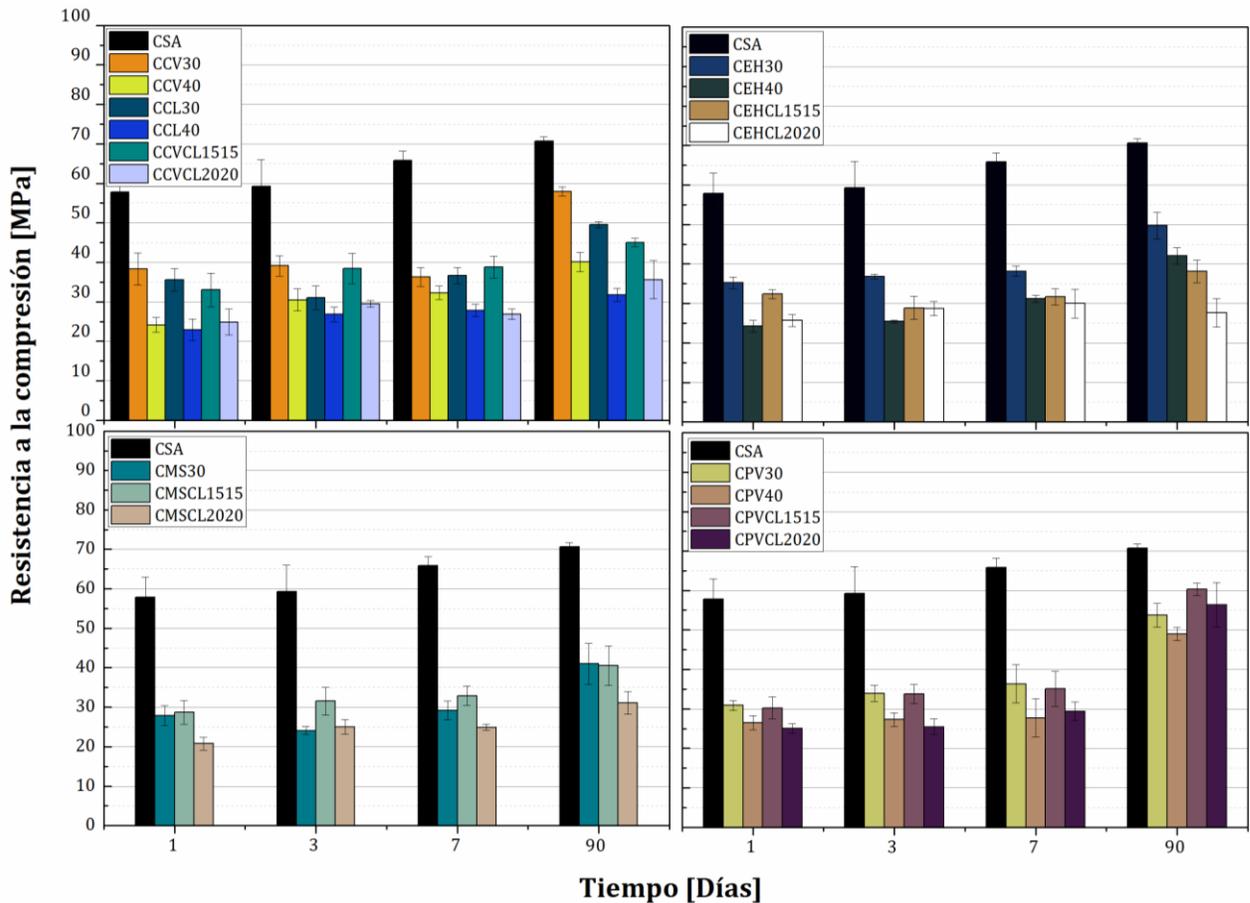


Figura 70. Resistencia a la compresión etapa 2

En el caso de la ceniza volante respecto a la referencia, a edades tardías (90 días) la reducción de la resistencia esta entre el 18 y 43% para las mezclas CCV30 y CCV40 respectivamente, pudiendo inferir que el reemplazo de 30% puede ser aceptable desde el punto de vista de sostenibilidad y resistencia lo que la hace una mezcla óptima para su uso, sin embargo la sustitución del 40%, presenta bajos comportamientos en resistencia respecto a la referencia, cosa que no se puede catalogar como errado en el estudio ya que esto valores no se encuentran por debajo de los 21 MPa, (valor que se considera adecuado si se extrapola a un uso estructural) lo que permite tener en cuenta estas mezclas desde el punto de vista de la sostenibilidad en aplicaciones no estructurales.

También es posible decir que la reducción de la resistencia en las mezclas binarias entre los reemplazos de 30 y 40% se da por el mayor contenido de agua lo que produce mayores valores de porosidad[34].

En cuanto a las mezclas con caliza las sustituciones de 30 y 40 % generaron reducciones del 30 y 55% respecto a la referencia, decrementos que a pesar de que se puede considerar importantes desde la resistencia, también es posible decir que por las características del material usado se hace altamente sostenible por la fácil consecución de la caliza en el sector de la construcción.

Las mezclas ternarias de CCVCL1515 y CCVCL2020, muestran reducciones del 37 y 50% respectivamente, lo que permite inferir que no hay una adecuada sinergia entre la ceniza volante y la caliza cuando existen reemplazos altos respecto al CSA.

Por otro lado a los 90 días, la escoria de alto horno a medida de que se aumenta el porcentaje de sustitución de este material en el CSA disminuye su resistencia a la compresión respecto a la referencia, presentando reducciones tanto en los sistemas binarios como ternarios del 30, 41, 46 y 61% que le corresponden a CEH30, CEH40, CEHCL1515 y CEHCL2020 respectivamente, esto muestra que este MCS no presenta buena sinergia con este tipo de cemento cuando se reemplaza el 30 y 40%, esto tampoco quiere decir que sea inviable en usos no estructurales. El efecto de la caliza en diferentes porcentajes de sustitución muestra una incompatibilidad de este material con el CSA pudiéndose que el uso de este filler en sistemas ternarios no es recomendable en combinación con la EH.

La microsílíce para la mezcla CMS30 muestra una reducción del 24%, valor que, a pesar de tener una reducción importante, se puede considerar que no existe una buena interacción entre la MS y el CSA ya que por la alta reactividad de este tipo de adición debería presentar mejores valores de resistencia esto puede ser debido a que las partículas utilizadas estuvieron demasiado grandes y por el alto nivel de sustitución.

En cuanto a los sistemas ternarios la interacción entre la caliza y la MS en el sistema CMCCL1515 muestra una reducción similar a la de mezcla binaria, lo que puede relacionarse con el hecho de que el porcentaje de sustitución (15%) de la microsílíce podría ser un óptimo respecto al 30% usado en el sistema de 30 % de reemplazo, acercándose más al porcentaje de uso recomendado que se reporta para el cemento CPO, de igual manera se puede mencionar que la caliza no tiene buena compatibilidad con esta adición mineral ya que tanto para las mezclas en donde se combina en un 15 y 20% no se observa mejoramiento en la resistencia a la compresión.

Por otro respecto al efecto de la sustitución de la puzolana natural a 90 días de edad definir un adecuado comportamiento tanto de los sistemas binarios como ternarios, pudiéndose observar que las mezclas de CPV30 y CPV40 tuvieron un decremento de la resistencia del 24 y 31% respectivamente, para lo cual se puede considerar que la puzolana natural presenta una adecuada sinergia en altos porcentajes de uso, de igual manera al realizar el análisis de los sistemas ternarios es posible definir que la caliza con la puzolana

natural muestra reducciones no tan pronunciadas del orden de 15 y 21 % (CPVCL1515 y CPVCL2020 respectivamente) lo que permite definir un excelente comportamiento de la caliza con este tipo de MCS.

Como apoyo a la gráfica anterior, en la figura 71, se puede observar el efecto de cada una de las combinaciones normalizadas respecto al porcentaje de sustitución (30 y 40%) en el CSA.

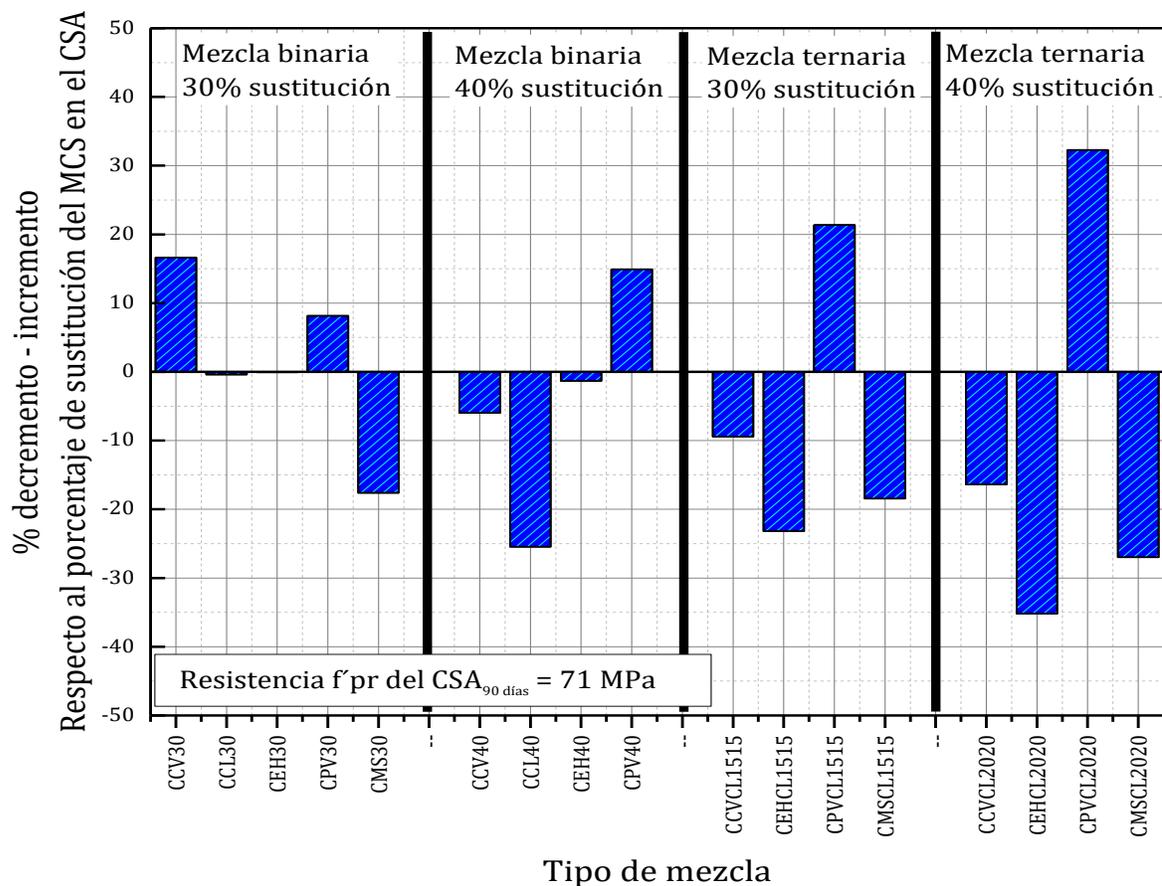


Figura 71. % de incremento/decremento de los MCS en el CSA.

Por otra parte se puede observar que al normalizar los 71 MPa respecto al 30 y 40% de sustitución, en el caso de la mezclas binarias con 30% de reemplazo la de mejor comportamiento desde el punto de vista del efecto causado en la combinación es la de la CV con un incremento del 17%, caso contrario la de peor comportamiento es la mezcla en donde se sustituyó la microsílíce para la cual hubo un decremento del 18%.

En el caso de las mezclas con 40% de sustitución se observa que hubo un incremento del 15% en la mezcla CPV30 y un decremento importante (26 %) en la mezcla CCL40, que indica que porcentajes de caliza del 40% de reemplazo no producen ninguna

compatibilidad que pueda mejorar la resistencia a la compresión en sistemas binarios CL + CSA.

Para los sistemas ternarios del 30% de reemplazo, se evidencio que el mejor efecto de los MCS en la resistencia a la compresión se de en la combinación CPVCL1515 con 21% de incremento y la menor efecto fue la CEHCL1515 con un decremento frente al normalización del porcentaje de reemplazo del 23%, lo que indica que la caliza en combinación con la EH, no tiene adecuada sinergia para mejorar la resistencia a la compresión en sistema ternarios en donde intervengan los tres componentes estudiados.

En el caso los ternarios con 40% de sustitución se puede observar que las mezclas con PV y CL muestran un incremento importante del 32%, lo que indica una alta compatibilidad entre estos dos materiales, caso contrario cuando se mezcla la caliza y la escoria en los porcentajes de reemplazo estudiados, la Figura 71 muestra decrementos importantes del orden del 35%, lo que reafirma la tendencia que se muestra en las mezclas ternarias del 30% anteriormente explicada.

De la Figura 70. Resistencia a la compresión etapa 2 y Figura 71. % de incremento/decremento de los MCS en el CSA., es posible indicar que la mejor puzolana desde el punto de vista de la reacción y de sostenibilidad es la CV debido a que con este MCS es posible obtener adecuadas resistencias tanto en sistemas binarios y ternarios, además de que su fácil consecución hace posible su aplicación de manera industrial. Si bien es cierto que los mejores desempeños de f'_{pr} , se obtienen con la PV, la consecución del material dificulta que las combinaciones que incluyan este material puedan ser extrapoladas a su aplicación en la industria de la construcción.

6.2.1.3. Etapa 3- Mezclas de pastas base CO-COCV-COCL-COEH-COMS-COPV y COMC.

En esta fase se mostró los efectos de las adiciones minerales en mezclas ternarias en donde se combina el cemento sulfoaluminoso, el CPO y diferentes tipos de MCS en la resistencia a la compresión.

En la tabla 36, se muestran las resistencias a las compresión con relaciones agua/cementante de 0.4, para las distintas combinaciones realizadas las cuales tienen como constante que en todas el 50% del total del sistema es cemento sulfoaluminoso belítico, 25% de cemento portland ordinario y 25 % materiales cementicios suplementarios (ceniza volante, microsílce, metacaolín, caliza, escoria de alto horno y puzolana volcánica), los cuales generaron los resultados mostrados en tabla 6.21, de donde se puede observar que los mejores efectos se presentan a edades tardías de análisis para cada una de las mezclas entre los 7 y 90 días de edad.

Tabla 36. Resistencia a la compresión etapa 3

	Mezcla		Relación Agua/Cementante				Pendiente (1-90 días)
			0.4				
			Tiempo (Días)				
			1	7	28	90	
Etapa 3	CO	f _{pr} (MPa)	58	57	72	82	0.28
		s	8.1	1.9	5.9	4.6	
	COMS2525	f _{pr} (MPa)	24	28	30	41	0.14
		s	3.6	3.3	1.8	1.6	
	COMC2525	f _{pr} (MPa)	23	29	34	68	0.44
		s	1.4	4.7	2.6	4.0	
	COC2525	f _{pr} (MPa)	22	29	46	67	0.43
		s	0.6	1.9	4.3	0.6	
	COEH2525	f _{pr} (MPa)	22	23	41	63	0.45
		s	2.1	1.2	2.2	2.9	
	COCV2525	f _{pr} (MPa)	24	25	45	75	0.56
		s	1.7	1.1	1.6	3.5	
	COPV2525	f _{pr} (MPa)	25	25	46	86	0.69
		s	1.6	0.6	1.3	3.8	

De la tabla anterior se puede observar que para las mezclas en donde se combinan el CSA y el CPO, la mayor ganancia de resistencia se da entre las edades de 7 y 28 días alcanzando una pendiente de 0.72 posiblemente esto se da porque a los 28 días ya se desarrolla la mayor ganancia de resistencia que aporta el CPO, después de que a 1 día el CSA le brindara a la mezcla el 71% de la resistencia alcanzada a los 90 días.

Para las mezclas en donde la microsílíce actuó como MCS, no producen aumentos importantes a través del tiempo y su ganancia de resistencia es gradual. En el caso del metacaolín la mayor ganancia de resistencia se presenta entre los 28 y 90 días alcanzando una pendiente del 0.55, lo que muestra una tendencia a que la MK reacciona de manera importante a edades tardías.

La caliza en combinación con el CSA y el CPO, muestra su máxima ganancia de resistencia entre los 7 y 28 días con una pendiente de 0.81, posiblemente siguiendo el mismo comportamiento que se presenta en la mezcla CO, terminando la ganancia de resistencia con una pendiente de 0.35 entre las edades de 28 a 90 días.

Para el caso de la EH, se presenta el mismo comportamiento que el de la caliza mostrando tendencia de evolución de resistencia en función de las pendientes entre los 7 a 28 días del 0.82 y entre los 28 a 90 días del orden de 0.37.

La ceniza volante y la puzolana volcánica muestran las mejores evoluciones de resistencias entre todas los MCS estudiados presentando su mayor tendencia de pendiente

entre los 7 y 28 días con un valor de 1.0, lo que permite definir que este tipo de adiciones minerales tienen muy buena reactividad cuando se utilizan en mezclas ternarias a edades tempranas. Otra cosa que se puede extraer de la tabla anterior es que la PV sigue mostrando de manera importante ganancia en la pendiente a edades tardías entre los 28 y 90 días que la pendiente está en 0.66, de igual manera la CV muestra una tendencia (pendiente del 0.47) menor a estas mismas edades, pero no menos importante, lo que sigue refrendando que la ceniza volante sigue aportando sus mejores características a edades tardías.

A continuación, la figura 72, muestra el efecto en la resistencia por parte de las adiciones minerales y el CPO en sistemas ternarios, para la cual en la parte izquierda de la gráfica se puede observar la comparación entre los sistemas analizados en las fases anteriores y un sistema binario en donde se combina el CSA y el cemento Portland Ordinario, de igual manera en las gráficas del centro y derecha se observa la incidencia sobre mezclas de CSA cuando se reemplaza el 50% de la mezcla por 25% de MCS y CPO a diferentes edades de ensayo.

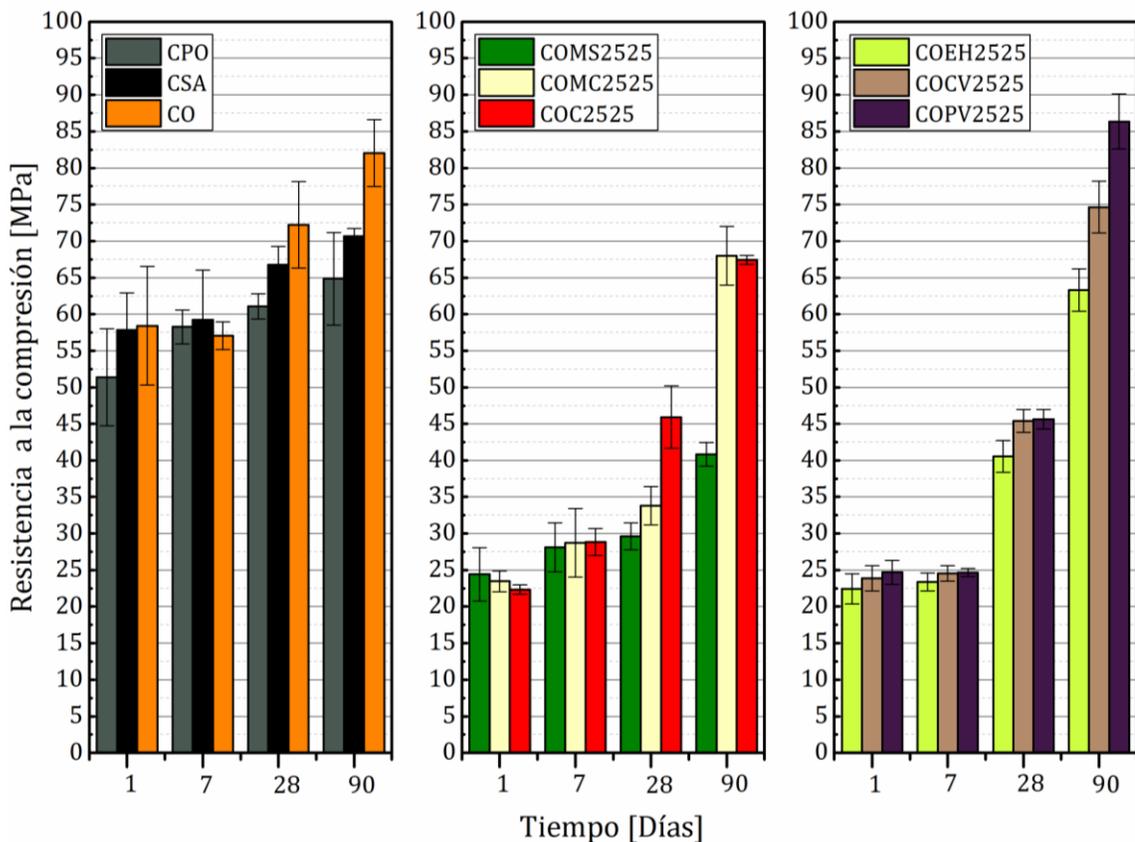


Figura 72. Resistencia a la compresión etapa 3

De la figura anterior se aprecia que, a los 90 días la mezcla binaria CO, tuvo un incremento del 16% respecto a la mezcla de solo cemento sulfoaluminoso y del 26%

respecto al sistema CPO definiendo esta combinación como óptima desde el punto de vista de la resistencia.

Por otro lado, la microsílíce, el metacaolín, la caliza y la escoria de alto horno presentaron reducciones respecto a la referencia de CSA del 42, 4, 5 y 10% respectivamente evidenciando que la microsílíce no tiene buena compatibilidad con el CSA y el CPO en el porcentaje manejado en este sistema ternario, quizás por el tamaño de partículas del material que en lugar de actuar como sitio de nucleación reactivo se comporta como punto de falla en la matriz.

En cuanto al metacaolín y la caliza, estos materiales no muestran mayor reducción respecto a la referencia en cuanto a su resistencia a la compresión a los 90 días, lo que indica que estos sistemas se convierten en alternativas adecuadas para ser utilizados desde el punto de vista de resistencia, sostenibilidad y reducción de costos de la mezcla, respecto al costo de la referencia.

Respecto a las mezclas con ceniza volante y puzolana volcánica se puede observar aumentos del 6 y 22% por encima del valor presentado por la referencia, mostrando la misma tendencia presentada en la fase anterior, en donde las dos adiciones minerales se convierten en las que mejor compatibilidad presentan con el CSA.

Al normalizar la mezcla de referencia al 75% de la resistencia a la compresión y al compararlas con la resistencia de las demás mezclas en donde apenas el 25% es un material cementante no latente se tiene que únicamente la microsílíce respecto al 75% de la referencia muestra una reducción del 23%.

Los otros MCS muestran incrementos que van del 28% para la mezcla con MK, del 27% para la de caliza, del 18% para la de EH, los cuales se pueden considerar como positivos ya que muestran que estas adiciones minerales funcionan de manera adecuada en combinación con el CSA y el CPO.

Por otro lado, al usar la ceniza volante y la puzolana volcánica se muestra incrementos del 40 y 62% respecto a la normalización de la referencia lo que no muestra el altísimo grado de reactividad que tienen estas puzolanas en este tipo de sistemas.

Yeung[88] realizó diferentes combinaciones entre CPO, CSA y Escoria de alto horno con porcentaje menores de CSA obteniendo valores de resistencia equivalentes a la combinaciones de CPO+CSA, lo que podría conducir a una solución para incrementar la resistencias mostradas por el uso de la escoria de alto horno en esta tesis.

6.6.1.4 Etapa 4 - Consistencia de pastas, tiempos de fraguado, temperatura, retracción por secado en pastas de cemento.

6.2.1.4.1 Consistencia de pastas de cemento.

Debido a la química del cemento CSA se producen diferentes efectos en la trabajabilidad de las pastas CSA+MCS y CSA+MCS+CPO, dichos efectos se midieron

mediante el ensayo de asentamiento por el mini slump cuyos resultados se pueden observar a continuación.

En la tabla 37 se puede observar el cambio de extensibilidad respecto al tiempo que tiene las matrices en donde se combinan el cemento sulfoaluminoso con la caliza, microsíllice, puzolana volcánica, ceniza volante, escoria de alto horno, metacaolín y el CPO, en ella es posible prestar atención a los cambios en la pendientes entre la extensibilidad (teniendo en cuenta que esta es el diámetro medido en la pasta una vez que se levanta un cono relleno con pasta de cemento el cual tiene un diámetro interior de 70 mm) presentada por la mezcla a los 5 minutos de agregar el agua al cementante y su pérdida a los 60 minutos.

En la tabla 37 se observa que la referencia CSA con AC, tiene una pérdida total de extensibilidad a los 35 min, esto debido que para este tiempo ya comienza su fraguado, de igual manera también se muestra que una vez que la mezcla se le adhiere el plastificante base policarboxilato este actúa sobre la misma otorgándole una aumento en la extensibilidad a los 60 minutos del 98%, además de eso por la columnas de pendiente (m) se observa una mayor m para la muestra con plastificante debido a que su pérdida de extensibilidad es más pronunciada por la forma que toma la mezcla una vez que se retira el cono, entre el minuto 5 y el 60, esta misma tendencia se presenta en todas las mezclas estudiadas, desde el punto de vista de pérdida de extensibilidad, la mezcla CSA(AC+SP) presenta su mayor pérdida entre el minuto 5 el 15, mostrando una pendiente del 1.12.

Por otro lado, las mezclas con plastificante muestran incrementos importantes en cuanto su extensibilidad respecto a las que no lo tienen, indicando para el caso de los sistemas CCL, CCV, CO, COCL, COPV, COCV y COEH aumentos del 135, 142, 133, 136, 115, 153 y 157%, indicando esto una excelente compatibilidad del policarboxilato en este tipo de mezclas con las diferentes combinaciones de MCS y de CPO.

En el caso de las mezclas CPV y COMC la efectividad del plastificante fue intermedia mostrando incrementos del 65% y 51% respectivamente, indicando que para este tipo de adiciones y combinaciones la plasticidad y fluidez que este tipo de aditivos puede otorgarle a la mezcla se reduce considerablemente respecto a los comportamientos antes mencionados, esto se puede deber a que estas combinaciones requieren mayor cantidad de agua para lograr cierta fluidez requerida.

En el caso de las mezclas con microsíllice al realizar una comparación a los 60 minutos de su extensibilidad fue posible observar que el aditivo SP a este tiempo ya no puede otorgar ninguna clase de fluidez debido a que se tiene ya fraguado final.

De la tabla 37 y de la figura 73 también se puede evidenciar que la pérdida de trabajabilidad de las mezclas presentan diferentes momentos los cuales obedecen al

tipo de MCS con el cual se esté trabajando, en ese orden de ideas si se habla de las mezclas con SP, los sistemas CCL, CMS, COEH y COMC muestran su máxima pendiente de pérdida de extensibilidad entre los 5 y 15 minutos, por otro lado CO, COMS, COCLC, COPV y COPV presentan su máxima pendiente de pérdida entre los 15 y 35 min.

Para el caso de los sistemas CCV y CPV se puede observar que la máxima pendiente se da entre los 45 y 60 minuto, mostrando una altísima compatibilidad y mantenimiento de la trabajabilidad en estos sistemas por parte del policarboxilato.

La figura 73, indica la pérdida de extensibilidad de diferentes sistemas fabricados con ácido cítrico con y sin plastificante. En la parte de arriba se podrá observar una ampliación de la pérdida de consistencia de las mezclas que no tenían el plastificante y en el resto de la gráfica la incidencia entre el uso y el no uso del SP.

Tabla 37. Consistencia de pastas

Mezcla	Tiempo						m _{5-60min}
	Minutos						
	5	15	25	35	45	60	mm/minutos
CSA-AC	77.0	74.3	74.8	73.7	73.7	73.7	-0.06
CSA-(AC+SP)	166.3	155.2	148.4	146.5	146.8	146.0	-0.37
CCL-AC	81.4	76.3	76.7	76.8	74.9	74.9	-0.12
CCL-(AC+SP)	208.9	199.9	192.4	186.1	177.3	176.2	-0.59
CMS-AC	74.1	72.9	72.3	72.3	72.3	72.3	-0.03
CMS-(AC+SP)	115.0	82.2	73.4	71.7	71.7	71.7	-0.79
CPV-AC	74.8	74.5	75.3	74.0	73.9	72.4	-0.04
CPV-(AC+SP)	160.1	150.4	150.1	141.3	138.4	119.4	-0.74
CCV-AC	88.7	78.2	75.3	74.4	73.9	73.9	-0.27
CCV-(AC+SP)	197.2	196.6	193.7	193.0	188.2	179.4	-0.32
CO-AC	80.5	81.0	81.0	79.8	79.0	75.5	-0.09
CO-(AC+SP)	196.3	195.3	192.4	185.1	181.5	176.3	-0.36
COMS-AC	74.0	73.6	73.0	71.1	71.1	71.1	-0.05
COMS-(AC+SP)	131.3	118.3	84.3	74.5	73.5	73.5	-1.05
COCL-AC	81.0	80.0	80.0	79.0	77.3	77.3	-0.07
COCL-(AC+SP)	196.0	196.5	195.0	190.7	186.8	183.0	-0.24
COPV-AC	75.5	75.3	75.0	75.0	75.0	75.0	-0.01
COPV-(AC+SP)	181.0	178.6	175.5	168.8	164.8	161.4	-0.36
COCV-AC	88.0	88.0	83.4	83.0	80.1	77.3	-0.20
COCV-(AC+SP)	213.0	210.0	210.3	200.3	196.8	196.0	-0.31
COEH-AC	95.8	90.6	90.0	88.0	85.5	80.3	-0.28
COEH-(AC+SP)	230.0	225.5	221.3	216.8	212.8	206.8	-0.42

COMC-AC	74.9	73.9	73.8	75.0	72.6	72.6	-0.04
COMC-(AC+SP)	104.5	82.3	78.3	75.0	73.0	73.0	-0.57

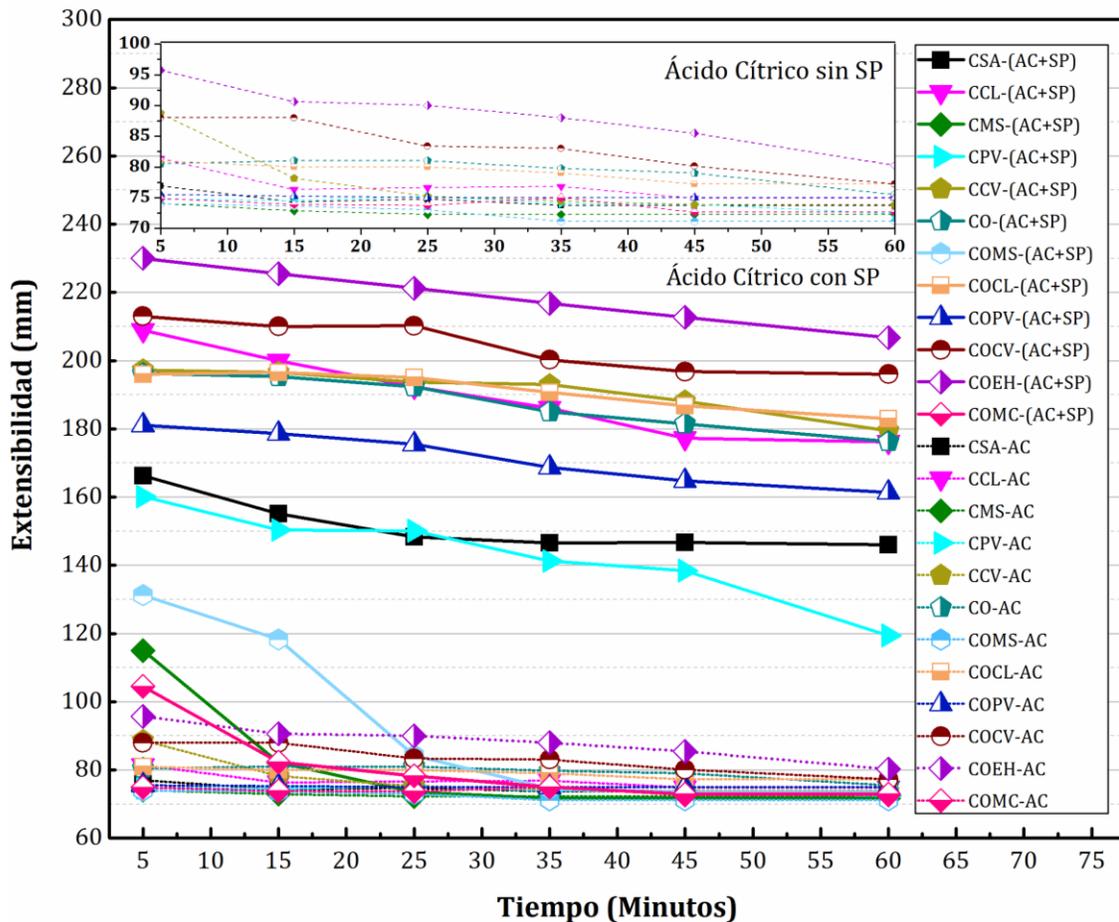
AC= Mezcla con ácido cítrico

AC+SP=Mezcla con ácido cítrico + plastificante

m=pendiente

En la tabla 37 y figura 73, se pueden observar las diferentes consistencias de cada una de las mezclas, es claro que las muestras que contenían AC+SP presentan mayor fluidez que las muestras sin el SP, concluyéndose que desde el punto de vista de colocabilidad de las muestras que es necesario adicionar el superplastificante en sistemas que tengan como base el CSA, esto debido a que las muestras con únicamente ácido cítrico, presentan extensibilidades que no superan más del 95.8 cm respecto a su similar con SP, para la cual se tiene 230 cm de extensibilidad presentando una reducción del 58 % si se analiza la extensibilidad a los 5 minutos.

Figura 73. Extensibilidad de las pastas.



Al comparar el efecto del SP en los sistemas estudiados desde el punto de vista de la colocabilidad de la mezcla, de acuerdo a la figura 73 es posible definir que a los 60 minutos de fraguado, las adiciones minerales utilizadas en las mezclas binarias

otorgaron aumentos en la consistencia de la mezcla de referencia (CSA-AC+SP), del 20 y 22 % en el caso de los sistemas CCL y CCV respectivamente, lo que muestra que la adición de estos compuestos pueden mejorar la fluidez de las mezclas, caso contrario también es posible observar que para las mezclas CMS y CPV se presentan reducciones del 50 y del 18% en la consistencia definiendo que este tipo de mezclas la microfílice reduce de manera importante la trabajabilidad de las mezclas.

Para las muestras ternarias en donde se incluye el Cemento Portland Ordinario se puede observar que las combinaciones CO, COCL, COPV, COCV y COEH, generan importantes aumentos en la consistencia de las mezclas base CSA mostrando incrementos del orden 20, 25, 10, 34 y 41% respecto a la referencia, indicando esto que la incorporación del CPO mejora aún más la consistencia de este tipo de sistemas.

Al igual que en las mezclas binarias la MS aunque se tenga CPO sigue mostrando reducciones importantes en la extensibilidad al punto de reducirse con base a la referencia en un 50%, la misma tendencia es mostrada con el uso de la MC, la cual presenta el mismo porcentaje de reducción, posiblemente por la alta demanda de agua que tiene este tipo de adiciones.

6.2.1.4.2 Tiempos de fraguado de pastas.

A continuación se muestran la tabla 38 y la figura 74, en las cuales se evidencia físicamente los efectos de las reacciones químicas ocurridas en el proceso de hidratación del cemento representado a través del fraguado de los sistemas estudiados.

La tabla 38, muestra el estudio de los tiempos de fraguado inicial (T_{fi}) y final (T_{ff}) para las mezclas cuando no se incluye el retardante, con AC únicamente y cuando se adiciona el AC y el SP.

También se muestra como el plastificante contribuye a extender los tiempos mostrando los incrementos en porcentajes entre las mezclas sin retardante y plastificante y los tiempos de fraguado cuando a dichos sistemas se le adiciona estos componentes que contribuyen al mejoramiento de la colocabilidad de las mezclas.

En ellas es posible evidenciar que la mezcla con mejor tiempo de fraguado y por ende con una adecuada tendencia para que sean colocada de mejor manera es la COCV con tiempo de fraguado final que alcanzó 200 minutos, es mismo efecto se presentó en la CO, con la salvedad de que en la COCV se ve beneficiada por la sostenibilidad proporcionada por la CV.

Tabla 38. Tiempos de fraguado de pastas.

Mezcla	Tiempos de fraguado						Incremento
	(Minutos)						
	Tf inicial	Tf final	Tf inicial AC	Tf final AC	Tf inicial AC-SP	Tf final AC-SP	(%)
CSA	51	65	93	120	93	120	85
CCV	47	60	98	115	106	123	105
CCL	58	73	114	130	139	155	112
CEH	47	60	123	140	117	135	125
CMS	16	23	21	30	28	35	52
CPV	31	42	72	95	99	115	174
O	131	186	-	-	-	-	-
CO	52	145	120	170	142	200	38
COEH	52	85	127	160	158	195	129
COCV	38	58	126	160	160	200	245
COMS	24	36	31	40	48	60	67
COPV	34	44	113	150	122	158	259
COC	76	88	162	205	172	220	150
COMC	28	50	47	70	62	80	60

Desde el punto de vista del incremento entre colocar y no los aditivos es importante mencionar que la COCV y COPV son las que mejor incremento presentan con un 245 y 259%, contrario a esto las mezclas con menor incremento son las que tienen como MCS la MS esta tendencia se ve representada tanto en las mezclas binarias como ternarias y muestran incrementos del orden de 52 y 60% en las mezclas CMS y COMS, esto no quiere decir que no tenga aplicabilidad en la industria ya que en ciertas aplicaciones como la rehabilitación, estas mezclas pueden ser usadas por su acelerado fraguado.

La tabla 38 indica también que el ácido cítrico también puede aumentar los tiempos de fraguado de las mezclas pero su incidencia entre los Tff no ofrece mayor incidencia en los sistemas alcanzando un máximo de incremento entre todas las mezclas de un 50%.

De igual forma se puede observar en la tabla 38, que todas las mezclas en combinación con los MCS y con CPO, evidencian mayor tendencia al incremento de los tiempos de fraguado respecto a la referencia.

Por otro lado la figura 74, muestra que para los sistemas sin ningún tipo de aditivo en el caso de las binarias se evidencia que la única que tiene mayor tiempo de fraguado final respecto a la referencia es la CCL con un incremento del 12 %, el resto de evidencia menores tiempos de fraguado finales menores al punto de tener reducciones respecto al sistema de CSA del 64% para la mezcla de CMS y del 35% para CPV, indicando que para los MCS cuando se utilizan en combinación 30% de

reemplazo las adiciones minerales reducen los tiempos de fraguado, exceptuando la CL tal y como se dijo anteriormente.

De igual manera también se puede colocar como referencia los tiempos de fraguado del CPO e indicar que la diferencia entre este tipo de cemento y el CSA está un 186%, si se compara ahora la combinación de los dos tipos de cemento respecto a la referencia se tiene que la mezcla CO tuvo un incremento en el tiempo de fraguado final de 123%, caso contrario una vez se trabaja mezclas base CSA (50%)+CPO(25%)+MCS(25%), la adición mineral de nuevo tal y como se mostró tendencia en los sistemas binarios reducen los Tff, al punto de llegar al valores de reducciones de 44 y 32% para COMS y COPV respectivamente. Este comportamiento no se da en las mezclas COCL y COEH en la cuales se tuvo un incremento del 35 y 30% respectivamente.

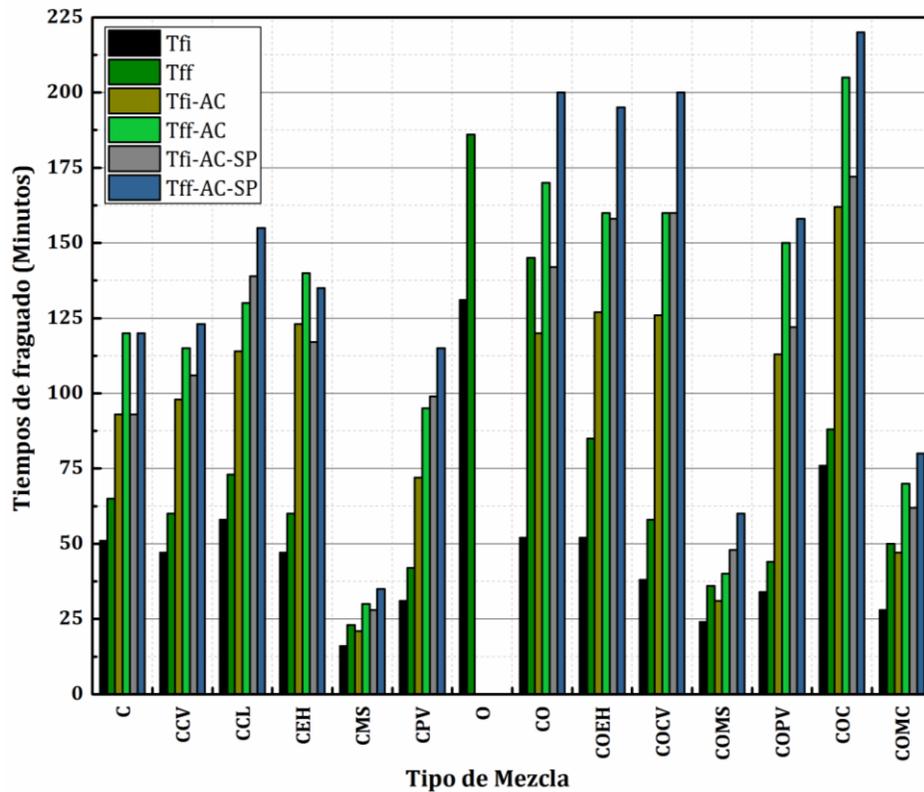


Figura 74. Tiempos de fraguado de las pastas.

Para esta parte del análisis las mezclas a las cuales se le colocó el AC como retardante, material que actuó ampliando los tiempos de fraguado en ciertas mezclas tales como las CCL y CEH para las binarias, sin embargo en mezclas en donde se incluyó la CV, MS y la CPV no se generó aumento de los Tff encontrándose reducciones de 7.7, 75, y 20% respectivamente respecto a su referencia con AC. La reducción del tiempo de fraguado con la adición de CV, puede deberse al consumo

acelerado del sulfato de calcio y a la formación de hidratos lo que puede conducir a una mayor demanda de agua y por ende a la reducción de los tiempos de fraguado.[27]

Para la mezcla CO respecto a la referencia, esta presento un aumento del 41% mostrando gran mejoramiento de los Tff.

En cuanto a las mezclas ternarias se puede observar incrementos de hasta el 70% para el caso de las COCL y reducciones del 41% para las mezclas COMC.

El efecto del plastificante se hizo importante en este tipo de mezclas tanto en la combinaciones binarias como en las ternarias, mostrando incremento del 30% para la muestra CCL y reducciones respecto a la referencia del 70%, es claro como se dijo anteriormente que en las mezclas en donde se incluyó la MS no se pudo ampliar los Tff respecto a su respectiva referencia, sin embargo si se compara la mezcla binaria CMS (AC+SP) con la misma mezcla en donde no se adiciono ningún aditivo el incremento presentado fue del 52%.

Por otro lado respecto a la referencia CSA(AC+SP), en las mezclas ternarias se presentaron incrementos importantes en todas los sistemas COEH (62%), COCV (66%), COPV(31%) y COCL(83%) lo que indica que el policarboxilato en este tipo de mezclas si actuó de manera adecuada mostrando gran compatibilidad en este tipo de combinaciones.

La reducción del tiempo de fraguado con la adición de CV, puede deberse al consumo acelerado del sulfato de calcio y a la formación de hidratos lo que puede conducir a una mayor demanda de agua y por ende a la reducción de los tiempos de fraguado.

6.2.1.4.2 Retracción por secado de pastas.

En la tabla 39 y en la figura 75 se pueden observar las retracciones por secado de diferentes muestras binarias (CSA70%+MCS30%) y ternarias (CSA 50%+CPO25%+MCS25%), las cuales fueron sometidas a 28 días de secado a temperatura y humedad controlada para conocer su retracción bajo condiciones normalizadas, los resultados de esta experimentación se muestran a continuación:

En la tabla 39, se puede observar los cambios en la retracción de la barras para la cuales es posible evidenciar que la muestra de referencia tuvo un incremento del 544% en la medida de retracción a los 28 días respecto a su retracción a 1 día, presentando un cambio importante respecto a las demás mezclas estudiadas, esta misma tendencia se muestra en los sistemas O y CO con cambios entre las mismas edades del 486 y 550%, por otro lado, las muestras binarias tuvieron diferencias de retracción entre las dos edades analizadas del orden del 51 al 69% indicando esto que los MCS ayudaron a disminuir la retracción de las mezclas estudiadas.

En el caso de las muestras ternarias dichos sistemas presentaron mayores porcentajes de incremento de la retracción en comparación a las muestras binarias presentando valores que van entre el 115% y el 399% para las muestras COMC y COPV.

Una amplia reducción de la retracción por secado al comparar las retracciones del CPO con la matrices binarias y ternarias de hasta del 80% presentándolas como alternativa de compensadores de retracción, de igual manera respecto a la mezclas de CSA la que mejor comportamiento presento fue la de CPV, la cual llego a un 40%.

Tabla 39. Retracción por secado de pastas.

Mezcla	Tiempo (Días)										
	1	3	5	7	10	13	15	18	21	25	28
	micras/m										
CSA	-101	-301	-499	-493	-522	-567	-580	-627	-612	-639	-651
CCV	-244	-268	-299	-313	-349	-378	-383	-404	-404	-394	-412
CCL	-273	-299	-328	-378	-404	-408	-409	-430	-429	-423	-423
CEH	-286	-304	-346	-386	-407	-425	-428	-451	-451	-451	-451
CMS	-367	-394	-405	-415	-480	-481	-488	-522	-531	-542	-554
CPV	-239	-268	-294	-307	-337	-367	-391	-396	-396	-396	-396
O	-396	-660	-1100	-1517	-1600	-1761	-1795	-2031	-2134	-2276	-2323
CO	-319	-955	-1249	-1470	-1751	-1857	-1892	-1933	-1924	-2008	-2073
COEH	-680	-1016	-1188	-1360	-1396	-1431	-1465	-1518	-1541	-1615	-1740
COCV	-559	-895	-1121	-1346	-1499	-1555	-1612	-1698	-1738	-1814	-1898
COMS	-262	-354	-399	-457	-535	-588	-614	-669	-690	-743	-764
COP	-302	-680	-879	-1042	-1152	-1215	-1247	-1302	-1349	-1433	-1507
COCL	-572	-824	-969	-1018	-1136	-1163	-1186	-1202	-1192	-1249	-1252
COMC	-391	-444	-585	-583	-661	-730	-761	-785	-777	-824	-843

Por otro lado, en la figura 75 se evidencia las retracciones en millonésimas por metro para cada una de las mezclas estudiadas sometidas 28 días de ensayo, en ella se aprecia una gráfica de apoyo en la cual se puede observar las reducciones en la retracción por secado que en la que se comparan las mezclas binarias y ternarias con el CPO y la mezclas binarias con el CSA.

En la figura 75, se muestra que la todas las mezclas presentan reducciones importantes en retracción por secado respecto al sistema CPO, encontrándose valores en las mezclas binarias que van del 76% para el CMS hasta el 83% en el sistema CPV, indicando este comportamiento que en sistemas base CSA las adiciones minerales presentan retracciones mucho menores respecto a la referencia.

En el caso de los sistemas CSA y CO las reducciones presentadas están en el 72 y 11% respecto a la mezcla con CPO, indicando desde el punto de vista del control

de la retracción que el combinar los dos tipos de cemento contribuye en cierta manera en la reducción de las retracciones.

En los referido a las mezclas ternarias, estas presentan reducciones menores que las mostradas en los sistemas binarios quizás por la mayor cantidad de cemento en el sistema, las reducciones de retracción respecto al CPO van desde el 18% de la mezclas COCV hasta el 64% de la mezclas COMK, se observa que en este tipo de mezclas el sistema COMS presente una alta reducción (64%) de la retracción respecto al CPO la cual se puede deber a que en este caso el tamaño partícula del material no permitió que se generará mayor reacción del MS para generar aumentos en este parámetro medido.

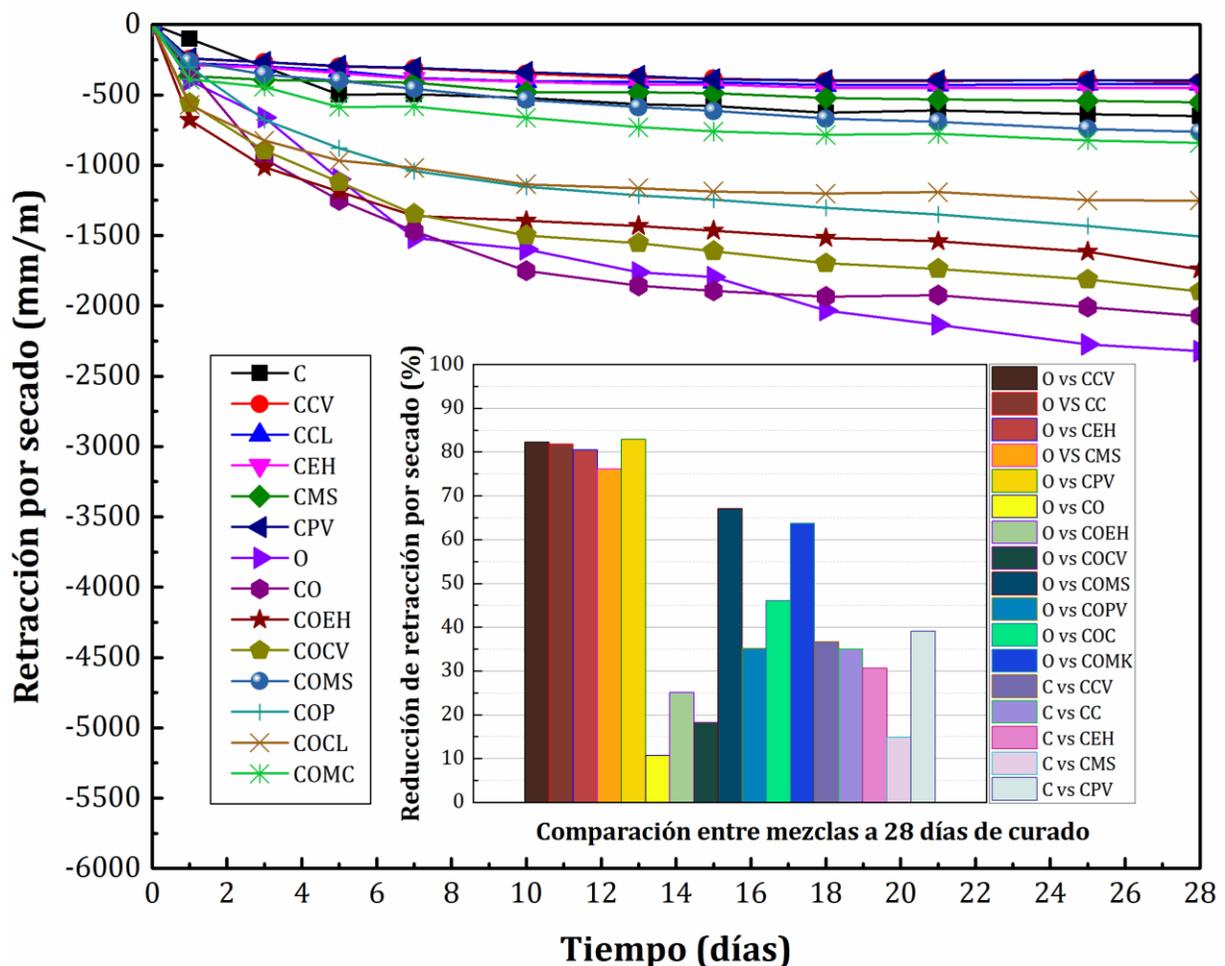


Figura 75. Retracción por secado de pastas y reducción de la retracción

Para el caso de los sistemas binarios comparados contra el CSA de puede observar que las reducciones en la retracción oscilaron entre un 15% y un 39% esto en el caso de las mezclas CMS y CPV, lo que permite plantear que los materiales

cementicios suplementarios ayudan a reducir aún más las retracciones cuando se combinan con el CSA respecto a trabajo solo con Cemento Portland.

En la tabla 39 y en la figura 75, se puede observar una amplia reducción de la retracción por secado al comparar la retracciones del CPO con la matrices binarias y ternarias de hasta del 80%, presentándolas como alternativa de compensadores de retracción, de igual manera respecto a las mezclas de CSA la que mejor comportamiento presento fue la de CPV, la cual llego a un 40%.

6.2.1.4.2 Temperatura de las pastas de cemento y cementantes.

En esta parte de la investigación se muestra las temperaturas alcanzadas por cada una de las mezclas estudiadas una vez que comienza su proceso de hidratación. En la figura 76, se puede observar las curvas de evolución de temperatura de mezclas binarias y ternarias a 24 horas de evaluación, en ella es posible observar el efecto sobre la temperatura de las adiciones minerales y del CPO en la reducción de la temperatura de los sistemas base CSA.

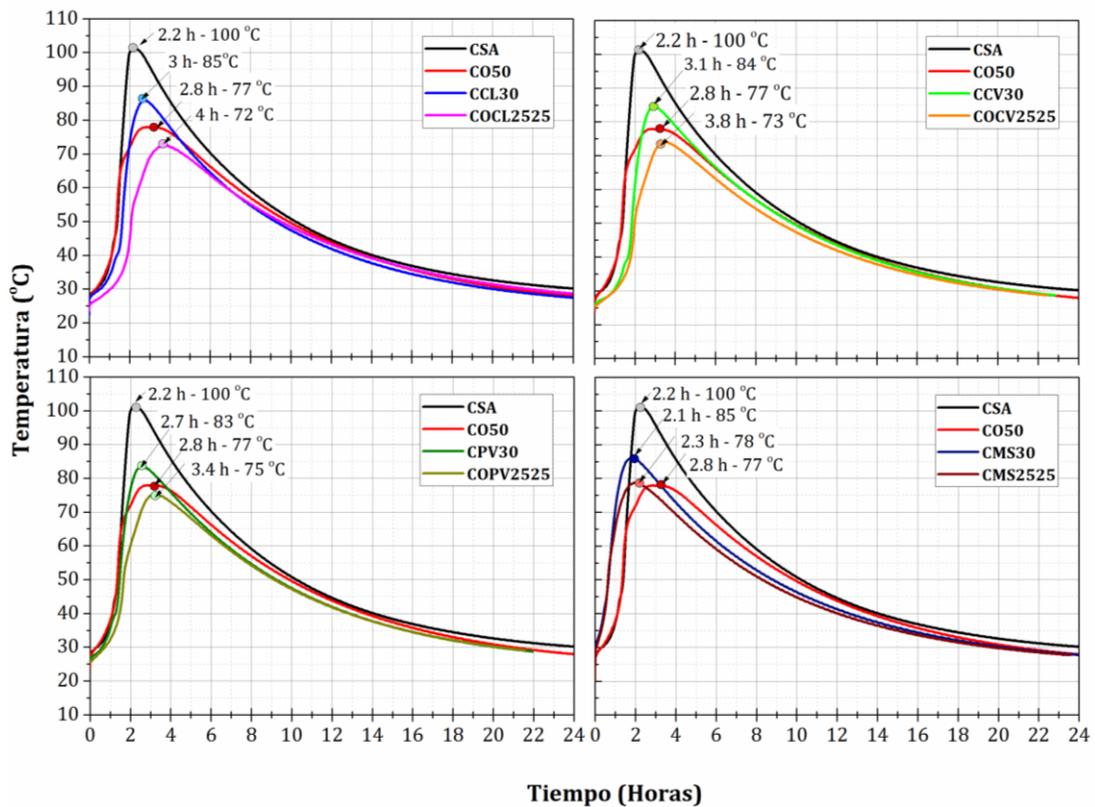


Figura 76. Temperatura de las pastas.

En la parte superior izquierda de la figura, se observa la comparación de la mezcla con CO50 la cual tuvo una reducción de la temperatura del 23% respecto a la CSA, de igual forma también se observa que las mezclas con CCL30 y COCL2525

tuvieron reducción del 15 y 28%, esto debido a baja reacción que genera la caliza en los procesos de hidratación de los cementos. Por otro lado, al comparar la temperaturas alcanzadas con la ceniza volante es posible observar en la figura 76 que la este MCS, se comporta de igual forma que la caliza disminuyendo la temperatura respecto a la referencia en un 16 y 27%, en las mezclas CCV30 y COCV2525, este comportamiento se debe a la baja reactividad de las adiciones a edades muy tempranas.

Por otro lado, la PV y MS presentan reducciones similares a los MCS antes mencionados. Indicando con esto la gran capacidad que tienen estos materiales para reducir las temperaturas en sistemas cementicios en donde se alcanza temperatura muy elevadas como es el caso de las mezclas con 100 CSA.

En todos los casos las mezclas ternarias siempre muestran mayor efectividad que las muestras binarias en la reducción de la temperatura esto debido a que en este tipo de sistemas hay menor cantidad de CSA que pueda elevar la temperatura de las mezclas estudiadas.

6.3. FASE 3- Morteros base cemento sulfoaluminoso.

En esta fase se muestran los resultados de diferentes propiedades medidas en morteros base cemento sulfoaluminoso combinado en con materiales cementicios suplementarios y cemento portland ordinario.

6.3.1. Resistencia a la compresión de morteros.

A continuación se muestran en la tabla 40 y en la figura 77 las resistencias a la compresión de sistemas binarios y ternarios de morteros sometidos a diferentes tipos de curados (aire, inmersión, cuarto de curado e inmersión por 1 día+ aire).

En la tabla 40 se puede observar el efecto del tipo de curado en cada una de las mezclas analizadas, pudiéndose evidenciar incrementos en la muestra de referencia entre los 7 y 28 días del 19% en las muestras curadas en el cuarto de curado, de igual manera al comparar las resistencias a la compresión a 28 días entre los diferentes tipos de curado es posible definir que los mejores resultados se presentan en la muestras curadas al aire, presentando una mayor resistencia la muestra de 1 día de curado y curado al aire (C1A) con 84 MPa, 11% más que la muestra curada por inmersión (CI), esto puede deberse a la posible lixiviación de los productos de hidratación en el CI los que puede provocar esta disminución de resistencia f'_{mr} .

Tabla 40. Resistencia a la compresión de morteros

Tipos de mezclas	Edad	Tipos de curado			
		CI	C1A	CC	CA
	(días)	Resistencia a la compresión (MPa)			
C	7	74.3	70.7	65.7	73.3
	S	2.8	2.4	8.8	5.9
	28	75.5	84.2	78.3	82.3
	S	0.7	6.7	6.9	3.7
CO	7	51.5	51.0	52.7	52.9
	S	4.9	1.5	1.6	2.3
	28	70.0	71.4	68.5	71.6
	S	2.4	3.0	5.7	2.7
CCL	7	44.9	45.8	45.9	48.2
	S	1.7	2.8	1.7	1.6
	28	48.2	49.8	46.1	46.5
	S	1.3	3.4	2.5	0.4
COCL	7	33.5	42.6	38.9	41.7
	S	1.9	1.2	0.9	3.6
	28	48.1	43.3	48.5	42.0
	S	0.6	1.6	0.8	3.5
CCV	7	45.0	49.1	45.3	43.6
	S	2.1	3.9	0.7	1.8
	28	48.0	44.9	48.8	43.6
	S	0.6	1.2	0.4	1.9
COCV	7	37.2	41.8	39.7	37.4
	S	2.6	1.4	2.4	2.3
	28	53.9	45.1	51.4	42.5
	S	1.7	3.1	2.3	1.0
CPV	7	43.4	50.5	42.1	51.4
	S	2.2	1.4	1.5	2.0
	28	46.0	50.1	44.0	51.3
	S	2.3	2.3	6.2	2.0
COPV	7	40.4	44.7	39.6	45.4
	S	2.8	0.9	2.8	2.2
	28	55.6	54.3	58.1	47.2
	S	1.8	3.1	2.3	1.0

De igual manera en el caso del sistema CO (CSA+CPO), se puede observar incrementos del 40% en la resistencia del sistema C1A de 7 a 28 días, y al igual que en el sistema de referencia para este tipo de mezcla, la tendencia indica que el sistema de curado al aire (CA) presenta un mejor comportamiento que el curado en cuarto de curado (CC) con un 4.5% de incremento.

En el caso de la mezcla binaria CCL, se puede observar que no se presentan incrementos importantes de una edad respecto a la otra entre los tipos de curado lo que indica que para las mezclas binarias con caliza, el tipo de curado no influye en la resistencia, esto se puede dar por que la caliza al ser un filler no aporta mayor desarrollo de resistencia a la mezcla a edades tempranas, caso contrario para el caso del sistemas ternarios en donde se tiene CPO mas caliza, se puede observar que el tipo de curado se hace importante ya que lo mayores incrementos se dan en las muestras curadas ya sea por inmersión o a través del cuarto de curado, las cuales presentan incrementos de los 7 a los 28 días del 43 y 24% respectivamente, esto posiblemente se esté dando por que para estas mezclas la hidratación del cemento Portland necesita del curado para desarrollar de mejor manera su resistencia.

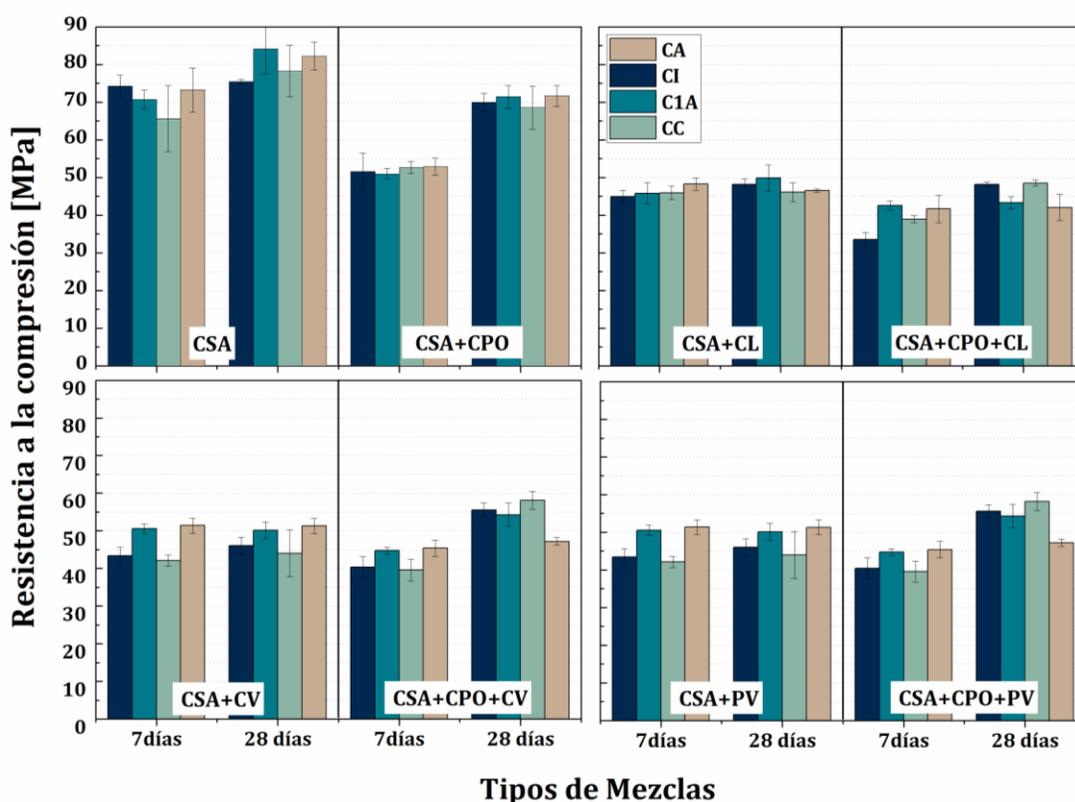


Figura 77. Resistencia a la compresión del mortero.

En el caso de la ceniza volante se tiene un comportamiento similar al presentado por la caliza tanto en las mezclas binarias como en las ternarias. En la mezcla COCV se muestra un incremento en la f'_{mr} de 7 a 28 días para los tipos de curado CI y CC del orden del 45 y 29%, la misma tendencia se aprecia en la muestra COPV para la cual los especímenes curados mediante CI y CC generan los mejores incremento de la resistencia de 7 a 28 días con aumentos de 37 y 46%, esto de igual manera se debe a que las mezclas que tienen cemento en su composición requieren de un buen tipo de curado para que desarrollen de manera adecuada su evolución de la resistencia.

La figura 77, muestra el efecto de adicionar materiales cementicios suplementarios en mortero con matrices base cemento CSA, en ella se puede observar la comparación entre sistemas binarios y ternarios en donde se combinan el CSA con la caliza, CV y la PV y el CSA mas los MCS antes mencionado y el CPO, además se puede observar cómo afecta el tipo de curado las combinaciones antes mencionadas. En ese orden de ideas es posible observar que para el curado por inmersión la mayoría de la mezcla tuvieron un decremento importante en la resistencia llegando a valores máximos de reducción entre 26% y 38 % en el caso de la muestra COPV y CPV, sin embargo, en estas mezcla se tiene reemplazo del 25% y del 30% lo que desde el punto de vista de sostenibilidad se vuelve importante ya que en las dos mezclas la reducción del uso de CPO tiene un alto valor agregado si se extrapola a las emisiones de CO₂ que se producen en el proceso de fabricación del cemento.

Por otro lado, si evaluamos el curado C1A, es posible definir que la reducción de la resistencia es mucho más severa que en el curado CI, los rangos de reducción van del 35% al 48% para la mezclas COPV y COCL lo que indica que definitivamente combinaciones CSA+MCS y CSA+MCS+CPO necesitan de un buen curado para que se desarrolle las resistencias adecuadas.

La tendencia mostrada en los curados CC y CA son muy similares a lo indicado en f_{mr} que evidencia en los curados C1a y CI.

La resistencia a la compresión del sistema CO (CSA+OPC), se ve afectada cuando en la mezcla existe una mayor cantidad de CPO[66], lo que indica que al tener menor cantidad de CPO en la mezclas de mortero ternarias respecto a la referencia CO, estas mezclas presentarán menores resistencia.

6.3.2. Resistividad eléctrica superficial de Morteros.

A continuación se muestra en la tabla 41 y en la figura 78 los valores de resistividad eléctrica superficial de morteros base cemento sulfoaluminoso en donde se combinaron diferentes tipos de cementantes de manera binaria y ternaria con el fin de observar el efecto de este tipo de MCS y del CPO en la resistividad de muestras curadas en CI y en CC.

En la tabla 41 se puede observar como el tipo de curado afecta la RES encontrándose en el caso de la mezcla referencia reducciones del 22% entre los dos tipos de curados (CI respecto al CC) estudiados a los 28 días, de igual manera se observa disminución de la RES del orden del 40, 30 y 34% al analizar las muestras CC30, CV30 y CPV30, posiblemente por la porosidad interna generada entre el curado CI y el CC, ya que en el de inmersión se puede dar una mejor densificación de la matriz.

Por otro lado la figura 78, también muestra el efecto en la resistividad de la incorporación de MCS, CPO y de los tipos de curado en la RES acompañada de los límites de penetrabilidad del ion cloruro según la normativa AASHTO T358.

Tabla 41. Resistividad eléctrica superficial por el método de Wenner

Mezcla	Tiempo (Días)							
	7				28			
	CI	S	CC	S	CI	S	CC	S
	kOhm-cm							
CSA	9.04	0.30	8.16	0.24	10.82	2.06	8.36	0.35
CO	6.56	0.13	6.67	0.17	12.56	0.20	12.49	0.32
CC30	4.52	0.08	3.47	0.24	7.60	0.13	4.56	0.23
COC2525	5.97	0.34	5.08	0.30	6.59	0.38	6.20	0.12
CCV30	5.59	0.16	5.13	0.27	8.61	0.33	5.99	0.46
COCV2525	8.76	0.83	7.89	0.47	8.33	0.14	7.57	0.28
CPV30	9.59	0.38	6.90	0.30	10.46	0.14	6.89	0.59
COPV2525	7.67	0.27	6.90	0.29	8.31	0.21	9.24	0.50

La figura 78, evidencia que las mezclas binarias y ternarias curadas en inmersión a los 28 días muestran reducciones de 29, 39,20 ,23 y 23% para los sistemas CC30, COC2525, CCV30, COCV2525 y COPV2525 respectivamente.

Como se expresó anteriormente todas las mezclas tienen reducciones respecto a la referencia esto debido a la mayor porosidad de las matrices binarias y ternarias que incluyen MCS y CPO lo que las hace menos resistivas, caso contrario la matriz CSA+CPO genera un incremento del 16% posiblemente a que la mezcla entre los dos tipos de cemento presente una matriz en donde los procesos de hidratación estén mayormente desarrollados lo que las hace más resistiva.

En el caso de las muestras curadas en cuarto de curado, se observa la misma tendencia para todas las mezclas presentado la mezcla CO con un incremento del 49% en el valor de RES respecto a la referencia indicando que a los 28 días de edad la matriz CO es la que mejor comportamiento muestra, quizás porque en las otras mezclas en donde intervienen los MCS, a esta edad no se han generado completamente los procesos de hidratación del cementante, tal y con indico la tendencia mostrada en pastas.

Por otra parte, al comparar los resultados tanto en muestras CI y CC y adaptando los límites de la AASHTO T358, se puede observar que a la edad de 28 días todas las muestras con adiciones minerales indican comportamiento por debajo del límite de 12 kOhm-cm, indicando esto que hay una penetrabilidad alta del ion cloruro pudiéndose definir estos tipos de mezclas como no tan durables ante este ataque exógeno hacia el concreto.

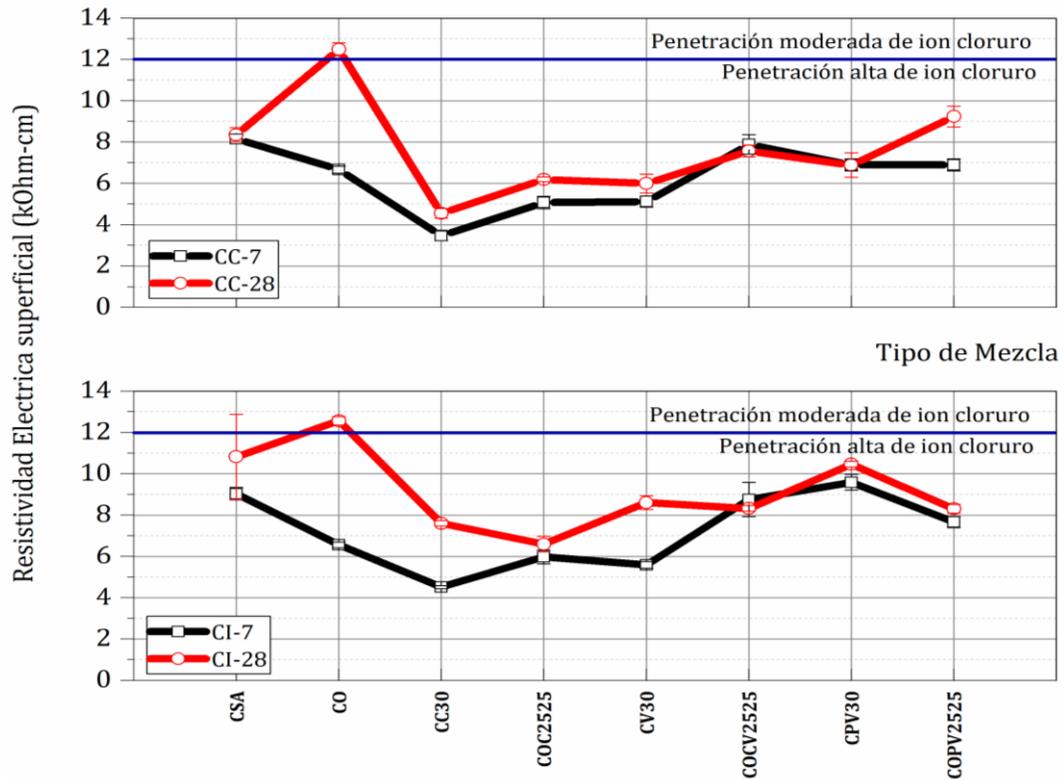


Figura 78. Resistividad eléctrica superficial Wenner del mortero.

La única mezcla que se puede ubicar en la zona de penetración moderada del ion cloruro es la muestra CO la cual presenta valores de RES del 5% mayores a límite de 12 kOhm-cm de la AASHTO.

También se puede decir que la muestra binaria con caliza es la que indica menor desempeño en RES, mostrando valores de resistividad del 62% por debajo del límite de 12 kOhm-cm, esto a puede deberse a la poca reactividad que tiene este material a edades tempranas con el CSA.

6.3.3. Velocidad de Pulso Ultrasónico en Morteros.

En la tabla 42 y en la figura 79, se muestran las diferentes tendencias de las mezclas estudiadas, teniendo en cuenta el tipo de curado y el efecto de los MCS y del CPO en matrices binarias y ternarias base CSA.

Tabla 42. VPU de morteros base cemento Sulfoaluminoso

Tipo de mezcla	Tipos de curado			
	CA	C1A	CI	CC
	Velocidad promedio (m/s)			
CSA	4635	4640	4725	4774
S	43	43	22	49
CO	4667	4726	4766	4793
S	8	21	17	5
CCL30	4121	4118	4451	4318
S	32	40	5	33
COCL2525	4388	4454	4647	4747
S	29	73	6	17
CCV30	4156	4127	4313	4324
S	24	17	26	37
COCV2525	4760	4529	4776	4853
S	26	86	3	31
CPV30	4272	4264	4391	4356
S	19	17	20	11
COPV2525	4836	4696	4614	4812
S	78	11	9	27

La tabla 42 y la figura 79, muestran cambios de los diferentes sistemas estudiados respecto a la referencia los cuales indican que las muestras binarias en el curado CC presentan reducciones del 10, 9 y 9% para CCL30, CCV30 y CPV 30 respectivamente.

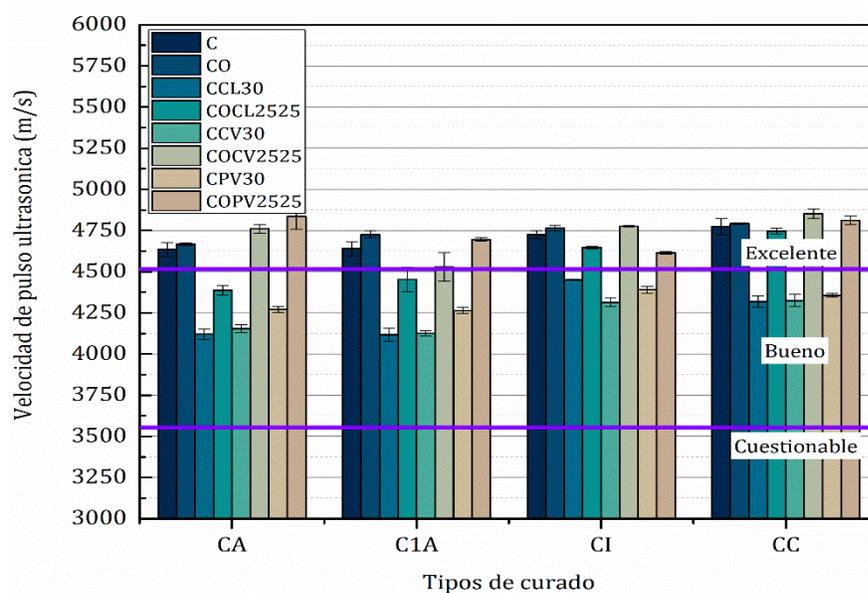


Figura 79. Velocidad de pulso ultrasónico del mortero a 28 días de curado.

De igual manera al revisar los otros tipos de curados se observa que en el caso del curado CA los porcentajes de reducción de resistencia están en 11, 10 y 8% para CCL30, CCV30 y CPV 30 respectivamente. Lo anteriormente expuesto indica una menor calidad de estos sistemas respecto a la referencia lo que se puede explicar por una mayor porosidad de estos sistemas a edades tempranas.

Por otro lado, los sistemas ternarios que combinan la CV y PV con el CPO muestran los mejores comportamientos desde la velocidad de pulso ultrasónico teniendo como incrementos en el caso del curado CA un aumento respecto a la referencia del 2 y 4% para las mezclas COCV y COPV respectivamente. Estos porcentajes no son demasiado altos sin embargo son los que mayor diferencia presentan en incremento entre las referencias y el resto de los sistemas. Los demás tipos de curado presentan cambios en porcentajes de incrementos muy reducidos lo que indica que para estos sistemas el tipo de curado no genera mayor cambio en los valores de VPU.

La mezcla con menor desempeño en cuanto a la medida de VPU es la que contiene caliza, esto como se dijo anteriormente puede darse la porosidad presentada en la combinación binaria entre el CSA y la CL a edades tempranas.

De la figura 79 es también importante decir que adaptando el criterio de control de calidad del concreto de la IS 13111 parte 1 de 1992 para VPU, las muestra CSA, CPO, COCV y COPV en la mayoría de los métodos de curado se clasifican con calidad excelente y el resto de mezclas se clasifica como bueno, lo que indica que bajo esta forma de reconocer como están las mezclas de concreto todos los sistemas estarían bien para ser usados en aplicaciones constructivas.

6.3.4. Carbonatación de morteros base cemento CSA.

En las tablas y graficas que se pueden ver a continuación se observa el efecto del reemplazo de los MCS y del CPO en mezclas base CSA desde el punto de vista de la carbonatación, la cual se generó al someter cada uno de los sistemas a un ensayo de durabilidad con una concentración de CO₂ del 8% a una temperatura del 23°C y una humedad relativa de 60±10. Cada uno de los especímenes fueron evaluados a diferentes edades tal y como se puede observar en las gráficas 80 a y b, de igual manera también se aprecia que las mezclas se sometieron a diferentes regímenes de curado para los cuales se presentaron los siguientes resultados desde el punto de vistas de la profundidad a la carbonatación de la mezclas.

En la tabla 43, se evidencia cada uno de los sistemas estudiados, pudiéndose observar que desde el punto de vista de la carbonatación en la mezcla de referencia, las muestras curadas CA y C1A, tuvieron profundidades del frente de carbonatación del orden de 11 mm, respecto a los 4.29 mm y 2.05 mm de la muestras curadas

mediante CI y CC, lo que indica esto que el tipo de curado afecta el frente de carbonatación de la muestra.

Tabla 43. Carbonatación de morteros base Cemento Sulfoaluminoso

Tiempo	Tipo de curado							
	Profundidad de carbonatación (mm)							
100 CSA								
Tipo de mezcla	C-CA	S	C-C1A	S	C-CI	S	C-CC	S
0	0.72	0.3	1.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
7	6.26	0.1	6.72	0.29	2.63	0.17	0.58	0.22
14	8.24	0.2	8.18	0.95	3.14	0.37	1.48	0.36
21	10.40	0.3	10.57	0.11	3.19	0.19	1.79	0.57
28	11.99	0.1	11.38	0.12	4.29	0.02	2.05	0.14
50 CSA + 50 CPO								
Tipo de mezcla	CO-CA	S	CO-C1A	S	CO-CI	S	CO-CC	S
0	2.12	0.02	2.09	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
7	5.83	0.32	5.75	0.34	1.23	0.29	0.53	0.14
14	6.79	0.10	7.55	0.37	1.71	0.20	0.98	0.35
21	8.62	0.44	8.02	0.26	2.89	0.61	1.64	0.39
28	8.76	0.07	9.13	0.10	3.56	0.30	2.22	0.49
70 CSA + 30 C								
Tipo de mezcla	CC-CA	S	CC-C1A	S	CC-CI	S	CC-CC	S
0	5.82	0.23	5.71	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
7	19.76	0.37	18.87	0.66	8.37	0.53	5.97	0.65
14	0.00	0.00	0.00	0.00	12.20	0.37	10.62	0.80
21	0.00	0.00	0.00	0.00	17.04	0.43	14.55	0.84
28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.13	1.77
50 CSA + 25 C + 25 CPO								
Tipo de mezcla	COC-CA	S	COC-C1A	S	COC-CI	S	COC-CC	S
0	7.72	0.37	7.29	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00
7	19.25	0.81	19.43	0.59	5.86	0.55	1.37	0.54
14	0.00	0.00	0.00	0.00	8.08	0.66	3.37	0.47
21	0.00	0.00	0.00	0.00	9.33	0.63	4.68	0.25
28	0.00	0.00	0.00	0.00	11.13	0.74	6.13	0.66
70 CSA + 30 CV								
Tipo de mezcla	CCV-CA	S	CCV-C1A	S	CCV-CI	S	CCV-CC	S
0	5.40	0.16	5.21	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00
7	17.12	0.24	18.55	1.36	5.86	0.33	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00	9.95	0.80	3.40	0.84
21	0.00	0.00	0.00	0.00	13.73	0.16	3.90	0.62
28	0.00	0.00	0.00	0.00	18.69	0.88	6.45	0.92
50 CSA + 25 CV + 25 CPO								

Tipo de mezcla	COCV-CA	S	COCV-C1A	S	COCV-CI	S	COCV-CC	S
0	0.75	0.15	0.88	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
7	16.44	0.43	8.74	0.32	4.20	0.17	3.19	0.02
14	0.00	0.00	10.61	0.19	5.71	0.37	4.50	0.08
21	0.00	0.00	12.31	0.35	7.79	0.18	6.40	0.03
28	0.00	0.00	14.73	0.24	8.95	0.29	7.28	0.09
70 CSA + 30 PV								
Tipo de mezcla	CPV-CA	S	CPV-C1A	S	CPV-CI	S	CPV-CC	S
0	2.61	0.22	2.60	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
7	14.99	1.19	15.31	0.32	5.00	0.44	3.46	0.16
14	0.00	0.00	0.00	0.00	14.38	0.72	11.58	0.46
21	0.00	0.00	0.00	0.00	17.79	0.68	17.04	0.47
28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50 CSA + 25 PV + 25 CPO								
Tipo de mezcla	COPV-CA	S	COPV-C1A	S	COPV-CI	S	COPV-CC	S
0	0.16	0.17	1.32	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
7	11.13	0.93	6.70	0.18	3.10	0.39	3.46	0.16
14	12.10	0.67	8.02	0.30	5.77	0.43	4.19	0.22
21	13.56	0.54	9.24	0.34	6.64	0.90	7.30	0.06
28	18.08	1.25	10.48	0.40	8.76	0.14	7.71	0.60

De la tabla anterior también se observa que en el caso del sistema CO, que corresponde a 50% CSA+50%CPO, el curado tiene un papel importante en su desempeño en la resistencia al ingreso del CO₂, en el material indicando mayor incidencia del frente de carbonatación sobre la muestra cuando esta no se ve curada(CA y C1A) respecto a las curadas (CI y CC) mostrando aumentos en la profundidad de carbonatación a los 28 días del orden del 294 y 311% al comparar CC con CA y C1A, respectivamente, esto debido a la porosidad formada en la matriz por la falta de curado el cual afecta de manera importante los procesos de hidratación temprana permitiendo el ingreso del dióxido de carbono.

Al revisar las muestras binarias en donde se tiene como adición mineral la caliza, ceniza volante y la puzolana natural se evidencia según la tabla 43 y la figura 80 (a) y (b), que para el caso de la caliza el tipo de curado influyo categóricamente indicando que el no curar las muestras en este tipo de combinaciones afecta el material a tal punto de que el frente de carbonatación alcanza su máximo avance en las probetas que se curaron al aire (CA y C1A) a los 7 días de exposición ante el CO₂, hecho que indica que la caliza a edades muy tempranas al no aportar en el proceso de hidratación de la mezclas por la falta de reactividad de la misma, genera una matriz con una alta porosidad esto aunado a que en los primeros días no hubo

restitución del agua superficial del sistema por la falta de curado se produjo una exacerbación en las posibles reacciones de densificación del sistema provocando finalmente los efectos mostrados de profundidad de carbonatación. Esta misma tendencia se presenta en las otras dos muestras binarias que incluyen la CV y la PV, para las cuales a los 7 días en las mezclas no curadas también se presentó la penetración total del frente de carbonatación sobre las muestras, comportamiento relacionado de igual manera falta de hidratación temprana y la falta de reactividad de los MCS estudiados.

Por otro lado, al observar las mezclas ternarias, la combinación CSA+CPO+CL presenta penetración total en las muestras no curadas igual que su similar binaria, lo que indica que para este tipo de mezclas en donde se tiene como base el CSA la caliza carece de compatibilidad con este tipo de cemento cuando la mezcla tiene pérdida del agua de curado.

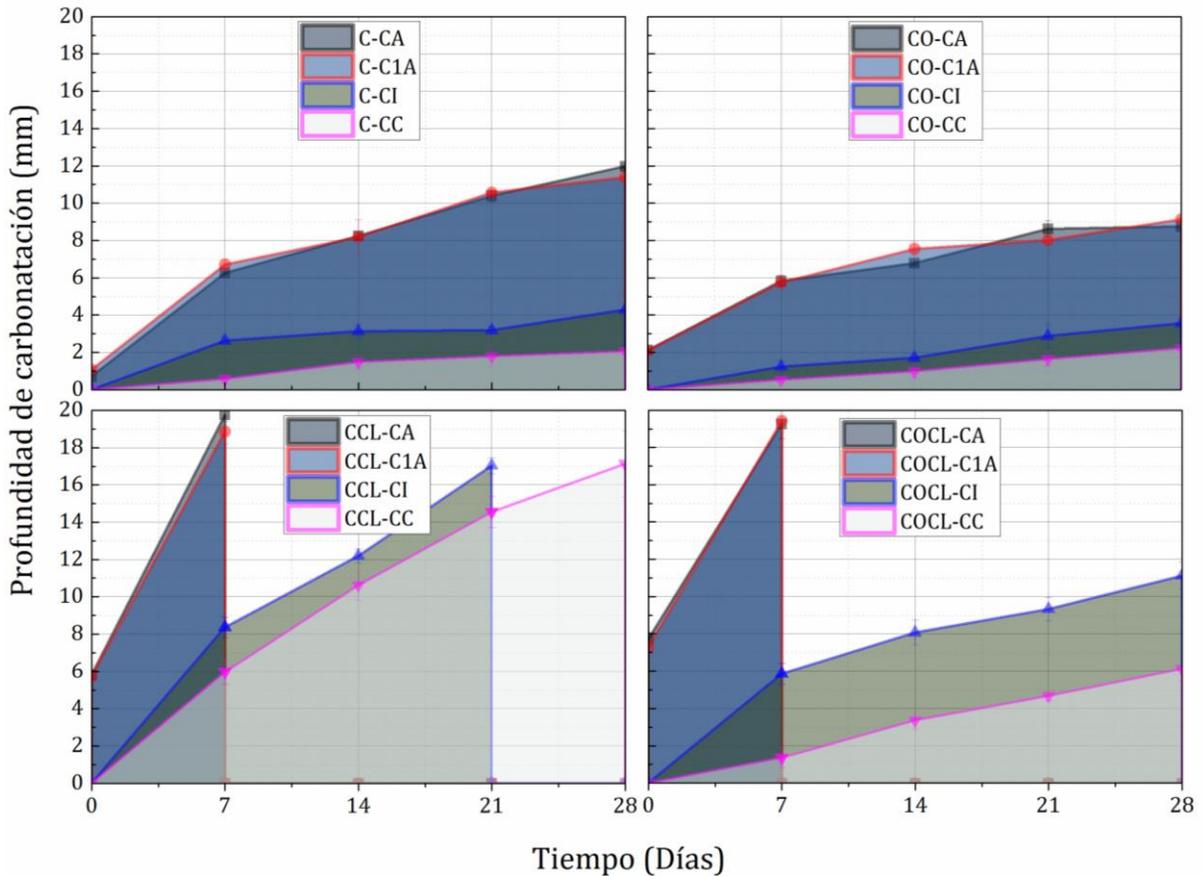


Figura 80. Profundidad de carbonatación (a) Carbonatación en sistemas binarios y ternarios base CSA, OPC y CL

Para el caso de los sistemas con CV el comportamiento mejora indicando que solamente con hidratar 1 día la muestra se mejora la resistencia al avance del frente de carbonatación. Para el caso de las muestras con PV se evidencia que este tipo de MCS tiene muy buena reactividad con los dos tipos de cemento al punto de que,

aunque la penetración del CO₂ se presenta de manera importante a edades tempranas la profundidad total se alcanza hasta los 28 días.

La figura 80 (a) y (b), muestra los efectos en la profundidad de carbonatación que generan diferentes tipos de curado y MCS, en la Figura 80. Profundidad de carbonatación (a) Carbonatación en sistemas binarios y ternarios base CSA, OPC y CL (a) se puede observar a los 28 días de curado en CC, las muestra muestran su mejor comportamiento, indicando profundidades de penetración del orden del 2.05, 2.22, 17.13 y 6.13 mm para las muestras CSA, CO, CCL y COCL respectivamente, indicando esto que este tipo de mezclas deben curarse de manera adecuada para evitar problemas de durabilidad, de igual manera en términos de porcentaje es posible indicar que aunque se cure el sistema CSA, este se va a ver afectado por la inclusión de la caliza mostrando un aumento de la profundidad del frente de carbonatación de la mezcla binaria respecto a la de referencia en el curado CC del 734 %, esto debido a que esta adición mineral no tiene reactividad con este tipo de cemento lo que genera mayor porosidad por el aumento del agua de reacción respecto al cementante.

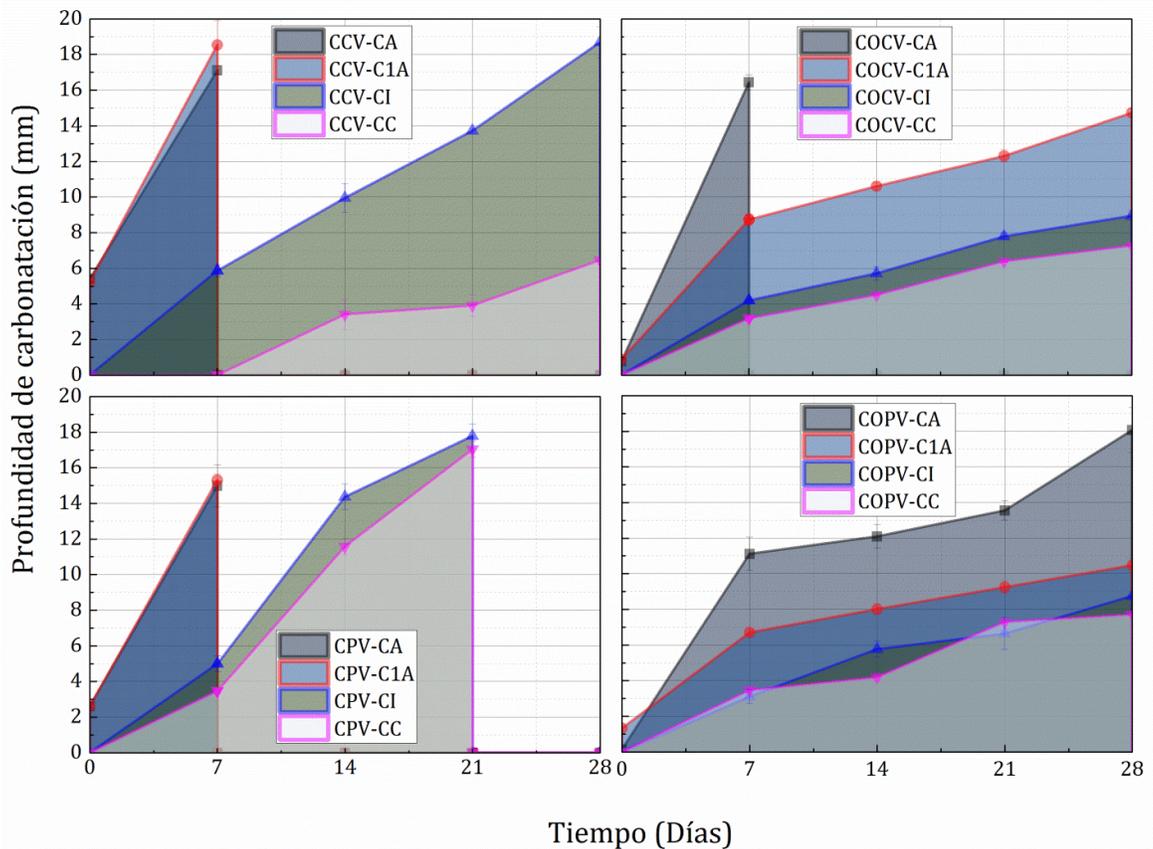


Figura 81. Profundidad de carbonatación (a) Carbonatación en sistemas ternarios base CSA, OPC, CV y PV

En el caso de la combinación COCL, el aumento de la profundidad de carbonatación esta al rededor del 198% mostrando una menor incidencia de la caliza primer por la menor cantidad utilizada y segundo por la excelente sinergia que tiene el CPO y la CSA, lo que contribuye al mejoramiento en la durabilidad de las mezclas. La combinación CO curada en CC resulta ser la mejor y resulta lógica por que los dos tipos de cemento tienen la capacidad de reaccionar de manera adecuada para producir una matriz con excelente durabilidad.

Por otra parte, las combinaciones mostradas en la figura 81 (b) indican de igual manera que adicionar MCS en mezclas base CSA afectan su resistencia a la carbonatación mostrando aumentos entre el 214% y el 275%, para CCV y COPV en muestra curada en CC, incrementos que parecen altos, pero al analizar los resultados respecto a la muestras no curadas se puede observar reducciones importantes. El incremento en la carbonatación está ligado a una matriz más porosa a los 28 días por la adición mineral. Para el caso de la muestra con PV se muestra que el total del perfil de penetración se dio a los 21 días mostrando que para este tipo de combinaciones binarias la puzolana natural no es compatible con el CSA produciendo una matriz que a edades intermedias carece de reactividad.

6.4 FASE 4 - Concretos base cemento sulfoaluminoso.

Con el objetivo de conocer cómo se comporta este tipo de cemento CSA en mezclas de concreto, en esta etapa se escogió una sola adición mineral y se investigó cual era el efecto de realizar altos reemplazos del MCS en concreto base CSA, además se revisó si la incorporación de un polímero superabsorbente aplicado como estabilizador de suelos podría generar efectos en el curado externo del concreto a edades tempranas.

6.4.1. Resistencia a la compresión concretos base cemento sulfoaluminoso.

Para esta fase se incorporó 0.03% de SAP y sustituciones del 30 y 50 % de ceniza volante respecto al total del cemento esto con el fin de conocer el efecto de estos materiales sobre la resistencia a la compresión del concreto curado en inmersión.

La tabla 44, muestra los valores de resistencia a la compresión f'_{cr} , de concreto base CSA con una relación agua/cte de 0.4 a diferentes edades de ensayo. En ella se posible observar que su máxima ganancia de pendiente de resistencia se da entre los 7 y 28 días alcanzando 0.5 en el sistema CSA respecto a las pendientes entre otras edades, esta misma tendencia de ganancia de resistencia se presenta para la otras mezclas estudiadas, lo anterior indica que para todos los sistemas analizados la edad en donde se puede considerar que ya se desarrollaron la mayoría de los productos de hidratación es la de 28 días. De igual manera al analizar la pendientes entre los 28

y 484 días fue posible evidenciar pendientes menores (0.034, 0.072, 0.056, 0.095, 0.066 y 0.084 para las mezclas CSA, CCV30, CSAS, CCV30s y CCV50S respectivamente) las cuales muestran que si bien la ganancia de resistencia entre estas edades es importante, esta se logra a edades muy tardías por disolución.

Tabla 44. Resistencia a la compresión del concreto

Tipo de mezcla	Edad (Días)				Pendiente entre días 7 y 28
	7	28	56	484	
	Resistencia a la compresión				
	(MPa)				
CSA	52.7	63.3	65.3	78.7	0.505
S	4.6	5.4	3.6	5.94	
CCV30	28.4	34.3	36.9	67.0	0.281
S	1.9	0.9	2.0	5.31	
CCV50	19.0	24.3	22.2	50.0	0.251
S	0.8	1.0	0.0	2.92	
CSAS	33.6	35.9	54.7	79.3	0.107
S	5.5	0.5	6.7	5.57	
CCV30S	19.2	20.9	33.1	51.2	0.082
S	2.2	1.1	2.6	2.15	
CCV50S	11.3	14.3	17.5	52.6	0.144
S	0.6	2.6	0.9	5.55	

En la figura 82, se puede observar que la ganancia de resistencia entre los 28 días y los 484 días para la muestra referencia fue de 24%, pero al analizar el incremento en porcentaje entre las mismas edades para la mezclas con 30 y 50% de sustitución de ceniza volante se puede establecer que los incrementos son muy superiores entre estas edades, evidenciando aumentos del 95% y del 106% lo que indica que la CV tiene una alta compatibilidad con este tipo de cemento permitiendole generar incrementos a edades tardias en la mezclas de concreto, tambien muestra una tendencia importante y que entre mayor es la cantidad mayor capacidad de reacción tiene la CV.

Por otra parte, en la misma figura se puede obsevar el efecto del SAP a edades tardias entre las misma edades evaluadas anteriormente para la mezcla referencia , para la cual produjo incrementos del 121% lo que permite establecer que el SAP incide en la disolucion de los productos de hidratación para seguir ganado resistencia a través del tiempo. De igual manera al analizar la influencia del SAP en combinacion con la CV se puede obsevar incrementos del 144% y 267 % para las mezclas CCV30S y CCV50S respectivamente, lo que muestra que matrices con ceniza volante y el

polímero superabsorbente permiten ganancias de resistencia por la mejor saturación de poros dentro de la matriz cementicia.

La muestra de referencia a edades tardías obtuvo una resistencia a la compresión de 78.7 MPa (a los 484 días), sin embargo al sustituir la ceniza volante por el CSA dicha sustitución produjo reducciones del orden del 14 % que desde el punto de vista práctico no esta tan relevante considerando que se está reemplazando el 30% del material cementante generando una mezcla muy sostenible y con buenas resistencias a la compresión.

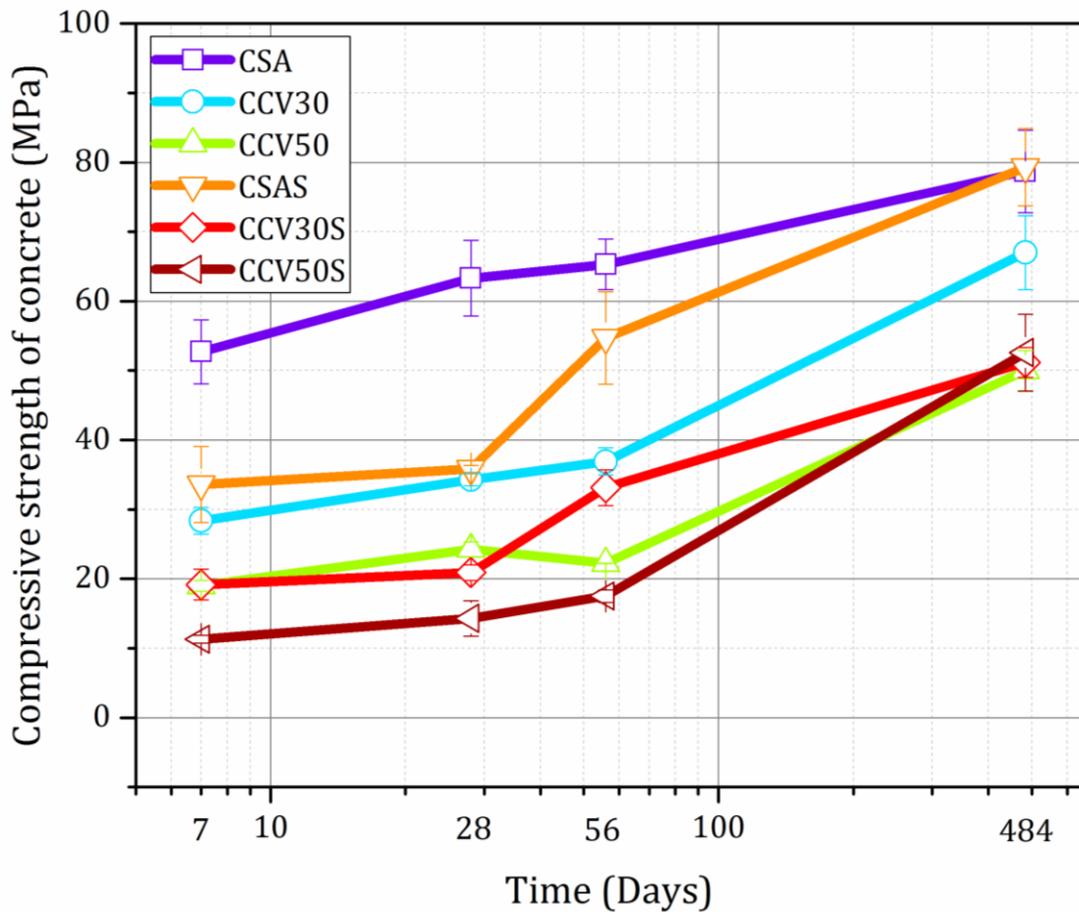


Figura 82. Resistencia a la compresión del concreto

En ese mismo sentido al reemplazarse el 50% de CSA por CV el porcentaje de reducción de resistencia a edades muy tardías se redujo en un 36% que si bien es un poco alta también es cierto que se convierte en una mezcla muy sostenible debido a que además de tener una resistencia adecuada, desde el punto de vista de sostenibilidad se está llegando a mezclas que contribuye en la reducción de la huella de carbono en altos porcentajes respecto a la mezclas de concreto con cemento portland ordinario. Aquí también se puede evidenciar que si se normalizo la

referencia respecto al 50% de sustitución la mezcla CCCV50 presente un aumento del 27% en resistencia a la compresión.

Al realizar una comparación entre los sistemas CSA y CSAS, la resistencia a la compresión no se ve afectada es más se presenta un pequeño incremento del 0.7%, esto indica que a edades tardías el SAP genera que se obtenga resistencia similares a la de referencia.

Por otro lado al revisar el efecto del SAP en la mezclas con sustitución se puede observar reducciones de resistencia del 34% y del 33 % para las mezclas CCV30S y CCV50S respectivamente lo que indica que a edades tardías este tipo de sistemas pueden alcanzar con la ayuda del SAP las resistencias similares a las muestras que no contienen el polímero, esto en el caso del sistema CCV50S. Para la muestra con 30% de sustitución se observa una afectación de sus resistencias tardías que ronda el 23% entre las mezcla con y sin SAP.

Duan[78] muestra comportamiento de resistencia superior para la muestra de referencia en la resistencia a la compresión a edades tempranas de 28 d y tardías, posiblemente debido al mayor tamaño de la ceniza volante utilizada en esta investigación lo que no permitió el mejoramiento de la matriz ce concreto.

6.4.2. Retracción por secado de concretos base cemento sulfoaluminoso.

A continuación, se muestran los resultados de la retracción por secado del concreto en la tabla 45 y la figura 83, en ellas se muestra el efecto del usar altos porcentaje de CV en el concreto a edades tardías y de introducir un polímero superabsorbente en el concreto para ayudar con el curado externo del material, la Tabla 45. Retracción por secado del concreto muestra dichos efectos pudiéndose observar que a edades de 500 días las mezclas indican que para el sistema de referencias se tiene una retracción por secado de -231 micras/m, de igual manera si se compara valor anterior con los datos de las otras combinaciones es posible establecer reducciones en la retracción por secado del orden del 33% respecto al sistema con 30% de sustitución y del 47% cuando se sustituye el 50% de ceniza volante esto nos evidencia que el ingresar este MCS a la matriz de concreto este va a actuar como un agente reductor de contracción.

Tabla 45. Retracción por secado del concreto

Mezcla	Tiempo (Días)				
	1	14	28	56	500
	µm/m				
CSA	-131	-139	-147	-165	-231
CCV30	-73	-79	-84	-105	-147

CCV50	-42	-50	-58	-84	-121
CSAS	-147	-194	-199	-239	-302
CCV30S	-129	-134	-134	-181	-228
CCV50S	-39	-51	-98	-134	-150

La tendencia anterior posiblemente se mantiene desde edades tempranas debido a que la CV ayuda a controlar el calor de hidratación inicial generado en las mezclas con CSA lo que induce a regularizar las retracciones en el concreto.

Por otro lado, cuando se evalúa la mezcla referencia con SAP en la figura 83 se puede evidenciar que se produce un incremento en la retracción por secado del orden del 30%, esto posiblemente se esté presentado cuando el SAP interactúa con el cemento y se produce un aumento en el calor de hidratación de la mezcla produciendo a edades tardías mayores retracciones debido a posibles efectos de microfisuración temprana. Siguiendo con el análisis se puede observar que en las combinaciones de SAP y CV se presentan reducciones en la retracción por secado generadas por el hecho que la ceniza volante en estas proporciones produce un efecto directo en la retracción del concreto.

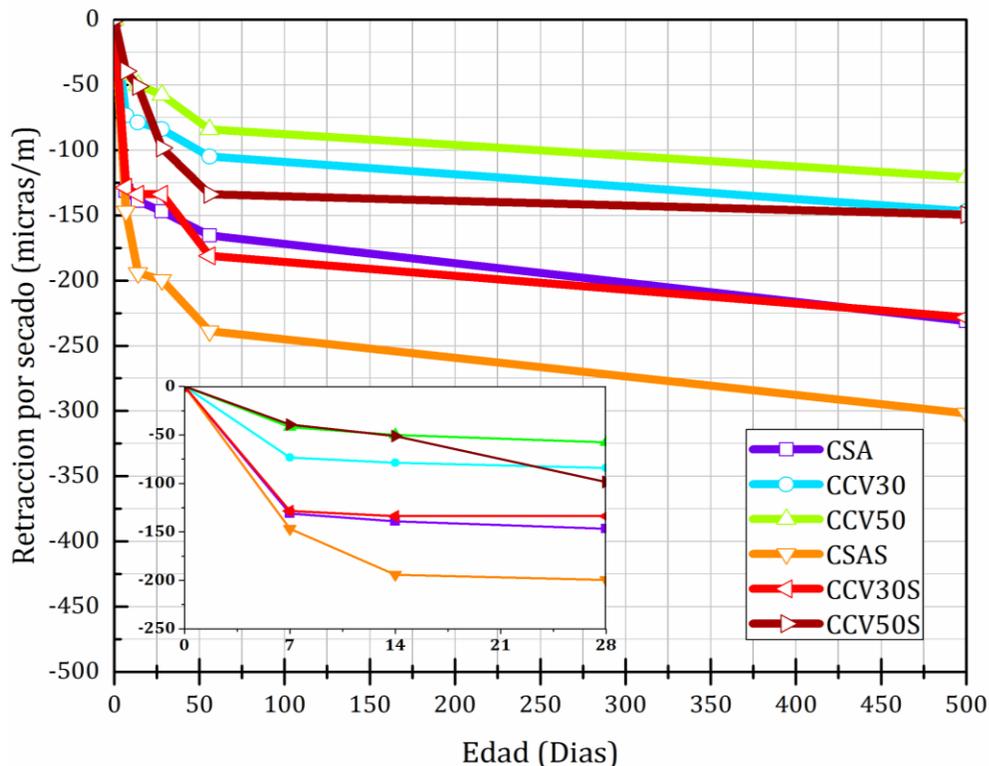


Figura 83. Retracción por secado del concreto

Por último, la ceniza volante en sustitución del 50% muestra a edades tardías reducciones respecto a la referencia del 35% que es importante desde el punto de vista de encontrar un material que contribuya en mayor medida a reducir problemáticas de retracción de los concretos que se utilizan en el sector de la construcción.

Afroughsabet[79], muestra para una matriz de 100% CSA retracciones mucho mayores a la mostrada en esta investigación, de igual manera se observa la misma tendencia sobre matrices combinadas la cuales indican menor retracción que la referencial

6.4.3. Resistividad de concretos base cemento sulfoaluminoso.

Con el objeto de conocer parámetro de durabilidad a continuación se muestran los resultados de la resistividad del concreto. Se realizaron dos tipos de resistividad una por el método de Wenner y otra por método Bulk, tal y como se puede observar a continuación en la tabla 46 y tabla 47.

En la tabla 46 se puede observar el incremento de la resistividad de la muestras a edades tardías para las cuales en la muestra de referencia se observa un incremento en la pendiente de ganancia de resistencia de 0.51 de 28 a 56 días y de 0.14 de 56 a 484 días, en ese mismo sentido se puede observar que desde el punto de vista de la resistividad eléctrica las mezclas con la adiciones minerales muestran incrementos importantes esto debido a la mayor densificación de la matriz lo que produce una tendencia al incremento de esta propiedad.

Tabla 46. Resistividad del concreto método de Wenner

Mezcla	Tiempo (Días)					
	28		56		484	
	RES	S	RES	S	RES	S
	kohm-cm		kohm-cm		kohm-cm	
CSA	12.47	0.61	26.83	1.64	90.18	3.24
CCV30	13.37	1.08	16.89	1.37	143.34	8.43
CCV50	10.08	0.70	17.82	0.78	90.45	4.73
CSAS	21.89	0.57	12.28	0.47	44.63	1.12
CCV30S	9.31	0.66	15.12	0.88	15.62	0.52
CCV50S	10.32	0.56	16.75	0.88	134.79	3.98

Por otro lado en la tabla 47 se muestran los valores de resistividad por el medio del método Bulk para los cuales se observa altos incrementos a edades tardías generados por la densificación de la matriz del concreto, ese sentido la muestra referencia indica un incremento importante de 56 a 484 días de 295% , en ese mismo sentido al revisar las muestra con 50% de CV y con SAP, es posible observar que se genera un aumento de la resistividad Bulk entre las mismas edades analizadas anteriormente del 693% esto indica desde el punto de vista de esta propiedad la

adición mineral y el polímero superabsorbente mejoran la resistividad de la mezclas base CSA.

Tabla 47. Resistividad del concreto método Bulk

Mezcla	Tiempo (Días)					
	28		56		484	
	RES	S	RES	S	RES	S
	kohm-cm		kohm-cm		kohm-cm	
CSA	7.63	2.01	14.79	6.20	58.55	1.51
CCV30	7.30	1.81	10.02	4.61	77.96	2.77
CCV50	5.78	1.11	9.62	1.44	44.65	1.18
CSAS	7.23	0.73	8.41	1.63	46.38	3.07
CCV30S	5.57	1.31	8.88	1.26	12.50	0.52
CCV50S	5.48	1.36	8.54	1.85	67.72	1.98

La figura 84, muestra el efecto de la adición de CV y SAP en la resistividad de mezclas base CSA. En esta figura se puede observar que a edades tardías la mayoría de las mezclas presentan muy baja penetración de cloruros, excepto la mezcla CCV30S la cual presenta penetración moderada para Wenner y baja para Bulk.

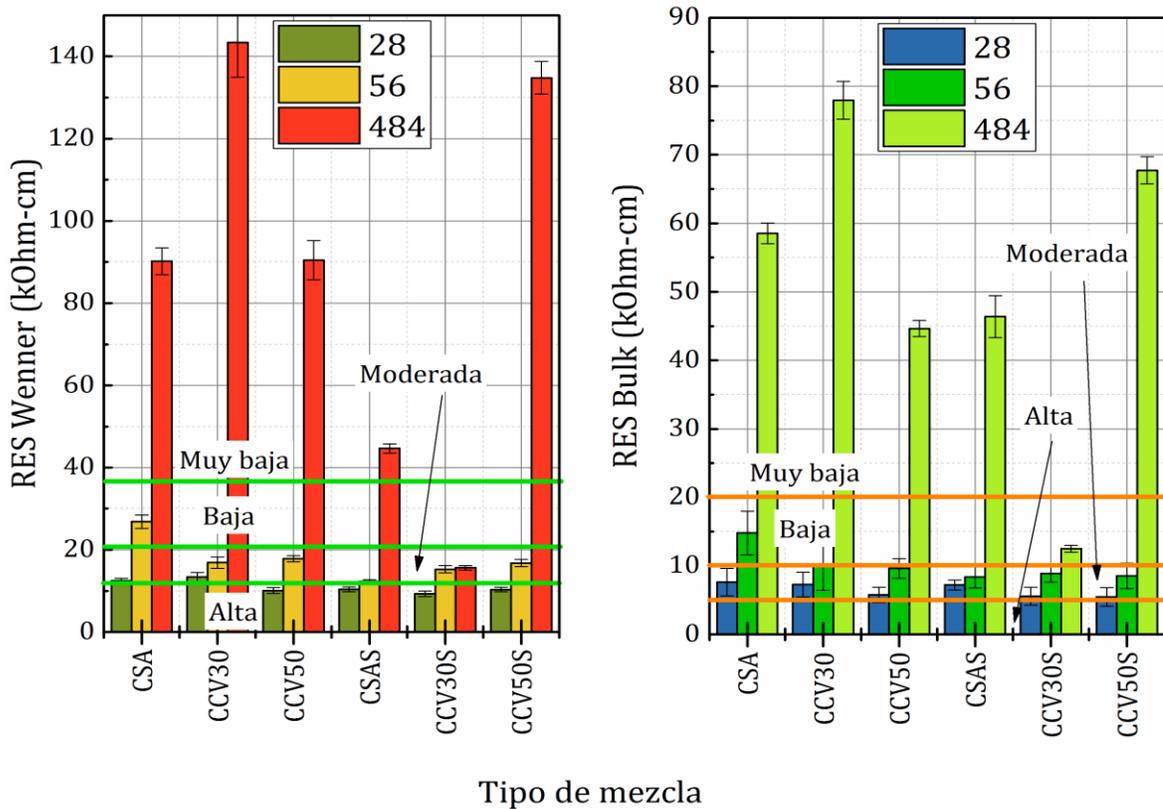


Figura 84. Resistividad eléctrica superficial Wenner y Bulk del concreto

Lo anteriormente expuesto indica que desde el punto de vista de durabilidad las mezclas estudiadas presentan buen comportamiento ante el ion cloruro.

6.4.4. Carbonatación de concretos base cemento sulfoaluminosos.

A continuación, se muestran los resultados de la carbonatación del concreto base CSA, el cual fue sometido a 30 días de curado en inmersión y a una concentración de 8.5 de CO₂ por 28 días.

En la tabla 48, se puede observar que la referencia muestra un perfil de carbonatación promedio de 7.3 milímetros a los 28 días indicando esto que si se utiliza la ecuación $P=k\sqrt{t}$ la cual describe el modelo básico de profundidad de carbonatación respecto al tiempo es posible decir que matrices con este tipo de cemento en la condiciones estudiadas y con concentraciones de CO₂ 8.5 % producirían un valor de $k = 1.4$, lo que permitiría establecer que la penetración a los 365 días de exposición podría estar en 26 mm, esto de alguna manera indica cierto grado de durabilidad de este tipo de matrices por el alto nivel de concentración que se tiene respecto a lo que generalmente se encuentra en la atmósfera el cual está alrededor de 400 ppm.

Tabla 48. Carbonatación del concreto

Tipo de mezcla	Edad (Días)			
	7	14	21	28
	Profundidad de carbonatación (mm)			
CSA	2.0	2.6	4.4	7.3
S	0.04	0.21	0.49	0.51
CCV30	8.4	9.4	14.2	15.5
S	0.40	1.14	1.19	1.61
CCV50	14.6	16.4	22.6	30.1
S	0.62	0.04	0.65	0.49
CSAS	2.5	5.8	6.9	9.3
S	0.52	0.45	0.41	0.65
CCV30S	5.1	10.9	16.1	20.3
S	0.47	1.12	0.34	0.47
CCV50S	15.0	20.8	30.4	33.8
S	0.79	2.98	3.45	3.86

Si se analiza las otras mezclas con este mismo criterio se podría establecer penetraciones a los 365 días de 55, 108, 33, 73 y 122 mm para las mezclas CCV30, CCV50, CSAS, CCV30S Y CCV50S respectivamente, profundidades de carbonatación que aparentemente son altas pero que están magnificadas por el hecho de tener las probetas a concentraciones bastantes elevadas.

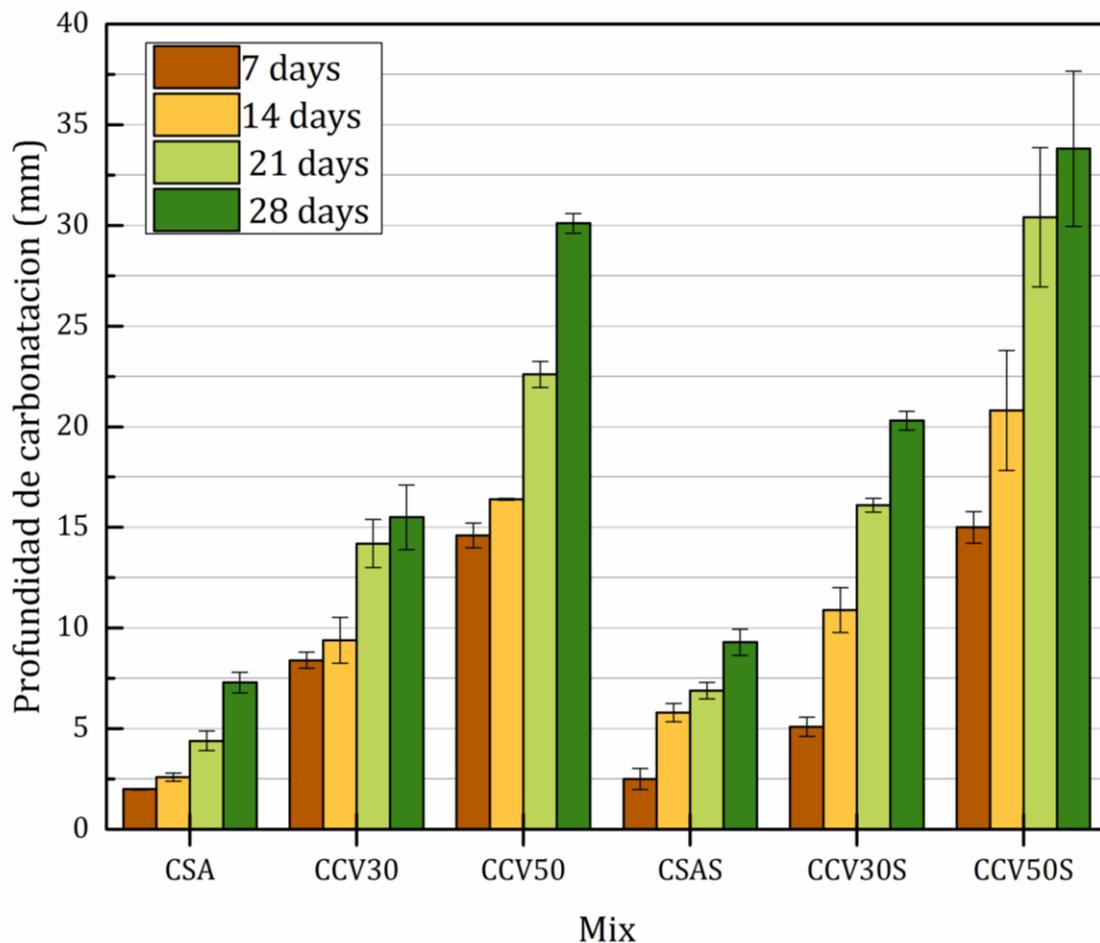


Figura 85. Carbonatación del concreto

Por otro lado si se observa la figura 85 es posible observar que las mezclas con sustitución del 30 y 50% de ceniza volante a los 28 días de exposición presentan incrementos de penetración del frente de carbonatación del 112 y 312 %, esto generado por la alta sustitución respecto al CSA, además que a la edad curado evaluada a (28 días) no se han generado la mayoría de los productos de hidratación que permiten densificar de mejor manera este tipo de matrices.

En ese mismo sentido al comparar la referencia con matrices en donde se adiciono el SAP, se evidencia incrementos del 27%, 178 y 364% para CSAS, CCV30S y CCV50S respectivamente, este posiblemente debido a la alta porosidad en este tipo de matrices a edades tempranas.

El comportamiento de la muestra de referencia (100% CSA) coincide con lo presentado por Socrates 2010[82], el cual presenta profundidades de carbonatación a los 56 días de alrededor de 10 mm para concretos de relación agua/cemento de 0.35.

El comportamiento de la ceniza como adición mineral en el caso de esta investigación muestra afectaciones a la matriz de concreto respecto a la referencia, esto va en contravía de los presentado por Zhang 2009[80] quizás por la mayor cantidad de reemplazo(30 y 50%) utilizado en esta investigación respecto al 20% mostrado por Zhang.

6.5. Difracción de rayos X en pastas.

En esta sección se muestra los resultados de difracción de rayos X de muestras de pastas en donde se analizaron los sistemas 50%CSA+25%CPO+25%MCS, observandose una clara evidencia de la etringita como fase principal de hidratación de este tipo de cemento CSAB, de igual manera se observa en todas las combinaciones la belita, la cual es generada tanto por el CSA como por el CPO. En cuanto a las mezclas COC , con incorporación de caliza lse puede observar como la calicita predomina de manera importante respecto a las otras combinaciones (ver figura 86).

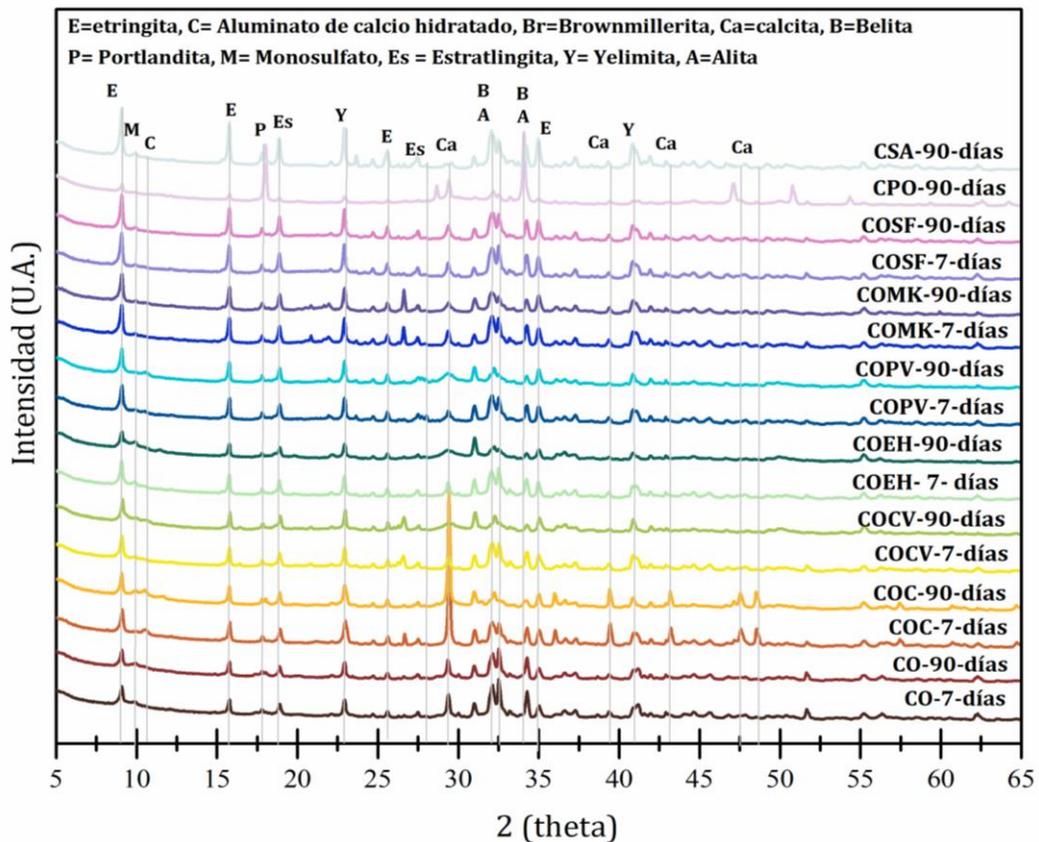


Figura 86.Difractogramas de pastas CSA+CPO+MCS

En la figura anterior es posible observar de manera muy ligera el incremento de etringita de los 7 a los 90 días para las muestras de CO(50CSA+50 CPO), esto debido al proceso de hidratación de la yelimita, la cual no aparece de manera importante a las edades de hidratación analizadas[89], también se puede observar el desarrollo de la portlandita de manera muy ligera producto de la hidratación del CPO. El efecto de la calcita sobre los sistemas COC en sus picos característicos se muestran en el drx para el cual se observa un incremento en el pico de mayor intensidad debido al porcentaje de calcita del 25% que tiene el sistema, se puede mencionar que este incremento no se debe a la absorción de CO₂ el cual se transforma en CaCO₃ con la calcita presente que produce dicho polimorfo dominante[90], esto debido a que estos sistemas analizados no estuvieron sometidos al CO₂, sin embargo en sistemas CSA por la carbonatación, la etringita se convierte en basanita, aragonita y vaterita con una pequeña cantidad de etringita presente, de igual manera se forma Al(OH)₃ amorfo que no puede detectarse con el DRX[90], en las muestras con escoria de alto horno se puede observar que la etringita y el monosulfato están presentes en todas las muestras y este aumenta a medida que el tiempo de curado se incrementa, lo que indica formación de monosulfato adicional a través del tiempo proceso que se da desde el comienzo de la hidratación cuando al etringita se transforma a monosulfato cuando se agota la yelimita y la posible anhidrita presente, la intensidad de los picos de etringita son menores en las muestras con escoria ya que el contenido de yelimita se reduce por el reemplazo de la escoria.[62] Los picos de belita y yelimita que se observan en todas las muestras indican que estas fases no se disolvieron completamente debido a la baja cantidad de agua de la mezcla en la relación agua/cemento. Según Jun[71], la microsíllice en sistemas con CSA, puede promover la formación de AFt a edades tempranas de 3 días y retrasar la formación de este componente a edades posteriores, para el caso de nuestro sistemas, los picos de etringita en combinación con el CPO presentan un ligero incremento de los 7 días a los 90 días, pudiéndose referir este comportamiento similares al presentado por Jun. La difracción del metacaolín no muestra mayores cambios respecto a las otras adiciones, se sigue teniendo como fase principal la etringita y se alcanza a observar algo de estratlingita.

6.6. Micrografías de productos hidratados en el cemento sulfoaluminoso.

En la figura 87, se muestra una micrografía de los productos de reacción a 90 días de edad del cemento CSA hidratado, en ella se observar gran cantidad de partículas sin hidratar, esto posiblemente debido a la baja relación agua/cemento empleada en este sistema hidratado, también se observa el comportamiento de fisuración característico de este tipo de matrices cementantes; las zonas gris oscura

referencian la estratlingita (Es), por otro lado las zonas gris claras identifican partículas de CSA anhidras (c). [91]

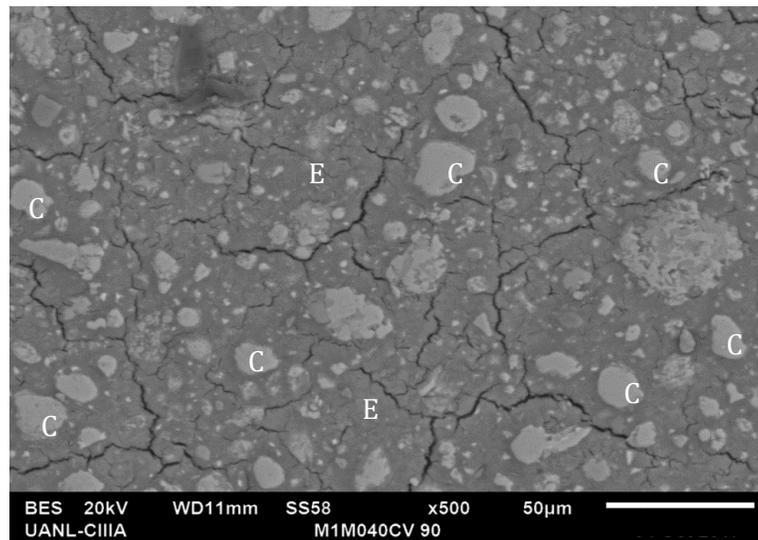


Figura 87. Micrografía del cemento sulfoaluminoso a los 90 días

En la figura 88, se puede observar los productos de hidratación entre el cemento sulfoaluminoso y la escoria de alto horno. Al igual que con las micrografía anterior se alcanzan a apreciar los mismos productos de hidratación como estratlingita y las partículas de CSA sin hidratar, la figura 89 muestra la micrografía entre el CSA y la puzolana natural, en este sistema se puede observar el mismo comportamiento descrito anteriormente.

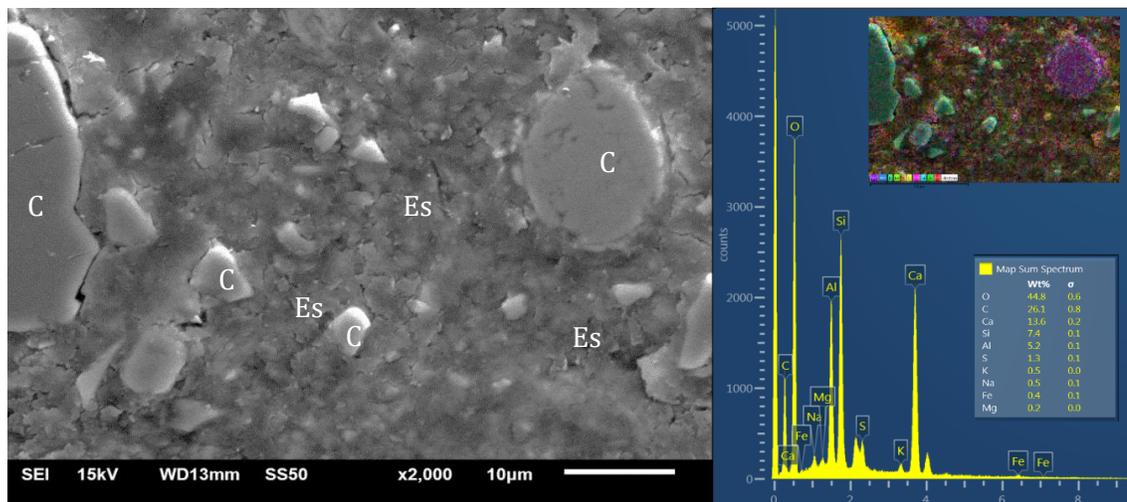


Figura 88. Micrografía de productos de hidratación a los 90 días de curado en un sistema 70CSA+30 Escoria de alto horno. (c) partículas anhidras, (Es) Estratlingita

La figura 89, muestra las micrográficas de la matriz 70% CSA + 30% puzolana natural, en ella puede observarse granos anhidros que al igual que en la imágenes anteriores no se alcanzaron a hidratar por la baja relación agua cemento de la matriz, de igual forma se puede apreciar que gran parte de la matriz esta hidratada evidenciado productos como la etringita y estratlingita, lo que puede ser un indicador del buen comportamiento en resistencia a la compresión para este tipo de combinación binaria. La información del EDX muestra porcentajes importantes de Al, S y Ca, indicando la formación de Aft.

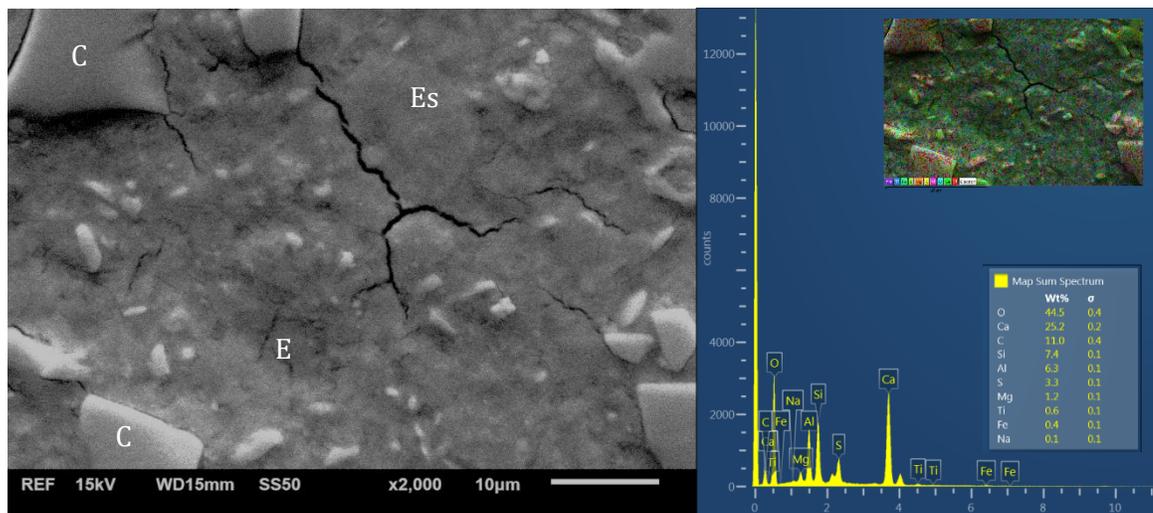


Figura 89. Micrografía del sistema CSA + Pozzolana natural. Estratlingita (Es), Etringita (E) y CSA anhidro (c). (90 días de curado)

La figura 90, muestra las micrográficas de una pasta de cemento 50% CSA y 50 % CPO, en la cual se puede observar una matriz con granos de cemento sin reaccionar en su gran mayoría de cemento CSA (c), esto debido a que este cemento para alcanzar su hidratación completa requiere de niveles de cantidades de agua mucho más altos que los del cemento Portland el cual está cerca de los 0.42. Por otro lado, se puede observar una alta densidad en el matriz producto de la reacción a edades tardías que puede generarse en este tipo de combinaciones entre la que se puede mencionar al estratlingita y el CSH por parte del cemento Portland. En el EDX se muestra un alto porcentaje de aluminio, calcio, azufre y silicio elementos que integran los productos de hidratación de los cementos estudiados en esta imagen.

En la figura 91 se puede observar la interacción entre las partículas de ceniza volante y 50% de cemento sulfoaluminoso + 25% de cemento Portland Ordinario, es posible apreciar que cierto número de partículas de ceniza volante a edades tardías no reaccionaron con los cementos utilizados mostrando su forma cenosférica característica, desde el punto de vista del EDX, se observa un importante porcentaje del silicio presente en las partículas de CV, acompañado de los habituales Al, S y Ca que

le corresponde a la fase hidratada estratlingita presente en el CSA la cual rodea la partículas anhidras (c) y la de la ceniza volante (CV).

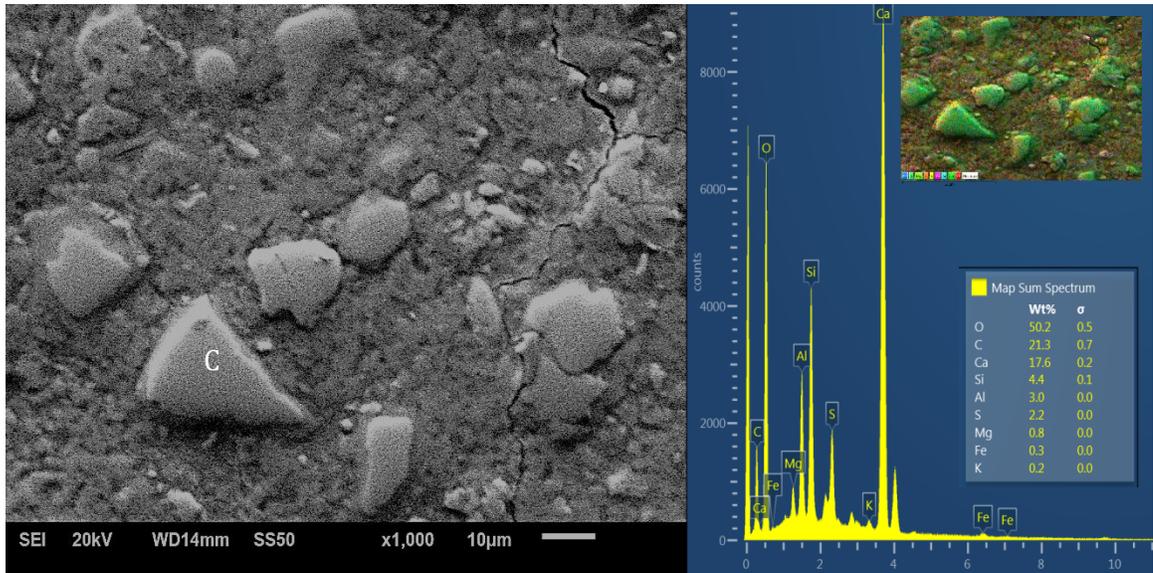


Figura 90. Micrografía combinación 50% CSA y 50% CPO. (90 días de curado)

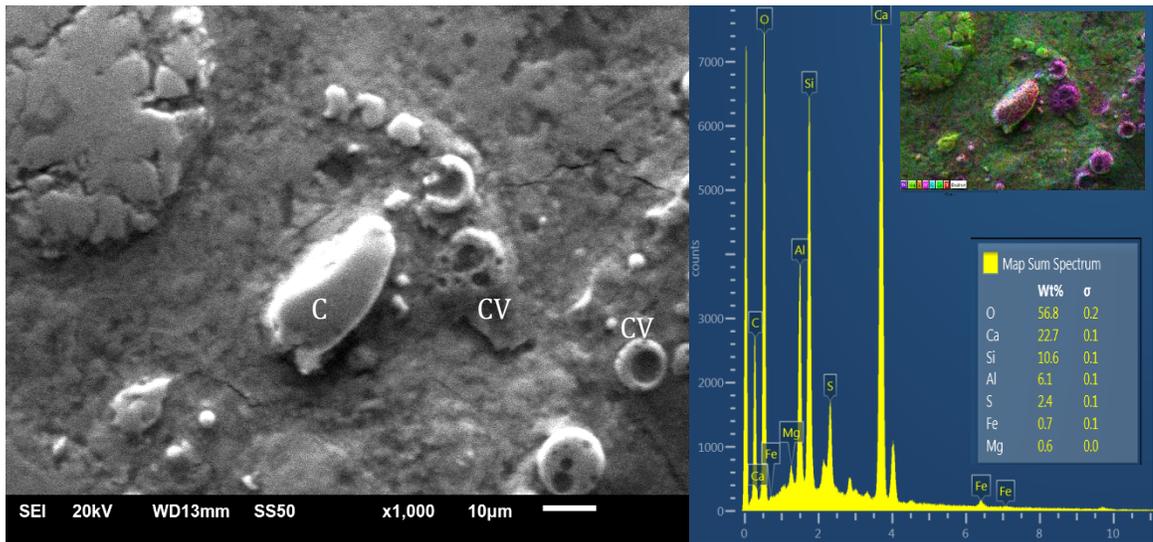


Figura 91. Imagen SEM combinación 50%CSA + 25% CPO + 25% CV (90 días de curado).

La figura 92, muestra algunas partículas de CSA anhidro (c) sin hidratar y al igual que la gran mayoría de la matriz hidratada bien sea por los productos de hidratación del CSA, como por los productos de CPO, esto se evidencia con el EDX, el cual muestra alto porcentajes de calcio en la matriz pudiéndose vincular eso a la estratlingita formada a edades tardías (en este caso 90 días) en el CSA y a los geles CSH del cemento Portland ordinario. También se observa la fase inerte Fe en muy bajos

porcentajes, este elemento también se hace presente en las imágenes anteriormente mostradas.

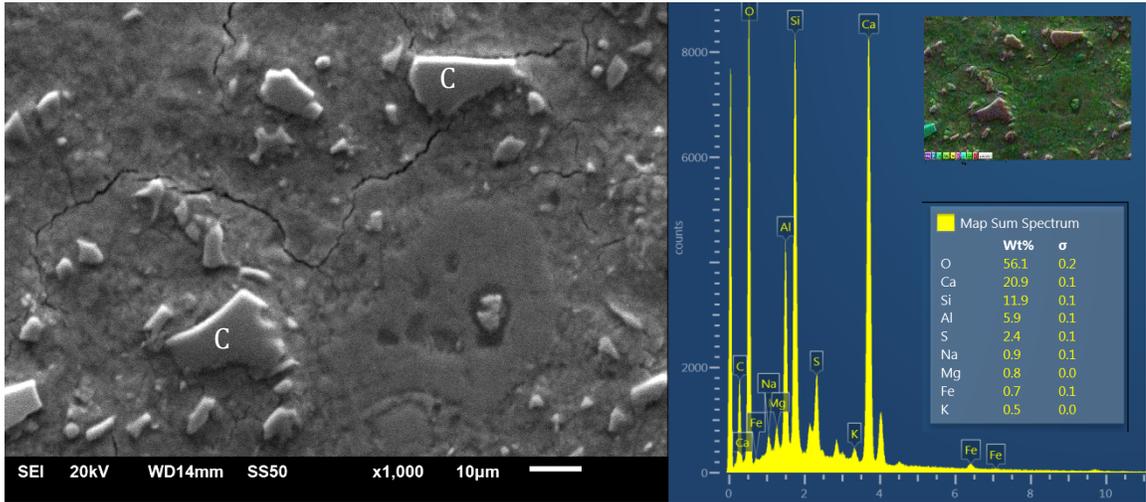


Figura 92. Micrografía combinación 50% CSA, 25% CPO y 25% PV. (90 días de curado)

La figura 93 muestra la interacción entre la caliza y los cementos sulfoaluminoso y Portland, ahí se puede observar partículas de cemento Portland (p) y sulfoaluminoso (c) sin hidratar. De igual manera se observa que la matriz a edades tardías muestra una gran conformación de los productos de hidratación de los dos cementos estudiados permitiendo una buena densificación de la matriz. El EDX muestra altos porcentajes de Si lo que puede dar la posibilidad de inferir que gran parte de los productos desarrollado en la imagen se relacionan con el gel CSH.

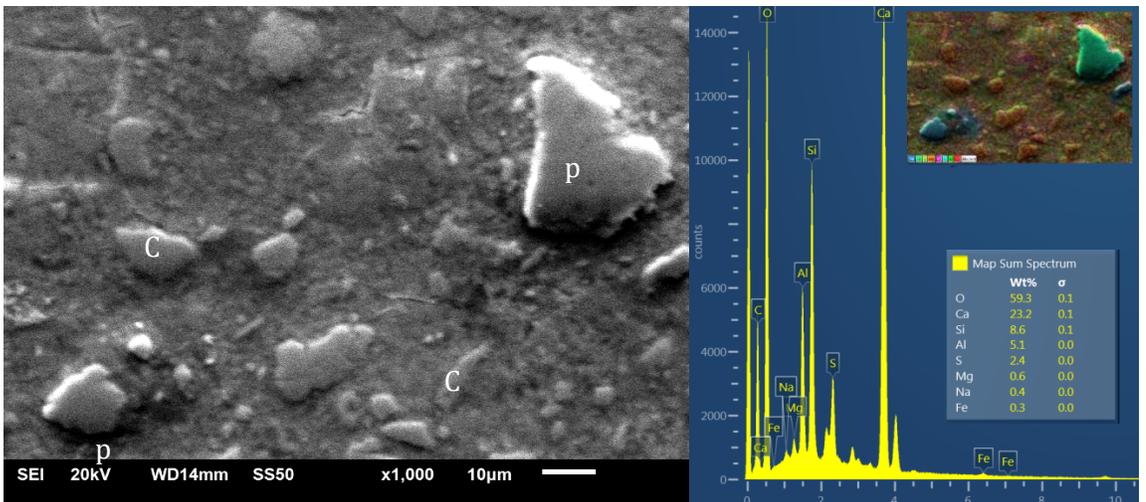


Figura 93. Micrografía combinación 50% CSA, 25% CPO y 25% CL. (90 días de curado)

6.7. Discusión general de resultados.

6.7.1. Caracterización química- física de los materiales

En esta parte se muestra una discusión general de los resultados obtenidos en todas las etapas del desarrollo de esta tesis.

La composición mostrada por cada uno de los materiales utilizados en este investigación muestra que para el caso del cemento sulfoaluminoso sus cuatro óxidos principales obtenidos por FRX son el SiO_2 , este se origina producto de las materias primas que componen este tipo de cemento tales como la bauxita y la arcilla las cuales aportan en mayor medida este tipo de óxido por la composición química, también se un alto porcentaje de CaO producto de la caliza adicionada, este es el componente con mayor porcentaje en cuanto peso total en los óxidos presentes en el CSA, mas sin embargo, sigue siendo más bajo respecto al que aparece en el CPO, lo que indica desde este punto de vista una menor contribución de este componente en la producción de este tipo de cemento de tercera generación. De igual manera se tiene un porcentaje importante Al_2O_3 a partir de la inclusión de la bauxita en el proceso de clinquerización [92] se observa el SO_3 , el cual junto con el óxido de aluminio y el óxido de calcio forma una de las fases principales del cemento estudiado (ver tabla 49).

Tabla 49. Composición de materiales

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO
	(%)										
CSA	14.73	16.29	0.94	47.66	1.42	14.17	0.21	0.57	0.63	0.1	0.04
CPO	19.82	4.97	1.99	61.47	1.48	4.53	0.5	0.81	0.24	0.1	0.04
Caliza	0.3	0.06	0.03	56.57	0.34	-	-	-	-	0.01	-
C. Volante	59.9	24.3	3.98	2.72	0.78	0.42	0.54	0.54	0.86	0.04	0.01
Escoria	39.36	9.11	0.81	37.47	5.02	2.91	0.52	0.91	2.63	0.01	0.99
Puzolana	65.2	14.9	3.5	3.2	2.1	0.3	3.8	3.7	-	-	-
Microsílice	98.564	0.383	0.04	0.06	-	0.75	-	0.154	-	-	-
Metacaolín	63.24	30.67	1.47	0.32	-	0.46	-	1.27	1.12	0.13	0.03

En la tabla anterior el CPO muestra el porcentaje en peso de los óxidos que convencionalmente presenta este tipo de cementos. Por otro lado, la caliza muestra el óxido de calcio como fase principal, óxido que en algunas mezclas de pastas desarrolladas en este proyecto en su fase calicita, presenta sinergia con los aluminosilicatos de la ceniza volante para mejorar los resultados de la propiedad antes mencionada [93]. Desde el punto de vista de la ASTM C-618[94], La escoria de alto horno, la puzolana natural y el metacaolín cumple con el límite mínimo de óxidos ($\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$) especificado por esta normativa el cual se regula a 70%,

obteniéndose para la ceniza volante, puzolana volcánica y para el metacaolín 88.18, 83.6 y 95.38 % respectivamente, lo que ubica a estos materiales como potencialmente utilizables para que puedan interactuar con el cemento y adquirir propiedades de endurecimiento; los tres materiales antes mencionados cumplen con el requerimiento mínimo (4%) de la normativa antes mencionada. Para la escoria de alto horno se puede observar que tiene como óxidos principales el Al_2O_3 , CaO y el SiO_2 , con 37.47 % de óxido de calcio generando una importante diferencia respecto a los otros MCS en cuanto a este compuesto, lo que le permite producir fases muy parecidas a los de los cementos tradicionales, la escoria utilizada en esta tesis es una escoria ácida debido a la relación $CaO/SiO_2 < 1$ ($0.95 < 1$), para la cuales se genera menor potencial hidráulico que la básicas[95]. La microsílíce muestra su mayor porcentaje en su composición química en el óxido de silicio con un 98.56%, lo que indica que en su composición hay una estructura desordenada que resulta producto de una solidificación o consolidación de un material fundido[96].

Por otro lado la técnica de difracción de rayos muestra las diferentes fases de los materiales. En la figura 94, se puede observar algunas de las fases más importantes de cada uno de los materiales usados en esta investigación.

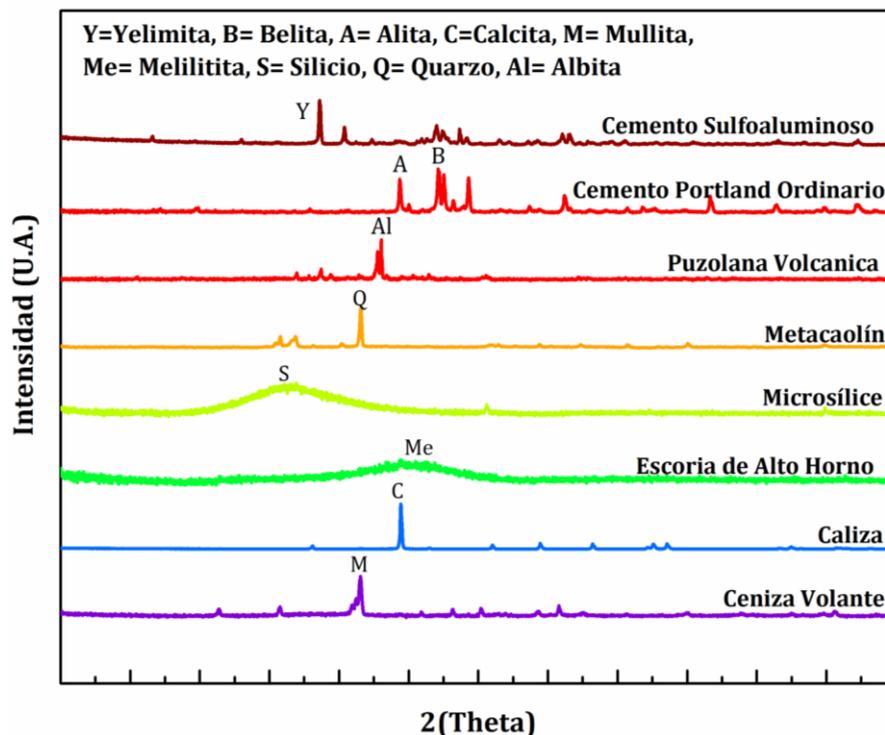


Figura 94. DRX de materias primas.

En la figura anterior se puede observar la amorfisidad característica de la microsílíce y de la de la escoria de alto horno, las cuales no muestran picos

característicos de una fase cristalina. De igual manera se muestra los DRX anhidros del cemento Portland y del Cemento Sulfoaluminoso que presentan algunas de las fases principales que le permiten a estos cementos desarrollar sus características cuando son hidratados, como se dijo anteriormente el DRX del CSA presenta como fases principales la yeimita(cubica y ortorómbica)[97] y la belita con porcentaje del 42% wt respecto a las otras fases presentes lo que permitirá a edades tardías (180 días en ciertos casos) desarrollar estratlingita[34].

Desde el punto de vista del tamaño de partícula el cemento Portland esta alrededor de las 50 micras, lo que lo ubica dentro del tamaño teórico para este tipo de cementos [98], para el cemento sulfoaluminoso su tamaño de D50 está alrededor de las 13 micras, tamaño de partícula que corresponde a lo reportado por Yeonung, el mismo autor realizo un análisis del efecto de la finura del polvo de carbonato de calcio en la hidratación, lo que es posible comparar con la caliza usada en esta tesis según la fase principal mostrada en el DRX para este material, de ahí se plantean la finura del filler en el CSA incide en la aceleración de la hidratación del cemento a medida que aumenta la finura del polvo de carbonato de calcio por los sitios de nucleación adicionales que se generan para que se forme los productos de hidratación, de igual forma esta puede mejorar la resistencia debido a la formación de etringita adicional por la formación de hemicarboaluminato y monocarboaluminato, productos que potencialmente pueden disminuir la porosidad de la pasta en el caso de polvos más finos en el clínquer CSA [99]; que para nuestro caso con la caliza la cual tiene un D50 alrededor de las 12 micras pueda que este sea uno de los factores para mejorar la resistencia a la compresión de los sistemas estudiados. En el caso de la ceniza volante el D10=11 micras, refleja un tamaño de partícula gruesa, el cual al mezclarse con tamaños de cemento Portland un poco más finos pueden proporcionar comportamientos a edades tempranas adecuados [100]. Por otro lado en la microsílíce y el metacaolín por el análisis del DTP, fue posible observar que su D50 estuvo alrededor de 48 y 35 micras respectivamente, estos tamaños respecto a lo indicado por diferentes autores se evidencian bastante alejados de lo reportado D50=3.5 micras para le MC y de 12.53 micras para el MS[101][102], lo que incide directamente en la reacción que tienen estos MCS con el cemento estudiado.

Por otro lado, en lo referido a los índices de actividad resistente de cada uno de los materiales cementicios suplementarios en sinergia con CSA, es posible decir que a pesar de que la caliza se cataloga como un filler calcáreo, en el caso del este parámetro presento un IAR de 75% cumpliendo con el mínimo que solicita la normativa ASTM C618 para la CV y la PV, esto pudo haberse debido a los sitios de nucleación adicionales que formo este tipo de material. En el caso de la ceniza volante y la puzolana natural estas adiciones mostraron un IAR muy cercanos al mínimo exigido por la norma, con 72% para la ceniza volante y 75% para la puzolana volcánica, en el caso de la ceniza volante quizás la falta de reactividad se

deba al tamaño de las partículas que para nuestro caso tiene un D90 de 88 micras lo que podría afectar dicho índice, en el caso de la PV cumplió con el mínimo exigido por la normativa, esto no quiere decir que este tipo de material tengan un mal comportamiento con el CSA, esto debido a que ya en el estudio de resistencia de pastas en donde se combina estas adiciones con el sulfoaluminoso se puede observar buenos comportamientos. En cuanto a la microsílíce el índice evaluado a los 28 días con un valor de 87 % se encuentra muy por debajo de lo solicitado por la normativa ASTM C-1240, la cual específica medirlo de manera acelerada a los 7 días teniendo como un porcentaje mínimo de 105%, este tipo de desempeño puede atribuírsele al alto tamaño de partícula de este MCS. Por otro lado, el metacaolín presenta un índice por debajo del exigido por la normativa ASTM C618, indicando que el material analizado a edades tempranas en cuando a resistencia a la compresión no ofrece un buen comportamiento, sin embargo a edades de 90 días en combinación con CSA y CPO ofreció excelente desempeño en la resistencia a la compresión de pastas. La escoria de alto horno presenta un IAR inferior respecto a lo mínimo especificado por la ASTM C989, esto debido a una posible hidratación previa a su uso, lo que genero efectos bajos en la reactividad de la adición con el CSA.

6.7.2. Pastas base cemento sulfoaluminoso

Desde el punto de vista del estudio del efecto de las adiciones minerales como reemplazo del CSA en diferentes propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido de pasta de cemento CSA. Es posible que para diferentes niveles de reemplazo de ceniza volante la por el CSA a medida de que se aumenta el contenido de la ceniza volante los valores de resistencia bajan, lo mismo ocurre con la relación a/cm, a mayor cantidad de agua menor resistencia, esta tendencia es coincidente con García-Mate [34], la cual expone que la sustitución parcial de CSA por ceniza volante genera dos efectos sobre las propiedades mecánicas, el primero está relacionado a que funciona como un filler y el otro a que genera efectos de disolución, en donde el primero se puede asociar a mejoras de la resistencia a la compresión en niveles de reemplazo bajos y el segundo, con reducciones de resistencia cuando se tiene sustituciones altas debido a que se tiene mayor contenido de agua en la matriz lo que provoca aumento en la porosidad. Las resistencias a compresión con las otras adiciones minerales muestran excelentes comportamientos para una misma relación agua cemento, sin embargo se reducen debido a los altos porcentajes de reemplazo utilizados los cuales se establecieron por sostenibilidad ambiental, lo que provoca que a una misma cantidad de agua se tenga mayor disolución lo que provoca una mayor porosidad en la matrices binarias y ternarias estudiadas. En este tipo de matrices se observa una sinergia importante entre la caliza - ceniza volante y caliza puzolana volcánica, debido a que la presencia de caliza en la matriz puede conducir a la formación de hidratos de monocarboaluminatos y hemicarboaluminatos, los que genera un aumento en el volumen de los hidratos y una posterior reducción de la porosidad y por ende un aumento de la resistencia[99] lo que probablemente genere que la ceniza volante proporcione aluminatos adicionales que reducirán la relación

sulfato/aluminato lo que puede amplificar el impacto de la caliza.[93] Es probable que la puzolana volcánica este presentando la misma sinergia con la caliza para generar los aumentos de resistencia a edades tardías. Jun [71], establece que en sistemas en donde se combina el CSA con MCS, al comparar el efecto de la ceniza volante y la microsíllice con el cemento sulfoaluminoso, la microsíllice puede promover de mejor manera la formación de AFt a una edad temprana y retrasar su formación a edades posteriores. El uso de los componentes para buscar trabajabilidad y permanencia como el policarboxilato y ácido cítrico contribuye en la obtención de parámetros que buscaban finalmente realizar una investigación aplicada, en ese sentido el efecto del uso de los componentes anteriormente mencionados muestra que según el tipo de adición mineral o combinación ternaria (CSA+CPO+MCS) el efecto en la extensibilidad, tiempo de fraguado y temperatura afecte bien se sea reduciendo o mejorando las características del material, es de ahí que es posible mostrar una sinergia de estas propiedades de la mezclas analizadas. En el caso de la mezcla de 100% CSA se puede observar que con la adición de ácido cítrico (AC) su extensibilidad es prácticamente de 77mm a 5 minutos de la hidratación y de 73.7mm a los 35 minutos, lo que indica una baja fluidez, este comportamiento se observa reflejado en la prueba de tiempos de fraguado al observar tiempos de fraguado iniciales muy cortos. Esta tendencia se ve revertida para la mezcla de 100% CSA, cuando se adiciona el policarboxilato elevando la extensibilidad a más de 160 mm a los 5 minutos con una pérdidas de consistencia bajas a los 60 minutos, dicha tendencia se ratifica con los tiempo de fraguado pudiéndose observar fraguados iniciales (93 minutos) y finales de 120, lo que indica que con estos componentes fue posible darle mayor tiempo de trabajabilidad a este tipo de cemento, los tiempos anteriormente mencionado coinciden de manera cercana con el pico de la curva de calor del cemento sulfoaluminoso estudiado. Las muestras de CO con ácido muestran consistencias más altas que la mezcla con 100% CSA, ya que el cemento CPO contribuye con otorgarle a la mezcla mayor fluidez y una permanencia mayor, esta tendencia se refleja en los tiempos de fraguado pudiéndose observar que en este parámetro cuando solamente se tiene AC su tiempo de fraguado inicial esta en 120 min, indicando perdidas de consistencias muy leves en los primeros 60 minutos. Desde el punto de vista de la temperatura que alcanza la matriz CO a través del tiempo se muestra una coincidencia con los tiempos de fraguado indicando un retraso de pico máximo respecto a la muestra de referencia de solo CSA. En el caso de la microsíllice la consistencia a los 5 minutos tiene una pérdida importante de extensibilidad a través del tiempo de 115 mm a cerca de 73 mm en tan solo 25 minutos en las mezclas que tienen AC y SP, lo que indica nula posibilidad de uso en combinación binaria con el CSA desde el punto de vista de la aplicación, este comportamiento coincide con los tiempos de fraguado y con la aceleración del pico máximo en las curvas de calor contra tiempo. En cuanto a las combinaciones binarias CSA+PV y CSA+CV con AC y SP, las mezclas muestran con un comportamiento similar a la de la referencia con mayor extensibilidad para la CV y con mayor pérdida de

consistencia en las mezclas con PV, sin embargo en el tiempo de fraguado y en la temperatura de mezcla, el desempeño se refleja de manera similar a la de la referencia. En la mezclas con CPO se observa una gran mejoría en la extensibilidad producto de la inhibición de las reacciones por parte del CPO y del MCS los cuales equilibran el endurecimiento temprano de la muestras estudiadas, las tendencias se pueden observar similares tanto en la figura de consistencia, tiempos de fraguado y temperatura del concreto. Siendo la retracción por secado una medida de la inestabilidad volumétrica de las pastas analizadas, muestran mayores rangos de retracción para las probetas ternarias en donde se combina el CSA+CPO+MCS, indicando esto que el cemento portland por su composición y comportamiento ante este parámetro gobierna la retracción por secado en este tipo de matrices.

6.7.3. Morteros base cemento sulfoaluminoso

En este tipo de mezclas las resistencias a la compresión se ve influenciada por el porcentaje de uso del CSA, como es de suponer en las mezclas de mortero entre mayor porcentaje de CSA mejores resistencias en matrices binarias (CSA+MCS), respecto a las ternarias, desde el punto de vista del curado, este efecto a edades entre 7 y 28 días no presenta cambios significativos en cuanto el tipo de curado en la medida de resistencia a la compresión para la matrices binaria y ternarias, esto muestra una gran diferencia en comparación al comportamiento del cemento Portland en cual se ve afectado por el no curado de sus matrices. Huang [103] expone que la temperatura de curado incide en el desempeño de los mortero con CSA y CPO, para los cuales se definió que se tiene mejores comportamientos los morteros a temperaturas bajas fabricados con CSA que los fabricados con CPO. En las matrices en donde el CPO compone las matrices binarias su aporte es mínimo a edades tempranas (7días) en la resistencia a la compresión, debido a una incidencia reducida en los procesos de hidratación llevados a cabo por parte de este tipo de cemento considerándolo prácticamente como un filler durante la hidratación temprana de sistema, La baja contribución por parte del CPO, no está relacionada con el uso del retardante utilizado en las mezclas.[67] La velocidad de pulso ultrasónico muestra una tendencia al mejoramiento de la VPU en la mezclas ternarias, este comportamiento es posible observarlo de manera ligeramente similar a lo que presenta la resistencia a la compresión del mortero y de la resistividad eléctrica superficial. Desde el punto de vista de la carbonatación atmosférica en los morteros curados al aire se observan mayor afectación en la medidas del frente de carbonatación en comparación con los morteros curados por inmersión, esto posiblemente por la más alta inestabilidad de la etringita en condiciones de curado al aire que en húmedas.[81] Siendo la resistividad y profundidad de carbonatación medidas correlacionables con la posible velocidad de corrosión del acero de refuerzo, en la matriz binaria CSA+CPO es posible plantear que el CPO, puede mejorar la protección del acero de refuerzo embebido en la matriz debido que la presencia de ese material, puede mejorar la estabilidad de la capa de pasividad del acero incrementando el tiempo de iniciación de la corrosión inducida por la

carbonatación si se compara con la mezcla de 100% CSA [104]. Los tipos de curado evaluados para la resistividad y la VPU, no indican mayor efecto en los valores finales obtenidos señalando la misma tendencia en el comportamiento sin presentar detrimentos o incrementos importantes para cada una de las mezclas analizadas caso contrario de la carbonatación la cual evidencia un claro efecto del tipo curado

6.7.4. Concretos base cemento sulfoaluminoso

La resistencia a la compresión de los concretos estudiados muestra valores importantes para la muestra de referencia a través del tiempo en comparación con las otras muestras analizadas, teniendo en cuenta que los otros sistemas analizados se trabajaron con altos reemplazos de ceniza volante y con la inclusión de polímeros superabsorbentes, lo que presentó una tendencia a edades tempranas con resistencias bajas debido a la alta porosidad de las matrices, mas sin embargo por las reacciones de los productos de hidratación (etringita y silicatos de calcio hidratados) a edades tardías, los concretos con 30 y 50 % de reemplazo de CV mostraron mejorías importantes a edades de 484 días debido a la mejor densificación de las matrices, por otro lado, desde el punto de vista de la inclusión del SAP, estos produjeron un comportamiento pobre de resistencia a la compresión a edades tempranas, sin embargo a edades tardías se pudo observar una mejoría de los sistemas que incluían este producto debido a que posiblemente este producto funciona como un agente auto reparador absorbiendo agua y ayudando a edades tardías a reaccionar partículas de cemento no hidratadas y a los subproductos de la hidratación [105], lo que genera mayores densificaciones de las matrices, mejorando a su vez las resistencias a la compresión de este tipo de sistemas.

La retracción por secado es uno de los parámetros más importantes desde el punto de vista de la estabilidad volumétrica de los concretos, la cual está directamente relacionada con la cantidad relativa de etringita en el ensamblaje de la fase del producto de hidratación que está controlada por la química del Clinquer del CSA [106]. En el caso de este estudio se analizó cual era la influencia del reemplazo de altos volúmenes de CV e inclusión de SAP en la retracción de concretos base CSA, teniendo en cuenta que por la naturaleza de la química de este tipo de cemento se tiene una tendencia a presentar baja retracción, Adams [107] muestra una comparación entre el CSA, el CPO y el CAC (cemento de aluminato de calcio) en donde define desde el punto de vista de este parámetro mejores ventajas de parte del CSA en comparación con los otros tipos de cementos. Sirtoli [108] presenta retracciones por secado de una mezcla de concreto con 100% CSA similares a la presentada en este estudio, con reducciones de retracción de alrededor del 52% respecto a la presentada en concretos base CPO. Las retracciones de los sistemas estudiados muestran dos zonas bastante definidas las cuales están limitadas por la edad de 56 días de ensayo, la primera zona que va de 0 a 56 días muestra una ganancia importante de microdeformaciones hasta que se estabiliza para ganancias de retracción de alrededor de 50 μm para todas las mezclas evaluadas. Desde el punto

de vista de la carbonatación los concretos con cemento CSA se ven afectados en la resistencia a la compresión por la reducción del contenido de etringita [109].

Desde el punto de vista de la resistividad eléctrica superficial los valores de esta propiedad asociados al riesgo de corrosión que se pueda presentar en este tipo de sistemas estudiados, indican que a edades tempranas en el material se puede presentar riesgo alto de corrosión en el acero de refuerzo, salvo en el sistema con 0% de reemplazo un riego bajo a los 56 días, esto posiblemente porque a esta edad se comienza a encontrar la formación de etringita lo que vuelve la matriz más resistiva, respecto a los sistemas analizados, sin embargo esta resistividad a edades tardías se ve mejorada por la formación de más productos de hidratación tardíos, al asociar este comportamiento a los niveles de corrosión que pueden presentar este tipo de concretos se debe partir de que los concretos con 100% CSA se comportan de manera satisfactoria como un material capaz de proporcionar protección al acero de refuerzo embebido en el, en estructuras de concreto sometidas a ambientes de exposición a los cloruros, Carsana[104], estableció que concretos base cemento CSA a pesar de presentar menor alcalinidad en cuanto al pH respecto al cemento Portland, dicha alcalinidad es suficiente para promover la paliación del acero de refuerzo embebido en la matriz al punto de que el potencial de corrosión y la tasa de corrosión presentan valores típicos del acero en condiciones pasivas.

Para las mezclas estudiadas en esta investigación los sistemas con porcentajes de reemplazo de ceniza volante del 30 y 50% se ven más afectados en cuanto a la profundidad de carbonatación debido a la falta de hidróxidos alcalinos, dado que la carbonatación es una reacción entre los hidróxidos alcalinos (hidróxido de calcio) y el CO₂ en presencia de humedad, de ahí que al tener menores posibilidades de encontrar estos hidróxidos en la matriz se generan menores consumos de este tipo de hidróxidos lo que acompañado de una reducción del pH alcalino al presentarse la condiciones adecuadas se propicien la carbonatación de esos pocos hidróxidos presentes [82], desde el punto de vista de la corrosión que este fenómeno puede presentar, para concreto con 100% CSA Carsana[104], estableció que la tasa de corrosión del acero por el concreto carbonatado presenta valores insignificantes a condiciones de humedad relativa de 95% y a 20 °C, lo que permite inferir que el concreto de referencia estudiado en esta tesis presentara adecuados comportamientos una vez expuesto a una vida útil de servicio.

6.7.5. Microscopia electrónica de barrido en pastas.

De la microscopia realizada en las pastas de cemento es posible relacionar que la matriz 100% CSA, muestra gran cantidad de partículas anhidra las cuales por la baja relación agua cemento utilizada repercute directamente en la resistencia de dichas pasta las cuales llegaron a los 90 días a los 70 MPa, resistencia menor a la presentada por la combinación de 50% CSA + 50% CPO la cual mostró a edades tardías alrededor de 82 MPa de resistencia a la compresión posiblemente debido a

que en este tipo de matrices se desarrollaron mayor productos de hidratación a partir del CPO.

Por otro lado, la micrografía de la ceniza volante muestra una correcta densificación de la matriz permitiéndole a edades muy tardías obtener en este tipo de pastas resistencias a la compresión del orden 75 MPa, un poco menores que lo presentado por la combinación COPV (50 CSA+ 25CPO +25 PV), la cual en los ensayos de resistencia a la compresión muestra cerca 85 MPa de resistencia, pudiéndose relacionar estos valores con la alta densificación mostrada en la micrografía de esta combinación en donde se observa una alta interacción entre los materiales utilizados, por último la caliza al actuar como un filler muestra resistencias adecuadas cercanas a los 65 MPa posiblemente porque en esta caso no se alcanzó a generarse tal y como lo muestra la micrografía respectiva los productos de hidratación del CPO y del CSA ya que en esta imágenes se alcanza a visualizar todavía productos sin hidratar de los dos cementos estudiados.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Pastas base cemento sulfoaluminoso.

7.1.1. Etapa 1- Resistencia a la compresión de pastas base CSA-CV-CL y CPO-CV-CL.

- En sistemas de pastas binarias cemento sulfoaluminoso y ceniza volante con altos reemplazos de este material cementicio suplementario se afecta la resistencia a la compresión presentando la misma tendencia en mezclas con relaciones a/mc de 0.4 y 0.5, de igual forma ninguna de las dos relaciones estudiadas presento aumentos importantes en la pendiente de resistencia de 3 días a 90 días.
- Las mezclas ternarias CSA+CV+CL presentan el mejor comportamiento en la resistencia a la compresión respecto a todos los sistemas estudiados al punto de que la mezcla CCVCL105 mostro resistencias equivalentes a la referencia para el caso de la relación a/mc de 0.4. lo que permite mediante este sistema reemplazar hasta el 15 % del CSA sin generar ningún detrimento de la propiedad estudiada.
- Combinaciones de CV y CL con cemento Portland presentan en las dos relaciones a/mc estudiadas mejores desempeños de resistencia a la compresión.

7.1.2. Etapa 2- Resistencia a la compresión de pastas base CSA-CV-CL-EH-PV-CM

- Niveles de reemplazo altos (30 y 40%) en combinaciones binarias CSA + MCS (EH, PV, MS y caliza) presentaron detrimentos importantes en la resistencia a la compresión de los sistemas estudiados, por el contrario dichas reducciones de la propiedad estudiada no son muy relevantes para la ceniza volante y para la puzolana volcánica cuando es combinada con el CSA.
- En mezclas base CSA ternarias (70%CSA+15%MCS1+15%MCS2) con 30% y 40% de reemplazo (60%CSA+20%MCS1+20%MCS2) para todas las adiciones minerales estudiadas la de mejor comportamiento fue la de puzolana

volcánica, la cual mostro ganancias de resistencia importantes a edades tardías.

- Las combinaciones ternarias con puzolana natural y caliza permiten generar reemplazo de hasta el 40% de CSA con reducciones de resistencias medianamente importantes pero con altas posibilidades de contribuir de manera importante con las reducciones de la huella de carbono producto de la fabricación del cemento.

7.1.3. Etapa 3- Resistencia a la compresión de pastas base CO-COCV-COCL-COEH-COMS-COPV y COMC.

- Dentro de los sistemas ternarios (50%CSA+25%CPO+25MCS), los materiales cementicios suplementarios con mejor comportamiento en resistencia a la compresión fueron la ceniza volante y la puzolana volcánica, pudiéndose desde el punto de vista del uso actual de CPO reducir en un 75% su utilización, por materiales con menor impacto en la huella de carbono alcanzando al mismo tiempo excelentes valores de resistencia a la compresión.
- Sin ser la caliza un MCS, en combinaciones ternarias con el CPO y el CSA presente adecuada sinergia con los cementos estudiados al punto de obtener resistencias equivalentes al MC y EH, así como también valores de esta propiedad mayores al presentado por microsílce con 25% de uso, en estos sistemas ternarios.
- Por los resultados de las micrografías obtenidas de algunos de los sistemas es posible concluir que en parte la no ganancia de resistencia a la compresión se puede deber a dos factores, primero a la falta de agua para la hidratación de las partículas anhidras de los cementos y segundo a la posible retracción autógena que se puede presentar en este tipo combinaciones en donde se tiene CSA y CPO con relaciones agua/cemento y cementante por debajo del 0.42.

7.1.4. Consistencia de pastas.

- El ácido cítrico como agente retardante en compañía del superplastificante incrementa la extensibilidad en todos los sistemas estudiados.
- Los sistemas ternarios (CSA+CPO+MCS) se ven mejor beneficiados por la combinación entre el AC y SP que los sistemas binarios (CSA+MCS).
- La escoria de alto horno presenta la más alta extensibilidad y la menor perdida de consistencia a través del tiempo, por el contrario, la de peor comportamiento ante los parámetros estudiados fue el de la microsílce.

7.1.5. Tiempos de fraguado de pastas

- El uso del ácido cítrico y del plastificante amplio de manera importante los tiempos de fraguado finales en todos los sistemas estudiados respecto a los sistemas en donde no se usaron estos componentes, de igual forma esta tendencia persiste con mayor incidencia en las mezclas ternarias estudiadas.
- La mezcla ternaria con caliza, AC y SP presenta el tiempo de fraguado más amplio respecto a las demás mezclas estudiadas, por el contrario la microsílíce fue la mezcla con menores tiempos de fraguado convirtiéndola en una mezcla poco extrapolable en aplicaciones industriales.

7.1.6. Retracción por secado de pastas

- Todas las mezclas estudiadas presentaron menores retracciones por secado que la mezcla de CPO, llegando a reducciones de hasta el 80% en mezclas binarias con caliza, ceniza volante, escoria, microsílíce y puzolana volcánica.
- Mezclas ternarias con CPO y MCS reducen ligeramente las retracciones por secado respecto a lo que presenta el CPO.
- Respecto al CSA las reducciones de retracción por secado están alrededor del 30%.

7.1.7. Temperatura de las pastas de cemento y cementantes

- En los sistemas binarios estudiados, la adición mineral que reduce de mejor manera la temperatura es la puzolana natural, sin embargo en los sistemas ternarios la caliza en combinación con el CPO es la adición mineral que mejor contribuye en la reducción de la temperatura que alcanza el CSA cuando se está llevando a cabo la reacción exotérmica de la hidratación.

7.2. Morteros base cemento sulfoaluminoso

7.2.1. Resistencia a la compresión de morteros

- El curado con mejor efecto sobre la muestra de 100% CSA fue el sistema al cual se le dio 1 día de curado únicamente.
- En morteros el sistema con mejor comportamiento en la resistencia a la compresión dentro de las mezclas estudiadas en ternario CSA+OPC+PV, fue la del curado en cuarto de curado a temperatura controlada y humedad relativa mayor a 98 %.
- En la todas la muestras analizadas el efecto del curado no incide de manera importantes en la resistencia a la compresión del mortero.

7.2.2. Resistividad eléctrica en morteros

- Tanto los sistemas binarios como los sistemas ternarios estudiados se ven afectados, desde el punto de vista de la durabilidad ante los iones cloro de acuerdo al ensayos de resistividad eléctrica, sin importar el tipo de curado (curado por inmersión o cuarto de curado)

7.2.3. Velocidad de pulso ultrasónico

- Los sistemas ternarios estudiados presentan comportamientos en cuanto a calidad de la matriz formada adecuados sin importar el tipo de curado utilizado, sin embargo los mejores desempeños se presentan con la puzolana volcánica.

7.2.4. Carbonatación en morteros

- Los sistemas binarios y ternarios que contienen caliza, se ven altamente influenciados por el tipo de curado, al punto de que al someter las muestras a una concentración del 8% durante 7 días, probetas muestran un avance total del frente de carbonatación en la sección transversal de la probeta, esta tendencia no se presenta de igual manera cuando las mismas muestras se curaron por inmersión o en el cuarto de curado. Esta misma tendencia se puede observar en la combinación binaria de CV.
- La puzolana volcánica en combinación con el CPO, es el MCS con mejor comportamiento ante este efecto exógeno que afecta al mortero y concretos independientemente del tipo de curado al que se haya sometido.

7.3. Concretos base cemento sulfoaluminoso

7.3.1. Resistencia a la compresión de concretos

- La ceniza volante en combinación con el CSA con altos niveles de reemplazo, presenta ganancia de resistencia a la compresión importante a edades tardías.
- El polímero superabsorbente en sistemas CSA+CV genera detrimento en la resistencia a la compresión a edades tempranas, pero a edades tardías muestra una incidencia clara en la ganancia de resistencia.

7.3.2. Retracción por secado de concretos

- Las mezclas con reemplazos de CSA por CV en porcentajes de 30 y 50% muestra reducciones importantes en las retracciones por secado de los concretos a edades tardías.
- El polímero superabsorbente afecta incrementado la retracción por secado en sistemas con ceniza volante.

7.3.3. Resistividad en concretos

- A edades tardías los sistemas estudiados presentan niveles de resistividad moderada lo que indica que desde el punto de vista de la durabilidad ante cloruros estos sistemas pueden comportarse de manera satisfactoria. Por el contrario a edades tempranas todos los sistemas muestran una alta probabilidad a ser afectados por los iones cloro.

7.3.4. Carbonatación en el concreto

- Desde el punto de vista de la carbonatación el sistema con CV que presenta el mejor desempeño ante el frente de carbonatación es el de 30% indicando un avance únicamente de 15 mm, a diferencia de esto los sistemas con SAP incrementaron la carbonatación en los sistemas estudiados.

Como recomendaciones se plantean las siguientes áreas de oportunidad en el estudio de la sinergia entre los MCS, el CSA y el CPO:

- Realizar mayor experimentación microestructural (termogravimetría, SEM-XDS, F-TIR y resonancia magnética nuclear y porosimetría por intrusión de mercurio), con el fin de definir con mayor detalle cada una de las reacciones sinérgicas que pueden darse al combinar de manera binaria y ternaria los materiales estudiados.
- Generar un análisis de los tiempos de fraguado apoyándose con calorimetría isotérmica por conducción, con el fin de conocer el efecto de los materiales cementicios suplementarios en combinación con el CSA y los aditivos superplastificantes para generar materiales base CSA con mejores opciones de colocabilidad en estructuras.
- Realizar estudios de durabilidad para mezclas de concreto en donde se pueda los efectos de diversos agentes nocivos en sistemas en donde se combinen los MCS con CSA, con el fin de generar concreto de bajos impacto ambiental que puedan comportarse de manera adecuada en su estado de servicio.

- Estudiar la inclusión de fibras naturales y artificiales en concretos base CSA+MCS y CSA+CPO+MCS, con el fin de conocer propiedades de ductilidad en este tipo de concretos y los comportamiento en la retracción compensada que puede mejorarse de manera importante con la adición de las fibras.

8. REFERENCIAS.

- [1] R. M. Andrew, "Global CO₂ emissions from cement production," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, pp. 195–217, 2018.
- [2] USGS (United States Geological Survey), "Cement mineral commodity summary 2020," 2020.
- [3] V. M. John, M. Quattrone, P. C. R. A. Abrão, and F. A. Cardoso, "Rethinking cement standards: Opportunities for a better future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 124, no. July, 2019.
- [4] G. Habert *et al.*, "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 1, no. 11, pp. 559–573, 2020.
- [5] F. Winnefeld, "Calcium sulfoaluminate cement: an example of a low CO₂ - alternative to Portland cement," in *WTA Colloquium Effect of Climate Change on Built Heritage*, 2010.
- [6] Marta García Maté, "Processing and characterisation of calcium sulphoaluminate (CSA) eco-cements with tailored performances," Universidad de Malaga, 2014.
- [7] E. Gartner, "Low-CO₂ Cements based on Calcium Sulfoaluminates," 2007, no. September, pp. 16–19.
- [8] F. Telesca, A. Marroccoli, M., and Winnefeld, "Synthesis and characterization of calcium sulfoaluminate cements produced by different chemical gypsums," *Adv. Cem. Res.*, vol. 31, no. 3, pp. 113–123, 2019.
- [9] C. W. Hargis, A. Telesca, and P. J. M. Monteiro, "Calcium sulfoaluminate (Ye' elimite) hydration in the presence of gypsum, calcite, and vaterite," *Cem. Concr. Res.*, vol. 65, pp. 15–20, 2014.
- [10] D. Bescher E. and B. M. N., "The use of calcium sulfoaluminate rapid setting cement for underground construction," *Tunel Business Magazine*, pp. 29–30, 2013.
- [11] J. Pera and J. Ambroise, "New applications of calcium sulfoaluminate cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, pp. 671–676, 2004.
- [12] Simge Çankaya & Beyhan Pekey, "Identifying Environmental Impacts of Cement Production With Life Cycle Assessment: Literature Review," *Ecol. Saf.*, vol. 9, no. March 2016, pp. 251–267, 2015.

- [13] C. N. B.V, "The advantages of CSA cement." p. 4, 2015.
- [14] IEA (International EnergyAgency), "Cement Technology Roadmap 2009 Carbon emissions reductions up to 2050," 2009.
- [15] T. Hanein, J. L. Galvez-Martos, and M. N. Bannerman, "Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, no. November, pp. 2278–2287, 2018.
- [16] P. E. B. Moses and Perumal, "Hydration of Cement and its Mechanisms," *IOSR J. Mech. Civ. Eng. Ver. I*, vol. 13, no. 6, pp. 2278–1684, 2016.
- [17] Pierre Claude Aitcin and Robert J., *Science and Technology of concrete Admixture*, 1st Editio. Cambridge, UK: Woodhead Publishig, 2016.
- [18] I. J. E.M. Gartner, J.F Young, D.A. Damidot, "Hydration of Portland cement," in *Structure and Performance of cement*, Secong., J. B. and P. Barnes, Ed. London: Spon press-Taylor and Francis Group, 2002, p. 565.
- [19] K. L. Scrivener and A. Nonat, "Hydration of cementitious materials , present and future," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 7, pp. 651–665, 2011.
- [20] D. D. Sidney Mindess, J. Francis Young, *Concrete*, 2nd Editio. Upper Saddle River, NJ, United States: Pearson Education, 2002.
- [21] G. Le Saout *et al.*, "Hydration of a calcium sulfoaluminate cement blended with zincite," *Adv. Cem. Res.*, vol. 33, no. 4, pp. 183–191, 2021.
- [22] M. C. Martín-sedeño *et al.*, "Aluminum-rich belite sulfoaluminate cements : Clinkering and early age hydration," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 3, pp. 359–369, 2010.
- [23] W. Lan and F. P. Glasser, "Hydration of calcium sulphoaluminate cements," *Adv. Cem. Res.*, vol. 8, no. 31, pp. 127–134, 1996.
- [24] L. Zhang, M. Su, and Y. Wang, "Development of the use of sulfo- and ferroaluminate cements in China," no. 1, pp. 15–21, 1999.
- [25] F. P. Glasser and L. Zhang, "High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate – belite compositions," vol. 31, pp. 1881–1886, 2001.
- [26] M. Marroccoli, M. L. Pace, A. Telesca, and G. L. Valenti, "Synthesis of Calcium Sulfoaluminate Cements From Al₂ O₃ -Rich By-products from Aluminium Manufacture," in *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2010.
- [27] S. Ioannou, L. Reig, K. Paine, and K. Quillin, "Properties of a ternary calcium sulfoaluminate-calcium sulfate-fly ash cement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 56, pp. 75–83, 2014.
- [28] A. G. Aranda, M. A.G., De la Torre, "Sulfoaluminate cement," in *Eco-Efficient Concrete*, 1st Editio., F Pacheco-Torgal S Jalali J Labrincha V M John, Ed.

Woodhead Publishing, 2013, p. 624.

- [29] A. M. Id, A. Belli, C. Giosu, A. Telesca, M. Marroccoli, and F. Tittarelli, "Calcium Sulfoaluminate , Geopolymeric , and Cementitious Mortars for Structural Applications," pp. 1–18, 2017.
- [30] J. Bizzozero, C. Gosselin, and K. L. Scrivener, "Expansion mechanisms in calcium aluminate and sulfoaluminate systems with calcium sulfate," *Cem. Concr. Res.*, vol. 56, pp. 190–202, 2014.
- [31] A. Telesca, M. Marroccoli, M. L. Pace, M. Tomasulo, G. L. Valenti, and P. J. M. Monteiro, "Cement & Concrete Composites A hydration study of various calcium sulfoaluminate cements," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 224–232, 2014.
- [32] E. Bescher and J. Kim, "Belitic Calcium Sulfoaluminate Cement : History , Chemistry , Performance , and Use in the United States," in *1st International conference on innovation in low carbon cement and concrete tecnology*, 2019, no. June, pp. 2–5.
- [33] G. Álvarez-pinazo *et al.*, "In - situ early-age hydration study of sulfobelite cements by synchrotron powder diffraction," *Cem. Concr. Res.*, vol. 56, pp. 12–19, 2014.
- [34] M. García-Maté, A. G. De La Torre, L. León-Reina, M. A. G. Aranda, and I. Santacruz, "Hydration studies of calcium sulfoaluminate cements blended with fly ash," *Cem. Concr. Res.*, vol. 54, pp. 12–20, 2013.
- [35] P. Du *et al.*, "Preparation and properties of of alite-modified calcium sulfoaluminate cement," *Adv. Cem. Res.*, vol. 33, no. 3, pp. 135–143, 2021.
- [36] N. Chitvoranund, F. Winnefeld, C. W. Hargis, S. Sinthupinyo, and B. Lothenbach, "Synthesis and hydration of alite-calcium sulfoaluminate cement," *Adv. Cem. Res.*, vol. 29, no. 3, pp. 101–111, 2017.
- [37] A. Telesca, M. Marroccoli, M. L. Pace, M. Tomasulo, G. L. Valenti, and P. J. M. Monteiro, "Cement & Concrete Composites A hydration study of various calcium sulfoaluminate cements," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 53, pp. 224–232, 2014.
- [38] P. K. Mehta, "Mechanism of expansion associated with ettringite formation," *Cem. Concr. Res.*, vol. 3, pp. 1–6, 1973.
- [39] S. W. Mehta, P.K., "expansion of ettringite by water adsorption," *Cem. Concr. Res.*, vol. 12, pp. 121–122, 1982.
- [40] K. Ogawa and D. M. Roy, "C4A3S hydration ettringite formation, and its expansion mechanism: I. expansion; Ettringite stability," *Cem. Concr. Res.*, vol. 11, no. 5–6, pp. 741–750, 1981.
- [41] J. S. M. T. Pedersen, B. Lothenbach, F. Winnefeld, "The effect of metakaolin

and limestone on the hydrate phase assemblages and hydration kinetics of calcium sulfoaluminate-metakaolin-limestone blends,” in *International Workshop on Calcium sulfoaluminate cements*, 2018, pp. 44–45.

- [42] J. Zhang *et al.*, “Microstructure and Properties of Sulfoaluminate Cement-Based Grouting Materials: Effect of Calcium Sulfate Variety,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2020, 2020.
- [43] Y. Jeong, C. W. Hargis, S. C. Chun, and J. Moon, “The effect of water and gypsum content on strätlingite formation in calcium sulfoaluminate-belite cement pastes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 166, pp. 712–722, 2018.
- [44] F. Winnefeld, M. Ben Haha, and B. Lothenbach, “Hydration mechanisms of calcium sulfoaluminate cements assessed by scanning electron microscopy and thermodynamic modelling,” *13th Int. Congr. Chem. Cem.*, no. July, pp. 1–7, 2011.
- [45] L. F. K. R.B. Holland, K.E. Kurtis, “Effect of different concrete materials on the corrosion of the embedded reinforcing steel,” in *Corrosion of Steel in Concrete Structures*, Structures., 2016, pp. 131–147.
- [46] E. R. Cyr, Martin, Philippe Lawrence, “Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, pp. 264–277, 2006.
- [47] M. F. Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Menéndez, G., & Carrasco, “Hydration and properties of ternary cement with calcareous filler and slag,” *Rev. ALCONPAT*, vol. 5, no. 2, pp. 83–95, 2015.
- [48] P. Chaunsali and V. Kumar, “sulfoaluminate- belite cements : opportunities and challenges,” *Indian Concr. J.*, no. May, pp. 18–25, 2020.
- [49] E. Gartner, “What are BYF cements, and how do they differ from CSA cements?,” in *Symposium “The future of cement”200 years after Louis Vicat*.
- [50] A. Kaminsky, M. Krstic, P. Rangaraju, A. Tagnit-Hamou, and M. D. A. Thomas, “Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete Members of ASTM Subcommittee C09.24 summarize industry context behind new ASTM standard specification,” Nov. 2020.
- [51] R. R. R. Lewis, L. Sear, P. Wainwrigth, “Cementitious additions,” in *Advanced Concrete Technology - Constituent Materials*, First., B. S. C. J. Newman, Ed. Elsevier, 2003, pp. 96–160.
- [52] L. H. J. Martin, F. Winnefeld, E. Tschopp, C. J. Müller, and B. Lothenbach, “Influence of fly ash on the hydration of calcium sulfoaluminate cement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 95, pp. 152–163, 2017.
- [53] D. K. Panesar, “Supplementary cementing materials,” in *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, Second Edition., S. Mindess,

Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2019, pp. 55–85.

- [54] M. Thomas, *Supplementary cementing materials in concrete*, First edition. Boca Raton: CRC Press Taylor and Francis Group, 2013.
- [55] ACI Committee 116, “Cement and concrete terminology,” Farmington Hills, MI., 2000.
- [56] R. L. Day, “Pozzolans for use in low cost housing,” Ottawa, 1990.
- [57] H. Ulusu, H. Y. Aruntas, and O. Gencil, “Investigation on characteristics of blended cements containing pumice,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 118, pp. 11–19, 2016.
- [58] O. J. Restrepo Gutierrez, Juan Camilo R. and J. Iván Tobon, “Effects of the addition of metakaolin in portland cement,” *Dyna*, vol. 73, no. 150, pp. 131–141, 2006.
- [59] L. Coppola, D. Coffetti, and E. Crotti, “Use of tartaric acid for the production of sustainable Portland-free CSA-based mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 171, pp. 243–249, 2018.
- [60] D. Gao, Y. Meng, L. Yang, J. Tang, and M. Lv, “Effect of ground granulated blast furnace slag on the properties of calcium sulfoaluminate cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116665, 2019.
- [61] L. Coppola, D. Coffetti, E. Crotti, R. Dell’Aversano, G. Gazzaniga, and T. Pastore, “Influence of lithium carbonate and sodium carbonate on physical and elastic properties and on carbonation resistance of calcium sulphoaluminate-based mortars,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, 2020.
- [62] H. N. Yoon, J. Seo, S. Kim, H. K. Lee, and S. Park, “Hydration of calcium sulfoaluminate cement blended with blast-furnace slag,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 268, no. 25, p. 121214, 2021.
- [63] L. H. J. Martin, F. Winnefeld, C. J. Müller, and B. Lothenbach, “Contribution of limestone to the hydration of calcium sulfoaluminate cement,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 204–211, 2015.
- [64] L. Pelletier-Chaignat, F. Winnefeld, B. Lothenbach, and C. J. Müller, “Beneficial use of limestone filler with calcium sulphoaluminate cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 619–627, 2012.
- [65] D. Sirtoli, M. Wyrzykowski, P. Riva, and P. Lura, “Autogenous and drying shrinkage of mortars based on Portland and calcium sulfoaluminate cements,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 53, no. 5, pp. 1–14, 2020.
- [66] R. Trauchessec, J. M. Mechling, A. Lecomte, A. Roux, and B. Le Rolland, “Hydration of ordinary Portland cement and calcium sulfoaluminate cement blends,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 56, pp. 106–114, 2015.

- [67] L. Pelletier, F. Winnefeld, and B. Lothenbach, "The ternary system Portland cement-calcium sulphoaluminate clinker-anhydrite: Hydration mechanism and mortar properties," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 7, pp. 497–507, 2010.
- [68] L. Pelletier-Chaignat, F. Winnefeld, B. Lothenbach, G. Le Saout, C. J. Müller, and C. Famy, "Influence of the calcium sulphate source on the hydration mechanism of Portland cement-calcium sulphoaluminate clinker-calcium sulphate binders," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 5, pp. 551–561, 2011.
- [69] S. Park, Y. Jeong, J. Moon, and N. Lee, "Hydration characteristics of calcium sulfoaluminate (CSA) cement/portland cement blended pastes," *J. Build. Eng.*, vol. 34, no. April 2020, p. 101880, 2021.
- [70] J. J. Wolf, D. Jansen, F. Goetz-Neunhoeffler, and J. Neubauer, "Application of thermodynamic modeling to predict the stable hydrate phase assemblages in ternary CSA-OPC-anhydrite systems and quantitative verification by QXRD," *Cem. Concr. Res.*, vol. 128, no. October 2019, pp. 1–9, 2020.
- [71] G. Ke, J. Zhang, Y. Liu, and S. Xie, "Early hydration heat of calcium sulfoaluminate cement with influence of supplementary cementitious materials and water to binder ratio," *Powder Technol.*, vol. 14, 2021.
- [72] ACI - committee 201, "Guide to durable concrete ACI 201.2R-16," 2016.
- [73] Lopez-Yepe. L.G, "Influencia del porcentaje de adición de microsíllice y del tipo de curado en la penetración del ion cloruro del Concreto de Alto Desempeño," Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [74] K. Tuutti, "Corrosion of steel in concrete," *Swedish Found. Concr. Res.*, vol. Stockholm, 1982.
- [75] P. R. Bertolini, L. Elsener, B. Pedferri P., *Corrosion of steel in concrete*, First Edition. 2004.
- [76] H. Layssi, P. Ghods, A. R. Alizadeh, and M. Salehi, "Electrical Resistivity of Concrete," *Concr. Int.*, no. May, pp. 41–46, 2015.
- [77] D. Kalogridis, G. C. Kostoglou, C. Ftikos, and C. Malami, "Quantitative study of the influence of non-expansive sulfoaluminate cement on the corrosion of steel reinforcement," *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, no. 11, pp. 1731–1740, 2000.
- [78] P. Duan, W. Chen, J. Ma, and Z. Shui, "Influence of layered double hydroxides on microstructure and carbonation resistance of sulfoaluminate cement concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 601–609, 2013.
- [79] M. Afroughsabet, V. Biolzi, L. Monteiro, P. Gataldi, "Investigation of the mechanical and durability properties of sustainable high performance concrete based on calcium sulfoaluminate cement," *J. Build. Eng.*, vol. 43, no. April, pp. 1–14, 2021.

- [80] Z. Decheng, X. U. Dongyu, C. Xin, and C. Wen, "Carbonation Resistance of Sulphoaluminate Cement-based High Performance Concrete," *J. Wuhan Univ. Technoloty-Mater.*, vol. 24, no. 4, pp. 663–666, 2009.
- [81] G. L. V. N. Sherman, J. Beretka, L. Santoro, "Long term behaviour of hydraulic binders based on calcium sulfoaluminate and calcium sulfosilicate," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no. 1, pp. 113–126, 1995.
- [82] S. Ioannou and K. A. Paine, "Strength and durability of calcium sulfoaluminate based concretes," in *Internation conference on Non Conventional Materails and Technologies: Ecological Materials and Tecnologies for sustainable building*, 2010, no. September 2010.
- [83] P. Alapati and K. E. Kurtis, "Carbonation in alternative cementitious materials: Implications on durability and mechanical properties," in *6th International Conference on Durability of Concrete Structures, ICDCS 2018*, 2018, vol. 1, no. July, pp. 111–119.
- [84] OECD, *OECD Environmental Outlook to 2050*. 2012.
- [85] United Nations, *World Urbanization Prospects 2018*. 2018.
- [86] C. E. C. Linton, "Modificación de la propiedades de matrices cementantes mediante la adición de nanoparticulas de sílice," Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015.
- [87] B. Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials.*, 1st Editio. CRC Press Taylor and Francis Group, 2016.
- [88] J. S. K. Yeung, M. C. H. Yam, and Y. L. Wong, "1-Year development trend of concrete compressive strength using Calcium Sulfoaluminate cement blended with OPC, PFA and GGBS," *Constr. Build. Mater.*, vol. 198, pp. 527–536, 2019.
- [89] P. Chaunsali and P. Mondal, "Influence of Calcium Sulfoaluminate (CSA) Cement Content on Expansion and Hydration Behavior of Various Ordinary Portland Cement-CSA Blends," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 98, no. 8, pp. 2617–2624, 2015.
- [90] A. Leemann, H. Pahlke, R. Loser, and F. Winnefeld, "Carbonation resistance of mortar produced with alternative cements," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 51, no. 5, 2018.
- [91] F. Winnefeld and B. Lothenbach, "Hydration of calcium sulfoaluminate cements - Experimental findings and thermodynamic modelling," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 8, pp. 1239–1247, 2010.
- [92] I. Galan, A. Elhoweris, T. Hanein, M. N. Bannerman, and F. P. Glasser, "Advances in clinkering technology of calcium sulfoaluminate cement," *Adv. Cem. Res.*, vol. 29, no. 10, pp. 405–417, 2017.

- [93] K. De Weerd, K. O. Kjellsen, E. Sellevold, and H. Justnes, "Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 1, pp. 30–38, 2011.
- [94] ASTM, "ASTM C618 - 19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," 2019.
- [95] F. Puertas, "Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico," *Mater. Construcción*, vol. 43, no. 229, pp. 37–48, 1993.
- [96] P. K. M. Malhotra, V. M., *Pozzolanic and cementitious materials. Advances in concrete Technology*, Vol. 1. 1996.
- [97] Y. Jeong, C. W. Hargis, H. Kang, S. C. Chun, and J. Moon, "The effect of elevated curing temperatures on high ye'elimate calcium sulfoaluminate cement mortars," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 7, 2019.
- [98] G. Schumacher and L. Juniper, "Coal utilisation in the cement and concrete industries," in *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*, vol. 2, D. Osborne, Ed. Elsevier Inc., 2013, pp. 387–426.
- [99] Y. Jeong, C. W. Hargis, S. Chun, and J. Moon, "Effect of calcium carbonate fineness on calcium sulfoaluminate-belite cement," *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 8, 2017.
- [100] D. P. Bentz, A. S. Hansen, and J. M. Guynn, "Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 8, pp. 824–831, 2011.
- [101] S. Yaseri, G. Hajiaghahi, F. Mohammadi, M. Mahdikhani, and R. Farokhzad, "The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste," *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, No. December, pp. 534–545, 2017.
- [102] H. F. Campos, N. S. Kleina, and J. M. Filhoa, "Comparison of the Silica Fume Content for High-Strength Concrete Production: Chemical Analysis of the Pozzolanic Reaction and Physical Behavior by Particle Packing," *Mater. Res.*, vol. 23, no. 5, 2020.
- [103] G. Huang, D. Pudasainee, R. Gupta, and W. Victor, "Hydration reaction and strength development of calcium sulfoaluminate cement-based mortar cured at cold temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 224, pp. 493–503, 2019.
- [104] M. Carsana, F. Canonico, and L. Bertolini, "Corrosion resistance of steel embedded in sulfoaluminate-based binders," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 88, no. September, pp. 211–219, 2018.
- [105] S. Formagini and P. Serna, "Self-healing concrete-What Is it Good For?," *Mater. Construcción*, vol. 71, no. 341, 2021.
- [106] I. A. Chen, C. W. Hargis, and M. C. G. Juenger, "Understanding expansion in

calcium sulfoaluminate-belite cements," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 1, pp. 51–60, 2012.

- [107] M. P. Adams and J. H. Ideker, "Volume stability of calcium aluminate cement and calcium sulfoaluminate cement systems," 2014, no. May, p. 159.
- [108] D. Sirtoli, M. Wyrzykowski, P. Riva, S. Tortelli, M. Marchi, and P. Lura, "Shrinkage and creep of high-performance concrete based on calcium sulfoaluminate cement," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 98, pp. 61–73, 2019.
- [109] B. Tan, M. U. Okoronkwo, A. Kumar, and H. Ma, "Durability of calcium sulfoaluminate cement concrete," *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 21, no. 2, pp. 118–128, 2020.
- [110] R. Zhang, L. Li, Y. Sultanbawa, and Z. P. Xu, "X-ray fluorescence imaging of metals and metalloids in biological systems.," *Am. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, vol. 8, no. 3, pp. 169–188, 2018.