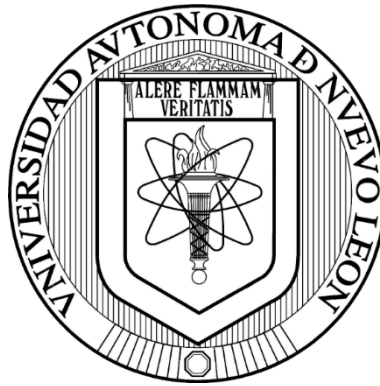


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**DESARROLLO DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE UN MATERIAL**

**LIGERO AIREADO A BASE DE ANHIDRITA Y**

**ESCORIA DE ALTO HORNO**

**Por:**

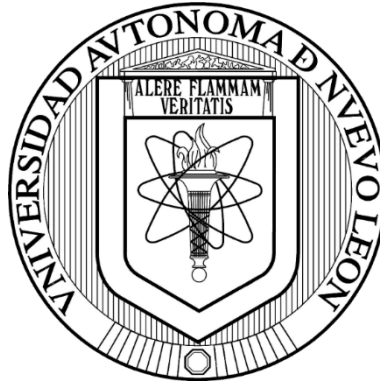
**MIGUEL ÁNGEL GUERRA COSSÍO**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de  
DOCTORADO EN INGENIERÍA con Orientación en Materiales de Construcción**

**J u l i o, 2020**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**DESARROLLO DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE UN MATERIAL**

**LIGERO AIREADO A BASE DE ANHIDRITA Y**

**ESCORIA DE ALTO HORNO**

**Por:**

**MIGUEL ÁNGEL GUERRA COSSÍO**

**Como requisito parcial para obtener el Grado de  
DOCTORADO EN INGENIERÍA con Orientación en Materiales de Construcción**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. JAVIER RODRIGO GONZÁLEZ LÓPEZ  
CO-DIRECTOR DE TESIS: DR. ANTONIO ALBERTO ZALDÍVAR CADENA  
EVALUADOR DE TESIS: DRA. MAYRA ZYZLILA FIGUEROA TORRES**

**J u l i o, 2020**

**DESARROLLO DE LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DE UN MATERIAL  
LIGERO AIREADO A BASE DE ANHIDRITA Y  
ESCORIA DE ALTO HORNO**

Aprobación de la Tesis

---

Dr. Javier Rodrigo González López

---

Dr. Antonio Alberto Zaldívar Cadena

---

Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres

---

Dr. Jacobo Hernández Sandoval

---

Dra. Ana María Guzmán Hernández

---

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

2020/junio/22

**DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL**  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es “**Desarrollo de las Propiedades Térmicas de un Material Ligero Aireado a Base de Anhídrita y Escoria de Alto Horno**”, que presenta el **Ing. Miguel Ángel Guerra Cossío**, dentro del programa de **Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción**, como requisito parcial para obtener el grado de **Doctor en Ingeniería**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

**DR. JAVIER RODRÍGUEZ GONZÁLEZ LÓPEZ**

Director de Tesis



Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, C.P. 66455  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México  
Tels. 81 8329 4000 ext 7200 | 81 1442 4400  
<http://fic.uanl.mx>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL**  
**SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**PRESENTE.-**

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es “**Desarrollo de las Propiedades Térmicas de un Material Ligero Aireado a Base de Anhídrita y Escoria de Alto Horno**”, que presenta el **Ing. Miguel Ángel Guerra Cossío**, dentro del programa de **Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción**, como requisito parcial para obtener el grado de **Doctor en Ingeniería**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** on la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente

“ALERE FLAMMAM VERITATIS”

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 1 de julio de 2020

**DR. ANTONIO ALBERTO ZALDIVAR CADENA**

Evaluador



EDUCACION DE CALIDAD PARA TRANSFORMAR Y  
TRANSCENDER EN BENEFICIO DE LA HUMANIDAD

Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, C.P. 66455  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México  
Tels. 81 8329 4000 ext 7200 | 81 1442 4400  
<http://fic.uanl.mx>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

2020/06/24

**DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL**  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es “**Desarrollo de las Propiedades Térmicas de un Material Ligero Aireado a Base de Anhídrita y Escoria de Alto Horno**”, que presenta el **M.C. Miguel Ángel Guerra Cossío**, dentro del programa de **Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción**, como requisito parcial para obtener el grado de **Doctor en Ingeniería**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento cuen con la calidad y nivel científico, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

**Dra. Mayra Zyzlila Figueroa Torres**  
Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455  
Tels. 8329 4000 ext. 7216, 7234  
[www.ingenieriacivil.uanl.mx](http://www.ingenieriacivil.uanl.mx)



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

FECHA: 2020/JUNIO/30

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“Desarrollo de las Propiedades Térmicas de un Material Ligero Aireado a Base de Anhídrita y Escoria de Alto Horno”**, que presenta el Ing. Miguel Ángel Guerra Cossío, dentro del programa de **Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción**, como requisito parcial para obtener el grado de **Doctor en Ingeniería**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dr. Jacobo Hernández Sandoval

Evaluador



Pedro de Alba s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 66451,  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México,  
Conm.: 8329-4020, Fax: 8332-0904, www.fime.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

2020/JULIO/03

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“Desarrollo de las Propiedades Térmicas de un Material Ligero Aireado a Base de Anhídrida y Escoria de Alto Horno”**, que presenta el **Ing. Miguel Ángel Guerra Cossío**, dentro del programa de **Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción**, como requisito parcial para obtener el grado de **Doctor en Ingeniería**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dra. Ana María Guzmán Hernández

Evaluador



Ciudad Universitaria  
Pedro de Alba s/n, C.P. 66455, A.P. 076 Suc. "F"  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.  
Tels: (81) 8332 0903 / Conm.: 8329 4020 / Fax: (81) 8332 0904

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de investigación, a la vez que agradezco profundamente, a mi compañera de vida, de proyectos, de aventuras y de profesión, **Loth Ivonne Rodríguez Barboza**. Gracias por aceptarme como tu compañero, por tu apoyo en todo momento y por tu enorme comprensión hacia las locuras que suelen surgir de una mente como la mía. Emprendimos juntos este camino de formación, el cual de cierta forma ha resultado ser más largo y complicado para ti, pero hemos ido de la mano apoyándonos el uno al otro cuando ha sido necesario. Eres mi motivo para seguir adelante. Eres mi inspiración para lograr cada objetivo. Muchas gracias por todo.

A mis padres, **María Catalina Cossío Villegas** y **José Pablo Guerra Pacheco** que, a pesar de las diferencias y la distancia, siguen y seguirán siendo mis primeros maestros y mi principal pilar de apoyo. Gracias por sus consejos, orientación y por ser un modelo de perseverancia y de trabajo arduo. A mis hermanos, **Clara Cecilia, Juan Pablo, Israel** y **José Alain**, que su motivación y cariño son irremplazables y siempre han sido un ejemplo de esfuerzo, honestidad y dedicación. Cada uno hemos tenido que tomar distintas decisiones que nos han llevado por diferentes caminos, sin embargo, siempre hemos estado el uno para el otro cuando ha sido requerido. Y de forma general, a las familias **Guerra Pacheco** y **Cossío/Casillas Villegas**, de quienes siempre he sentido su reconocimiento y apoyo, siempre empujándome a lograr lo que me propongo.

## **Agradecimientos**

El agradecimiento va dirigido a todas aquellas personas e instituciones que de alguna manera se vieron involucradas en el desarrollo de este trabajo de investigación, y que forman parte importante de este logro. Considero que cada pieza es importante y que este es el resultado de la suma de muchos esfuerzos. Mi más profundo agradecimiento, no solo por el apoyo mostrado para lograr los objetivos científicos que amerita un trabajo de investigación como éste, sino también por el desarrollo personal logrado gracias a las exigencias y adversidades que se hayan tenido que sortear durante el mismo. De antemano una respetuosa disculpa a las personas e instituciones que no sean mencionadas directamente.

- Principalmente a Dios por permitirme llegar hasta aquí. Por darme la vida y las fuerzas para seguir siempre hacia adelante con paso firme. Por proveerme con la capacidad y el discernimiento necesarios para tomar las decisiones correctas y llegar a obtener el grado máximo de estudios. Por poner a las personas correctas en mi camino.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado por medio de la beca de doctorado.
- A la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) por haberme permitido llevar a cabo mis estudios de doctorado en sus instalaciones.
- Al Instituto de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil, por abrir las puertas de sus instalaciones y equipos.
- Al Dr. Javier Rodrigo González López por aceptarme como su asesorado y permitirme desarrollar este proyecto en conjunto con él. Por compartir sus conocimientos conmigo y guiarme a través de mi formación como investigador. Y en general por su apoyo desinteresado en todos los sentidos.
- Al Cuerpo Académico de Materiales Alternativos en Ingeniería (CAMAI) y a cada uno de sus integrantes; Dr. Rodrigo González López, Dra. Mayra Figueroa Torres

y Dr. Antonio Zaldívar Cadena; por la oportunidad de pertenecer a su grupo de investigación, permitirme familiarizarme con su dinámica de trabajo y colaborar en distintas actividades formativas.

- A la Subdirección de Estudios de Posgrado por el apoyo administrativo proporcionado durante el desarrollo del doctorado, en especial a Ramiro Torres y Jessica Saucedo.
- Al Laboratorio de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción del Instituto de Ingeniería Civil, en especial a Gumaro Tovar, por haber facilitado la utilización de sus espacios y equipos para la elaboración de las pruebas necesarias.
- El departamento de Verificación y Control de Materiales de Construcción (VCMC); M.C. Javier Rocha, Dr. Rodrigo González, Ing. Sergio Castillo, Dr. Oziel Casco, Ing. Pablo Pedraza, Dr. Guadalupe Millán, Lic. Elvira García.
- Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) de Chihuahua, Chih., particularmente al M.C. Daniel Lardizábal, responsable del laboratorio de análisis térmicos, por recibirme durante mi estancia y por guiarme a realizar las pruebas correspondientes.
- A la Biblioteca del Instituto de Ingeniería Civil por el libre acceso a sus instalaciones y a su extenso acervo bibliográfico.
- Sin dejar de mencionar a todos los compañeros y colegas que coincidimos a lo largo de este camino de superación. A todos ellos gracias por los momentos divertidos, tristes, de asombro, de competencia, pero sobre todo de amistad, que compartimos dentro y fuera del horario laboral.

Probar las ideas por medio de la experimentación y la observación.

Apoyarnos en aquellas ideas que pasaron la prueba y rechazar las que fracasaron.

Seguir la evidencia hasta donde ésta nos lleve y **cuestionar todo**.

Si aceptamos estos términos, el conocimiento será nuestro.

Neil deGrasse Tyson (2014)

# TABLA DE CONTENIDO

| Capítulo   | Página |
|--|--------|
| CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....  | 1      |
| 1.1 Planteamiento del Problema.....  | 3      |
| 1.2 Hipótesis.....   | 5      |
| 1.3 Justificación y Alcance .....  | 5      |
| 1.4 Objetivo General.....  | 6      |
| 1.5 Objetivos Específicos.....   | 6      |
| CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES.....   | 8      |
| 2.1 La Relación Entre Consumo de Energía y los Gases de Efecto Invernadero ..... | 8      |
| 2.2 El Consumo de Energía en la Construcción.....                                | 10     |
| 2.3 Materiales Cementantes Suplementarios .....                                  | 14     |
| 2.3.1 Escoria de Alto Horno .....  | 16     |
| 2.3.2 Microsílice.....   | 19     |
| 2.4 Cementantes Alternativos Potencialmente de Bajo Carbono.....                 | 21     |
| 2.5 El Sulfato de Calcio como Cementante de Bajo Consumo de Energía .....        | 23     |
| 2.5.1 Procesamiento y Reactividad del Sulfato de Calcio.....                     | 24     |
| 2.5.2 Anhidrita .....  | 26     |
| 2.6 Cementantes Base Sulfato de Calcio .....                                     | 28     |
| 2.6.1 Cementos Base Hemihidrato.....   | 28     |
| 2.6.2 Cementos Base Anhidrita.....   | 30     |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 2.6.3                                    | Cementos Supersulfatados .....                           | 31 |
| 2.6.4                                    | Cementos Sulfoaluminosos.....                            | 33 |
| 2.7                                      | La Etringita y sus Efectos .....                         | 34 |
| 2.8                                      | Materiales Aligerados .....                              | 39 |
| 2.8.1                                    | Materiales Aligerados por Método Espumado.....           | 40 |
| 2.8.2                                    | Materiales Aligerados por Método Aireado.....            | 41 |
| 2.8.3                                    | Materiales Ligeros Base Sulfato de Calcio .....          | 41 |
| 2.8.4                                    | Expresiones Existentes para Comportamiento Térmico ..... | 43 |
| CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL..... |  | 48 |
| 3.1                                      | Materiales .....   | 48 |
| 3.1.1                                    | Sulfato de Calcio .....                                  | 48 |
| 3.1.2                                    | Escoria de Alto Horno .....                              | 48 |
| 3.1.3                                    | Microsílice.....   | 49 |
| 3.1.4                                    | Aditivos.....  | 49 |
| 3.2                                      | Detalles Experimentales.....                             | 50 |
| 3.2.1                                    | Etapa 1. Estudio de la Formación de Etringita.....       | 52 |
| 3.2.2                                    | Etapa 2. Cantidad de Agente Aireante.....                | 54 |
| 3.2.3                                    | Etapa 3. Correlación y Expresión Matemática.....         | 56 |
| 3.3                                      | Técnicas de Caracterización.....                         | 56 |
| 3.3.1                                    | Resistencia a la Compresión (RC).....                    | 56 |
| 3.3.2                                    | Cambios de Longitud.....                                 | 57 |
| 3.3.3                                    | Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) .....           | 59 |
| 3.3.4                                    | Difracción de Rayos X (DRX) .....                        | 62 |
| 3.3.5                                    | Fluorescencia de Rayos X (FRX).....                      | 64 |
| 3.3.6                                    | Transferencia Térmica (Técnica de Flujo de Calor).....   | 65 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 3.3.7                                   | Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) .....                      | 67  |
| CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... |  | 70  |
| 4.1                                     | Caracterización de Materiales .....                                  | 70  |
| 4.1.1                                   | Sulfato de Calcio .....  | 71  |
| 4.1.2                                   | Escoria de Alto Horno .....  | 72  |
| 4.1.3                                   | Microsílice, Carbonato de Calcio y Carburo de Silicio .....          | 75  |
| 4.2                                     | Etapa Experimental 1. Formación de Etringita .....                   | 77  |
| 4.2.1                                   | Comportamiento Mecánico .....  | 78  |
| 4.2.2                                   | Estabilidad Dimensional .....  | 81  |
| 4.2.3                                   | Composición Mineralógica .....                                       | 83  |
| 4.2.4                                   | Microestructura.....   | 85  |
| 4.2.5                                   | Resumen de Resultados, Etapa Experimental 1 .....                    | 88  |
| 4.3                                     | Etapa Experimental 2. Sistemas Aireados .....                        | 89  |
| 4.3.1                                   | Densidad.....  | 90  |
| 4.3.2                                   | Contenido de Aireante .....  | 91  |
| 4.3.3                                   | Porosidad.....   | 94  |
| 4.3.4                                   | Resistencia a Compresión .....                                       | 98  |
| 4.3.5                                   | Fases Presentes (DRX) .....  | 105 |
| 4.3.6                                   | Análisis Microestructural .....                                      | 108 |
| 4.3.7                                   | Conductividad Térmica.....   | 112 |
| 4.3.8                                   | Calor Específico .....   | 115 |
| 4.3.9                                   | Resumen de Resultados, Etapa Experimental 2 .....                    | 116 |
| 4.4                                     | Etapa Experimental 3. Correlación y Expresión Matemática .....       | 117 |
| 4.4.1                                   | Relación Densidad - Resistencia a Compresión - Transferencia Térmica |     |

|                               |  |     |
|-------------------------------|--|-----|
| 4.4.2                         | Propuesta de Expresión Matemática.....           | 121 |
| 4.4.3                         | Resumen de Resultados, Etapa Experimental 3..... | 131 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES ..... |  | 132 |
| 5.1                           | Conclusiones.....                                | 132 |
| 5.2                           | Recomendaciones.....                             | 135 |
| BIBLIOGRAFÍA .....            |  | 137 |

## LISTA DE FIGURAS

| Figura   | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Consumo directo de energía por el sector de la construcción en cada región del mundo de 1995 a 2009 [26].....  | 11     |
| Figura 2. Consumo de energía y CO <sub>2</sub> inherentes de diferentes materiales de construcción [27].....   | 13     |
| Figura 3. Materiales cementantes suplementarios usados en la actualidad (de izquierda a derecha: ceniza volante clase C, metacaolín, microsílíce, ceniza volante clase F, escoria de alto horno, puzolanas naturales) [34] ..... | 15     |
| Figura 4. Composición química de los materiales suplementarios utilizados en construcción [29] .....   | 16     |
| Figura 5. Esquema de operación de un alto horno [36] .....   | 17     |
| Figura 6. Diagrama esquemático de la producción de microsílíce [40] .....  | 19     |
| Figura 7. Composición química de las fases del sulfato de calcio .....   | 25     |
| Figura 8. Micrografías de pastas 85% HH - 9% CP - 6% MS después de 200 días de inmersión en agua (izq: x2,000, der: x10,000) [61].....   | 29     |
| Figura 9. Estructura típica de una pasta de yeso espumada [89].....  | 40     |
| Figura 10. Esquema del ensayo de resistencia a la compresión .....   | 57     |
| Figura 11. Aparato medidor de cambios de longitud.....   | 58     |
| Figura 12. Funcionamiento de un Microscopio Electrónico de Barrido [36,127].....   | 59     |
| Figura 13. Imagen típica de un grano de cemento, vista con el detector de Electrones Secundarios [128]. .....  | 60     |
| Figura 14. Imagen típica de una pasta de cemento, vista con el detector de Electrones Retrodispersados [128]. .....  | 61     |

|  |    |
|--|----|
| Figura 15. Orden creciente de brillantez en imágenes por ERD de las fases presentes en compuestos cementantes [36].          | 61 |
| Figura 16. Generación de rayos X característicos [128].  | 62 |
| Figura 17. Representación gráfica de la ley de Bragg [130].  | 63 |
| Figura 18. Transición orbital debido a la fluorescencia de rayos X [133].  | 65 |
| Figura 19. Componentes de la prueba de flujo de calor [123].   | 66 |
| Figura 20. Diagramas esquemáticos de configuraciones de análisis térmicos. A la izquierda DTA, a la derecha DSC [137].       | 68 |
| Figura 21. Fases presentes en el sulfato de calcio (YComS/C=Yeso Comercial sin calcinar; YCom500=Yeso Calcinado a 500°C).    | 72 |
| Figura 22. Patrón de DRX de la EAH.  | 73 |
| Figura 23. Estimación del tiempo de molienda para la EAH.  | 75 |
| Figura 24. Fases presentes en la microsíllice, carbonato de calcio y carburo de silicio ...                                  | 76 |
| Figura 25. DTP de microsíllice (MS), carbonato de calcio (CC) y carburo de silicio (SiC).                                    | 77 |
| Figura 26. Resistencia a compresión de los sistemas AH-EAH con distintos materiales para disminuir la formación de etringita | 78 |
| Figura 27. Resistencia a compresión de los sistemas AH-EAH con MS (inferior), CC (medio) y SiC (superior).                   | 80 |
| Figura 28. Cambios de longitud de los sistemas AH-EAH con distintos materiales para disminuir la formación de etringita.     | 82 |
| Figura 29. DRX de sistemas a 1 día de curado.  | 84 |
| Figura 30. DRX de sistemas a 28 días de curado   | 84 |
| Figura 31. DRX de sistemas a 180 días de curado  | 85 |
| Figura 32. Micrografías de sistemas con 15% microsíllice (izquierda) y 15% carbonato de calcio (derecha) a 28 días.          | 85 |
| Figura 33. Aglomeraciones de partículas de microsíllice en los sistemas 15% MS a 1 día (izquierda) y 28 días (derecha).      | 86 |
| Figura 34. Cristales de yeso dihidratado (DH) visibles en los sistemas 15% MS.   | 87 |
| Figura 35. C-S-H recubriendo los cristales de yeso (DH).   | 87 |
| Figura 36. Cristales de etringita (Ett) visibles en los sistemas 15% CC.   | 88 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 37. Pérdida de masa de sistemas aireados con respecto al tiempo .....   | 91  |
| Figura 38. Comportamiento de la densidad en función de la cantidad de aireante para sistemas con polvo de aluminio.....                | 92  |
| Figura 39. Comportamiento de la densidad en función de la cantidad de aireante para sistemas con polvo de aluminio + microsíllice..... | 92  |
| Figura 40. Comportamiento de la densidad en función de la cantidad de aireante para sistemas con peróxido .....                        | 93  |
| Figura 41. Comportamiento de la densidad en función de la cantidad de aireante para sistemas con peróxido + microsíllice .....         | 93  |
| Figura 42. Isotermas e histéresis típicos en análisis BET [146].....   | 97  |
| Figura 43. Resultados de porosidad (BET) de sistemas aireados.....   | 98  |
| Figura 44. Resistencia a compresión de sistemas aireados .....   | 99  |
| Figura 45. Resistencia a compresión de sistemas aireados con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                                       | 101 |
| Figura 46. Resistencia a compresión de sistemas aireados con polvo de Al .....   | 102 |
| Figura 47. Porosidad visible en sistemas 1200 Al (izq.) y 1200 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (der.).....                               | 103 |
| Figura 48. Porosidad visible en sistemas 800 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (izq.) y 800 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +MS (der.).....  | 105 |
| Figura 49. Fases presentes en los sistemas aireados a 28 días de curado .....  | 106 |
| Figura 50. Diferencia de intensidad en el pico característico de etringita .....   | 107 |
| Figura 51. Fases presentes en los sistemas aireados con polvo de aluminio a 28 días de curado.....                                     | 108 |
| Figura 52. Porosidad inherente en sistema de referencia sin aireante, a 200x.....  | 109 |
| Figura 53. Porosidad mostrada en sistemas 1200 Al (a) y 1200 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (b).....                                    | 109 |
| Figura 54. Identificación de C-S-H y Cristales de yeso (DH).....   | 110 |
| Figura 55. Cristales de etringita de 1-3 micras en sistema de referencia a 1000x (a) y 2000x (b).....                                  | 111 |
| Figura 56. Comparativa entre sistemas 800 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> sin microsíllice (a) y con microsíllice (b).<br>.....          | 112 |
| Figura 57. Relación Densidad-Resistencia-Transferencia de sistemas aireados con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> sin adición de MS .....  | 118 |
| Figura 58. Relación Densidad-Resistencia-Transferencia de sistemas aireados con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + MS.....                | 119 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 59. Relación Densidad-Resistencia-Transferencia de sistemas aireados con polvo de Al sin adición de MS .....                                     | 120 |
| Figura 60. Relación Densidad-Resistencia-Transferencia de sistemas aireados con polvo de Al + MS .....  | 121 |
| Figura 61. Comportamiento de la Resistencia a Compresión en función de la densidad en sistemas con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> .....                  | 123 |
| Figura 62. Comportamiento de la Resistencia a Compresión en función de la densidad en sistemas con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +MS .....              | 123 |
| Figura 63. Comportamiento de la Resistencia a Compresión en función de la densidad en sistemas con Al.....  | 124 |
| Figura 64. Comportamiento de la Resistencia a Compresión en función de la densidad en sistemas con Al+MS .....  | 124 |
| Figura 65. Variación en el valor de transferencia térmica medida vs calculada, usando valores promedio de $\alpha$ y $C_p$ , y densidades medidas ..... | 128 |
| Figura 66. Variación en el valor de transferencia térmica medida vs calculada, usando la expresión propuesta .....                                      | 130 |

## LISTA DE TABLAS

| Tabla  | Página |
|--|--------|
| Tabla 1. Potencial de calentamiento global de los GEI [20].....  | 9      |
| Tabla 2. Composición química (% en peso) típica de EAH en diferentes países [36,37]  | 18     |
| Tabla 3. Características físicas típicas de la MS [43] .....   | 21     |
| Tabla 4. Producción de CO <sub>2</sub> (gramos de CO <sub>2</sub> / gramos de fase producida) de diferentes fases cementantes..... | 34     |
| Tabla 5. Volumen molecular de algunos compuestos existentes en el concreto [80] .....  | 36     |
| Tabla 6. Esquema de etapas del desarrollo experimental .....   | 52     |
| Tabla 7. Esquema de mezclas de prueba etapa 1 (unidades en % en masa) .....  | 53     |
| Tabla 8. Arreglo de mezclas de prueba etapa 2.....   | 55     |
| Tabla 9. Composición química en óxidos (% en peso) de los materiales usados. ....  | 71     |
| Tabla 10. Masa, densidad y volumen de los constituyentes de la mezcla de referencia.   | 95     |
| Tabla 11. Porosidades teóricas calculadas para cada densidad propuesta. ....   | 96     |
| Tabla 12. Resultados de conductividad térmica de sistemas aireados con 28 días de curado (W/mK).....                               | 113    |
| Tabla 13. Conductividad térmica y densidad de distintos materiales comúnmente utilizados en la construcción .....                  | 114    |
| Tabla 14. Valores de Calor Específico de los sistemas a 28 días.....   | 115    |
| Tabla 15. Valores de Calor Específico típicos de compuestos comúnmente encontrados en matrices cementantes .....                   | 116    |
| Tabla 16. Valores de difusividad calculados de los sistemas aireados. ....   | 126    |
| Tabla 17. Diferencia entre K medida y K calculada (W/mK).....  | 130    |



## Resumen

En este trabajo de investigación se evaluaron las propiedades térmicas y mecánicas de un compuesto base yeso y escoria de alto horno, aireado con polvo de aluminio y peróxido. El enfoque principal reside en la propuesta y fabricación de un material cementante alternativo, que represente un beneficio ecológico al disminuir el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> desde el proceso de fabricación del material, al no ser basado en Cemento Portland y reutilizar desechos industriales como la escoria de alto horno; y también durante la vida útil del mismo, al ser un material con un valor de conductividad térmica bajo al ser comparado con el Cemento Portland.

La investigación se dividió en tres etapas principales. En la primera se evaluó el beneficio de la adición de un material con alta finura como la microsílíce, el carbonato de calcio y el carburo de silicio. Particularmente la adición de la microsílíce representó un aumento en la resistencia a compresión, así como una mayor estabilidad dimensional.

En la segunda etapa, se evaluaron las propiedades mecánicas y térmicas del compuesto fabricado con tres densidades aparentes propuestas, 1200 kg/m<sup>3</sup>, 1000 kg/m<sup>3</sup> y 800 kg/m<sup>3</sup>, obtenidas por medio del uso de agentes aireantes que generaron burbujas de aire atrapadas dentro de la estructura del material cementante. El efecto de la inclusión de poros, con su consecuente disminución de la densidad aparente, afecta negativamente la resistencia a compresión y a su vez también disminuyó la transferencia térmica, volviendo al material efectivamente más aislante.

Finalmente, en la tercera etapa se estableció la relación entre la densidad, resistencia a compresión y transferencia térmica del material. Se propuso una ecuación para describir esta relación y de esta manera poder estimar el valor de transferencia térmica de una matriz dada, a partir únicamente de su resistencia a compresión.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Para la producción de Cemento Portland se necesitan temperaturas de 1450°C para calcinar la materia prima y producir las fases reactivas necesarias, esto representa un alto consumo de energía. Además, si consideramos que se utilizan más de 4 mil millones de toneladas anuales de este material a nivel mundial [1], la industria del cemento se vuelve responsable de alrededor del 7% de CO<sub>2</sub> total producido [2]. Entre las opciones más viables para reducir el impacto ambiental a largo plazo de esta industria se considera el desarrollo de cementantes alternativos que no estén basados en Cemento Portland [3].

Además, desde una perspectiva de ciclo de vida, únicamente alrededor del 3% del consumo de energía y emisiones resultantes de CO<sub>2</sub> por operación de un edificio durante toda su vida de servicio, son atribuibles a la producción de los materiales con los que se fabricó [4]. Asimismo se estima que el consumo de energía durante la operación de edificios puede representar hasta el 40% del consumo total de energía de un país [5]. De ahí la importancia del desarrollo de materiales de construcción con propiedades mecánicas y térmicas optimizadas, que puedan representar una forma rentable de reducir el consumo total de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> desde el punto de vista de la fabricación del material de construcción y también durante su vida útil. Los materiales aligerados son una clase de materiales de construcción que pueden servir para mejorar la eficiencia de la fabricación y la construcción y para obtener productos térmicamente atractivos.

Por esta razón, en este trabajo se propone la utilización de yeso como fuente de sulfato de calcio, para ser el principal constituyente en la fabricación de un cementante

multicompuesto. El uso del yeso presenta algunas ventajas frente al consumo del Cemento Portland (CP) desde el punto de vista ecológico. Es un material que no genera CO<sub>2</sub> proveniente de la materia prima, además, el CO<sub>2</sub> producido por acondicionamiento del material también es muy bajo, debido esto, a que las temperaturas necesarias para formar una fase reactiva de sulfato de calcio son de 120-150°C para hemihidrato y >300°C para anhidrita, ambos muy por debajo de la temperatura necesaria para obtener el clínker [6]. Sin embargo, el uso de sulfatos de calcio tiene una serie de desventajas, como las bajas resistencias del yeso y la alta solubilidad en ambientes húmedos de hasta 2 g/l de agua.

Por lo tanto, en este trabajo de investigación se utilizaron distintos materiales como escoria de alto horno (EAH) y microsílíce (MS) en combinación con una fase de sulfato de calcio para mejorar las propiedades mecánicas y disminuir la solubilidad del yeso[7], debido a que la EAH forma compuestos similares a los del CP, que son insolubles. Además, considerando que uno de los aspectos más favorables de una matriz de yeso es su baja conductividad térmica, de entre 0.20 y 0.40 W/mK, las adiciones de EAH y MS tendrían un efecto negativo en la capacidad aislante del compuesto, al ser materiales más densos y a su vez más conductores. Por esta razón, se adicionó polvo de aluminio y peróxido como aditivos aireantes para generar una serie de poros al interior de la matriz cementante, con la intención de disminuir la conductividad térmica de la matriz cementante y de esta forma obtener la mejor combinación de ambas propiedades, es decir, resistencia a compresión y conductividad térmica.

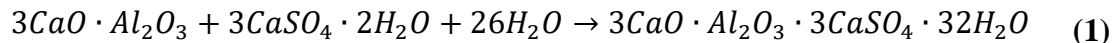
El uso de materiales ligeros con capacidad aislante, que proporcionen un buen control de la temperatura, representaría un ahorro de energía al mantener por más tiempo una misma temperatura en espacios interiores [8]. Por supuesto, la inclusión de una serie de poros al interior de un sólido, tendrá un efecto negativo en la capacidad mecánica del mismo. Entendiendo la relación existente entre la resistencia a compresión y la conductividad térmica de la matriz cementante, se propuso una expresión que correlaciona ambas propiedades para poder estimar la conductividad térmica de una muestra dada, a partir de su resistencia a compresión.

Esta investigación se llevó a cabo como parte de las líneas de investigación del Cuerpo Académico de Materiales Alternativos en Ingeniería (CAMAI), en las

instalaciones del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, durante el curso del Doctorado en Ingeniería con Orientación en Materiales de Construcción.

## 1.1 Planteamiento del Problema

Un riesgo latente en esta combinación de cementantes alternativos es la formación de fases expansivas como la etringita, debido al contenido abundante de sulfatos de la anhidrita (AH) y fases de aluminio de la EAH [9]. Usar EAH y no CP en la fabricación de cementos compuestos base sulfato de calcio, es una alternativa viable debido a la disminución del aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), que es la fase que reacciona fuertemente con los sulfatos para formar etringita (1). Otra forma de disminuir estos efectos es el uso de microsílice o ceniza volante como tercer constituyente cementante [10,11]. Sin embargo, el mecanismo por el cual funciona este constituyente aún no ha sido claramente definido. Entonces, se debe definir si este mecanismo es debido a una reacción química o simplemente un efecto físico debido al tamaño de partícula. Esto abriría la posibilidad de sustituir este material por algún otro que resulte más económico o con mayor disponibilidad.

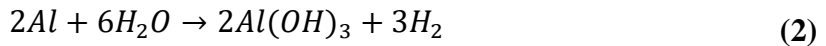


Debido a la falta de información e investigación para solucionar definitivamente problemas como la solubilidad y la formación de productos expansivos, aun no existe una propuesta clara de utilización de mezclas cementantes de este tipo y su aplicación se recomienda que sea limitada a condiciones sin exposición a la humedad. Además, un aspecto siempre deseable en una matriz base sulfato de calcio es su capacidad como aislante térmico, por esta razón en este estudio se propuso la fabricación de mezclas que funcionen como prototipo de un concreto ligero a base de anhidrita y escoria de alto horno, donde se utilizará polvo de aluminio y peróxido de hidrógeno como generadores de gas para formar una pasta aireada, y evaluar su efecto en la conductividad térmica. A su vez, el desarrollo de una expresión que correlacione la densidad, la capacidad térmica y la resistencia a compresión del prototipo, que permita entender de mejor manera la relación

entre estas propiedades y además, predecir su comportamiento térmico-mecánico, específicamente en este tipo de compuestos. De esta forma, se estaría disminuyendo el impacto ambiental y el consumo de energía de la industria de la construcción, no solo desde la fabricación del material de construcción, sino también durante la vida de servicio del mismo.

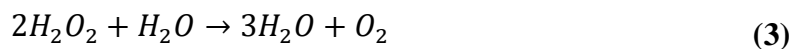
Cada uno de estos agentes aireantes presenta un mecanismo y velocidad de reacción distinto y liberan diferentes productos de reacción en forma de gas que, es a fin de cuentas este producto el responsable del efecto aireante. En el caso del polvo de aluminio, es un material comúnmente utilizado con fines de generación de aire en matrices cementantes, mientras que el peróxido no ha sido ampliamente explorado con este propósito. Determinar la cantidad adecuada de aditivo aireante es sumamente necesario debido a que una estructura porosa mejorará la capacidad aislante del material, sin embargo, tener una porosidad excesiva o tamaños de poros muy grandes disminuirá la capacidad mecánica de las muestras. Las reacciones químicas responsables de la producción de gas de ambos aireantes es presentada a continuación.

Para: polvo de **Al**:



El aluminio se estabiliza con el agua como  $Al(OH)_3$  liberando hidrógeno en forma de gas (2). Algunos autores aseguran que es necesario un ambiente alcalino para romper la capa pasiva que se forma en las partículas de aluminio, esto provocado por la oxidación de la capa exterior de dichas partículas. Al romper esta capa pasiva, la hidrólisis del Al se lleva a cabo y con ello la liberación de hidrógeno [12–14].

Para: **H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**:



En este caso, el peróxido de hidrógeno es altamente inestable y se descompone en oxígeno y agua (3), acompañado de una gran cantidad de calor liberado [15,16]. En ambos casos, el gas liberado es diferente, esto es con la intención de saber cuál de los 2 gases forma una matriz con mejores propiedades térmico-mecánicas para una densidad dada en función de las especies químicas y características termodinámicas observables.

## **1.2 Hipótesis**

La adición de microsílíce, carbonato de calcio o carburo de silicio, con tamaño de partícula inferior a las 45 micras, disminuirá la aparición de fases expansivas en sistemas activados alcalinamente a base de anhidrita, sintetizada a partir de yeso comercial, en combinación con escoria de alto horno, proveyendo con esto estabilidad dimensional a los sistemas. La posterior adición de un agente aireante a estas mezclas, afectará directamente la densidad aparente y la resistencia mecánica del sistema, formando un concreto ligero con propiedades térmicas y mecánicas optimizables a través del uso de una expresión matemática.

## **1.3 Justificación y Alcance**

Debido a los altos consumos de energía asociados a la industria de la construcción, es de suma importancia el desarrollo de materiales de construcción que representen una disminución en el consumo de energía tanto en la producción de materiales como en el funcionamiento de las edificaciones. Una forma de lograr esto, desde el punto de vista de la producción de materiales, es mediante el uso de materiales alternativos al cemento Portland, como el yeso o incluso desechos industriales, para la fabricación de matrices cementantes que requieran menos energía de fabricación, pero que a su vez muestren propiedades que puedan ser utilizadas en la construcción.

Asimismo, el desarrollo de materiales con propiedades de aislamiento térmico como son los materiales ligeros o con porosidad inducida por medio de un aireante, impactará en el consumo de energía durante la vida útil de las estructuras, puesto que la formación de poros de aire al interior de una matriz cementante sólida confiere una menor transferencia térmica al material.

Este estudio demostró que el yeso, siendo el constituyente principal de un cementante, puede resistir la humedad por medio de la adición de escoria de alto horno y activadores alcalinos a la mezcla, debido a que el silicato de calcio hidratado (C-S-H) producido en la reacción de la escoria le proporciona el carácter hidráulico a las pastas [17]. El cementante fabricado y aireado por medios químicos, presentó una microestructura tipo celular, la cual le aportó características de baja conductividad térmica y capacidades mecánicas superiores a las de un yeso convencional. Conocer y determinar la afectación de las propiedades mecánicas y térmicas debido a la inclusión de huecos de aire al interior de una matriz de este cementante compuesto, nos permitió generar una expresión que correlaciona dichas propiedades para predecir su transferencia térmica para una densidad y resistencia a compresión dadas y estimar el desempeño óptimo del material.

#### **1.4 Objetivo General**

Desarrollar las propiedades térmico-mecánicas de un material cementante alternativo base anhidrita y escoria de alto horno, aligerado por medio de la adición de agentes aireantes, y estimar el desempeño óptimo del mismo mediante la propuesta de una expresión matemática que correlacione la resistencia a compresión y la conductividad térmica.

#### **1.5 Objetivos Específicos**

1. Determinar los mecanismos de desempeño microestructural de la microsílíce, el carbonato de calcio y el SiC como materiales adicionados para minimizar los cambios dimensionales en un sistema base AH-EAH.
2. Analizar la microestructura y productos desarrollados en una matriz de material ligero base AH-EAH, aireada con Al o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, para tres densidades aparentes definidas (1200, 1000 y 800 kg/m<sup>3</sup>).
3. Evaluar el efecto del contenido de agente aireante y la disminución de la densidad en el comportamiento mecánico y la transferencia térmica del material.

4. Elaborar una expresión matemática que permita estimar el comportamiento térmico de muestras elaboradas con el cementante compuesto AH-EAH en base a su densidad y resistencia a compresión.

## CAPÍTULO 2

### ANTECEDENTES

#### 2.1 La Relación Entre Consumo de Energía y los Gases de Efecto Invernadero

A grandes rasgos, el efecto invernadero es la capacidad que tiene la atmósfera del planeta Tierra para retener calor. Esto es debido a que los gases que hay en la atmósfera son transparentes a la radiación solar, pero no a la radiación infrarroja emitida por la Tierra, eso quiere decir que el calor se retiene entre la atmósfera y la Tierra. De cierta forma, este fenómeno propicia la vida como la conocemos, ya que sin él la temperatura media de la Tierra sería de alrededor de 18°C bajo cero [18]. La atmósfera, para lograr esto, alberga una variedad de gases conocidos recientemente como “gases de efecto invernadero” o GEI, por sus siglas.

Los GEI tienen características diversas y su potencial de calentamiento global varía considerablemente, por lo tanto, para fines comparativos, se ha incorporado el criterio de medir los diferentes gases en unidades de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) considerando el potencial de calentamiento global en un periodo de 100 años. La Tabla 1, muestra el potencial de calentamiento de distintos GEI, tomando como referencia el potencial del CO<sub>2</sub>. Se puede observar que hay gases que tienen potenciales de calentamiento muy superiores al del CO<sub>2</sub>. Sin embargo, el CO<sub>2</sub> representa más del 70% del total de GEI producidos [19], esto debido probablemente a que este es el gas que se produce de la quema de combustibles fósiles. Esta es la razón por la que el CO<sub>2</sub> es tomado como referencia para estimar la afectación y aporte al calentamiento global del resto de los GEI.

**Tabla 1. Potencial de calentamiento global de los GEI [20]**

| <b>Formula</b>        | <b>GEI</b>             | <b>Potencial de Calentamiento</b>   |
|-----------------------|------------------------|---|
| <b>Química</b>        |                        |   |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Dióxido de Carbono     | 1   |
| <b>CH<sub>4</sub></b> | Metano                 | 21  |
| <b>N<sub>2</sub>O</b> | Óxido Nitroso          | 310   |
| <b>HFCs</b>           | Hidrofluorocarbonos    | 140 (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub> ) a 11700 (CHF <sub>3</sub> ) |
| <b>PFCs</b>           | Perfluorocarbonos      | 5700 (CF <sub>4</sub> ) a 11900 (C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )                |
| <b>SF<sub>6</sub></b> | Hexafluoruro de Azufre | 23900   |

En el año 2012, México contribuía con el 1.67% del total de emisiones anuales de GEI a nivel mundial, esto es aproximadamente 660 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e, ocupando el decimoprimer lugar entre los países con mayores emisiones, mientras que China y Estados Unidos producen más de 7000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e cada uno [20]. Para el 2015 México produjo un total de 683 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e, de las cuales, 481 millones de toneladas solo de la producción de energía [19]. Es decir, el 70% de las emisiones de CO<sub>2</sub>e de México, son provenientes únicamente del sector energético. De forma similar, según el Tribunal de Cuentas Europeo, en la Unión Europea el 79% de las emisiones de GEI son producidas en procesos que tiene que ver con suministro y consumo de energía. Éste tribunal también afirma que la energía, los GEI y el cambio climático, están estrechamente ligados, ya que la producción de energía procedente de combustibles fósiles es responsable de la mayoría de las emisiones de GEI a nivel global [21].

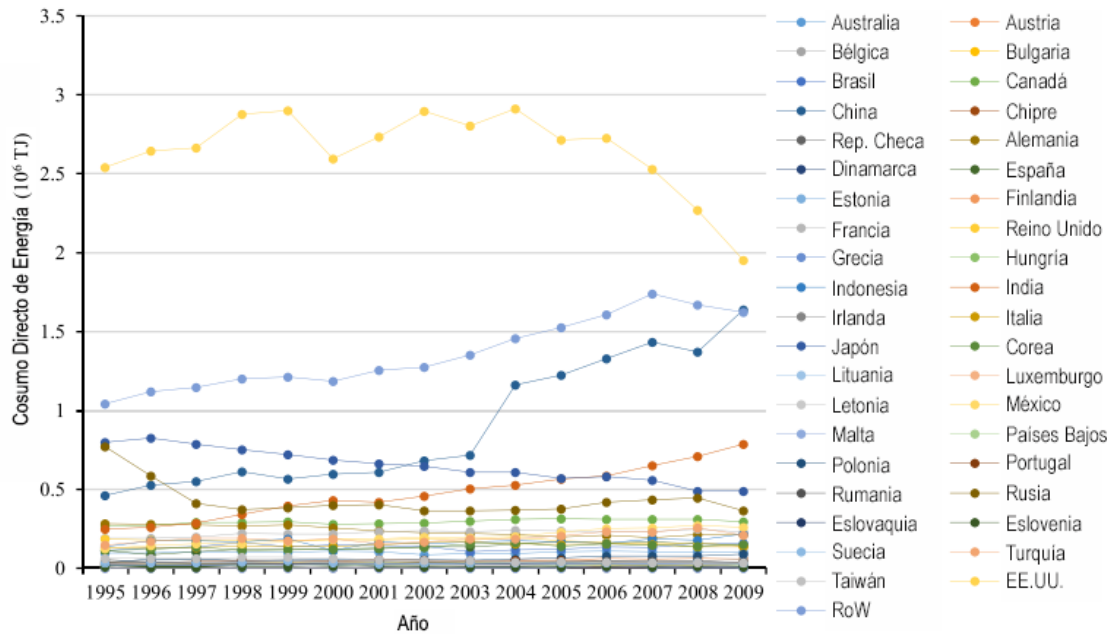
Como se observa, el sector energético es uno de los principales responsables de la generación de GEI, es decir, uno de los principales factores en la producción de GEI es la generación de energía útil, en sus diferentes formas, para satisfacer nuestras necesidades de manufactura, construcción, transporte, etc. Por su parte, la quema de combustibles fósiles provoca una mayor emisión de CO<sub>2</sub>, lo que finalmente impacta en el calentamiento global y el cambio climático. De ahí la importancia de cambiar nuestros procesos y

metodologías económicas para asegurar un menor consumo de energía y de esta forma garantizar una disminución en la aportación de GEI con miras a un futuro sustentable.

## **2.2 El Consumo de Energía en la Construcción**

La construcción de estructuras para edificios se ha convertido en el componente más importante del metabolismo urbano y el desarrollo regional. La aceleración en la urbanización contribuye a las actividades de construcción masiva, lo que acelera la migración de la población mundial a las zonas urbanas, con una proporción que se espera que alcance el 60% para el año 2030 [22]. En general, casi el 40% del consumo mundial de energía y el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero son inducidas por la ingeniería de la construcción [23–25].

La Figura 1 muestra el consumo directo de energía del sector de la construcción en cada región, para mostrar los cambios en una serie temporal de 1995 a 2009 [26]. Como se muestra, los Estados Unidos (EE.UU.) tuvieron el mayor consumo directo de energía en el sector de la construcción en este lapso, aunque disminuyó de 2006 a 2009. El consumo directo de energía del Resto del Mundo (RoW) aumentó de forma constante, de igual manera, los sectores de la construcción en China y la India tuvieron tendencias similares de aumento. Por el contrario, el consumo directo de energía de los sectores de la construcción en Japón y Rusia tuvo tendencias decrecientes entre 1995 y 2009. Los demás países se mantuvieron estables en sus consumos en el mismo lapso. Como se puede observar, a pesar de los esfuerzos, el consumo de energía en el sector de la construcción sigue presentando una tendencia al alza.



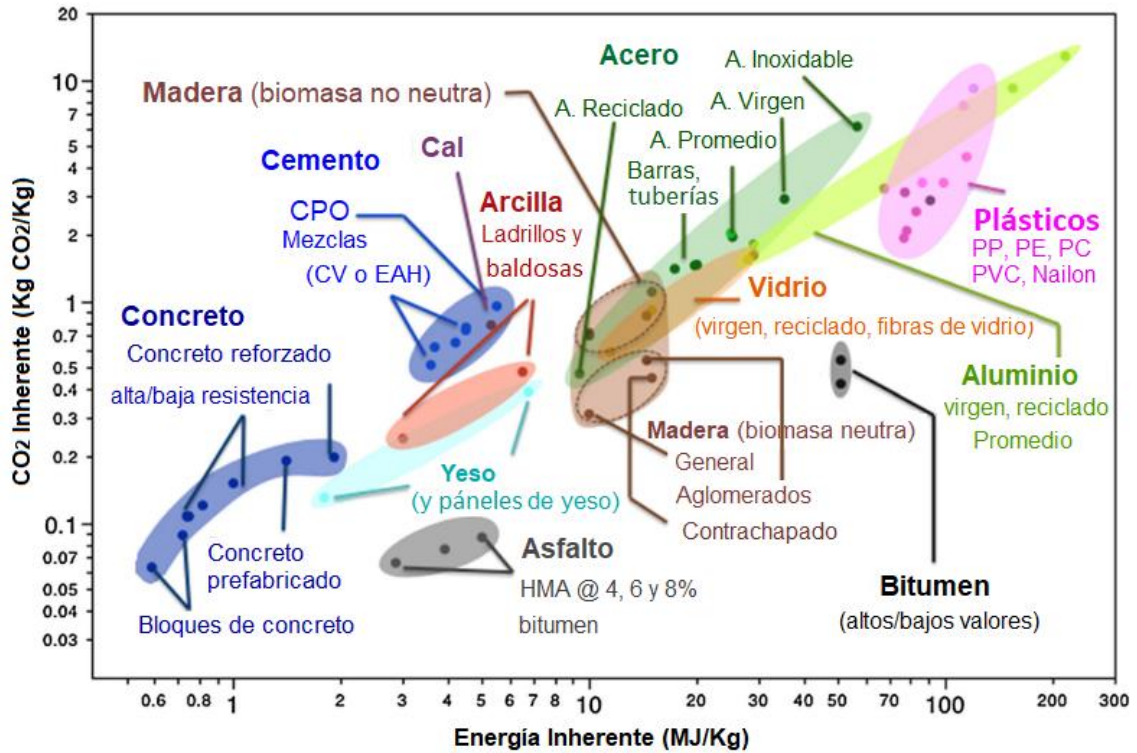
**Figura 1. Consumo directo de energía por el sector de la construcción en cada región del mundo de 1995 a 2009 [26]**

Particularmente en México, la industria del cemento se posiciona entre las industrias con más bajos consumos de energía y huella de carbono si la comparamos con otros sectores industriales como la industria petroquímica y la metalúrgica y siderúrgica [20]. Sin embargo, la producción de cemento proyecta un crecimiento del 50% en los próximos 30 años [27]. Dentro de las opciones más viables a considerar para reducir dichas emisiones de CO<sub>2</sub> se han propuesto principalmente las siguientes alternativas [3]:

1. Usar combustibles o materia prima alternativos para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la fabricación del cemento.
2. Reemplazar en la producción de concreto, la mayor cantidad posible de Cemento Portland con materiales cementantes suplementarios (ya sea agregados al cemento o directamente en la mezcla de concreto).
3. Capturar y secuestrar el CO<sub>2</sub> producido en las plantas cementeras.
4. Desarrollar cementantes alternativos no basados en Cemento Portland (para lo cual se requeriría nueva normativa).

En este último punto, la necesidad ecológica/económica de buscar materiales cementantes alternativos al Cemento Portland es debido a que, dependiendo de las condiciones de frontera del análisis de huella de carbono, se puede establecer que la fabricación de cemento es responsable de 5-7 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> antropogénico [27]. Esto representa una fracción considerable de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales, de ahí la importancia de entender el verdadero origen de las emisiones en la industria del cemento y que se puede hacer para reducirlas. Por un lado, los altos niveles de CO<sub>2</sub> producidos en el proceso de descarbonatación de la caliza, necesario para la producción de Cemento Portland (alrededor del 60% del total de emisiones directas de CO<sub>2</sub>). Por otro lado, la alta cantidad de energía necesaria para alcanzar los 1450°C que requiere el proceso de clinkerización, principalmente promovida por la incineración de combustibles fósiles (alrededor del 40% del total de emisiones directas de CO<sub>2</sub>). Además, la mayoría de las normativas actuales sugieren un elevado consumo de clínker para poder fabricar Cemento Portland, por lo tanto, una nueva normativa mejorará la eficiencia del consumo de clínker para la fabricación de cemento [27].

La Figura 2 muestra el consumo de energía y la producción de CO<sub>2</sub> inherentes asociados a diferentes materiales de construcción [27]. Existe una relación prácticamente lineal entre el consumo de energía y la producción de CO<sub>2</sub>, esto es, a mayor consumo de energía, mayor será la cantidad de CO<sub>2</sub> producido como contaminante. Se observa cómo el concreto es uno de los materiales con los niveles más bajos tanto de energía consumida como de CO<sub>2</sub> producido, llegando a producir únicamente alrededor de entre 0.07 y 0.2 kg de CO<sub>2</sub> por cada kg de concreto y consumiendo entre 0.6 y 2 MJ por cada kg de concreto producido. Sin embargo, el Cemento Portland, que es el ingrediente principal del concreto en la mayoría de los casos, produce alrededor de 1 kg de CO<sub>2</sub> por cada kg de cemento, y consume hasta 5 MJ de energía por cada kg de cemento. Además, si tomamos en cuenta la producción neta de cada uno de los materiales, notaremos que la producción de concreto excede a cualquier otra por al menos un factor de 10, incluyendo al aluminio, acero, vidrio o plásticos [27]. Los valores dados en la Figura 2 corresponden a un estudio con condiciones de frontera de la cuna a la puerta e incluyen valores de algunos materiales reciclados, sin embargo, estos no se especifican en el caso del concreto ni yeso.



**Figura 2. Consumo de energía y CO<sub>2</sub> inherentes de diferentes materiales de construcción [27]**

Ahora bien, para disminuir el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes del funcionamiento de las edificaciones durante su vida de servicio, según el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD por sus siglas en inglés), los esfuerzos deberían de ser dirigidos hacia estos tres elementos [23]:

1. Reducir la demanda de energía de los edificios, incluyendo el uso de materiales, diseños y equipos que sean más eficientes en el uso de la energía.
2. Producir energía localmente, a partir de recursos renovables o de fuentes de desecho.
3. Uso de redes inteligentes, es decir, generación de excedentes de algún tipo de energía en algunos edificios y su alimentación a la red de edificios.

Como se observa, una de las principales áreas de oportunidad para mejorar la situación del consumo de energía en las edificaciones, es desde el punto de vista de los materiales empleados para la construcción de las estructuras. Por ejemplo, con el uso de

materiales ligeros, aireados o espumados en las edificaciones, el consumo de energía de refrigeración puede ser reducido en un 12%. En consecuencia, el consumo total de energía puede ser reducido hasta en un 7%, debido a las propiedades de aislamiento térmico de estos materiales. Esto se traduce en una reducción de casi 350 kg de emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo de su ciclo de vida, por cada metro cuadrado de muro construido con materiales de este tipo [28]. Por esta razón el desarrollo de materiales de construcción eficientes, con propiedades mecánicas y térmicas mejoradas, representa una forma efectiva de reducir el consumo de energía durante la vida de servicio de las edificaciones.

Si tratáramos de verlo de una forma más detallada, para el estudio del consumo de energía durante el ciclo de vida de una estructura o un edificio, típicamente el análisis se divide en las siguientes fases: extracción de la materia prima, procesamiento y fabricación de los materiales de construcción, transportación de los materiales a la obra, construcción de la estructura o edificio, operación y mantenimiento de la estructura o edificio, y finalmente eliminación de los materiales al final de su ciclo de vida.

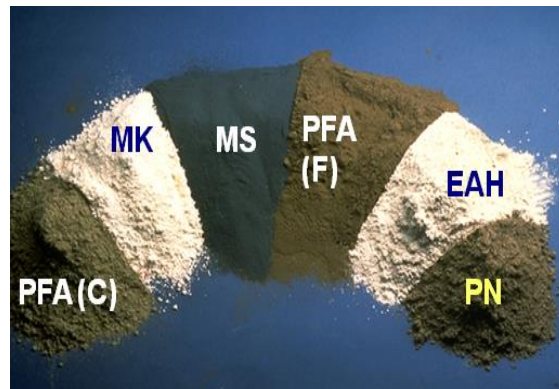
El desarrollo de un material cementante alternativo al Cemento Portland, permitiría disminuir el consumo de energía durante el ciclo de vida de una estructura o edificio desde la etapa del procesamiento y fabricación de los materiales de construcción o incluso desde la etapa de extracción de la materia prima, en el sentido de que algunos materiales utilizados en este proyecto son obtenidos como subproductos o desechos de otros procesos industriales como es el caso de la escoria de alto horno. De la misma forma, el desarrollar un material ligero y con propiedades térmicas, repercutirá finalmente en el consumo de energía de una estructura o edificio desde la etapa de operación y mantenimiento de la estructura.

### **2.3 Materiales Cementantes Suplementarios**

Los materiales cementantes suplementarios son aquellos que presentan propiedades cementantes por si mismos o que dichas propiedades se encuentran en estado latente, es decir, que requieren ser potenciadas o activadas externamente [29]. Estos materiales pueden emplearse como sustitutos parciales o incluso totales del cemento Portland. Considerando que se estima que por cada tonelada de cemento Portland

producido, se produce de igual forma una tonelada de CO<sub>2</sub> [30,31], el interés en el desarrollo de cementos que contengan altas proporciones de adiciones minerales y nuevos tipos de cementos diseñados para utilizar diferentes subproductos de la industria y materiales de desecho está en constante crecimiento.

La tendencia es hacia la combinación de diferentes materiales en la fabricación de sistemas más durables y sustentables. No solo para fabricar cementos y concretos más económicos y amigables con el medio ambiente, lo cual resulta de suma importancia, sino también para dar propiedades adecuadas para un propósito determinado. Actualmente, existe una amplia lista de materiales utilizados como adiciones minerales en sustitución parcial del cemento Portland (Ver Figura 3). La ASTM engloba estos materiales en dos clasificaciones diferentes: puzolanas naturales y cenizas volantes por un lado, y escoria de alto horno por el otro, en sus normas ASTM C 618 [32] y ASTM C 989 [33] respectivamente.



**Figura 3. Materiales cementantes suplementarios usados en la actualidad (de izquierda a derecha: ceniza volante clase C, metacaolín, microsílíce, ceniza volante clase F, escoria de alto horno, puzolanas naturales) [34]**

La razón por la que se hace esta distinción entre puzolanas y escorias radica en su composición química, y se puede ver gráficamente en el diagrama ternario presentado en la Figura 4, donde se observan algunas de las puzolanas y escorias de acuerdo con su composición. Particularmente, en este trabajo se profundizará en las características de la escoria de alto horno y en la microsílíce, ya que son los materiales suplementarios que se

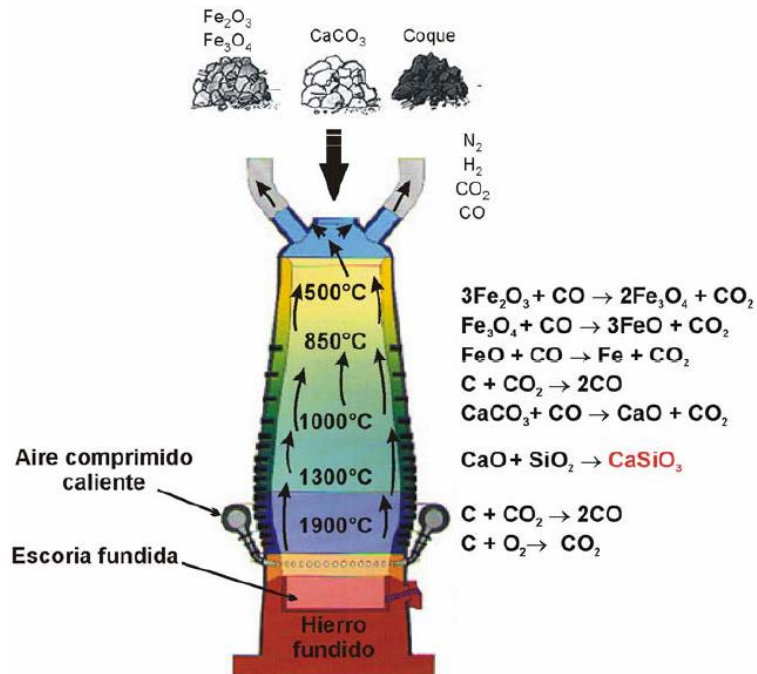
utilizarán en combinación con la fase anhidra de sulfato de calcio (AH) en la fabricación de un cementante alternativo al uso del cemento Portland.



**Figura 4. Composición química de los materiales suplementarios utilizados en construcción [29]**

### 2.3.1 Escoria de Alto Horno

El ACI define la escoria de alto horno (EAH) como un producto no metálico, que consiste esencialmente de silicatos y aluminosilicatos de calcio y de otras bases, que se desarrolla en un estado fundido simultáneamente con hierro en un alto horno [35]. La operación de un alto horno corresponde a un proceso químico-metalúrgico que implica reacciones de reducción para obtener metal fundido (arrabio). Los materiales básicos empleados para fabricar arrabio son minerales de hierro, coque y fundente (caliza), los cuales interactúan en un sistema de contracorriente dentro del horno para la formación del hierro. En la Figura 5 se muestra de manera esquemática el proceso y las reacciones químicas fundamentales a la altura aproximada del horno donde se llevan a cabo.



**Figura 5. Esquema de operación de un alto horno [36]**

La EAH es un compuesto de óxidos formado como un líquido alrededor de  $1500^\circ\text{C}$ , cuando la caliza neutraliza las porciones del mineral sin valor industrial que acompaña a los minerales de hierro, al combinarse con la sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presentes, para formar un material de silicatos y aluminosilicatos cálcicos de composición variable [37]. Cuando el mineral de hierro, coque y piedra caliza se funden en el alto horno, dos productos son obtenidos, fundido de hierro y la escoria fundida. Ésta última es más ligera flota en la parte superior del hierro fundido.

Para que la EAH pueda ser útil en la fabricación de materiales cementantes, debe enfriarse rápidamente por debajo de  $800^\circ\text{C}$  a la salida del horno, con el fin de que solidifique con una estructura atómica amorfa. A este proceso de enfriamiento rápido de la EAH se le conoce como granulación y se logra por medio de chorros de agua a presión. La granulación de la EAH impide la formación de cristales más grandes y el material granular resultante comprende alrededor de 95% de aluminosilicatos de calcio no cristalinos [38].

La principal diferencia de estos materiales frente a las puzolanas es que en la composición química de las escorias también se cuenta con calcio. Lo cual le da la propiedad de formar productos de hidratación con capacidad cementante y de carácter hidráulico parecidos a los formados por el cemento portland al combinarse con agua y con la adición de un activador. Esta propiedad les da el nombre de materiales con hidráulicidad latente. Un cemento hidráulico latente se define como un material que posee propiedades cementantes por sí mismo, pero requiere de activación para desarrollarlas. La activación puede ser térmica, mediante aumento de temperatura de curado; química, con adición de reactivos para acelerar los procesos de hidratación; o mecánica por medio de molienda, con el propósito de aumentar el área superficial del material [36].

En resumen, la EAH es un material con potencial hidráulico, no metálico que consiste básicamente en silicatos y aluminosilicatos de calcio en estado amorfo. La Tabla 2 muestra las composiciones químicas típicas de la EAH en diferentes países. Es recomendable que la EAH sea acondicionada por medio de molienda hasta un tamaño menor a las 45  $\mu$ m para mejorar su reactividad hidráulica. La escoria molida puede tener un área superficial Blaine de 400 a 600  $\text{m}^2/\text{kg}$  (4000 a 6000  $\text{cm}^2/\text{gr}$ ). Su masa específica relativa es de 2.85 a 2.95 y la masa unitaria varía de 1050 a 1375  $\text{kg}/\text{m}^3$  [34].

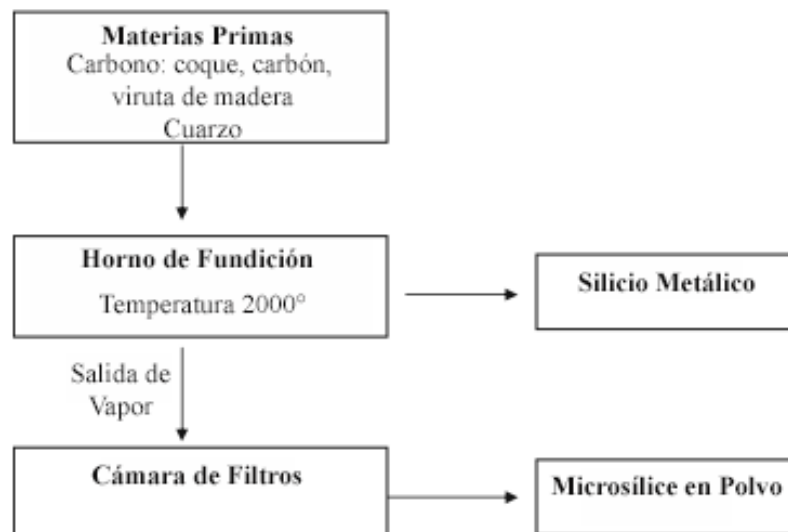
**Tabla 2. Composición química (% en peso) típica de EAH en diferentes países**  
[36,37]

| <b>Región</b>    | <b>CaO</b> | <b>SiO<sub>2</sub></b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>MgO</b> | <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>MnO</b> | <b>S</b> |
|------------------|------------|------------------------|------------------------------------|------------|------------------------------------|------------|----------|
| <b>UK</b>        | 40         | 35                     | 16                                 | 6          | 0.8                                | 0.6        | 1.7      |
| <b>Canadá</b>    | 40         | 37                     | 8                                  | 10         | 1.2                                | 0.7        | 2.0      |
| <b>Francia</b>   | 43         | 35                     | 12                                 | 8          | 2.0                                | 0.5        | 0.9      |
| <b>Alemania</b>  | 42         | 35                     | 12                                 | 7          | 0.3                                | 0.8        | 1.6      |
| <b>Japón</b>     | 43         | 34                     | 16                                 | 5          | 0.5                                | 0.6        | 0.9      |
| <b>Rusia</b>     | 39         | 34                     | 14                                 | 9          | 1.3                                | 1.1        | 1.1      |
| <b>Sudáfrica</b> | 34         | 33                     | 16                                 | 14         | 1.7                                | 0.5        | 1.0      |
| <b>EUA</b>       | 41         | 34                     | 10                                 | 11         | 0.8                                | 0.5        | 1.3      |
| <b>México</b>    | 40         | 33                     | 15                                 | 11         | <1                                 | <2         | <3       |

### 2.3.2 Microsílice

La norma ASTM C 618, define una puzolana como un silíceo o silicoaluminoso que, por sí solo, posee poco o nulo valor cementante pero que finamente molido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. Dentro de esta definición, las puzolanas suelen subdividirse entre puzolanas naturales y artificiales. Estas últimas pueden ser residuos de determinados métodos de producción o productos fabricados a partir de materias primas seleccionadas.

Los procesos de fabricación del silicio metálico y de las aleaciones de ferrosilicio en un horno de arco eléctrico se realizan a temperaturas de hasta  $2000^\circ\text{C}$ . Estos procesos generan como subproducto humos que contienen micropartículas esféricas de dióxido de silicio amorfo (Ver Figura 6). Esta es la razón por la que el producto se denomina "humo de sílice" o "microsílice"; y menos comúnmente "humo de sílice condensado" y "sílice volatilizada" [39]. Su alto contenido de silicio, su tamaño tan pequeño y su alto grado de amorficidad, lo vuelven un material altamente reactivo, que encaja en la definición de las puzolanas, y con posibilidad de utilizarse como material con propiedades cementantes.



**Figura 6. Diagrama esquemático de la producción de microsíllice [40]**

El contenido de SiO<sub>2</sub> en la microsílíce (MS) así como la cantidad de MS producida, dependen del producto que se esté fabricando. Si fuera silicio metálico o ferrosilicio, se producirían 550 kg y 350 kg de MS por tonelada respectivamente. Al producir ferrosilicio, el contenido de SiO<sub>2</sub> en la MS obtenida varía entre el 84% y el 91%, mientras que al producir silicio metálico el contenido será entre 87% y 98% [41]. Datos precisos y recientes sobre la producción anual de humo de sílice en el mundo no están disponibles debido al carácter reservado de la industria de las aleaciones. Se pudiera tratar de estimar de acuerdo a la producción anual de silicio metálico y ferrosilicio, pero se desconoce si todo el MS producido durante estos procesos es recolectado.

Se estima que la producción anual de MS a nivel mundial se ubica entre 1 y 1.5 millones de toneladas, siendo Estados Unidos (0.3 millones de toneladas), China (0.15 millones de toneladas), Rusia (0.15 millones de toneladas) y Noruega (0.12 millones de toneladas) los mayores productores [30,42]. Por esta razón, resulta importante el entendimiento del mecanismo de funcionamiento de la MS como material para minimizar los cambios dimensionales en cementantes similares al propuesto en este trabajo de investigación, debido a que entendiendo el mecanismo, será posible proponer materiales con posibilidad de sustituir la MS por un material más económico o con mayor disponibilidad, ya que su producción se da en una cantidad limitada de países y por la misma razón resulta costosa para ciertas regiones.

La MS consiste en partículas vítreas muy finas con una superficie de entre 130,000 y 300,000 cm<sup>2</sup>/gr. Sus partículas son aproximadamente 100 veces más pequeñas que el promedio de las partículas del cemento. Debido a su extrema finura y alto contenido de sílice la MS es un material puzolánico altamente efectivo. Las características físicas típicas son mostradas en la Tabla 3 donde se observa que la MS presenta diferentes características dependiendo de su presentación, esta puede ser en polvo (tal como se ha producido), en suspensión o densificada.

**Tabla 3. Características físicas típicas de la MS [43]**

| <b>Característica</b>               | <b>Valor</b>                        |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Tamaño de partícula (típico)</b> | <1 micra                            |
| <b>Densidad aparente</b>            |                                     |
| <b>(polvo)</b>                      | 130-430 kg/m <sup>3</sup>           |
| <b>(en suspensión)</b>              | 1320-1440 kg/m <sup>3</sup>         |
| <b>(densificada)</b>                | 480-720 kg/m <sup>3</sup>           |
| <b>Peso específico</b>              | 2.22                                |
| <b>Área superficial (BET)</b>       | 130,000-300,000 cm <sup>2</sup> /gr |

#### **2.4 Cementantes Alternativos Potencialmente de Bajo Carbono**

La reducción del impacto ambiental en la industria del cemento debido principalmente a la generación de CO<sub>2</sub>, definitivamente se puede abordar desde distintos puntos de vista. Uno, por ejemplo, sería el uso de concretos de ultra alto desempeño para producir estructuras que alcancen un rendimiento equivalente al de estructuras de concreto convencional pero que utilizan un volumen de concreto significativamente menor y que además requieren si acaso, poco mantenimiento.

El uso de combustibles alternativos también representa una opción viable en la reducción de CO<sub>2</sub> en la producción de cemento, sin embargo, el principal aporte de CO<sub>2</sub> durante la fabricación de cemento sigue siendo la descarbonatación de la materia prima. El uso de materias primas alternativas para producir el cemento claramente reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>, principalmente en los casos donde una fracción significativa de calcio se suministra en forma descarbonatada, pero las fuentes de dichas materias primas alternativas son muy limitadas.

El enfoque predominante, desde el punto de vista de los materiales de construcción, sigue siendo la sustitución parcial del clínker de cemento Portland por materiales cementantes suplementarios, sin embargo, las normativas existentes limitan estas sustituciones a cantidades bajas. Es probable que las reducciones importantes de las emisiones de CO<sub>2</sub> requieran cambios significativos en las normas aplicables al cemento y al concreto, que permitan mayores sustituciones de cemento, pero es muy probable que

dichos cambios sean lentos, debido a la necesidad de probar la durabilidad de los concretos con sustituciones altas.

Algunos de los materiales comúnmente utilizados para sustituir parcialmente el cemento Portland ya fueron mencionados brevemente en la sección 2.3 de este documento (Materiales Cementantes Suplementarios). Estos materiales, al provenir de otros procesos industriales, no requieren necesariamente calcinarse para utilizarse como sustitutos parciales de Cemento Portland, solo en algunos casos requieren un acondicionamiento por medio de molienda. Además, el uso de estos materiales como remplazo parcial del cemento Portland no representa una pérdida o disminución de las propiedades que desarrollaría un cemento sin remplazo, sino incluso lo contrario [44,45].

El desarrollo de materiales alternativos al cemento Portland, la mayoría de las ocasiones, exige un enfoque que vaya más allá de las normas existentes para materiales cementantes, ya que estos materiales pueden requerir procesos de fabricación y tratamientos diferentes a los convencionales. Además de presentar propiedades que parecen estar fuera de norma como consistencia, trabajabilidad y tiempos de fraguado; pero que aun así el material presente propiedades mecánicas aprovechables como material alternativo al cemento Portland.

Algunos de los materiales que entran en esta categoría de materiales alternativos serían, por un lado, aquellos que buscan formar productos de reacción similares al cemento Portland como los cementos belíticos, los cuales son de reacción más lenta que el cemento Portland y por ello suele combinarse con algún otro material de reacción rápida [3]; y cementos puzolánicos, es decir, activación de puzolanas con hidróxido de calcio. En ambos casos el producto final es silicato de calcio hidratado. Por otro lado, están los cementantes que forman productos de reacción completamente diferentes al cemento Portland como los cementos activados alcalinamente y los geopolímeros, es decir, activación de puzolanas o escorias por medio de activadores altamente alcalinos [46]. En estos el producto hidratado suele ser un silicato o aluminosilicato de sodio o potasio hidratado, esto dependiendo de si el activador utilizado presenta un alto contenido de sodio o de potasio.

Finalmente, los cementos basados en fases sulfatadas pueden aprovechar las bondades del sulfato de calcio, ya que es un material que produce cero CO<sub>2</sub> proveniente de la materia prima, y muy bajo CO<sub>2</sub> producido por acondicionamiento del material [6]. La principal desventaja de estas matrices con alto contenido de sulfato de calcio es su suavidad y alta solubilidad lo que resulta en baja durabilidad en la intemperie. Por esta razón, el yeso producido por hidratación de hemihidrato o anhidrita, suele combinarse con otros materiales relativamente baratos o incluso desechos industriales, como adiciones minerales altas en contenido de aluminatos de calcio o silicatos, para mejorar su comportamiento mecánico y su durabilidad frente al intemperismo. Esto da lugar a la configuración de cementos multicompuestos base sulfato de calcio, cementos supersulfatados, cementos sulfoaluminosos, etc. Mas adelante se abordarán con mayor detalle estos cementantes.

En este tipo de cementantes altos en sulfatos, sobre todo si se combinan con adiciones minerales altas en aluminatos, uno de los productos de reacción comúnmente observado es la etringita ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). Esta fase suele ser relacionada con efectos adversos, sin embargo, en matrices cementantes de este tipo, puede aportar una mejora en las propiedades mecánicas al densificar la matriz [7,47,48], e incluso mejorando la resistencia a la humedad del yeso, ya que la etringita presenta muy baja solubilidad en agua [49]. Más adelante se profundizará en esta fase y los efectos que puede tener en matrices cementantes.

## **2.5 El Sulfato de Calcio como Cementante de Bajo Consumo de Energía**

Algunos materiales con propiedades cementantes que datan desde hace mucho tiempo, incluso antes que el cemento Portland, son la cal hidratada y el yeso (sulfato de calcio). Estos materiales cuentan con reacciones muy simples y solo requieren un proceso de calcinación con temperaturas muy inferiores a las del cemento Portland (850°C en el caso de la cal y 130°C en el caso del yeso), para obtener una fase reactiva con el agua para fraguar y endurecer. Sin embargo, estos materiales por sí solos no podrían sustituir al cemento Portland en muchas aplicaciones debido a que presentan propiedades mecánicas considerablemente inferiores a las que puede desarrollar el cemento Portland, además el yeso es un material altamente soluble en ambientes húmedos. No obstante, las propiedades

de estos materiales se pueden mejorar sustancialmente si se utilizan como constituyente de un cemento multicomponente o compuesto, con el valor agregado de ser materiales de bajo consumo de energía.

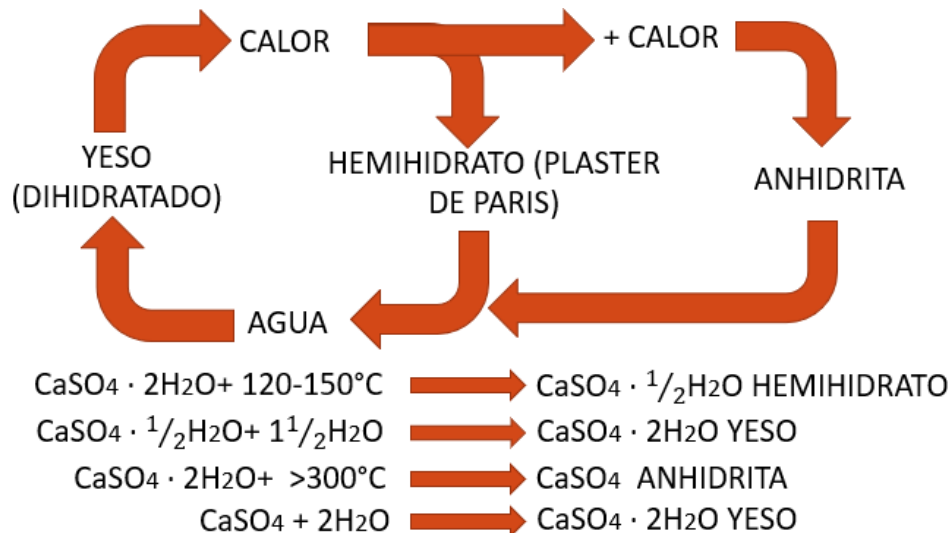
El término “cemento compuesto” es empleado para nombrar a aquellos cementos que usualmente contienen solo una adición mineral en combinación con el cemento Portland. Una variedad de subproductos industriales y materiales naturales pueden ser considerados como adiciones minerales. Estas adiciones pueden poseer propiedades cementantes por sí mismas, o pueden ser materiales hidráulicos latentes, puzolánicos o incluso materiales no reactivos. Aquellos cementos que contienen dos o más adiciones minerales son llamados “cementos multicomponentes”. Estos también se pueden producir al combinar dos o más cementantes sin adicionar cemento Portland al sistema, y pueden combinarse mediante la molienda en conjunto de todos los constituyentes o por la combinación de los mismos durante el mezclado [49].

El yeso o sulfato de calcio en su fase dihidratada ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) es uno de los materiales más abundantes de la tierra. El uso del yeso como material cementante puede ser datado hasta 9000 años A.C. Desde el punto de vista químico y de procesamiento, el yeso es el material de construcción procesado más simple [50]. En la actualidad, el yeso es utilizado como material de acabado en interiores, aprovechando sus propiedades naturales como aislante de temperatura y como material ignífugo, es decir, resistente al fuego y como protección de los elementos estructurales ante éste. El aspecto débil del uso de este material es que se ve restringido a utilizarse en interiores ya que pierde resistencia en condiciones húmedas debido a su disolución.

### **2.5.1 Procesamiento y Reactividad del Sulfato de Calcio**

En forma natural, la fase que más comúnmente se encuentra es el sulfato de calcio dihidratado (DH). Los yacimientos de esta fase se originaron de la evaporación de antiguos lagos salados poco profundos. La precipitación de esta fase y la composición final de la misma dependen de la temperatura, la presión y el contenido de otras sales al momento de la evaporación de los lagos. Solo en algunas condiciones específicas se puede formar naturalmente la fase de sulfato de calcio anhidro o anhidrita (AH), esto es, cuando la temperatura mientras el lago salado se está evaporando es superior a los  $42^\circ\text{C}$  y la

salinidad del lago es superior a 4.48 veces la salinidad normal del agua de mar, de ahí la baja probabilidad de su ocurrencia [51].



**Figura 7. Composición química de las fases del sulfato de calcio**

En la Figura 7 se presenta un diagrama que describe las diferentes fases reactivas del sulfato de calcio, y las condiciones para la obtención de dichas fases (Adaptado de [49]). El sulfato de calcio dihidratado (DH), el cual contiene 2 moléculas de agua y es obtenido de yacimientos naturales, es calcinado a una temperatura de entre 120 y 150 °C, cambiando su composición química al perder parcialmente el agua y transformándose en sulfato de calcio hemihidratado o hemihidrato (HH). Esta es la fase de sulfato de calcio más comúnmente utilizada, también conocida como Plaster de Paris. Solo contiene media molécula de agua en su estructura, esto la convierte en una fase altamente inestable por lo cual es difícil encontrarla de forma natural. Si la temperatura de calcinación es superior a los 300 °C, la composición y estructura del sulfato de calcio cambian nuevamente, esta vez al perder completamente el agua químicamente enlazada, entonces el resultado es la anhidrita (AH). Tanto el HH como la AH reaccionan con agua a temperatura ambiente para rehidratarse y formar DH [49], sin embargo, su cinética de reacción es diferente. Mientras el HH presenta fraguado y endurecimiento en cuestión de minutos, la anhidrita presenta una reacción sumamente lenta si no nula, requiriendo de la utilización de sulfatos alcalinos que sirvan como activadores de la reacción.

### 2.5.2 Anhidrita

Como ya se mencionó, la obtención de la AH requiere mayor temperatura que el HH, no obstante, sus propiedades pueden resultar de mayor utilidad para el área de los materiales de construcción. Mientras la reacción del HH es altamente exotérmica y completa después de 24 horas, la reacción de la AH es relativamente lenta y menormente exotérmica. Además, la matriz de yeso (DH) formada de la reacción de la AH presenta resistencia a compresión superior a aquella formada a partir de HH [17,52]. Sin embargo, la reacción de la AH puede llegar a ser tan lenta (o incluso nula) que resulte inviable su uso como cementante.

Estudios previos han demostrado que la anhidrita acelera su reacción con la utilización de sulfatos alcalinos que sirvan como activadores de la reacción [53]. Uno de los mecanismos plausibles sobre el desarrollo de la hidratación de la anhidrita en presencia de estos activadores, es mediante la formación de sales inestables de transición durante la hidratación. Estas sales se forman por la concentración de partículas coloidales, provenientes de los activadores, en la superficie de las moléculas de anhidrita. Como resultado, los puntos de nucleación son establecidos y alrededor de ellos la cristalización se inicia en cuanto la solución se vuelve sobresaturada. Las sales inestables se descomponen en diferentes iones ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  y cationes del activador) fijando agua a la anhidrita para formar agujas entrelazadas intercaladas con cristales en forma de prismas y tubulares [47].

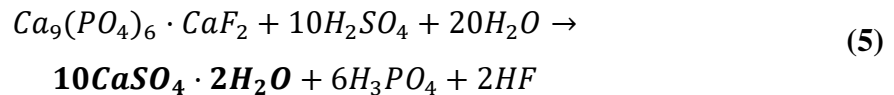
Existen diferentes procesos industriales en los cuales se obtiene alguna fase de sulfato de calcio como subproducto, incluso como anhidrita. De esta forma se obtienen los llamados yesos químicos y los desulfoyesos, estos últimos derivados de la desulfuración de gases en plantas eléctricas. Las composiciones de estos subproductos difieren sustancialmente, principalmente en el contenido de impurezas. Algunos ejemplos de procesos en los que se obtienen yesos químicos son la producción de ácido bórico, ácido cítrico y ácido fluorhídrico.

Este último, es obtenido de la reacción de espato de flúor ( $\text{CaF}_2$ ) y el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Como resultado de esta reacción (4) de materias primas se produce el ácido fluorhídrico (HF) y fluoranhidrita o anhidrita sintética como subproducto ( $\text{CaSO}_4$ ).

A la anhidrita obtenida, también llamada fluoryeso, ya se le emplea como regulador del fraguado en la fabricación del cemento, pero se estima que aproximadamente el 25% del fluoryeso producido es utilizado, el resto permanece como desecho [54–56].



Otra gran fuente de obtención de yesos químicos es como subproducto de la fabricación de ácido fosfórico de donde se obtiene el llamado fosfoyeso. La reacción (5) muestra la obtención de este material. El yeso obtenido de este proceso suele contener gran cantidad de impurezas las cuales no se pueden remover completamente por lavado o con tratamientos químicos. Pero cuando es calcinado a altas temperaturas, por encima de 700°C produce anhidrita y las impurezas se vuelven inertes [47,57].



Por otro lado, los desulfoyesos surgen como resultado de la purificación de los gases emitidos por las plantas eléctricas. El propósito de esta desulfuración es la reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub> a la atmósfera. Por el método de desulfuración en húmedo, el subproducto obtenido consta de más del 95% de sulfato de calcio dihidratado (DH). Los gases son colocados en un depurador en el cual son atomizados CaCO<sub>3</sub> o CaO [58]. La absorción del SO<sub>2</sub> se da por medio de las reacciones (6) y (7).



o



Como se muestra, el uso de fases de sulfato de calcio como cementante, no solo resulta en ahorro de energía, sino que además abre la opción a evitar la extracción de recursos naturales si se mejoran los procesos de reciclaje en distintos ámbitos industriales. Al mejorar las propiedades del yeso, las posibilidades de utilización de este cementante

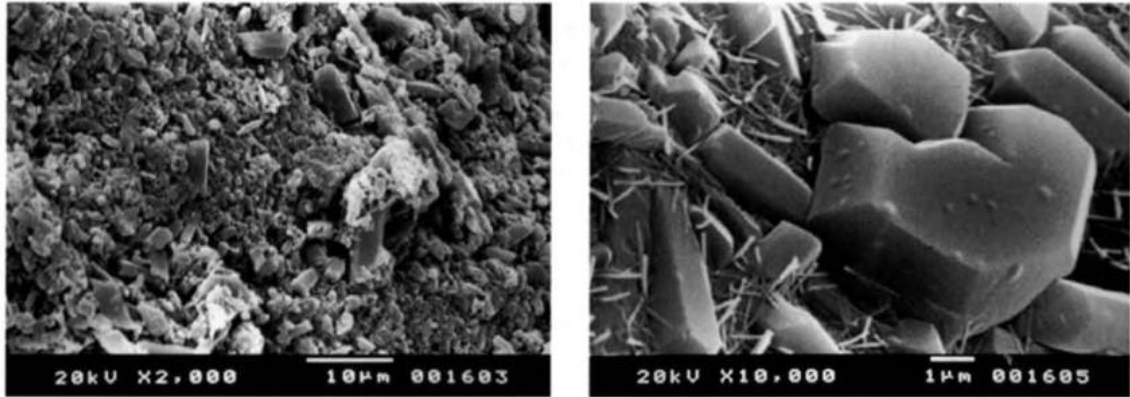
serán más amplias y representará una alternativa de bajo impacto ambiental en distintas aplicaciones de construcción.

## **2.6 Cementantes Base Sulfato de Calcio**

Debido a que el yeso puro es relativamente suave y soluble en agua, las investigaciones recientes se han enfocado hacia tal problema, combinando sulfato de calcio con otros cementos hidráulicos. Aunque por ahora, este tipo de cementos no reemplazaría al Cemento Portland en muchas aplicaciones, existen muchos usos donde es posible emplearlos como alternativa importante.

### **2.6.1 Cementos Base Hemihidrato**

Inicialmente se pensó en la posibilidad de hacer mezclas de hemihidrato (HH) en combinación con Cemento Portland. Estos cementos se desintegraron en menos de un año debido a la formación tardía de fases expansivas [59]. Algo interesante ocurrió en trabajos de Bentur [60] y Kovler [61] en 1994 y 1998 respectivamente, donde realizaron mezclas con contenido de HH del 65% hasta el 85% con Cemento Portland y un remplazo parcial de Cemento Portland por microsílíce. Los estudios demostraron que con la adición de la microsílíce las mezclas superaban por el doble la resistencia del yeso puro, además los cristales del yeso se recubrían con los productos del cemento, evitando así su solubilidad en agua (Ver Figura 8). Sin embargo, las mezclas sin microsílíce se desintegraron en menos de 200 días. De esta forma se establece el beneficio de la microsílíce para controlar o disminuir la formación tardía de fases expansivas. Como se mencionó previamente, el mecanismo por el cual una adición de microsílíce funciona para disminuir los efectos de la aparición de etringita en estos sistemas aún no ha sido claramente definido. Definir este mecanismo permitiría considerar la sustitución de este material por otro más económico o de mayor disponibilidad. O incluso, si se diera el caso, retirarlo completamente si se determina que su efecto se ve nulificado en matrices porosas como en un material aireado.



**Figura 8. Micrografías de pastas 85% HH - 9% CP - 6% MS después de 200 días de inmersión en agua (izq: x2,000, der: x10,000) [61].**

Las investigaciones continuaron utilizando el sulfato de calcio en su fase hemihidratada, pero en combinación con escoria granulada de alto horno en vez de Cemento Portland. Singh y colaboradores en 1992 [62] realizaron mezclas de HH sintetizado a partir de fosfoyeso con Cemento Portland y una puzolana, ya fuera ceniza volante o escoria de alto horno. Las resistencias reportadas resultaron superiores en las mezclas con escoria de alto horno (35 MPa) que en las mezclas con ceniza volante (22 MPa) a los 28 días de curado. Estas resistencias las atribuyen a la hidratación rápida de yeso y del cemento, y a la posterior formación de etringita y tobermorita. La utilización que ellos proponen para este material es como materia para fabricación de tabiques y como mortero de unión para mampostería.

Otra investigación con esta combinación de materiales es la de Escalante y colaboradores en 2009 [63], donde usaron HH de yeso de desecho en combinación con escoria de alto horno variando entre arena de escoria y arena sílica como agregados para formar morteros. Los morteros desarrollaron buena resistencia, cercana a los 20 MPa en algunos casos, y resultaron ser a prueba de agua, aun después de 90 días de curado en inmersión total en agua. El uso de arena de escoria fue mejor que la arena sílica, esto fue explicado por las reacciones de la escoria que participaron después para densificar la microestructura con el consecuente aumento en la resistencia. También, fue mencionado un efecto de curado interno debido a la naturaleza porosa de la escoria, que atrapó partículas de agua para servir como reserva para reacciones posteriores.

Otra investigación que data la combinación de HH de yeso con escoria de alto horno fue la desarrollada por Camarini y colaboradores en 2011 [64]. En este caso se combinó HH con un Cemento Portland de alto horno CP-III que, según normativas brasileñas [65], lleva en su composición del 35 al 70% de agregado siderúrgico de alto horno. Se comprobó que el desempeño de estas mezclas en ambiente externo fue similar al del yeso solo en ambiente interno. Esto debido a que la microestructura es más compacta y una película de C-S-H cubre las agujas de yeso dihidratado, protegiéndolas del ataque del agua.

El uso de HH en combinación con escoria de alto horno y una puzolana como microsílíce o ceniza volante fue abordado por Magallanes y colaboradores en 2012 [10]. Los resultados mostraron que es posible triplicar la resistencia a la compresión, pasando de solo 4 MPa en matrices de yeso puro a 12 MPa en esta combinación. El mecanismo de reacción se entiende como la reacción total del hemihidrato en las primeras 24 horas, seguido de la lenta reacción de la escoria y de las puzolanas, y de la reacción de los sulfatos con el aluminio para formar etringita. Se notó excelente estabilidad dimensional y baja densidad. De esta forma, fue demostrado que esta combinación de cementantes mejora la resistencia mecánica del yeso y disminuye considerablemente su solubilidad en agua. El mecanismo de reacción se entiende como la reacción total del hemihidrato en las primeras 24 horas, seguido de la lenta reacción de la escoria y de la reacción de los sulfatos con el aluminio para formar etringita. Además, se reportó excelente estabilidad dimensional y baja densidad.

### **2.6.2 Cementos Base Anhidrita**

Posteriormente se comenzó a utilizar el sulfato de calcio en su fase anhidra (AH). Magallanes y colaboradores en 2014 [17,52] hicieron una comparativa entre utilizar HH y AH como fuentes de sulfato de calcio para la formación de un cementante alternativo base yeso. Realizaron mezclas con contenidos de sulfato de calcio entre el 30% y el 70%, siendo este sulfato de calcio de hemihidrato comercial o de anhidrita de desecho, en combinación con escoria de alto horno y pequeñas adiciones de microsílíce y ceniza volante. Establecieron que las resistencias iniciales de las mezclas se debieron a la rápida

formación de yeso. Mientras que la anhidrita reaccionó más lento, dio lugar a mejores propiedades mecánicas debido a una mejor configuración microestructural.

Singh y colaboradores en 1995 [47], calcinaron fosfoyeso a una temperatura de 700-800°C formando anhidrita. Dieron una explicación al por que con la adición de activadores se acelera la reacción de la anhidrita que por sí sola es muy lenta. Realizaron la mezcla de esta anhidrita activada con escoria de alto horno y obtuvieron que en una proporción de 50:50 de anhidrita y escoria se alcanzaron más de 30 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días. A las resistencias obtenidas, ellos dan la explicación de que son debidas a la transformación de anhidrita a yeso y la formación de productos de hidratación como etringita y tobermorita de fórmulas  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$  respectivamente.

También Singh y colaboradores en otra investigación en 1995 [66], determinaron que en una mezcla de proporciones iguales de AH de fosfoyeso calcinado y ceniza volante, con pequeñas adiciones de cal y cemento Portland, se obtienen mejores resistencias a la compresión que en las mismas muestras que no contaban con la ligera adición de cemento Portland. Se probaron tres diferentes temperaturas de curado, 27, 40 y 50 °C, mejorando de esta forma la resistencia a compresión del sistema. El mejor resultado de resistencia a compresión fue de 22 MPa a los 28 días, obtenido con el curado a 50 °C.

### **2.6.3 Cementos Supersulfatados**

Por su parte, los cementos supersulfatados invierten las proporciones, maximizando el contenido de escoria de alto horno, con la intención de que esta sea activada por alguna fuente de sulfato, comúnmente sulfato de calcio, además de un activador alcalino, comúnmente clínker [67]. Los contenidos de escoria en estos materiales son muy variados, llegando a ir desde 50% hasta 90%, siendo siempre el principal constituyente. Es deseable que el contenido de aluminio en la escoria sea superior a 13% para mejorar la formación de etringita en el proceso de hidratación. Dado que la etringita es segundo producto más abundante en este tipo de cementantes, solo después del C-S-H, los cementos supersulfatados no son adecuados para curados con calor, ya que con temperaturas de curado elevadas la resistencia a compresión decae considerablemente debido a la descomposición de la etringita [49].

Algunas de las ventajas de este tipo de materiales, además del aspecto sustentable al reutilizar un desecho industrial como es la escoria y usar un material de bajo consumo de energía como el yeso, son buena resistencia a compresión, bajo calor de hidratación y buena resistencia a la penetración de agentes agresivos como sulfatos y cloruros [68,69]. Comúnmente, la mezcla de 80% - 85% de escoria de alto horno, 10% - 15% de activador sulfático (anhidrita o dihidrato) y una baja cantidad de Cemento Portland (normalmente 5%) ha sido ampliamente utilizada para la fabricación de cementos supersulfatados. Sin embargo, la escoria con una elevada área superficial y partículas angulosas, generan problemas de trabajabilidad. Además, los cementos supersulfatados se siguen considerando costosos debido a la cantidad limitada de materia prima como la escoria que se utiliza en grandes cantidades [70].

Tratando de reducir su costo, se ha propuesto la utilización de ceniza volante de combustión de lecho fluido como activador, en lugar de la mezcla de sulfato de calcio y Cemento Portland utilizada tradicionalmente [71]. Sin embargo, esta opción más allá de que sí reduce el costo final del cemento supersulfatado, sigue presentando problemas de trabajabilidad y utilizando grandes cantidades de escoria. Otra opción que se ha propuesto, es la sustitución parcial de escoria de alto horno por ceniza volante y activar el sistema con sulfato de calcio obtenido de la desulfuración de gases de combustión [72]. Sin embargo, la sustitución de escoria por ceniza volante tiene un efecto negativo en la resistencia a compresión del cemento supersulfatado.

Finalmente, la sustitución de no más del 30% de escoria de alto horno por ceniza volante clase F, con bajo contenido de calcio, utilizando ceniza volante de combustión de lecho fluido como activante, está mostrando resultados de mejoría en las propiedades mecánicas, ya que el alto contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  y  $\text{CaSO}_4$  de la ceniza volante de combustión de lecho fluido, proporciona el sulfato y a la vez eleva el pH de la mezcla lo cual desencadena la hidratación de la misma [73]. Aparentemente, el reto actual en este tipo de sistemas, es el de fabricar cementos supersulfatados con un costo menor, utilizar menos escoria de alto horno, y mejorar a su vez las propiedades como trabajabilidad y resistencia a compresión. Teniendo en mente la producción de mejores cementos supersulfatados fabricados con 100% subproductos industriales.

#### 2.6.4 Cementos Sulfoaluminosos

Los cementos sulfoaluminosos (CSA) contienen ye'elimita ( $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$  o  $\text{Ca}_4(\text{Al}_6\text{O}_{12})(\text{SO}_4)$ , de abreviación  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ ) como principal constituyente (30-70%). puede ser producido de acuerdo con la ecuación (8), a una temperatura de entre 1250 y 1300°C. El Al puede ser parcialmente sustituido por iones de Fe dentro de la estructura del  $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ , sin embargo, la reactividad de esta fase disminuirá con el aumento del contenido de hierro en la red cristalina [49]. La ye'elimita fue introducida como fase cementante en los años 60's, cuando fue patentado por Alexander Klein. Aunque los cementos CSA no son ampliamente usados en Europa y los Estados Unidos, han sido producidos, usados y estandarizados en China desde hace más de 30 años. Este tipo de cementantes ofrecen propiedades como endurecimiento rápido, alta resistencia, capacidades expansivas, entre otras [68].



Debido a los altos niveles de aluminio en los CSA (30-40%), estos cementos no son competitivos cuantitativamente desde un punto de vista económico. No obstante, con respecto a la reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$ , los cementos CSA presentan un alto potencial, ya que la formación de la ye'elimita como fase principal está asociada con la liberación de una cantidad significativamente menor de  $\text{CO}_2$  en comparación con las fases del clínker de cemento Pórtland, como puede verse en la Tabla 4 [31]. La baja temperatura de producción y la mayor facilidad de molienda del CSA, reducen el consumo de energía y las emisiones de  $\text{CO}_2$ . En general, dependiendo de la composición, los cementos CSA emiten entre un 25 y un 35% menos de  $\text{CO}_2$  durante su fabricación en comparación con el cemento Portland, incluso algunos colocan esta cifra en 44% [2,31].

**Tabla 4. Producción de CO<sub>2</sub> (gramos de CO<sub>2</sub> / gramos de fase producida) de diferentes fases cementantes**

| <b>Fase</b>              | <b>Abreviación</b>                      | <b>Producción de CO<sub>2</sub></b> |
|--------------------------|---|-------------------------------------|
| Alita                    | C <sub>3</sub> S                        | 0.578 g CO <sub>2</sub> /g fase     |
| Belita                   | C <sub>2</sub> S                        | 0.511 g CO <sub>2</sub> /g fase     |
| Ferro aluminato cálcico  | C <sub>2</sub> (A,F)                    | 0.362 g CO <sub>2</sub> /g fase     |
| Sulfoaluminato de calcio | C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> $\bar{S}$ | 0.216 g CO <sub>2</sub> /g fase     |

Los CSA son considerados como cementos sustentables por que superan a la fabricación convencional de Cemento Portland en cinco aspectos [74]:

1. La fase principal y responsables de las propiedades de los CSA es la ye'elimita (C<sub>4</sub>A<sub>3</sub> $\bar{S}$ ), que contiene solo 27.6% de óxido de calcio, comparado con el 73.7% de la alita (C<sub>3</sub>S), fase principal del Cemento Portland.
2. El CSA puede ser fabricado con 150° - 200° menos de temperatura que el Cemento Portland.
3. El clínker de CSA es más frágil que el clínker de Cemento Portland, lo que hace que sea más fácil de moler.
4. El clínker de CSA es mezclado con cantidades relativamente altas de sulfato de calcio para producir el CSA.
5. El CSA puede ser mezclado con carbonatos de calcio o puzolanas silíceas, alterando la hidratación, microestructura y/o otras propiedades.

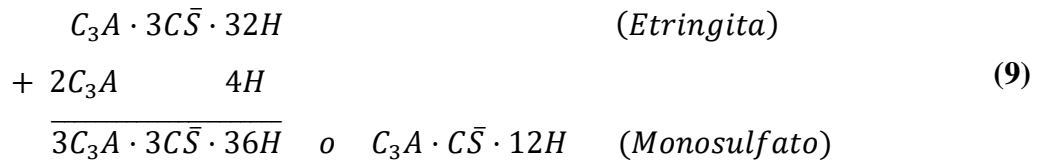
Sin embargo, a pesar de todos los beneficios ambientales que muestra el uso de los CSA y debido a que el producto final muestra capacidades expansivas, el uso de estos materiales se ve limitado a aplicaciones donde se pueda aprovechar esta característica, como materiales que compensan la contracción, materiales de autoesfuerzo, aplicaciones de alta resistencia inicial y fraguado rápido.

## **2.7 La Etringita y sus Efectos**

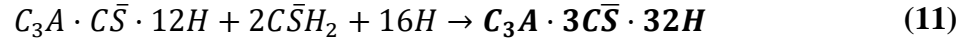
La etringita es un sulfoaluminato de calcio hidratado (3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O) pertenece al grupo de fases AFt que cristaliza de forma

trigonal. El término AFt se refiere a las tres unidades de CX en la formula general  $C_3(A,F) \cdot 3CX \cdot yH_2O$  o  $C_6(A,F)X_3 \cdot yH_2O$ , donde “X” representa una unidad de fórmula de un anión doblemente cargado. Las fases AFt forman cristales prismáticos o aciculares hexagonales. Esta fase se presenta durante la hidratación del cemento Portland [75] y su comportamiento es distinto a cuando la matriz es mayormente sulfato de calcio.

Durante la hidratación del cemento Portland, teniendo presencia de aluminatos de calcio ( $C_3A$ ) y sulfato de calcio, estos se hidratan y reaccionan entre sí para formar etringita. La formación de etringita durante las etapas iniciales de la hidratación del cemento, es de cierta forma deseable para regular los tiempos de fraguado, ya que, en ausencia de sulfato de calcio, el  $C_3A$  reacciona rápidamente provocando fraguado demasiado rápido. Cuando todo el sulfato de calcio disponible es consumido, la etringita inicial continúa reaccionando con cantidades adicionales de aluminato tricálcico para formar monosulfoaluminato de calcio hidratado (monosulfato) como producto de reacción [76], de acuerdo a la ecuación (9). Este monosulfato, perteneciente al grupo de fases AFm, cristaliza en forma de delgadas plaquetas hexagonales, sin embargo, en las pastas de cemento Portland las capas de AFm suelen estar íntimamente entremezcladas con las capas de la fase C-S-H [49]. Esta última fase no está asociada directamente con efectos deletéreos en el cemento o concreto endurecido.



Sin embargo, la formación de etringita en una matriz ya endurecida, si pudiera representar un riesgo a la integridad de la matriz cementante. Esto requeriría de la transformación del monosulfato, formado durante las etapas iniciales del fraguado, a etringita, la cual, al formarse en una matriz ya endurecida, genera problemas asociados con expansión, agrietamientos, pérdida de resistencia e incluso la desintegración. Este cambio de fase, de monosulfato a etringita, requiere de la presencia de agua y iones de sulfato y calcio (10), ya sea provenientes del exterior o no, o en su defecto, moléculas de sulfato de calcio dihidratado (11), de acuerdo a las siguientes ecuaciones [9,77–79].



En general, a la formación de etringita y los efectos adversos que esto conlleva, se le conoce como ataque por sulfatos. Una de las principales teorías en cuanto a la afectación que ocurre en una matriz endurecida por la aparición de etringita, es que ésta genera esfuerzos internos debido a expansiones originadas por el aumento de volumen de los sólidos presentes. Como se muestra en la Tabla 5, la conversión de etringita a partir de monosulfato provoca que el volumen de sólidos se duplique, pasando de 312.7 ml/mol del monosulfato a 714.9 ml/mol de la etringita. Algo similar ocurre en la formación de yeso a partir de hidróxido de calcio, que aumenta su volumen de 33.2 ml/mol a 74.2 ml/mol. Este aumento en el volumen de sólidos es el origen de la expansión y agrietamiento que se observa típicamente en un ataque por sulfatos [9]. En una pasta endurecida, en condiciones de nucleación aleatoria a partir del líquido de poro, los núcleos de etringita recién formada crecerán libremente y no ejercerán presión sobre el entorno, siempre y cuando haya espacio libre para el crecimiento de cristales. Sólo se puede ejercer presión sobre las paredes circundantes si los cristales son demasiado grandes y/o numerosos para el espacio disponible [77].

**Tabla 5. Volumen molecular de algunos compuestos existentes en el concreto [80]**

| <b>Compuesto</b>   | <b>Peso Molecular<br/>(g/mol)</b> | <b>Densidad<br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Volumen<br/>Molecular (ml/mol)</b> |
|--|-----------------------------------|--|---------------------------------------|
| Ca(OH) <sub>2</sub>  | 74.1                              | 2.23                                   | 33.2                                  |
| Mg(OH) <sub>2</sub>  | 58.3                              | 2.38                                   | 24.5                                  |
| CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O   | 272.2                             | 2.32                                   | 74.2                                  |
| 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O                       | 378.2                             | 2.52                                   | 150.1                                 |
| 4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·19H <sub>2</sub> O                      | 668.3                             | 1.81                                   | 369.2                                 |
| 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · CaSO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O  | 622.3                             | 1.99                                   | 312.7                                 |
| 3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 3CaSO <sub>4</sub> ·32H <sub>2</sub> O | 1236.6                            | 1.73                                   | 714.9                                 |

Las afectaciones de la etringita en matrices cementantes son evidenciadas por distintos trabajos científicos. Por ejemplo, Gladis Camarini y José Antonio de Milito [64], investigadores brasileños, documentan el uso de un cementante a base de HH y cemento Portland al cual llamaron “concreto químico plástico”, para producción de paneles prefabricados que posteriormente se usarían en proyectos de vivienda para personas de bajos recursos en la década de los 80’s. Durante el período de construcción, aproximadamente 3 años, la constructora tuvo un contrato para construir 3.000 unidades residenciales. Esta empresa utilizó este “concreto químico plástico” que consiste en una mezcla de Cemento Portland Ordinario, sulfato de calcio hemihidratado (HH), agregados, aditivos y agua. La composición del aglutinante fue del 60% HH y del 40% Cemento Portland. Estos paneles se utilizaban para paredes internas y externas. Antes de terminar la construcción de todas las unidades, las primeras ya estaban clasificadas con deterioro debido a la formación de etringita.

Uno de los trabajos más extensos en materia de ataque por sulfatos en concretos convencionales fue llevado a cabo por la Oficina de Restauración de los Estados Unidos, USBR por sus siglas en inglés [81]. En la década de los años 40’s, la USBR comenzó un experimento con más de 100 mezclas de concreto variando la composición del cemento, contenido de cemento, finura del cemento, relación agua/cemento, tipo de adición mineral, cantidad de adición mineral, contenido de aire, aditivos (incluidos de aire, reductores de agua, aceleradores de fraguado, etc.), temperatura de mezclado y resistencia a compresión. Se fabricaron cilindros de 3 pulg. de diámetro por 6 pulg. de altura de todos los sistemas. Y fueron sumergidos en una solución de 2.1% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a temperatura ambiente por un periodo ininterrumpido de hasta 40 años. Entre las conclusiones más relevantes de este trabajo, se menciona una relación inversa entre la durabilidad de las muestras y la relación agua/cemento y el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  en el cemento. Es decir, si se aumenta la relación agua/cemento o el contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , el tiempo de vida del concreto se acorta, debido a la formación excesiva de etringita (por el alto contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ ) en una matriz débil (por la alta relación agua/cemento).

En 2017, un caso de estudio fue publicado por Zhanqun Liu y colaboradores [82], donde documentan el daño por ataque por sulfatos en los túneles del ferrocarril Cheng-

Kun en China. Se realizó una investigación de campo para analizar el daño en el concreto. Los resultados mostraron que el revestimiento del concreto en contacto con el aire había sufrido carbonatación a más de 50 mm de profundidad, y los productos de hidratación del cemento habían sido convertidos de  $\text{CaCO}_3$ . También se encontró etringita y yeso, productos derivados del ataque por sulfatos, en el recubrimiento del concreto, lo que ocasiono desprendimientos del mismo.

Sin embargo, también existen investigaciones donde se llegó a la conclusión de que la etringita no en todos los casos resulta perjudicial, incluso argumentan que mejora algunas propiedades, sobre todo en materiales en donde el principal componente no es el cemento Portland. Es el caso de los cementos supersulfatados y los sulfoaluminosos [68], mencionados en el capítulo anterior, donde la etringita es responsable de las propiedades como resistencia inicial, resistencia a agentes agresivos y expansiones controladas, de los mismos.

Solo por dar algunos ejemplos, Singh y Garg [47], alcanzaron resistencias a compresión de hasta 30 MPa a los 28 días en sistemas a base de anhidrita y escoria de alto horno en diferentes proporciones. Atribuyen estas resistencias a la transformación de anhidrita a yeso y a la formación de etringita y tobermorita. Un caso similar es el de Fraire-Luna y colaboradores [48], que realizaron mezclas compuestas de 75% fluoryeso y escoria de alto horno y metacaolín como cementantes complementarios. Ellos argumentan que la microestructura de los compuestos estaba compuesta por cristales de yeso formado en las etapas iniciales, que después fue densificado por la formación de C-S-H y etringita como resultado de las reacciones de la escoria y el metacaolín, mejorando la resistencia a compresión.

Garg y Pundir [83], realizaron mezclas de ceniza volante (55%-60%), anhidrita de fosfoyeso (8%-15%), cal hidratada (5%-16%) y Cemento Portland (15%-20%). La resistencia más alta reportada fue de 27.5 MPa a los 28 días de curado y atribuyen este valor a la formación de C-S-H, yeso y etringita. En este trabajo también reportan resultados de durabilidad en ciclos de humectación y secado, mostrando reducción de la resistencia a compresión de hasta 4 MPa y pérdida de masa de hasta 5%, ambos valores a

los 45 ciclos. Sin embargo, no relacionan los resultados de durabilidad a la formación de etringita.

Otro ejemplo es el de Guerra-Cossío y colaboradores [7], quienes realizaron mezclas de anhidrita sintetizada a partir de yeso de desecho con escoria de alto horno y microsílíce. La adición de escoria de alto horno y microsílíce mejoro las propiedades e impidió la disolución del yeso en ambientes húmedos. La formación de etringita tuvo un efecto de densificación de la matriz del compuesto. El sistema donde visualmente había poca etringita y otro con una presencia considerable de etringita fueron los que mostraron la mayor resistencia a la compresión. A pesar de la aparición de etringita, los sistemas no mostraron expansiones considerables ni agrietamientos visibles.

Como vemos, la aparición de etringita representa un riesgo y suele ser constantemente ligada a efectos negativos, por lo tanto, suele ser indeseable. Sin embargo, la sola aparición de la etringita no implica una evolución deletérea o perjudicial, ya que factores como la resistencia de la mezcla, la porosidad y sobre todo la tasa de formación de etringita, juegan también un rol importante afectando directamente a la densificación del sistema y contribuyendo a las propiedades mecánicas, especialmente en el caso de estructuras porosas como el yeso.

## **2.8 Materiales Aligerados**

El código de construcción para concreto estructural ACI 318, considera como concreto ligero o liviano a aquel que presenta una densidad que no supera los  $1840 \text{ kg/m}^3$ . Entonces, el reciente y creciente interés en estos materiales radica en sus propiedades como material ligero, lo que permite economizar en el diseño de estructuras, su capacidad como material aislante térmico y el ahorro de materia prima en su fabricación debido a su estructura porosa y a la posibilidad de utilización de residuos industriales como materiales de partida. La primera revisión integral sobre estos materiales ligeros, también llamados materiales con estructura celular, fue presentada por Valore en 1954 [84,85].

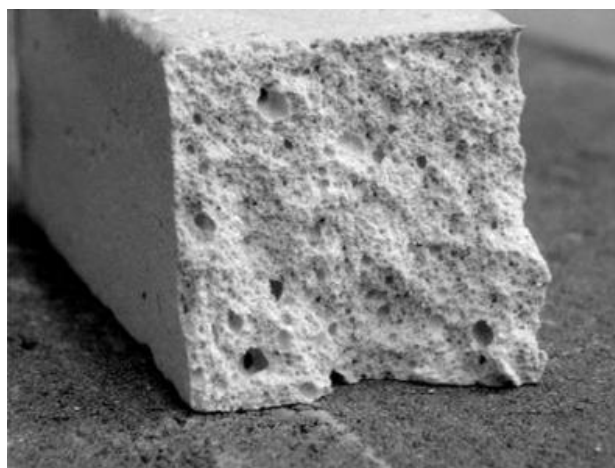
Las propiedades mecánicas y térmicas de estos materiales varían ampliamente dependiendo de la matriz cementante, el agente aireante empleado, los métodos de curado, que pueden ser con o sin autoclave (AAC o NAAC por sus siglas en ingles), los tiempos

de mezclado, contenido de agua, etc. Distintos materiales cementantes han sido utilizados para fabricar concretos celulares como cemento portland, cemento con cal, cemento con residuos de pizarra, cemento con ceniza volante y cemento con escoria de alto horno. Se han utilizado agregados como arena, ceniza volante o cuarzo, y métodos de curado con y sin autoclave. Se ha encontrado funcionalidad de estos materiales en cuanto a propiedades térmicas, acústicas y en resistencia al fuego [86,87].

Los materiales aireados son un tipo de material aligerado en el que el aire es atrapado intencionalmente en la matriz cementante generando huecos debido al uso de un agente incorporador de aire. Una de las formas de clasificar estos materiales, es basada en el método de la formación de los poros o huecos, y estos pueden ser por formación de espuma o por inclusión de aire.

### **2.8.1 Materiales Aligerados por Método Espumado**

En el método espumado, la introducción de los poros se consigue por medios mecánicos, ya sea mediante la formación previa de la espuma para después ser adicionada en el mezclado (agente espumante mezclado con una parte del agua de mezcla) o mediante espumado mixto (agente espumante mezclado con el mortero). Los diferentes agentes espumantes utilizados son detergentes, resina de jabón, resinas de pegamento, saponina, proteínas hidrolizadas como la queratina, etc. [86,88]. Este método es reportado como el proceso de formación de poros más económico y controlable, ya que no hay reacciones químicas involucradas.



**Figura 9. Estructura típica de una pasta de yeso espumada [89].**

### **2.8.2 Materiales Aligerados por Método Aireado**

En el método aireado o por inclusión de aire, aditivos químicos con capacidad para formar o desprender gas se mezclan en conjunto con la pasta cementante mientras aún está en estado líquido o plástico, resultando en un aumento de volumen provocado por el gas producido que al escapar deja una estructura porosa. El polvo de aluminio, polvo blanqueador (generalmente  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ ) y carburo de calcio liberan hidrógeno, oxígeno y acetileno respectivamente, siendo el polvo de aluminio el agente aireante más comúnmente utilizado [86,87]. La eficiencia del proceso de polvos de aluminio depende de la finura, pureza y alcalinidad del cemento, así como de los medios utilizados para evitar la fuga de gas antes del endurecimiento del mortero. En el caso de cementos Portland con baja alcalinidad, la adición de hidróxido de sodio o cal complementan la alcalinidad requerida.

### **2.8.3 Materiales Ligeros Base Sulfato de Calcio**

El sulfato de calcio es considerado un material con buenas propiedades térmicas, aun así, las propiedades térmicas de una matriz de sulfato de calcio pueden ser mejoradas de distintas formas, tal como la adición de materiales de baja densidad o fibras aislantes. Sin embargo, el aislamiento térmico resultante podría ser aún mejor si la propia matriz de yeso tuviera una porosidad muy alta, puesto que el aire atrapado en los poros tiene una conductividad térmica de solo  $0.026 \text{ W/mK}$  [90].

Colak [91] presentó un estudio en el que comparó la capacidad aligerante de distintos aditivos, tanto por método espumado como aireado, tomando como parámetros la densidad, la resistencia a compresión y el tiempo de fraguado de distintos sistemas de yeso celular fabricados a partir de sulfato de calcio hemihidratado. Para los sistemas aireados utilizó sulfato de aluminio, alumbre de potasio y bicarbonato de amonio, mientras que para los sistemas espumados se utilizó lauril sulfato de sodio y etoxilato de nonilfenol, además se usó ácido cítrico como retardante y carboximetilcelulosa como modificador de la viscosidad. Se reportan reducciones de densidad entre 30% y 35% al usar individualmente sulfato de aluminio, alumbre de potasio, lauril sulfato de sodio y bicarbonato de amonio, sin embargo, también se menciona que el uso de ácido cítrico promovió el efecto aligerante de los aditivos, ya que además de regular el tiempo de

fraguado, aceleró la liberación de gas de los aireantes, probablemente debido al cambio de pH de la solución. Se observa una relación directa entre la densidad y la resistencia a compresión, es decir, al disminuir la densidad, disminuye de igual manera la resistencia a compresión. El valor más alto de resistencia a compresión reportado en este estudio fue de 2.22 MPa para una densidad de 1086 kg/m<sup>3</sup>. La conductividad térmica no fue reportada en este estudio.

Vimmrova y colaboradores [89], prepararon matrices de yeso espumadas como material multifuncional con capacidad de carga y propiedades térmicas. El acercamiento que ellos proponen es desde dos perspectivas, matrices de yeso espumadas con agregados de densidad normal y matrices de yeso sin espumar con agregados ligeros. Respecto a estas dos perspectivas, los autores afirman que la primera resulta en matrices con mejores propiedades térmicas, y la segunda resulta en mejores resistencias a compresión. El mejor aprovechamiento, según los autores, fue obtenido en el sistema que contenía perlita expandida en un 5% respecto a la masa del yeso, el cual mostró una densidad de 547 kg/m<sup>3</sup>, conductividad térmica de 0.12 W/mK y resistencia a compresión de 2.0 MPa. Las matrices de yeso espumado reportaron únicamente 0.3 MPa a compresión para una densidad de 281 kg/m<sup>3</sup>. Cabe resaltar que estas matrices fueron de mortero de yeso, sin embargo, las propiedades del yeso se podrían mejorar si el yeso forma parte de un multicomponente cementante como el propuesto en esta tesis [7,17,92,93].

Rubio-Avalos y colaboradores [94], desarrollaron una matriz de yeso a partir de hemihidrato, con lo que ellos llamaron una estructura celular cristalina por medio de la adición de NaHCO<sub>3</sub> como productor de CO<sub>2</sub>. Reportan la disminución de la densidad desde 2300 kg/m<sup>3</sup> hasta 1400 kg/m<sup>3</sup>, resistencia a compresión desde 14MPa hasta 6MPa y la conductividad térmica desde 0.591 w/mK hasta 0.399 w/mK al espumar un yeso estándar con 1% de aditivo aireante, sin embargo, al elevar la adición a 1.5% estas propiedades se comportaban de una forma similar a las muestras sin adición. Esto es debido, según los autores, a que el exceso de gas CO<sub>2</sub> producido provocó el colapso de la estructura celular debilitada. Esto es prueba de la importancia de determinar la adición óptima de cada uno de los agentes aireantes propuestos y de la importancia de la homogeneidad e interconexión de la estructura de poros.

Umponpanarat y Wansom [90], utilizaron  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{NaHCO}_3$  como agentes aireantes en matrices de yeso a partir de la hidratación de hemihidrato, además, utilizaron ácido málico como agente retardante del fraguado. Este efecto retardante del ácido cítrico y el ácido málico había sido reportado con anterioridad por Badens [95] y por Magallanes-Rivera [96]. La densidad, resistencia a compresión y conductividad térmica son reportados. Según los autores, el  $\text{NaHCO}_3$  proporcionó la menor conductividad térmica (0.22 W/mK) al ser comparado contra los otros sistemas que contenían la misma cantidad de aditivo aireante adicionado. También, es el aditivo que mostró la mejor relación resistencia a compresión/transferencia térmica, sin embargo, solo alcanzó 0.72 MPa.

Ninguno de los artículos citados realiza un análisis profundo de la porosidad, sin embargo, se reporta que el volumen, tamaño y espaciamiento entre poros tiene un efecto en la resistencia a compresión del material. Así como tener tamaños de poros más grandes, tiene una mayor influencia en la resistencia a compresión que los poros pequeños. Adicionar algún material con elevada finura, ayuda a tener una distribución de tamaño de poros más uniforme [97]. Además, todos los trabajos aquí mencionados fueron realizados con yeso a partir de la hidratación de hemihidrato, sin embargo, no se encontraron usos de anhidrita como fuente de sulfato de calcio para la fabricación de concreto celular base yeso que puede desarrollar resistencias superiores a las del yeso. Además, la incorporación de EAH le proporcionará a la matriz cementante una mayor resistencia, lo que ampliará el área de aplicación de este material, además de proveer a la matriz de yeso resistencia a la humedad, mejorando así su desempeño en ambientes húmedos.

#### **2.8.4 Expresiones Existentes para Comportamiento Térmico**

Existen distintos modelos o expresiones para predecir la resistencia a compresión de pastas, morteros y concretos. Debido a que en un concreto convencional y bien compactado la porosidad depende principalmente de la cantidad de agua adicionada para su fabricación, la ley de Abrams (12), donde  $K_1$  y  $K_2$  son constantes,  $w$  es la cantidad de agua y  $c$  es la cantidad de cemento Portland, ambos en masa por unidad de volumen; provee una buena correlación para predecir la resistencia mecánica dependiendo de la relación agua/cemento [98]. Esta ley no considera el aire atrapado de forma inherente en

el concreto, que suele permanecer entre el 0.5 y 1.5% para concreto con compactación y trabajabilidad normales. Sin embargo, los vacíos causados por la falta de compactación y en concretos con aire incluido intencionalmente como es el caso de los concretos celulares, la porosidad no puede ser considerada como dependiente únicamente de la cantidad de agua. Por esta razón la ley de Abrams no puede ser aplicada a concretos aireados.

$$S = \frac{K_1}{K_2^c} \quad (12)$$

La reducción de la densidad por medio de la formación de poros repercute significativamente en la caída de la resistencia mecánica, mientras la resistencia a compresión aumenta de forma lineal con la densidad [86]. Sin embargo, estos no son los únicos factores para tomar en cuenta para determinar la relación entre porosidad, densidad y resistencia, ya que factores como método de curado, relación agua/cemento o el contenido de cementantes suplementarios; intervienen de manera considerable. La relación de Powers (13) y la expresión de Balshin (14) son considerados como la base para el desarrollo de modelos de cálculo de resistencia para concretos aireados o celulares [99], donde  $S$  es la resistencia a compresión,  $K$  es la resistencia intrínseca del gel,  $g$  es la relación gel/espacio,  $S_0$  es la resistencia a una  $P = 0$ ,  $P$  es la porosidad y  $n$  es una constante. Tanto Powers como Balshin utilizan valores teóricos, de resistencia intrínseca del gel hidratado en el caso de Powers, y resistencia con una porosidad nula en el caso de Balshin. Los valores  $K$  en la relación de Powers,  $S_0$  en el modelo de Balshin y  $n$  en ambas expresiones, serán diferentes y deben ser calculadas si las mezclas son de cemento Portland, cemento Portland con adiciones minerales, o algún cementante diferente.

$$S = Kg^n \quad (13)$$

$$S = S_0(1 - P)^n \quad (14)$$

Partiendo de la expresión de Balshin (14), Hoff [100] considera que el espacio dejado por el agua no ligada (agua evaporable) en el concreto, debe ser considerado como

vacíos y por lo tanto la porosidad total sería la suma entre estos y el volumen de vacíos por aire incluido, y propone su modelo (15) para la relación resistencia/porosidad para un cemento dado, donde  $n$  es la porosidad,  $dc$  es la densidad del concreto,  $\rho c$  es la gravedad específica del cemento,  $k$  es la relación agua/cemento,  $\gamma w$  es el peso unitario del agua y  $b$  es una constante empírica. Sin embargo, cuando el cementante consiste en otro que no sea únicamente Cemento Portland, este modelo no puede ser aplicado, debido a que considera solo la gravedad específica del cemento. Por esta razón, para poder aplicar este modelo a concretos con sustitución parcial de Cemento Portland por ceniza volante, Kearsley y Wainwright [101] proponen una variante en donde  $k$  es tomada como relación agua/cementante, siendo el cementante Cemento Portland + ceniza volante, y  $\rho c$  es calculada dividiendo la cantidad total de cementante entre el volumen total de cementante. Sin embargo, el mejor ajuste del modelo se da únicamente para mezclas con relaciones agua/cemento entre 0.40 y 0.60. Por otro lado, Nambiar y Ramamurthy [99], proponen una variación al modelo de Hoff para considerar la adición de un material de efecto filler a la mezcla (16), añadiendo los factores  $S_w$  y  $S_v$  que representan la relación filler/cemento en peso y en volumen respectivamente, y considerando una relación agua/sólidos en lugar de agua/cemento.

$$n = 1 - \left[ \frac{dc(1 + 0.2\rho c)}{(1 + k)\rho c \gamma w} \right]^b \quad (15)$$

$$n = 1 - \left[ \frac{dc(1 + 0.2\rho c + S_v)}{(1 + k)(1 + S_w)\rho c \gamma w} \right]^b \quad (16)$$

Para concreto aireados, la forma modificada de la ecuación de Feret (17) presentada por Tam y colaboradores [102] relaciona la resistencia ( $S$ ), la relación agua/cemento ( $W/c$ ) y la relación aire/cemento ( $a/c$ ). Donde  $K$  y  $n$  son constantes empíricas que dependen de las características del cemento y agregados. Esta ecuación también está limitada al uso de Cemento Portland, sin embargo, en la actualidad existen variaciones de este modelo para concretos a base de Cemento Portland con adiciones

minerales como caliza, cuarzo o microsílíce [103] y para cementos blancos y autocompactables [104]

$$S = K \left( \frac{1}{1 + w/c + a/c} \right)^n \quad (17)$$

Expresiones similares al modelo de Balshin han sido utilizadas para describir la relación entre resistencia y porosidad en materiales diferentes a matrices cementantes base cemento Portland. En la discusión de Duckworth sobre el trabajo de Ryshkewitch [105], se presenta un modelo (18) aplicado a materiales porosos sinterizados de alúmina y zirconia. Por otro lado, Hasselman [106] presenta una expresión (19) con la que sugiere que la relación entre la resistencia y la porosidad de materiales policristalinos puede ser expresada de forma lineal. En ambas expresiones  $S$  es resistencia mecánica, el subíndice 0 indica una condición de porosidad cero,  $k$  y  $As$  son constantes y  $P$  es la porosidad.

$$S = S_0 e^{-kP} \quad (18)$$

$$S = S_0 (1 - AsP) \quad (19)$$

Para el caso específico de matrices de yeso, existen modelos como el de Schiller [107], donde  $S$  es la resistencia a compresión,  $P$  es la porosidad,  $P_{cr}$  es la porosidad crítica correspondiente a una resistencia zero y  $K_s$  es una constante (20). De acuerdo con esta ecuación, existe una relación lineal entre la resistencia y el logaritmo de la porosidad. Por otro lado, Soroka y Sereda [108] utilizaron expresiones similares a la de Balshin aplicándola a matrices de yeso.

$$S = K_s \cdot \ln \left( \frac{P_{cr}}{P} \right) \quad (20)$$

La mayoría de las expresiones citadas, describen una curva con comportamiento exponencial o logarítmico. Todas utilizan constantes para poder adecuarse a ese comportamiento y consideran la porosidad solo como un espacio vacío, no toman en

cuenta la forma y tamaño de poros. Tomando como referencia las ecuaciones aquí mencionadas, se elaborará una expresión que relacione la resistencia a compresión con la densidad en sistemas cementantes base sulfato de calcio-Escoria de alto horno con distintas adiciones de agente aireante, para posteriormente relacionar esto con el comportamiento térmico de los mismos sistemas.

Será importante determinar una cantidad de aireante adecuado, que no perjudique las propiedades mecánicas al grado de convertir al cementante en un material inviable para ser utilizado en construcción. La propuesta de considerar la densidad en lugar de la porosidad resulta conveniente debido a que es más sencillo medir la densidad aparente en un prisma sólido que la porosidad. Sin embargo, será necesario revisar que el comportamiento de la curva que describa la relación resistencia/densidad sea similar a la de resistencia/porosidad. Relacionar los resultados de la expresión para predecir el comportamiento térmico significará una ventaja para poder determinar la capacidad aislante del cementante en base a parámetros fácilmente medibles como el ensaye a compresión y densidad para una cantidad y agente aireante dado.

Dentro de las limitaciones de las ecuaciones aquí mostradas, y que en su momento pudieran ser similares a las limitaciones de la expresión propuesta en esta tesis, se puede resaltar que algunas expresiones se aproximan mejor en ciertos rangos de relaciones agua/cemento. Algunos son exclusivos para matrices base cemento Portland a menos que se agreguen otros factores a la ecuación. También la mayoría idealizan la hidratación del cementante, al considerar que todo el cementante está hidratado. Además, las constantes en cada uno de los casos se tienen que determinar si la matriz cementante cambia o si contiene alguna adición.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Materiales

##### 3.1.1 Sulfato de Calcio

Como fuente de sulfato de calcio, se utilizó yeso de construcción MAXIMO<sup>MR</sup>, producido a partir de yeso mineral por la empresa Yesera Monterrey [109]. La fase reactiva correspondiente al yeso comercial es sulfato de calcio hemihidratado (HH). Todo el sulfato de calcio necesario para las distintas etapas experimentales fue calcinado a una temperatura de 500°C durante 6 horas, con el propósito de que la fase reactiva fuera sulfato de calcio anhidro (AH).

##### 3.1.2 Escoria de Alto Horno

Por otro lado, la escoria de alto horno utilizada fue obtenida como subproducto de la fabricación de arrabio de la industria acerera Arcelor Mittal de Lázaro Cárdenas, Michoacán, México. Para que la escoria pueda ser útil como material cementante, es necesario que ésta sea altamente reactiva. La reactividad de la escoria radica principalmente en tres parámetros: amorficidad, composición química y finura. Como vimos en la sección 2.3 de este documento (Materiales Cementantes Suplementarios), la amorficidad de la escoria se promueve por el enfriamiento rápido de la misma al salir del alto horno. De esta forma, si la EAH no es enfriada abruptamente al salir del horno y ésta se enfría lentamente, la fracción amorfa obtenida será tan baja que no podrá ser utilizada como cementante, ya que una escoria cristalina posee casi nulas propiedades cementantes.

Para la composición química, existen indicadores como el índice de basicidad y el índice de hidraulicidad, cuyo valor tiene que ser mayor a 1 para decir que es una escoria básica, y mayor a 1.4 para decir que es una escoria hidráulica. Estos nos indican si la composición química de la escoria es adecuada, para que sea reactiva en un sistema cementante alcalino. Finalmente, la finura, que puede ser controlada por medio de tiempos de molienda. Los resultados del cálculo de índices y tiempos de molienda serán mostrados en la sección 4.1 de este documento (Caracterización de Materiales).

### **3.1.3 Microsílice**

Se utilizó microsíllice (MS) comercial no densificada marca Norchem. De acuerdo con la ficha técnica del fabricante, esta MS cuenta con un contenido de SiO<sub>2</sub> por encima del 93% y un retenido en la malla 325 (45 µm) de 2.54%. La gravedad específica, según el fabricante, oscila entre 2.10 y 2.40 y un área superficial superior a los 22 m<sup>2</sup>/gr (220,000 cm<sup>2</sup>/gr) [110], superando en todos los aspectos los requerimientos de normativa [111]. Estos valores fueron después corroborados con pruebas y los resultados son presentados en la sección 4.1 de este documento (Caracterización de Materiales).

### **3.1.4 Aditivos**

Durante las distintas etapas de esta investigación se utilizaron distintos aditivos químicos ya sea como activadores de reacción o como agregados para las mezclas. Dichos aditivos son los siguientes:

Carbonato de Calcio. Grado reactivo marca Jalmek. De acuerdo al fabricante, tiene más del 99% de carbonato de calcio y puede contener impurezas de estroncio, sodio, potasio, magnesio, etc. Sin superar en ningún caso el 0.1% de contenido de cualquier impureza dada. El carbonato de calcio fue utilizado como una opción experimental de sustitución de MS.

Carburo de Silicio. De abrasivos Panadyne, 800 grit. Según el fabricante, la denominación 800 grit corresponde a un tamaño de partícula de 6.5 µm [112]. El contenido mínimo de SiC es de 99.6% y puede contener menos del 0.2% de impurezas como carbono, silicio, SiO<sub>2</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [113]. El SiC fue utilizado como una opción experimental de sustitución de MS.

Sulfato de Potasio. Grado reactivo marca Jalmek, utilizado con el propósito de activar la reacción de la AH. De acuerdo con fabricante, tiene un mínimo de pureza del 99% y puede contener impurezas como sodio, calcio, magnesio, materia insoluble, etc. Sin superar en ningún caso el 0.02% de cualquier impureza dada.

Hidróxido de Calcio. Como hidróxido de calcio se utilizó cal hidratada (hidrocal) comercial marca Rebase, Unidad Monclova. De acuerdo al fabricante, el contenido de  $\text{Ca(OH)}_2$  mínimo es del 90% y el contenido de CaO máximo es de 1.5% [114].

Cemento Portland Ordinario. Marca Holcim con características de acuerdo a normativa NMX-C-414-ONNCCE-2014 [115]. El cemento adicionado a las mezclas se utilizó con la intención de alcalinizar las mezclas y como activante alcalino para la reacción de la escoria de alto horno.

Polvo de Aluminio. Grado reactivo marca Alpha Chemicals. De acuerdo a fabricante, tiene un mínimo de pureza de 99.5% y un tamaño  $D_{50}$  de 30  $\mu\text{m}$  [116]. El polvo de aluminio fue utilizado como aditivo generador de aire al interior de la matriz cementante.

Peróxido de Hidrogeno. Grado comercial marca Jaloma en solución al 3% de contenido de peróxido. El peróxido de hidrogeno fue empleado como aditivo generador de aire al interior de la matriz cementante.

Agua Destilada. Empleada como agua de reacción para todos los casos de mezclas hidráulicas.

### **3.2 Detalles Experimentales**

La investigación se dividió en tres etapas principales. En la primera etapa, el objetivo principal consistió en evidenciar los beneficios en cuanto a resistencia a la compresión y estabilidad dimensional de la adición de microsílíce en sistemas base anhidrita y escoria de alto horno. Comparativamente a la adición de microsílíce, se sustituyó la misma por una adición similar de carbonato de calcio o carburo de silicio, con tamaño de partícula inferior a las 45 micras. De esta forma, se trató de determinar si los beneficios que conlleva la adición de microsílíce, son debidos a un efecto físico o si existe

una reacción entre el  $\text{SiO}_2$  provisto por la microsílíce y el resto de los productos en la matriz cementante, y de esta forma abrir la posibilidad de sustituir la microsílíce por algún otro material, en el supuesto de que el tamaño de partícula es el que aporta el beneficio en la mezcla de AH+EAH+MS.

En una segunda etapa, el objetivo consistió en la formación de un material ligero con propiedades de aislamiento térmico mejoradas, por medio de la adición de agentes aireantes a los sistemas base anhidrita y escoria de alto horno. Considerando los resultados de la primera etapa, se decidió continuar con la adición de microsílíce, para determinar si su efecto seguía siendo el mismo ahora en una matriz altamente porosa. Correlacionar la resistencia a compresión, la transferencia térmica y la densidad de estos sistemas, permitirá diseñar un material que proporcione el mejor aprovechamiento de ambas propiedades, mecánicas y térmicas. De esta forma incentivar al uso de estos sistemas, evidenciando que pueden ser aprovechados en aplicaciones específicas.

Finalmente, en una tercera etapa se analizaron los datos obtenidos en las dos etapas anteriores para buscar el punto de inflexión entre las propiedades mecánicas y térmicas, lo cual permite estimar el aprovechamiento óptimo de ambas. De la misma forma, determinar una expresión que relacione ambas propiedades y permita predecir el comportamiento de matrices de este compuesto. El propósito de esta expresión es que se pueda hacer una estimación de la capacidad térmica del material, solo con conocer su densidad aparente y su resistencia a compresión. A manera de resumen, las 3 etapas experimentales se pueden ver esquemáticamente en la Tabla 6.

**Tabla 6. Esquema de etapas del desarrollo experimental**

| <b>Desarrollo Experimental</b>  |   |  |
|---|---|--|
| <b>Etapa 1. Estudio de la Formación de Etringita</b>  | <b>Etapa 2. Cantidad de Agente Aireante</b>   | <b>Etapa 3. Correlación y Expresión Matemática</b>   |
| Adición de distintos materiales finos a los sistemas AH-EAH.<br>Determinación el efecto de estos materiales en la formación de etringita. | Adición de distintos agentes aireantes.<br>Determinación de propiedades mecánicas y térmicas para diferentes cantidades y tipo de aireante. | Determinación del punto de aprovechamiento óptimo de propiedades mecánicas y térmicas.<br>Elaboración de expresión matemática que relacione estas propiedades. |

### **3.2.1 Etapa 1. Estudio de la Formación de Etringita**

Para determinar el comportamiento de sistemas base AH-EAH con adición de distintos materiales finos, se elaboraron pastas con una relación agua/sólidos de 0.45, considerando todos los polvos como sólidos, es decir, cementantes, activantes y adiciones. Variando la cantidad de adición de material fino para controlar la formación de etringita de acuerdo con la Tabla 7. Adicionando desde un 5% hasta un 15% de microsílíce (MS), Carbonato de Calcio (CC) o Carburo de Silicio (SiC) para su posterior estudio de propiedades como resistencia a compresión, cambios de longitud, micrografías y difracción de rayos-X, como indicadores de formación de etringita y su efecto en las propiedades del sistema.

Es común hacer uso de sulfatos de álcalis como activadores de reacción de la anhidrita ya que sin estos la reacción es muy lenta o incluso nula [47], para este trabajo de investigación se utilizó una combinación de  $K_2SO_4$  y  $Ca(OH)_2$  ya que mostró buenos resultados en ensayos previos [53]. De la misma forma es común en este tipo de cementos compuestos que combinan sulfato de calcio y escorias, como es el caso de los cementos supersulfatados, utilizar una cantidad mínima de agente alcalino como activante de la escoria [69], para este efecto se utilizó Cemento Portland Ordinario (CPO).

Se elaboraron muestras cilíndricas de una pulgada de diámetro para realizar ensayos a compresión en una prensa hidráulica Instron 600DX, a las edades de 1, 7, 28, 56, 91, 180 y 365 días, siguiendo los lineamientos de tiempos de mezclado de normativa ASTM C 305 [117]. Adicional a esto se elaboraron barras para medir expansión de acuerdo a normativa [118], las cuales se estuvieron midiendo cada 7 días durante el primer mes, y posteriormente cada 30 días hasta completar un año. Se observaron muestras a fractura, obtenidas de las pruebas a compresión, en un microscopio electrónico de barrido (MEB) Jeol modelo JSM-6510LV, en la modalidad de detección de electrones secundarios. Deteniendo la hidratación por inmersión en alcohol isopropílico inmediatamente después del ensayo a compresión. La inmersión en alcohol se mantuvo durante un periodo aproximado de 7 días, debido a que el secado de muestras con solventes se rige por la difusión y depende de las dimensiones de la muestra [119]. Posteriormente se colocaron en un horno de secado a 35°C durante 3 días para eliminar el alcohol remanente sin afectar las muestras dado que la descomposición del yeso puede iniciar alrededor de los 45°C [49]. Se realizaron análisis de difracción de rayos X (DRX) en muestras pulverizadas, en un difractómetro PANalytical modelo Empyrean con ánodo de cobre, desde 5 hasta 90° 2θ, y una distancia de paso de 0.026° 2θ, prestando particular atención en un pico característico de la etringita que aparece cercano a los 9° 2θ.

**Tabla 7. Esquema de mezclas de prueba etapa 1 (unidades en % en masa)**

| Como Cementantes |     | Como Activador |                                |                     | Como Adición |                   |     |
|------------------|-----|----------------|--------------------------------|---------------------|--------------|-------------------|-----|
| AH               | EAH | CPO            | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | Ca(OH) <sub>2</sub> | MS           | CaCO <sub>3</sub> | SiC |
|                  |     |                |                                |                     | -            | -                 | -   |
|                  |     |                |                                |                     | 5            | -                 | -   |
|                  |     |                |                                |                     | -            | 5                 | -   |
|                  |     |                |                                |                     | -            | -                 | 5   |
| 50               | 50  | 5              | 1.5                            | 2                   | 10           | -                 | -   |
|                  |     |                |                                |                     | -            | 10                | -   |
|                  |     |                |                                |                     | -            | -                 | 10  |
|                  |     |                |                                |                     | 15           | -                 | -   |
|                  |     |                |                                |                     | -            | 15                | -   |
|                  |     |                |                                |                     | -            | -                 | 15  |

### 3.2.2 Etapa 2. Cantidad de Agente Aireante

De acuerdo al ACI 318, concreto ligero o liviano se considera a aquel que presenta una densidad que no supera los 1840 kg/m<sup>3</sup> [120]. A su vez, la norma ASTM C1693, limita la resistencia a compresión de concretos ligeros aireados a un mínimo de 2 MPa [121]. Sabiendo esto, se elaboraron muestras de concreto ligero base AH-EAH activados alcalinamente, variando los contenidos de los distintos materiales aireantes ya mencionados, polvo de aluminio y peróxido de hidrogeno, hasta lograr las tres densidades propuestas (1200, 1000 y 800 kg/m<sup>3</sup>). Se mantuvieron fijos los contenidos de anhídrita y EAH como en los casos anteriores, y de igual forma el sulfato de potasio, hidróxido de calcio y CPO como activantes. Se evaluó la resistencia a compresión y la transferencia térmica para las diferentes densidades propuestas. La relación agua/sólidos fue elevada a 0.5 para facilitar el llenado de los moldes y no tener que compactar, y así evitar la pérdida de aire atrapado.

El coeficiente de conductividad térmica se calculó de acuerdo a normativa ASTM C1045 y ASTM E1530 [122,123]. Esta propiedad, que es inherente de cada sustancia o material, expresa el flujo de calor que pasa, por unidad de tiempo, a través de la unidad de superficie de una muestra de material. Para elementos con área rectangular, el coeficiente de conductividad térmica se calcula con la siguiente formula (21):

$$\lambda = \frac{QL}{A(Th - Tc)} \quad (21)$$

*Donde:*

$\lambda$  = Coeficiente de conductividad térmica (W/mK).

$Q$  = Tiempo de flujo de calor unidimensional a través de la zona de medición del aparato de ensayo (W).

$L$  = Longitud del área de medición en dirección axial (m).

$A$  = Área de la muestra, normal a la dirección del flujo de calor (m<sup>2</sup>).

$Th$  = Temperatura ponderada por área de la superficie caliente del espécimen (K).

$Tc$  = Temperatura ponderada por área de la superficie fría del espécimen (K).

Se propuso un arreglo de mezclas para 3 densidades propuestas y 2 aireantes como muestra la Tabla 8. El sistema de referencia corresponde a un sistema fabricado bajo las mismas condiciones, pero sin la adición del aireante. La densidad obtenida por este sistema, que fue 1550 kg/m<sup>3</sup>. Cada uno de los aireantes se combinó con microsíllice (de acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa 1), para ver si este componente tiene algún efecto en las propiedades mecánicas y térmicas, además de determinar si su efecto en cuanto a la disminución de la formación de etringita es similar en este tipo de matrices o si, por el contrario, su efecto es nulo en matrices porosas.

**Tabla 8. Arreglo de mezclas de prueba etapa 2.**

| Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Aireante                      | 5% SF       |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------|
| Referencia (1550)             | N/A                           | N/A         |
| 1200                          | Polvo de Al                   | Con adición |
|                               |                               | Sin adición |
|                               | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | Con adición |
|                               |                               | Sin adición |
| 1000                          | Polvo de Al                   | Con adición |
|                               |                               | Sin adición |
|                               | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | Con adición |
|                               |                               | Sin adición |
| 800                           | Polvo de Al                   | Con adición |
|                               |                               | Sin adición |
|                               | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | Con adición |
|                               |                               | Sin adición |

Se elaboraron muestras cúbicas de 2 pulgadas por lado [124] para ensayos a compresión en una prensa hidráulica Instron 600DX, a las edades de 7, 28, 91, 180 y 365 días de curado en inmersión en agua a 23°C. Se determinó la densidad aparente y la resistencia a compresión para cada una de las edades propuestas y se seleccionaron solo algunas fechas y sistemas para análisis de conductividad térmica en un equipo Unitherm

modelo 2022, de acuerdo con los resultados a compresión. De esta forma se relacionó el tipo y cantidad de material aireante adicionado con la densidad y su impacto en las propiedades mecánicas y térmicas del material cementante. Adicionalmente se realizaron análisis microestructurales en un microscopio electrónico de barrido (MEB) Jeol modelo JSM-6510LV, análisis de composición de fases en un difractómetro PANalytical modelo Empyrean con ánodo de cobre, además de la determinación del calor específico del compuesto en un calorímetro diferencial de barrido modelo Q200 de TA-Instruments.

### **3.2.3 Etapa 3. Correlación y Expresión Matemática**

El objetivo de esta etapa fue proponer una expresión que relacionara las propiedades mecánicas y térmicas, con la intención de poder estimar el comportamiento térmico de muestras aireadas a partir solo de su ensaye a compresión. Para esto, se analizaron expresiones propuestas anteriormente por otros autores, ya mencionados en la sección 2.8.4 de este documento (Expresiones Existentes para Comportamiento Térmico), y con los resultados obtenidos del ensaye de los sistemas aireados, se estableció la relación existente entre la densidad, la resistencia a compresión y la transferencia térmica de matrices del compuesto AH-EAH, para cada uno de los aireantes, con adición y sin adición de MS a 28 días de curado.

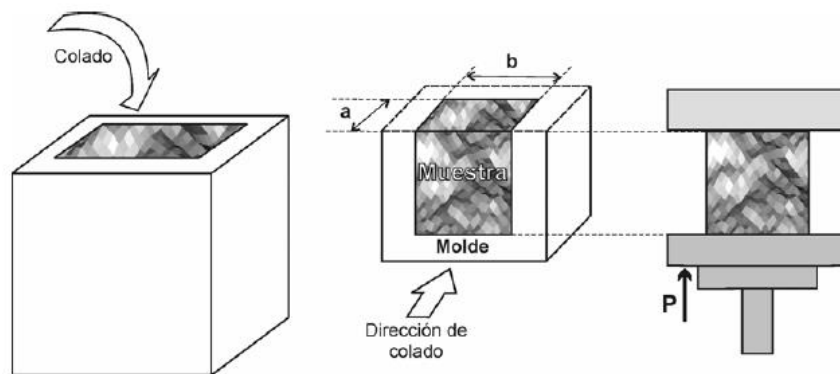
Sin embargo, dentro de las limitaciones encontradas para la expresión propuesta en esta tesis, se encontraron algunas similares a las de las mismas expresiones consultadas en la sección 2.8.4 de este documento, como el hecho de que las constantes utilizadas son diferentes si el airente utilizado es diferente. De la misma manera, se requeriría calcular las constantes adecuadas si se utilizara una matriz diferente.

## **3.3 Técnicas de Caracterización**

### **3.3.1 Resistencia a la Compresión (RC)**

Uno de los parámetros de mayor interés en la rama de los materiales de construcción, además de cuestiones de durabilidad, es la resistencia a la compresión. De ésta se derivan los usos prácticos y aplicaciones que pudiera tener el material de construcción en sí. La RC es un parámetro que resulta afectado por una gran variedad de factores, como pueden ser el tamaño y forma de las partículas del material cementante, las

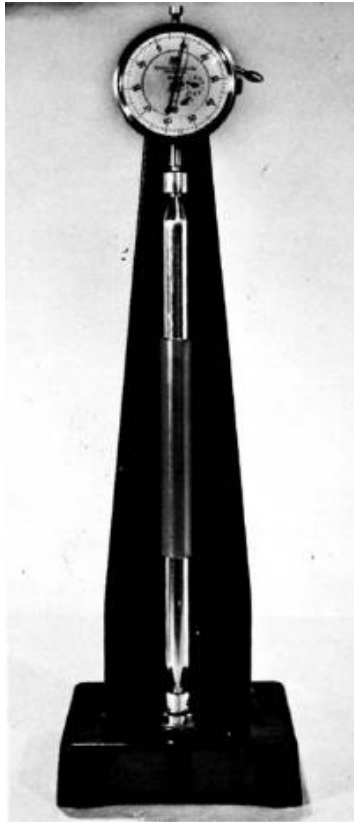
condiciones de curado, el método de ensaye y otros. Pero, sobre todo la RC se ve directamente afectada por las relaciones agua/cementante o agua/sólidos utilizadas y la distribución y tamaño de poros al interior de la matriz cementante [125,126]. La RC fue determinada para todos los sistemas de acuerdo a normativa consultada [124]. Se calculó el área sobre la que se aplicaría la carga para el ensaye de la resistencia a compresión. En el caso de los cilindros se midió el diámetro para calcular el área y en el caso de los cubos se midieron las dimensiones a y b perpendiculares a la dirección del colado como se muestra en la Figura 10.



**Figura 10. Esquema del ensayo de resistencia a la compresión**

### 3.3.2 Cambios de Longitud

El seguimiento de los cambios dimensionales permite medir las expansiones/contracciones que sufre el material sólido en función del tiempo. Estas variaciones dimensionales en matrices cementantes pueden ser debidas a múltiples factores como contracciones por secado o expansiones por formación de etringita. Las mediciones se llevan a cabo en especímenes prismáticos con forma de barras con sección cuadrada de 25mm x 25mm y 285mm de longitud, de acuerdo a la norma ASTM C490 [118]. Durante la fabricación de los especímenes, un par de tornillos son colocados en los extremos de las barras para que queden embebidos en ellas y es en estos tornillos donde se apoyará el aparato comparador para realizar la medición (Ver Figura 11). La longitud libre entre los extremos embebidos de los tornillos deberá ser de 250mm.



**Figura 11. Aparato medidor de cambios de longitud**

Una barra metálica con bajo coeficiente de expansión térmica es utilizada como barra de referencia, mientras las mediciones son realizadas en un ambiente de temperatura controlada. Dicha barra es medida siempre que un espécimen de estudio sea medido. La variación en la dimensión longitudinal de cada barra se calcula mediante la siguiente ecuación (22) [118]:

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (22)$$

*Donde:*

*L= Cambio de longitud a X edad.*

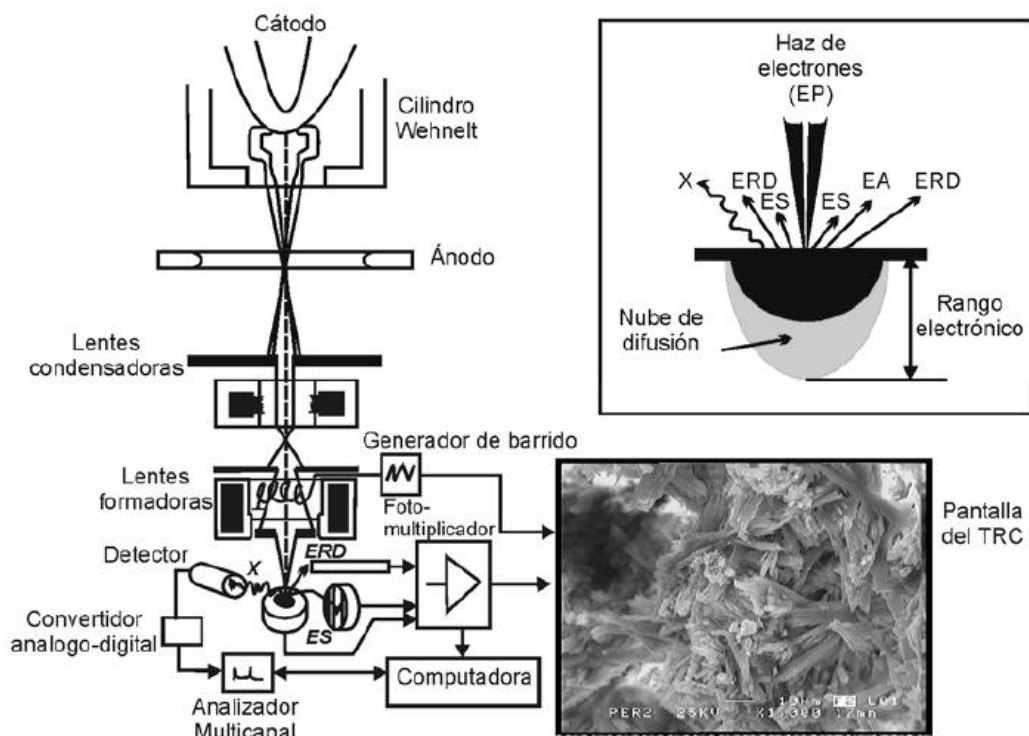
*Lx= Lectura en el medidor de una muestra a edad X menos la lectura de la barra de referencia a esa misma edad.*

*Li= Lectura inicial de una muestra menos la lectura de la barra de referencia a esa misma edad.*

*G= Longitud nominal de calibración (250mm)*

### 3.3.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

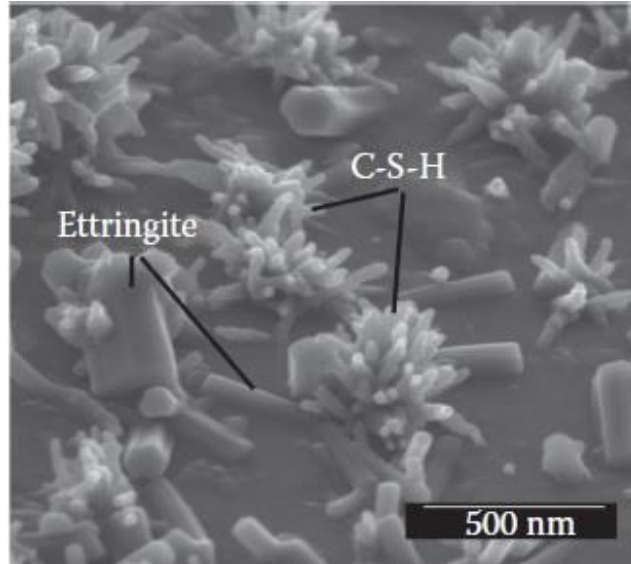
Con la técnica de MEB es posible producir imágenes con mayor contraste y de alta resolución comparadas con los microscopios ópticos. Esta técnica se basa en hacer incidir un haz de electrones primarios (EP), condensado por lentes magnéticas en forma de un punto de entre 5-100 nm de diámetro. Al chocar con un cuerpo sólido (muestra), los electrones son reflejados (dispersados) o absorbidos, y producen varias señales (Ver Figura 12) como son electrones secundarios (ES), electrones retrodispersados (ERD), rayos-X, electrones de Auger (EA) y otras respuestas [36,127].



**Figura 12. Funcionamiento de un Microscopio Electrónico de Barrido [36,127].**

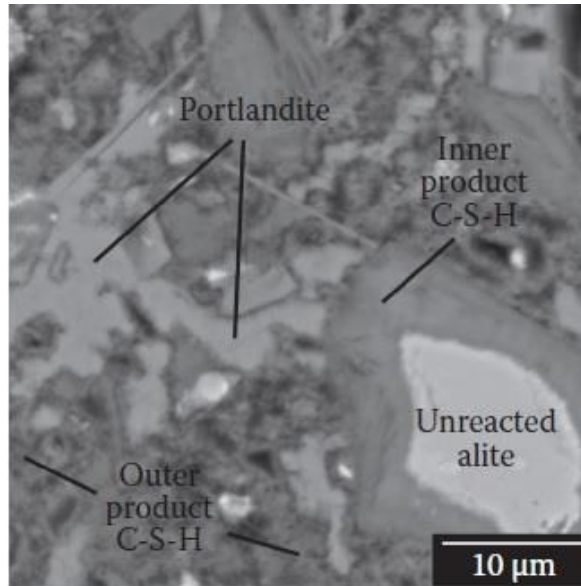
Los modos de operación más frecuentes en el MEB involucran la captura de ES, ERD y Rayos X característicos. Los ES surgen de colisiones inelásticas; por ejemplo, un electrón incidente puede golpear un electrón de una de las capas más externas de un átomo de la muestra. Estos electrones tienen mucha menos energía que los electrones incidentes, así que, aunque se generan ES en todo el volumen de interacción del haz primario, sólo pueden escapar de la superficie del espécimen. Por esta razón tienen la más alta resolución

de las señales (Ver Figura 13). Los electrones que emergen de la superficie de la muestra son recogidos por un detector cargado. Así que la señal se recoge de la mayoría de las superficies, sea cual sea su inclinación [128].



**Figura 13. Imagen típica de un grano de cemento, vista con el detector de Electrones Secundarios [128].**

Por su parte, los ERD son el resultado de colisiones elásticas, como una pelota que rebota en una pared. Tienen energías similares a las de los electrones incidentes y por lo tanto pueden escapar de una mayor profundidad en el espécimen y las imágenes serán de menor resolución que las imágenes de ES. El aspecto más importante acerca de los ERD es que su intensidad, y por lo tanto el brillo en la imagen, es principalmente una función del número atómico, que puede ser relacionado con la densidad atómica, de los átomos de la muestra. Los átomos más grandes tienen más electrones y la probabilidad de que el electrón incidente “rebote” en esta nube de electrones es mayor. Por lo tanto, la reflexión primaria de electrones por el espécimen es más alta cuando la densidad atómica es mayor, esto es, un material con un alto número atómico resulta en una reflexión más eficiente [128]. Esto genera un tipo de imagen (Ver Figura 14) donde los diferentes componentes de una muestra pueden ser fácilmente identificados.



**Figura 14. Imagen típica de una pasta de cemento, vista con el detector de Electrones Retrodispersados [128].**

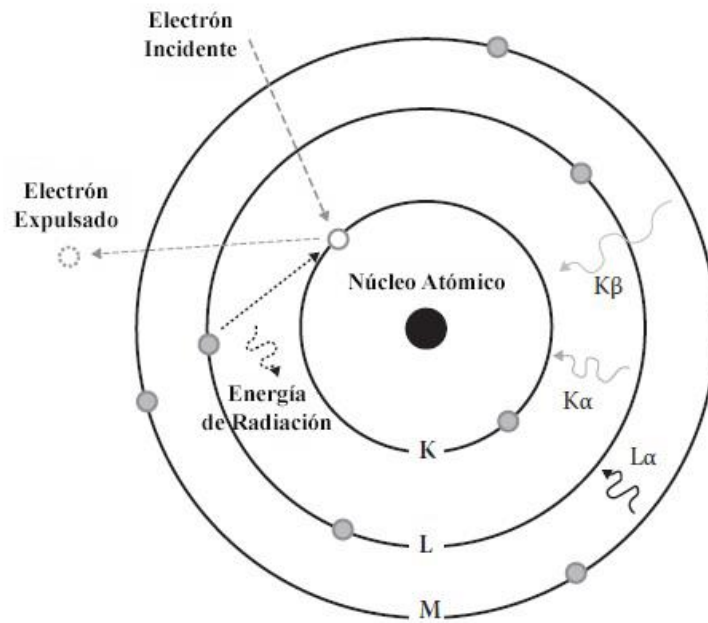
De esta forma, se puede explotar el contraste químico y se puede distinguir las diferentes fases dentro de un mismo grano de cementante por los tonos de gris. La Figura 15 muestra el orden de brillantez de algunas fases típicamente encontradas en materiales cementantes en imágenes por ERD. Sin embargo, para obtener un buen contraste de composición, es muy importante minimizar otros factores que afectan al contraste, en particular la topografía (rugosidad de la superficie), mediante el pulido de la muestra.



**Figura 15. Orden creciente de brillantez en imágenes por ERD de las fases presentes en compuestos cementantes [36].**

Los rayos X característicos surgen cuando un electrón incidente golpea y expulsa a un electrón de una capa interna de un átomo. En consecuencia, un electrón de una capa exterior “cae” para ocupar el lugar del electrón expulsado (Ver Figura 16), y al hacerlo, emite una radiación característica de la diferencia de energía entre los electrones de la

capa interna y externa y, por lo tanto, del átomo en cuestión [127]. Detectando esta radiación característica de cada átomo con una técnica llamada Espectroscopía por Dispersión de Energía (EDS) es posible realizar análisis químicos cuantitativos en un punto específico de la muestra. Es muy importante mencionar que un análisis químico cuantitativo por rayos X característicos, solo puede ser realizado en muestras pulidas y en condiciones de alto vacío, ya que las superficies de fractura y las condiciones ambientales no permiten un análisis preciso.



**Figura 16. Generación de rayos X característicos [128].**

### 3.3.4 Difracción de Rayos X (DRX)

El fenómeno de la radiación X fue descubierto por Wilhelm Conrad Roentgen en 1895 [129]. Pronto se supo que los rayos-X tienen longitudes de onda en el rango de angstroms, y que son lo suficientemente energéticas para penetrar sólidos y reconocer su estructura interna. En base a estos hallazgos bastantes herramientas y técnicas útiles para el análisis y evaluación de los materiales se han desarrollado y perfeccionado para su aplicación. La DRX es la dispersión elástica de fotones de rayos X por los átomos en una red periódica con interferencia constructiva [130]. La Figura 17 ilustra cómo la difracción

de los rayos-X por los planos cristalinos permite derivar espaciamientos de red mediante el uso de la ley de Bragg (23):

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen} \theta \quad (23)$$

Donde:

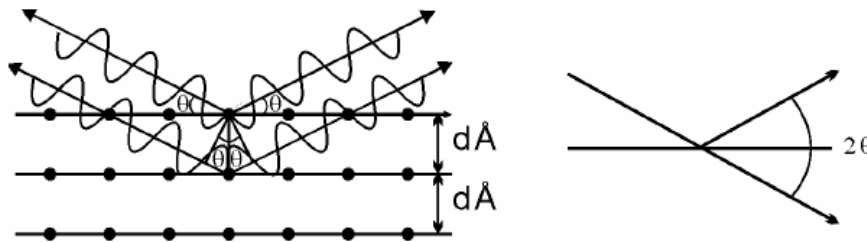
$n$  = es el orden de reflexión

$\lambda$  = es la longitud de onda de los rayos-X

$d$  = es el espaciamiento entre los planos de la muestra

$\theta$  = es el ángulo entre el haz incidente y la normal al plano de red de reflexión

La difracción de los rayos X generada por un material cristalino, produce un patrón de DRX que consiste en reflexiones, en forma de picos de diferentes intensidades ubicados en ángulos de difracción característicos. El ángulo de difracción y la posición de las reflexiones son determinados por la simetría y el tamaño de la celda unitaria haciendo uso de la ley de Bragg, mientras que las intensidades de las mismas se relacionan con la naturaleza y disposición de los átomos dentro de la celda unitaria del material cristalino. Con la medición de los ángulos  $\theta$  bajo los cuales los rayos-x dejan el cristal, pueden ser determinados los espaciamientos interplanares  $d$  de cada fase cristalográfica [131]. De esta manera, la DRX produce patrones de posiciones de reflexiones e intensidades relativas que caracterizan las diferentes estructuras cristalinas y permiten identificar su presencia en muestras desconocidas mediante la comparación de dichos datos con patrones estándar.

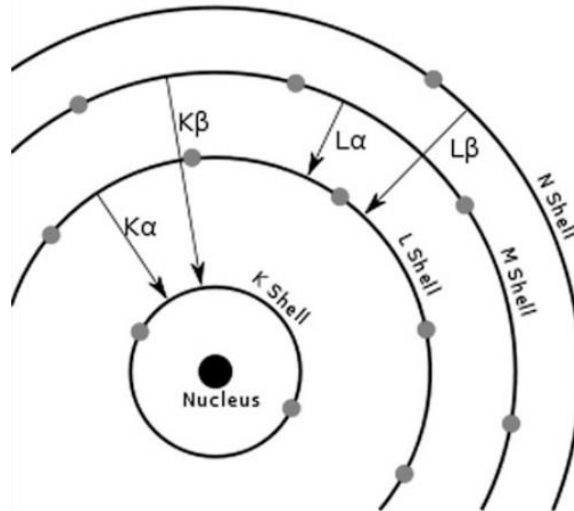


**Figura 17. Representación gráfica de la ley de Bragg [130].**

### **3.3.5 Fluorescencia de Rayos X (FRX)**

Los rayos X son una forma de radiación electromagnética de longitud de onda corta (alta energía-alta frecuencia) que habita en la región entre los rayos gamma y la radiación ultravioleta. El método FRX depende de principios fundamentales que son similares a otros métodos instrumentales que involucran interacciones entre los haces de electrones y los rayos X con las muestras, incluyendo la espectroscopia de rayos X (por ejemplo, MEB - EDS) y la difracción de rayos X (DRX) [132].

El análisis de los principales elementos y trazas de los materiales por FRX, es posible gracias al comportamiento de los átomos cuando interactúan con la radiación. Cuando los materiales se excitan con radiación de alta energía y longitud de onda corta (por ejemplo, rayos X), pueden ionizarse. Si la energía de la radiación es suficiente para desalojar un electrón de la capa interna fuertemente sostenido, el átomo se vuelve inestable y un electrón de la capa externa reemplaza al electrón interno que falta (Ver Figura 18). Cuando esto sucede, se libera energía porque el electrón de la capa interna está más fuertemente ligado que el externo. La radiación emitida es de menor energía que los rayos X incidentes y se denomina radiación fluorescente, también llamada fluorescencia [133]. Las diferencias de energía entre las capas de los electrones son conocidas y constantes en cada material, por lo que la radiación emitida siempre tiene una energía característica, y los rayos X fluorescentes resultantes pueden ser utilizados para detectar los elementos presentes en la muestra.

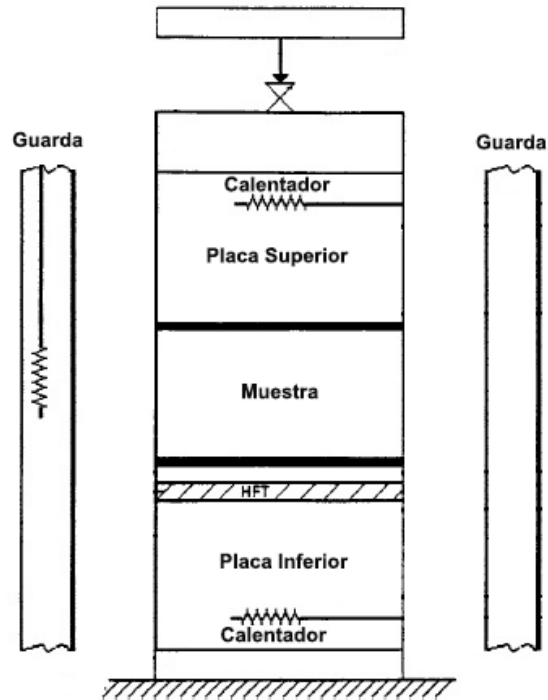


**Figura 18. Transición orbital debido a la fluorescencia de rayos X [133].**

### 3.3.6 Transferencia Térmica (Técnica de Flujo de Calor)

Existen diferentes técnicas para medir el comportamiento térmico de materiales sólidos. Dentro de las técnicas normadas por ASTM se encuentran las mediciones de flujo de calor por medio de la técnica de placa caliente [134], el uso de placa caliente con fuentes de calor de línea circular [135], el uso de caja caliente [136] y la técnica del medidor de flujo de calor protegido [123], entre otras. En esencia, lo que hacen estas técnicas es generar un gradiente de temperatura en extremos opuestos de la muestra, para medir el flujo de calor que logra pasar a través del material de análisis. Las mediciones de transferencia térmica en este trabajo se realizaron con la técnica del medidor de flujo de calor protegido.

En esta técnica, un espécimen y un transductor de flujo de calor son colocados entre dos placas planas controladas a diferentes temperaturas, para producir un flujo de calor a través de la columna de prueba (Ver Figura 19). Una carga es aplicada a la columna de prueba por vía neumática o por cualquier otro método, para asegurar que haya un contacto reproducible entre el espécimen y las superficies de las placas. Una guarda rodea la columna de prueba y se mantiene a una temperatura media uniforme respecto a las dos placas, con la función de minimizar el flujo de calor lateral que pudiera generarse desde o hacia la columna de prueba [123].



**Figura 19. Componentes de la prueba de flujo de calor [123].**

En estado estacionario, la diferencia de temperatura entre las superficies que entran en contacto con la muestra es medida con sensores de temperatura que están embebidos en las superficies de las placas, junto con el transductor de flujo de calor. El voltaje generado por el transductor de calor es traducido como flujo de calor a través de la muestra. La proporcionalidad se obtiene mediante una calibración previa del sistema con muestras de material térmico conocido previamente medidas bajo las mismas condiciones que el material de prueba. En equilibrio, las ecuaciones de Fourier de flujo de calor aplicadas al sistema son las siguientes:

$$R = \frac{N(T_1 - T_2)}{Q} - R_o \quad (24)$$

Y:

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad (25)$$

Donde:

*R=Resistencia térmica (m<sup>2</sup>K/W)*

*Q=Flujo de calor (W)*

*T<sub>1</sub>=Temperatura en una superficie de la muestra (K)*

*T<sub>2</sub>=Temperatura en la otra superficie de la muestra (K)*

*λ=Conductividad térmica (W/mK)*

*L=Espesor del espécimen (mm)*

*N=Constante de calibración del transductor de flujo de calor*

*R<sub>o</sub>=Resistencia térmica de las placas de contacto (m<sup>2</sup>K/W)*

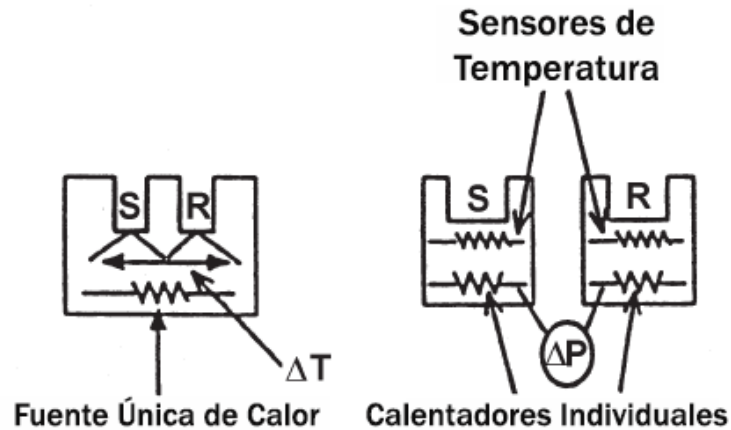
En este caso, si obviamos los valores de N y R<sub>o</sub> por ser constantes, y despejamos λ, e incluimos la consideración del área de contacto (A), llegaremos a la fórmula sumamente similar a la presentada en la normativa ASTM C1045 [122] y mostrada previamente en la sección 3.2 de este documento (Detalles Experimentales):

$$\lambda = \frac{QL}{A(T_1 - T_2)} \quad (26)$$

### 3.3.7 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Desde la invención de la Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) ha habido mucha confusión sobre la diferencia entre el Análisis Térmico Diferencial (DTA) y el DSC. El DTA es una técnica que monitorea la diferencia de temperatura existente entre una muestra y un material de referencia en función del tiempo y/o la temperatura, asumiendo que tanto la muestra como la referencia están sujetas al mismo ambiente a una determinada tasa de calentamiento o enfriamiento. Mientras que el DSC se define como una técnica que registra la energía (en forma de calor) necesaria para obtener una diferencia nula de temperatura entre una muestra y un material de referencia en función del tiempo y/o la temperatura, una vez más, asumiendo que la muestra y el material de

referencia se encuentran en el mismo ambiente y a una determinada tasa de calentamiento o enfriamiento [137].



**Figura 20. Diagramas esquemáticos de configuraciones de análisis térmicos. A la izquierda DTA, a la derecha DSC [137].**

Como podemos en los esquemas de la Figura 20, en ambos análisis la muestra (S) es calentada junto con un material de referencia (R). Las dos principales diferencias entre las dos técnicas son: a) En DTA hay un solo calentador común para la muestra y la referencia, mientras que en DSC la muestra y la referencia tienen sus propios calentadores individuales cada uno y b) En DTA se mide la diferencia de temperatura de las muestras, éstas al estar siendo calentadas por un solo calentador, teóricamente deberían estar a la misma temperatura, las diferencias de temperatura se atribuyen entonces a reacciones endotérmicas o exotérmicas que tenga la muestra, mientras que en DSC lo que se mide es la energía necesaria para mantener las dos muestras a la misma temperatura a pesar de las reacciones exo o endotérmicas que la muestra pueda tener, es decir, DTA mide temperatura y DSC mide energía necesaria para producir calor. Es por esta razón que el calor específico de un material, que es uno de los parámetros de interés en este proyecto, es obtenido por medio de DSC, ya que el calor específico es la cantidad de energía (en forma de calor) que hay que suministrar a una unidad de masa de una sustancia o muestra para que ésta eleve su temperatura en una unidad ( $J/g \cdot K$  o  $J/kg \cdot K$  o  $J/g \cdot C$  o  $J/kg \cdot C$ ).

El calor específico es una propiedad de la materia que expresa cuanta energía se necesita para elevar la temperatura de un material, es decir, cuanto mayor es el valor del

calor específico de un material, más energía calorífica se necesita para incrementar su temperatura. Es un parámetro de interés cuando se habla de materiales con aplicaciones térmicas ya que esto se puede relacionar con la transferencia térmica del material. El valor del calor específico se puede relacionar con la capacidad para absorber calor de un material sólido, sin embargo, la transferencia térmica final del material dependerá también de su porosidad y a su vez de su densidad.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1 Caracterización de Materiales**

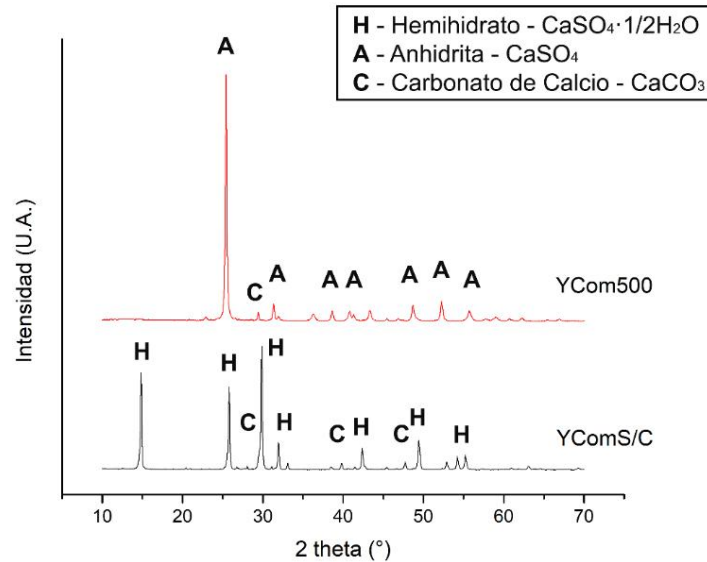
De forma general, la Tabla 9 muestra la composición química y propiedades de los materiales usados como cementantes y como activadores. Las composiciones se estimaron por fluorescencia de rayos X. Las densidades se calcularon mediante la norma ASTM C188 [138] por medio de volumen desplazado de líquido con un matraz Le´Chatelier. Las áreas superficiales se calcularon mediante la norma ASTM C204 [139] por medio de permeabilidad al aire en un aparato Blaine.

**Tabla 9. Composición química en óxidos (% en peso) de los materiales usados.**

| Óxido                            | Material |       |        |        |        |        |        |        |
|----------------------------------|----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                  | AH       | EAH   | MS     | CC     | SiC    | CPO    | CH     | KS     |
| CaO                              | 38.45    | 42.92 | 0.346  | 99.596 | -      | 62.313 | 98.793 | -      |
| SiO <sub>2</sub>                 | 3.243    | 31.66 | 98.996 | -      | 99.969 | 25.365 | 0.391  | -      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 0.478    | 9.644 | -      | -      | -      | 2.614  | 0.108  | -      |
| SO <sub>3</sub>                  | 57.29    | 3.023 | -      | -      | -      | 4.937  | -      | 49.485 |
| K <sub>2</sub> O                 | 0.237    | 0.479 | 0.354  | -      | -      | 1.353  | -      | 50.438 |
| MgO                              | 0.278    | 9.509 | 0.281  | 0.386  | -      | 0.899  | 0.696  | -      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | -        | 0.542 | -      | -      | -      | 2.297  | -      | -      |
| Blaine<br>(cm <sup>2</sup> /g)   | 5810     | 5589  | 145659 | 6825   | 7447   | -      | -      | -      |
| Densidad<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 2.60     | 2.84  | 2.20   | 2.60   | 3.17   | 3.12   | 2.34   | 2.63   |

#### 4.1.1 Sulfato de Calcio

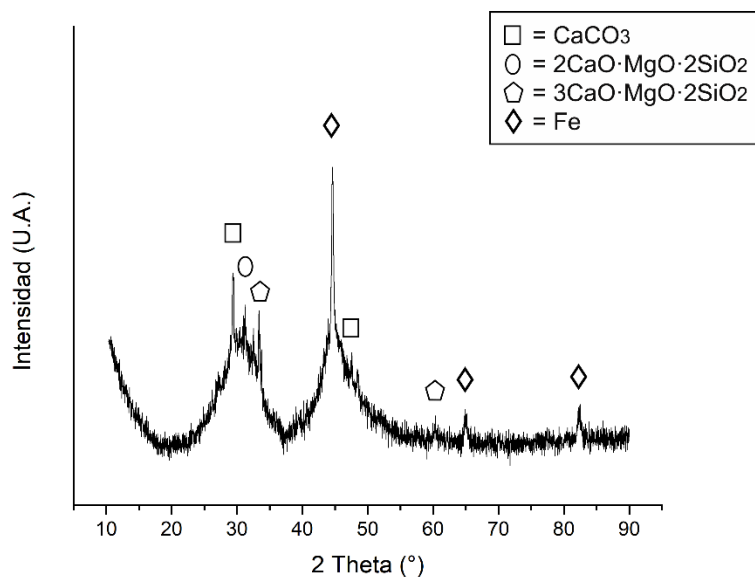
Como fuente de sulfato de calcio se utilizó yeso comercial marca MAXIMO de Yesera Monterrey que contiene hemihidrato como fase reactiva. Posteriormente fue calcinado a 500°C por un periodo de 6 horas para obtener la fase reactiva anhidrita. La presencia de estas fases fue corroborada por medio de análisis de DRX en ambas condiciones, sin calcinar y calcinado a 500°C (Ver Figura 21). Es posible observar también reflexiones características de carbonato de calcio, presente en este caso como impureza en ambas condiciones. La composición química del sulfato de calcio, además de su densidad y área superficial, son presentados en la Tabla 9.



**Figura 21. Fases presentes en el sulfato de calcio (YComS/C=Yeso Comercial sin calcinar; YCom500=Yeso Calcinado a 500°C)**

#### 4.1.2 Escoria de Alto Horno

La escoria de alto horno fue obtenida como subproducto de la industria acerera Arcelor Mittal de Lázaro Cárdenas, Michoacán, México. La Figura 22 exhibe el patrón de DRX de la EAH, donde se observa el grado de estado amorfo representado por el halo ubicado entre los 20 y los 40° 2θ revelando alta reactividad. Se observa también una fase de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) cristalino evidente por las reflexiones visibles que sobresalen de dicho halo. Esta carbonatación pudiera deberse a que la EAH es almacenada al aire libre y se presentaría únicamente en la parte superficial del depósito. Esta fase carbonatada pudiera afectar la reactividad de la escoria al ser una fase poco soluble en agua. También, se observan reflexiones características de fases con MgO como la akermanita (2CaO·MgO·2SiO<sub>2</sub>) y la merwinita (3CaO·MgO·2SiO<sub>2</sub>), fases comúnmente encontradas en escorias básicas [140]. También, se pudo identificar hierro metálico probablemente como contaminante derivado del proceso de molienda, el cual se lleva a cabo con bolas de hierro como carga abrasiva.



**Figura 22. Patrón de DRX de la EAH**

Tomando los valores de composición química de la escoria de alto horno, mostrados en la Tabla 9, los valores de índices de basicidad e hidraulicidad fueron de 1.27 y 1.96 respectivamente, recordando que estos valores tienen que estar por encima de 1 para decir que es una escoria básica y por encima de 1.4 para decir que la escoria muestra potencial hidráulico [140]. Sin embargo, estos índices no consideran el grado de carbonatación mostrado en los análisis de DRX ni el tamaño de partícula, el cual es también un factor importante en la reactividad de una escoria. El índice de basicidad (27) y el índice de hidraulicidad (28) se calcularon por medio de las siguientes expresiones [140]:

$$P = \frac{C + M}{S + A} \quad (27)$$

$$F = \frac{C + M + A}{S} \quad (28)$$

*Donde:*

*P=Índice de Basicidad*

*F=Índice de Hidraulicidad*

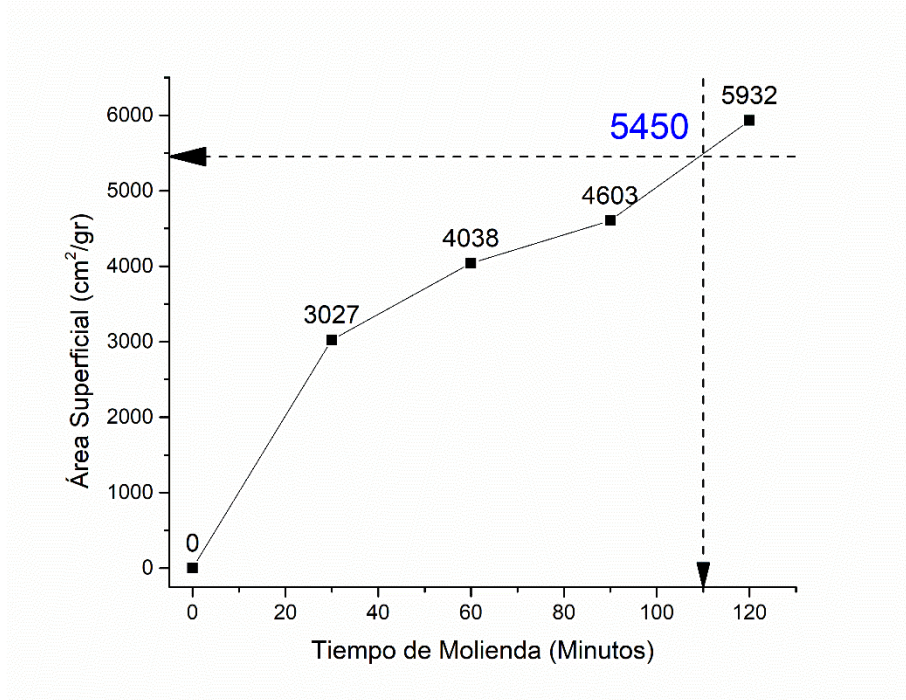
*C=Contenido de Calcio en %*

*M=Contenido de Magnesio en %*

*S=Contenido de Silicio en %*

*A=Contenido de Aluminio en %*

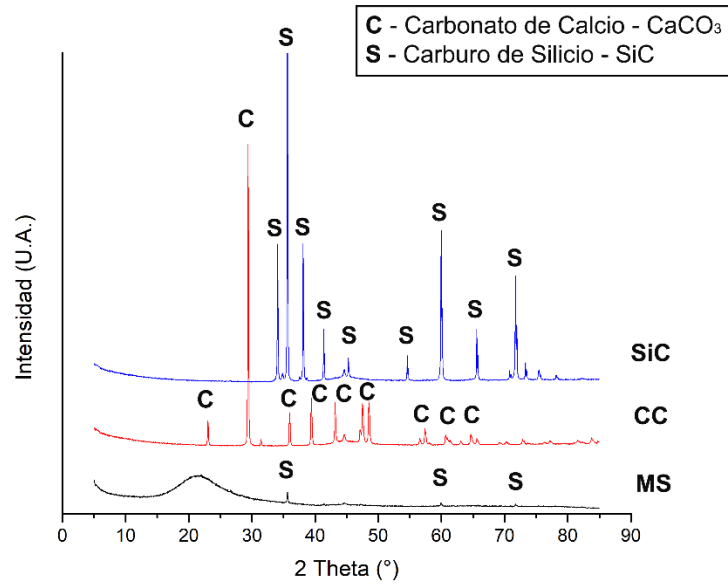
En cuanto al parámetro de la finura, la EAH requiere ser molida para ser utilizada como material cementante. La molienda mejora la reactividad de la EAH al aumentar su área superficial, con lo cual se aumenta su disolución al entrar en contacto con el agua. De acuerdo a la norma ASTM C989 [33], la escoria de alto horno, para ser utilizada en combinación con cemento Portland, debe tener una finura por debajo de las 45 micras, mientras la Asociación del Cemento Portland (PCA por sus siglas en ingles), sugiere un área superficial entre 4000 – 6000 cm<sup>2</sup>/gr [34]. Por lo tanto, se propuso la realización de 4 moliendas con una diferencia de media hora entre sí (Ver Figura 23), en un molino de rotación planetaria, con una carga abrasiva de 60 kg para un lote de 4 kg de EAH. De esta forma se determinó un tiempo de molienda de 110 minutos, con un resultado esperado de aproximadamente 5450 cm<sup>2</sup>/gr de área superficial. El valor real obtenido se muestra en la Tabla 9.



**Figura 23. Estimación del tiempo de molienda para la EAH**

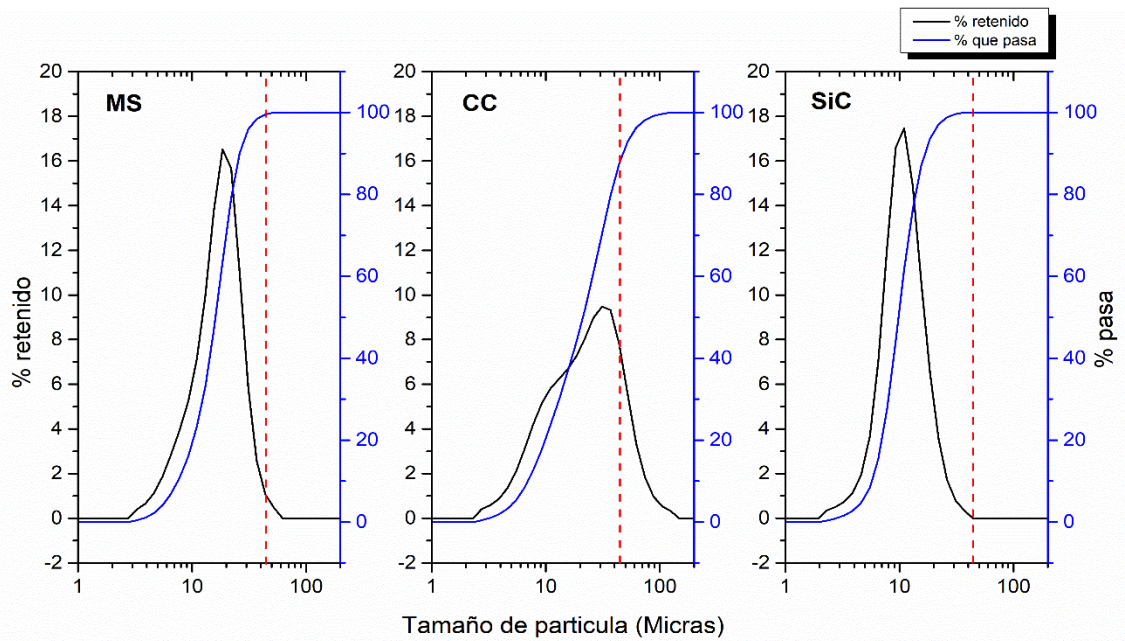
#### 4.1.3 Microsílice, Carbonato de Calcio y Carburo de Silicio

Se utilizó microsíllice (MS) no densificada marca Norchem, carbonato de calcio (CC) en polvo grado reactivo marca Jalmek y carburo de silicio (SiC) en polvo de reactivos Panadyne. Se comprobaron las fases presentes en cada uno de ellos por medio de análisis DRX (Ver Figura 24). Es posible visualizar el grado de amorficidad en la estructura de la microsíllice en comparación con los otros dos materiales, evidente por las escasas reflexiones visibles, únicamente algunas apenas apreciables de carburo de silicio, probablemente como impureza. El resto de compuestos presentes en la microsíllice no son identificables debido a que se encuentran en estado amorfo y no muestran ángulos de difracción característicos, pero según el fabricante, el material es mínimo 93% de SiO<sub>2</sub>.



**Figura 24. Fases presentes en la microsílíce, carbonato de calcio y carburo de silicio**

Es importante resaltar el tamaño de partícula del microsílíce, el carbonato de calcio y el carburo de silicio, ya que estos serán comparados como materiales para controlar la formación de etringita en la etapa experimental 1. Como muestra la Figura 25, los 3 materiales presentan más del 90% de sus partículas por debajo de las 45 micras (línea color rojo), superando así los requerimientos de tamaño de partícula que marca la normativa para el uso de microsílíce en mezclas cementantes [111].



**Figura 25. DTP de microsilíce (MS), carbonato de calcio (CC) y carburo de silicio (SiC).**

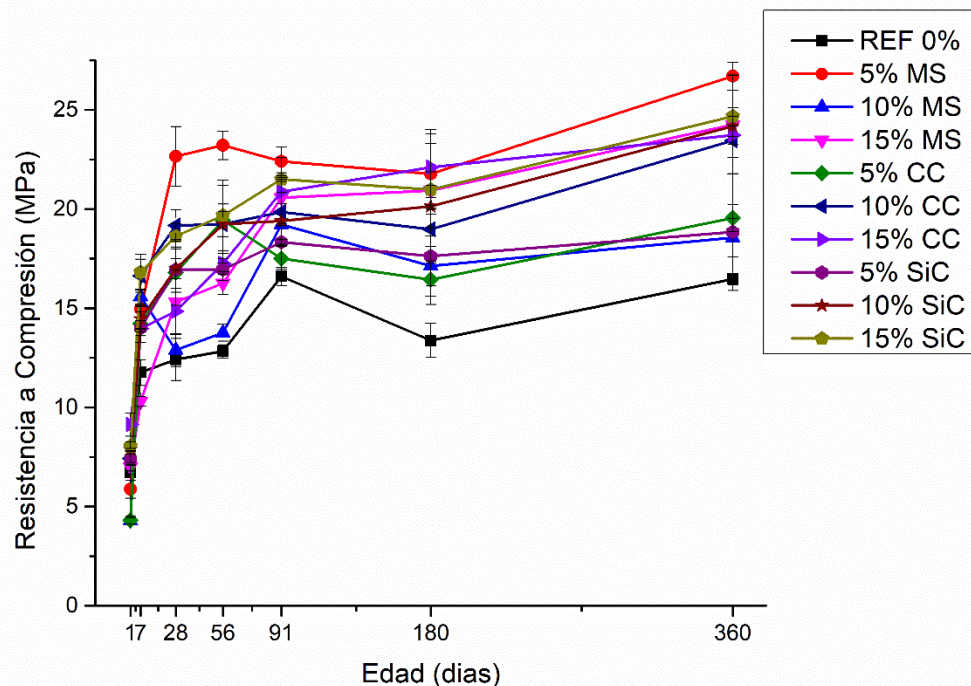
#### 4.2 Etapa Experimental 1. Formación de Etringita

La principal variable de consideración en esta etapa experimental, fue la adición de distintos polvos finos a la mezcla ya establecida de AH-EAH. Existen evidencias que establecen el beneficio del uso de microsilíce como tercer constituyente en mezclas base AH-EAH, principalmente al disminuir los efectos negativos de la formación de etringita [10,11]. Sin embargo, el mecanismo por el cual funciona este constituyente no ha sido claramente definido.

La microsilíce en México es considerada como un material costoso, por esta razón, se propuso la utilización, y posteriormente la sustitución de microsilíce por polvos de carbonato de calcio y carburo de silicio. Elaborando sistemas base Anhidrita – Escoria de Alto Horno, adicionando desde un 5% hasta un 15% de MS, CC o SiC, como ya se mencionó en la sección 3.2 de este documento (Detalles Experimentales) en la Tabla 7. La comparación entre estos sistemas aportaría información para definir el mecanismo por el cual la microsilíce logra disminuir los efectos negativos de la etringita, además de evidenciar si es posible la sustitución de la microsilíce por algún otro polvo.

#### 4.2.1 Comportamiento Mecánico

En cuanto a los resultados de resistencia a compresión, independientemente del material adicionado y la cantidad, todos resultaron en la mejora de esta propiedad. En la Figura 26 se puede observar como el sistema de referencia, a pesar de estar ligeramente por encima de algunos sistemas en edades tempranas, a partir de los 28 días se ve claramente por debajo de los demás. A los 28 días, todos los sistemas habían superado los 12 MPa, siendo el de referencia el más bajo con 12.42 MPa. Al mismo tiempo, el sistema con 5% microsílíce había superado ya los 22 MPa. El sistema que claramente sobresale de los demás en cuanto a resistencia a compresión es el que contiene 5% MS, el cual se mantuvo por encima de todos los demás durante la mayor parte del periodo de estudio.

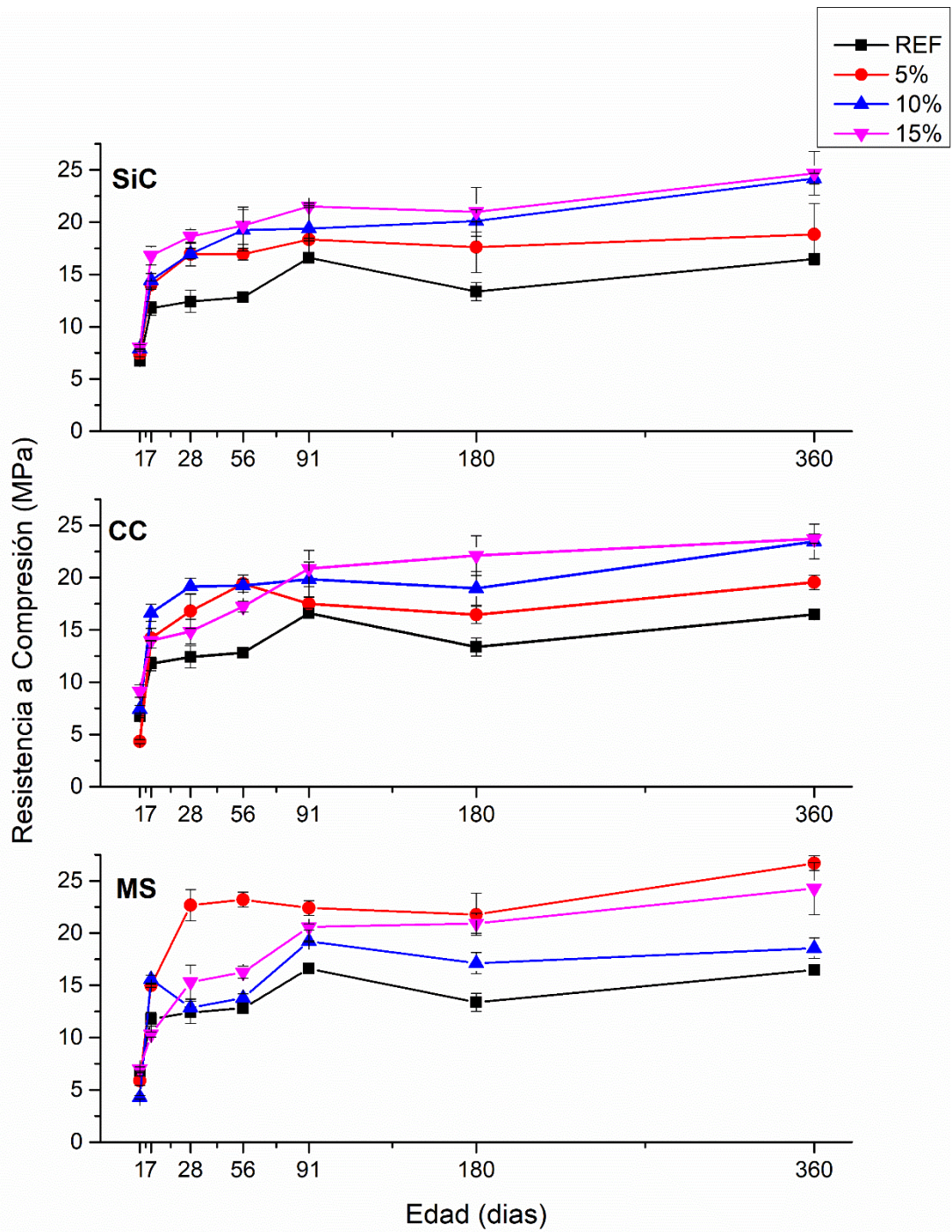


**Figura 26. Resistencia a compresión de los sistemas AH-EAH con distintos materiales para disminuir la formación de etringita**

Al comparar entre sistemas similares, a mayor adición del tercer constituyente, la resistencia a compresión aumenta debido a un efecto de empaquetamiento por el tamaño fino de las partículas del material adicionado. Sin embargo, en el caso de los que contienen

microsílice, el de menor contenido (5% MS) se mantuvo por encima de los demás (Ver Figura 27), esto es debido a que al adicionar microsíllice en sistemas base sulfato de calcio, ésta interfiere en la hidratación de la anhidrita para formar yeso [10,17]. Esto es comprobado por los análisis de DRX mostrados más adelante (Figura 29). Por esta razón, en estos sistemas tenemos dos fenómenos, por un lado, un efecto de empaquetamiento y densificación debido al tamaño de partícula tan bajo de la microsíllice, y, por otro lado, entre mayor es la adición de MS, mayor sería la cantidad de sulfato de calcio sin hidratar. Mantener un contenido bajo de MS, parece aportar un buen balance entre ambos fenómenos, aportando densificación y sin afectar considerablemente la formación de yeso.

En los sistemas con CC y SiC, no hay una diferencia considerable entre ellos (Ver Figura 27). Esto permite pensar que no hay una reacción entre estos materiales y la matriz cementante, al menos no una que aporte resistencia, incluso menos del SiC ya que es un material altamente estable. El único aporte de estos materiales parece ser en función del empaquetamiento. Sin embargo, la MS sí pudiera estar reaccionando puzolanicamente con el  $\text{Ca(OH)}_2$  para formar C-S-H.



**Figura 27. Resistencia a compresión de los sistemas AH-EAH con MS (inferior), CC (medio) y SiC (superior).**

La diferencia de dureza entre los materiales adicionados (MS, CC y SiC) parece no tener un efecto significativo en la resistencia a compresión de los sistemas, a pesar de

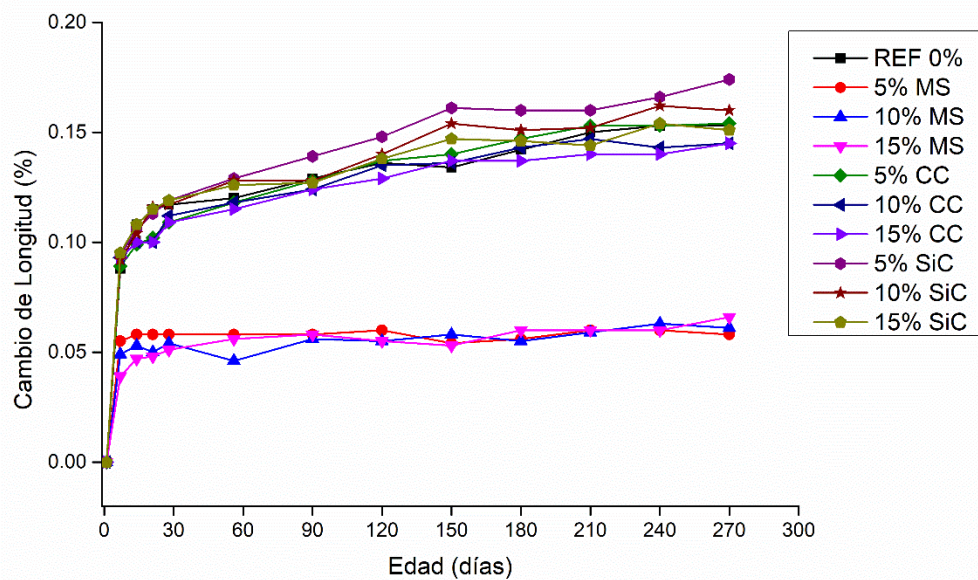
tener capacidades de dureza muy diferentes entre sí, con un valor de 7 para la MS, 3 para el CC y 9 para el SiC, de acuerdo a la escala de Mohs. Esto es evidenciado al hacer una comparativa entre los sistemas que tienen CC y los que tienen SiC, los cuales muestran un comportamiento muy similar en resistencia a compresión, a pesar de la amplia diferencia de dureza entre ellos.

#### **4.2.2 Estabilidad Dimensional**

En cuanto al comportamiento dimensional, sí se logra ver una tendencia clara. Como vemos en la Figura 28, los tres sistemas que contienen microsílíce se mantienen muy por debajo de los demás, sin superar el 0.06% de expansión a los 270 días, mientras que todos los demás sistemas ya superaban el 0.11% desde los 56 días. Los tres sistemas que contienen carbonato de calcio muestran una disminución del porcentaje de expansión con respecto a la referencia de aproximadamente 0.01% a los 21 días, sin embargo, esta diferencia se anula con el paso del tiempo llegando a desaparecer completamente a los 150 días por los tres sistemas. Los tres sistemas que contienen carburo de silicio, prácticamente no presentan cambios con respecto a la referencia incluso se colocan por encima de ésta desde los 56 días en adelante.

Es evidente la diferencia entre el uso de microsílíce y el uso de cualquiera de los otros dos materiales propuestos. Esto puede ser atribuible a dos factores principalmente, siendo uno de ellos el efecto de empaquetamiento debido a la diferencia en la forma y tamaño de sus partículas, ya que a pesar de que tanto el CC como el SiC cumplen con el tamaño sugerido por la norma para el uso de MS en cementos [111], en los resultados mostrados en la Tabla 9 se observa que hay una diferencia considerable en cuanto a área superficial. Esta diferencia está en función no solo del tamaño de partícula, sino también de la distribución de tamaños y de la morfología de las partículas.

Además, la técnica de determinación de tamaños de partícula tiene limitaciones en el análisis de partículas altamente finas, derivando en la detección de aglomeraciones como si fueran una sola partícula. Esto permite suponer que el tamaño de partículas real de la MS es muy inferior al de los otros dos materiales, por lo cual su efecto en cuanto a empaquetamiento y densificación de la matriz es mayor.



**Figura 28. Cambios de longitud de los sistemas AH-EAH con distintos materiales para disminuir la formación de etringita**

El otro factor al que se puede atribuir la diferencia entre el uso de MS y cualquiera de los otros dos materiales propuestos (CC o SiC), es que la cinética de la formación de etringita en estos sistemas se ve influenciada por la presencia de la MS. Según Mehta y Telesca [141–143], la etringita puede aparecer en forma de cristales largos, de 10-100 micras, o cristales pequeños, de 1-2 micras, siendo estos últimos los más perjudiciales para las propiedades mecánicas de una matriz endurecida. La aparición de uno u otro tipo de etringita, según estos autores, depende de la disponibilidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en la solución de poro o del grado de saturación de la misma y del índice de nucleación de la etringita.

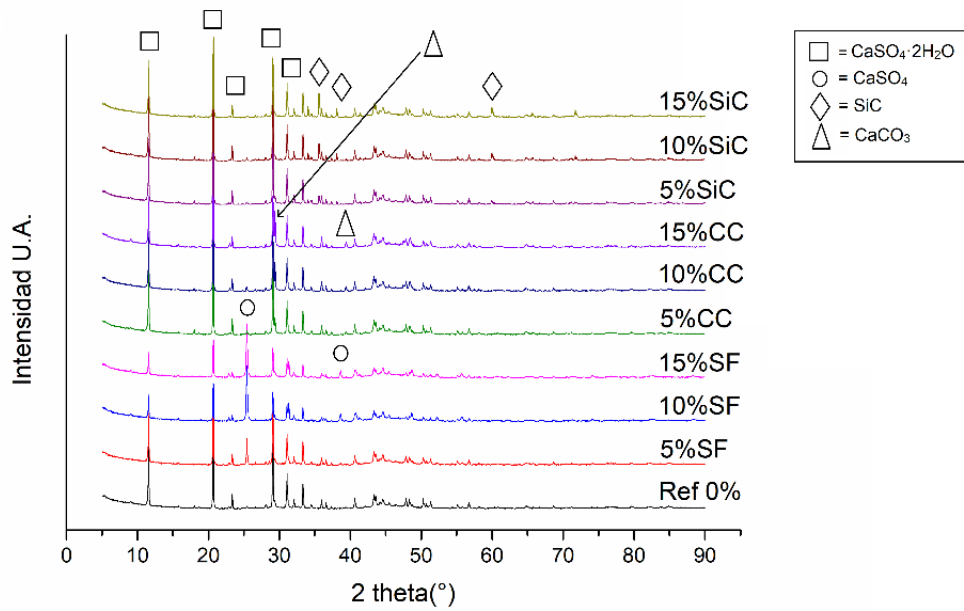
La MS al estar reaccionando parcialmente con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  disponible, alteraría la disponibilidad de éste, generando la formación de pocos puntos de nucleación de la etringita y a su vez disminuyendo los efectos expansivos de la misma. De manera distinta, ni el CC ni el SiC se consideran reactivos con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , siendo su efecto meramente

físico, mejorando el factor de empaquetamiento de la matriz cementante y su resistencia a compresión, no así su estabilidad dimensional.

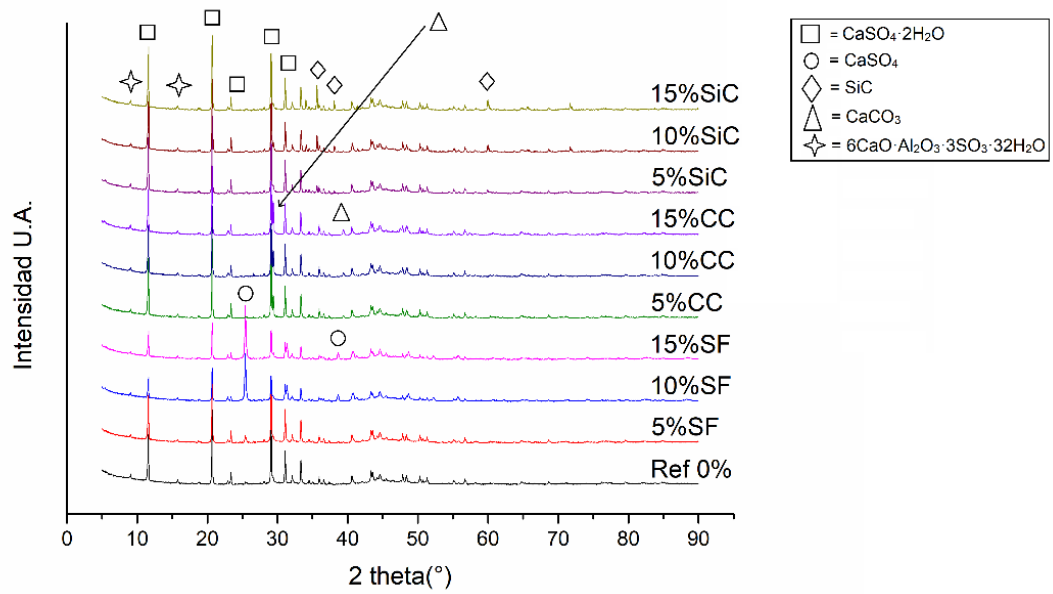
#### **4.2.3 Composición Mineralógica**

En los análisis por DRX se observaron las principales fases presentes en los compuestos. Se observan las reflexiones características de yeso dihidratado a  $11.63^\circ$ ,  $20.73^\circ$  y  $29.12^\circ$  ( $2\theta$ ) principalmente (Figura 29). Una constante en el comportamiento de los sistemas fue que las reflexiones de la etringita se volvieron más intensas con el paso del tiempo, ya que la presencia de etringita, con sus reflexiones características a  $9.09^\circ$  y  $15.77^\circ$  ( $2\theta$ ), no es claramente visible a 1 día de curado, pero sí lo es a los 28 días de curado (Figura 30).

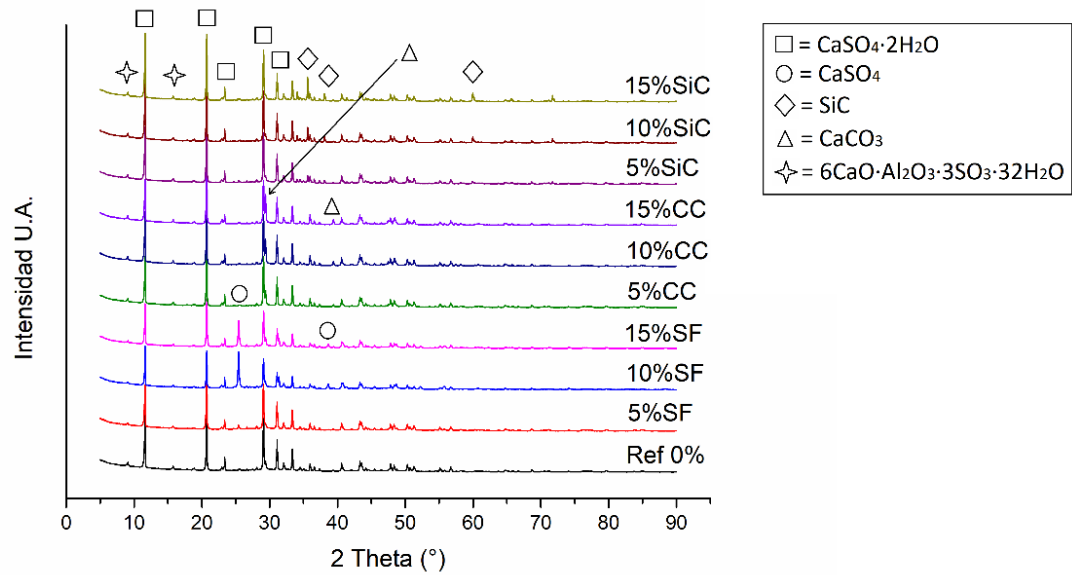
Las reflexiones características de anhidrita a  $25.4^\circ$  y  $38.61^\circ$  ( $2\theta$ ), son visibles particularmente en los sistemas que contienen microsílíce. A su vez, las reflexiones del yeso dihidratado son menos intensas en los sistemas donde son visibles las reflexiones de anhidrita, dando evidencia de que la MS interfiere en la hidratación del sulfato de calcio (Figura 31), al reaccionar con el  $\text{Ca(OH)}_2$  adicionado originalmente como activante de la reacción de la anhidrita para formar yeso. Las reflexiones del CC y SiC son visibles en los sistemas que cuentan con su adición. Sin embargo, en los que tienen adición de MS no es posible ver reflexiones de la misma, debido a que su estructura es mayormente amorfa.



**Figura 29. DRX de sistemas a 1 día de curado**



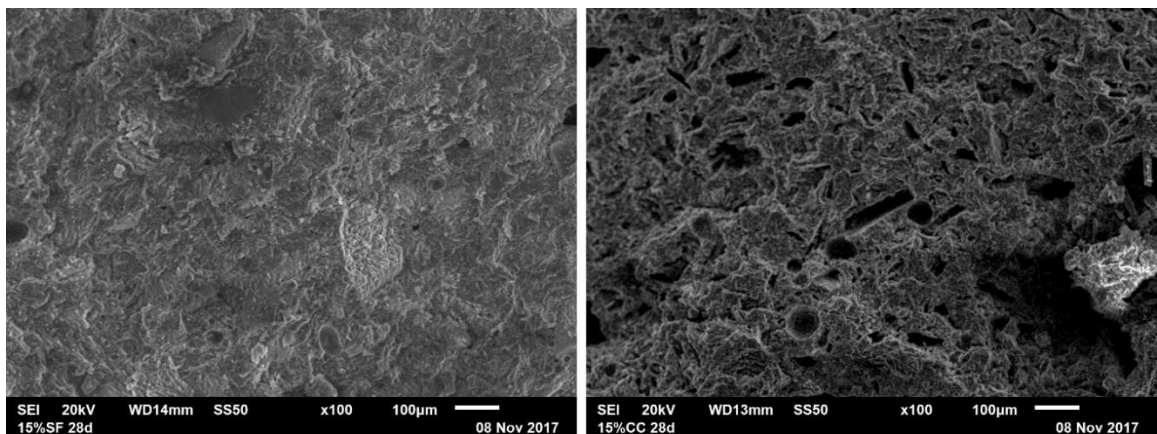
**Figura 30. DRX de sistemas a 28 días de curado**



**Figura 31. DRX de sistemas a 180 días de curado**

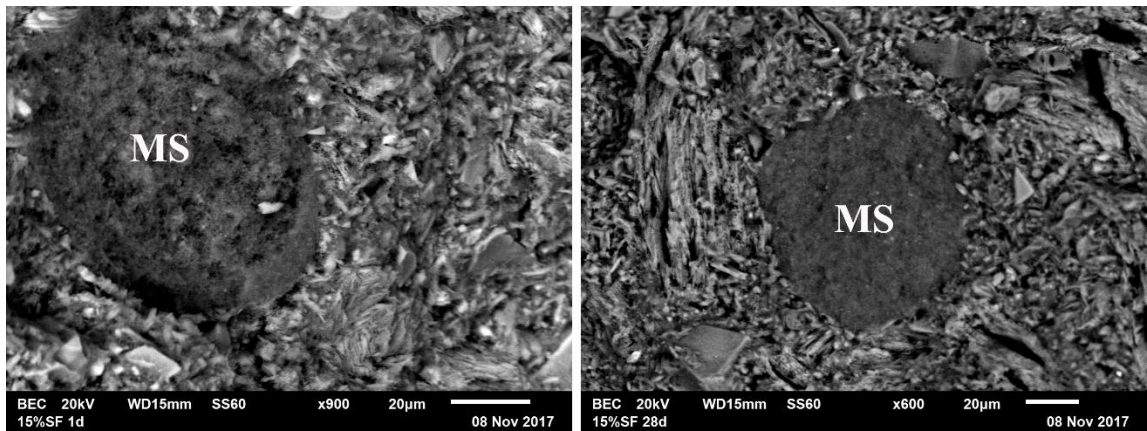
#### 4.2.4 Microestructura

En un análisis por microscopía electrónica de barrido de las muestras a fractura con el detector de electrones secundarios, se logró determinar que los sistemas con microsílíce aparentan una estructura mayormente compacta al ser comparada con los demás sistemas, como se observa al comparar las imágenes de la Figura 32.



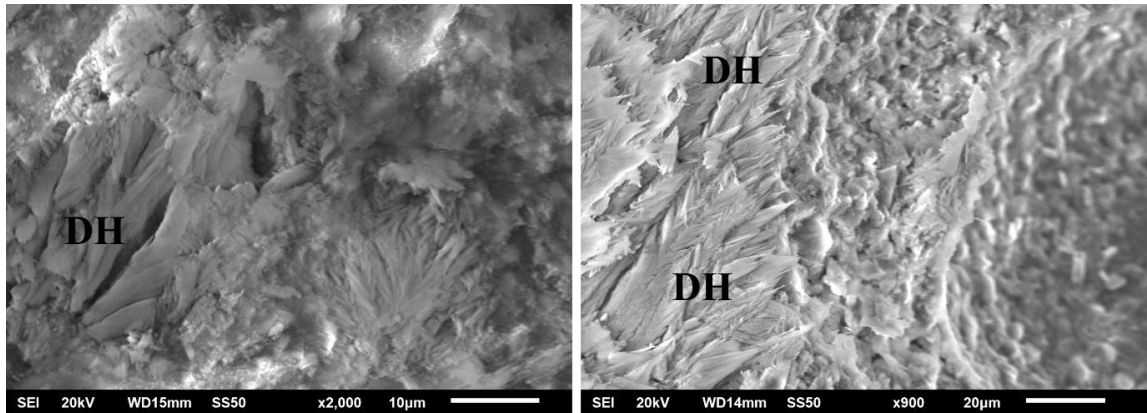
**Figura 32. Micrografías de sistemas con 15% microsílíce (izquierda) y 15% carbonato de calcio (derecha) a 28 días.**

También, en estos sistemas se lograron ver aglomeraciones de microsílíce, con el detector de electrones retrodispersados, tanto a 1 como a 28 días (Ver Figura 33). Esto pudiera ser un indicativo de que la microsílíce no está reaccionando en su totalidad. Probablemente este reaccionando parcialmente con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el resto permanece sin reaccionar, como se ve en la micrografía, funcionando como un filler altamente fino, aportando una densificación de la matriz cementante. En el caso del CC y el SiC, no fue posible localizarlos en los análisis por MEB. Al no tratarse de partículas tan finas, la tendencia a aglomerarse es menor, haciendo más difícil ubicarlos en las micrografías.

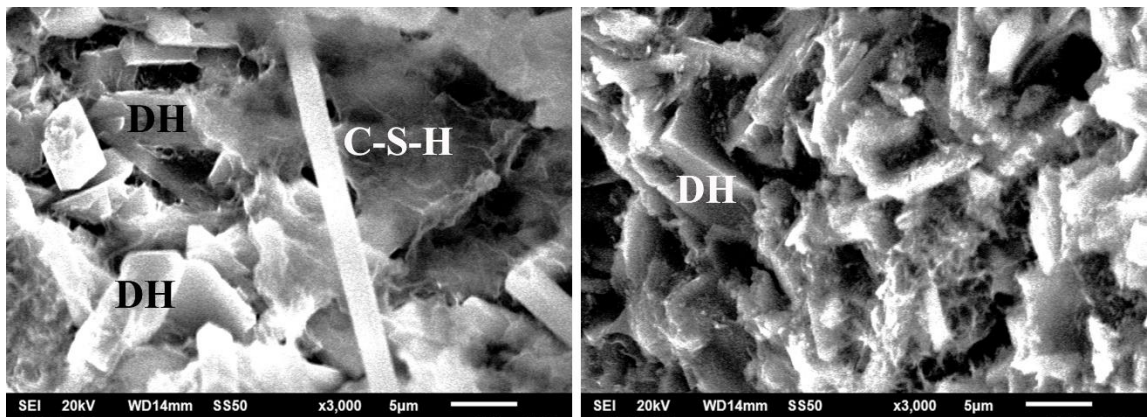


**Figura 33. Aglomeraciones de partículas de microsílíce en los sistemas 15% MS a 1 día (izquierda) y 28 días (derecha).**

En conformidad con los análisis de composición mineralógica, se lograron observar los principales productos de reacción como cristales de yeso dihidratado bien definidos y aglomerados en los sistemas con 15 % MS (Figura 34). Se observó la presencia de lo que parece ser el gel C-S-H en distintos sistemas (Figura 35), mostrándose como una especie de “telaraña” recubriendo los cristales de yeso y formando una estructura entremezclada de ambas fases [17,36], lo que conferiría la resistencia a la humedad al yeso.

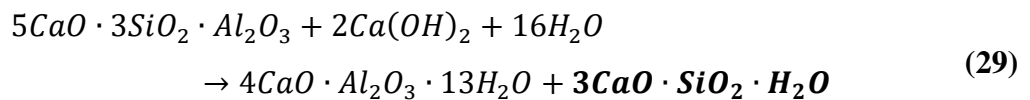


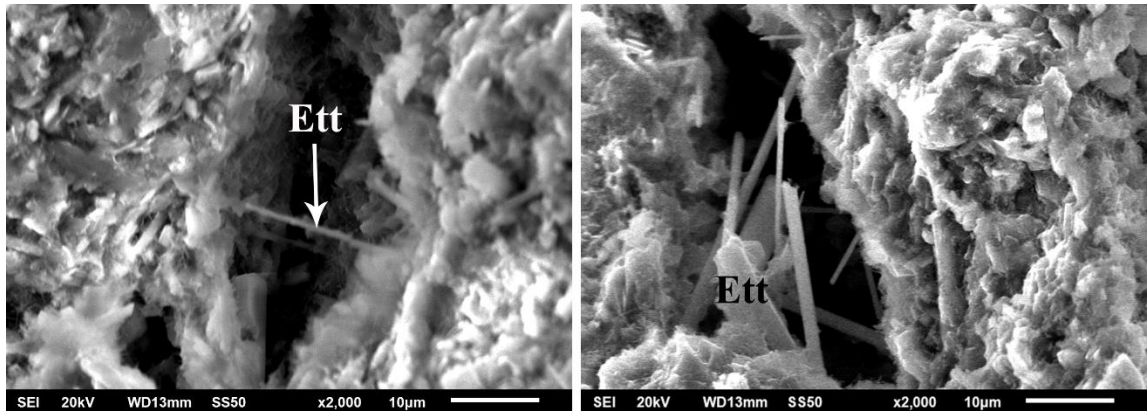
**Figura 34. Cristales de yeso dihidratado (DH) visibles en los sistemas 15% MS**



**Figura 35. C-S-H recubriendo los cristales de yeso (DH).**

La formación de C-S-H a partir de la activación de escorias de alto horno, ha sido propuesta por otros autores [36]. Una aproximación a una fórmula estequiométrica sería de acuerdo a la ecuación (29), donde la escoria de alto horno aporta el calcio, silicio y aluminio, los cuales, en un ambiente alcalino, se hidratan para formar aluminatos y silicatos de calcio hidratados.





**Figura 36. Cristales de etringita (Ett) visibles en los sistemas 15% CC.**

Finalmente, se observaron cristales de etringita, principalmente en los huecos donde se encontraría el espacio para nuclear y comenzar la formación de los cristales, en los sistemas 15% CC (Figura 36). A pesar de la aparición de etringita, no se observaron agrietamientos ni desprendimientos de material, incluso a los 360 días de curado. Sin embargo, si se notan sus efectos en la estabilidad dimensional de los sistemas sin MS, con expansiones de cerca del 0.15% (Ver Figura 28).

#### **4.2.5 Resumen de Resultados, Etapa Experimental 1**

Los efectos benéficos de la adición de MS en sistemas base AH-EAH quedaron evidenciados tanto en los resultados de resistencia a compresión como en los cambios de longitud. En los cambios de longitud, los sistemas que contenían MS se mantuvieron por debajo del 0.06% de expansión, mientras que los sistemas, independientemente si contenían CC o SiC, superaron el 0.11% de expansión desde los 56 días sin importar la cantidad de adición de CC o SiC.

Las reflexiones características de anhidrita son visibles particularmente en los sistemas que contienen microsílíce. A su vez, las reflexiones características del yeso dihidratado son menos intensos en los sistemas donde son visibles las reflexiones de anhidrita, dando evidencia de que la MS interfiere en la hidratación del sulfato de calcio (Figura 31), al reaccionar con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  adicionado originalmente como activante de la reacción de la anhidrita para formar yeso.

El sistema que mostró el mejor desempeño en cuanto a resistencia a compresión fue el de 5% MS, superando los 22 MPa a los 28 días de curado. Sin embargo, al aumentar la adición de MS, la resistencia a compresión se vio afectada debido a que la MS interfiere con la hidratación de la AH para formar yeso [10,17], como se muestra en los análisis por difracción de rayos X. Por lo tanto, se notan dos fenómenos presentes que afectan directamente a la resistencia a compresión de estos sistemas, por un lado, un efecto de empaquetamiento y densificación debido al tamaño de partícula de la MS y por otro lado la cantidad de sulfato de calcio sin hidratar debido a la adición de la MS.

Por medio de análisis por MEB, se lograron observar los principales productos de reacción como cristales de yeso dihidratado, además de la presencia del gel C-S-H en distintos sistemas, recubriendo los cristales de yeso y formando una estructura entremezclada de ambas fases [17,36], lo que conferiría la resistencia a la humedad al yeso. Finalmente, se observaron cristales de etringita, principalmente en los huecos donde se encontraría el espacio para nuclear y comenzar la formación de los cristales. A pesar de la aparición de etringita, no se observaron agrietamientos ni desprendimientos de material, incluso a los 360 días de curado. Sin embargo, si se notan sus efectos en la estabilidad dimensional de los sistemas sin MS, con expansiones de cerca del 0.15%.

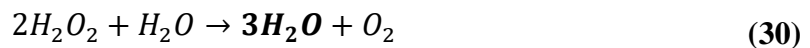
### **4.3 Etapa Experimental 2. Sistemas Aireados**

Se adicionaron agentes aireantes a las mezclas base AH-EAH activados alcalinamente, similares al sistema de referencia de la etapa experimental 1, para determinar su efecto en las propiedades mecánicas y térmicas en los sistemas. Variando los contenidos de los aireantes se lograron obtener sistemas con 3 densidades diferentes previamente propuestas (1200, 1000 y 800 kg/m<sup>3</sup>). La relación agua/sólidos fue elevada a 0.5 para facilitar el llenado de los moldes y no tener que compactar, y así evitar la pérdida de aire atrapado.

De igual manera, en la etapa anterior se evidenció el beneficio de la adición de MS a los sistemas, y se decidió seguir contando con esa adición en esta etapa, esto debido a la incógnita de si la adición de MS sigue teniendo algún efecto en matrices altamente porosas

por la acción de un aireante. Los principales parámetros de interés en esta etapa fueron la resistencia a compresión, la densidad aparente y la transferencia térmica de las muestras.

Al tratarse de dos aireantes distintos, uno en polvo y el otro líquido, el proceso de adición y mezclado tuvo que ser ajustado para cada uno de ellos. En el caso de los sistemas con polvo de aluminio, el aluminio se consideró dentro de los materiales sólidos de la mezcla, requiriendo ajustar la cantidad de agua para mantener la relación agua/sólidos constante. Su adición fue junto con los materiales cementantes en el tiempo de “absorción de agua” de acuerdo a la norma ASTM C305 [117]. Por su parte, para los sistemas con peróxido en líquido, la adición del peróxido fue en combinación con el agua de mezcla y se consideró la cantidad de agua que aportaría el peróxido después de liberar el oxígeno en forma de gas, de acuerdo a la siguiente reacción:

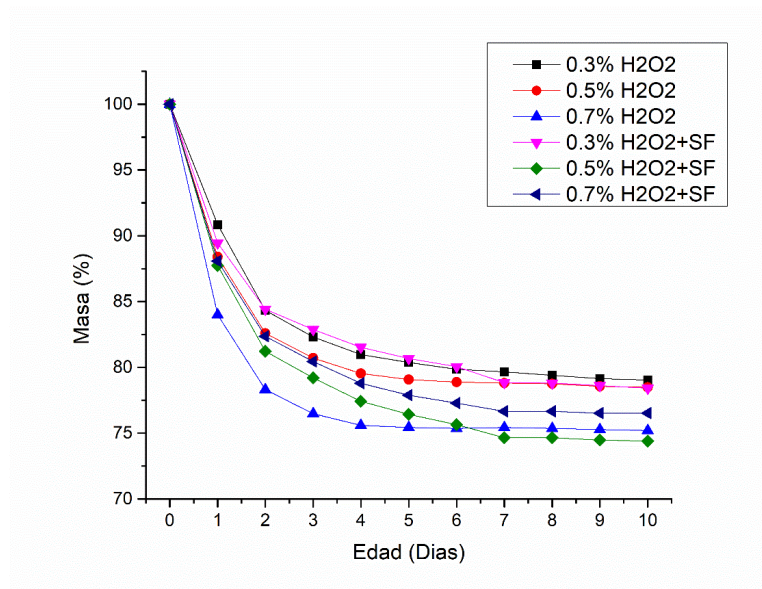


#### 4.3.1 Densidad

Debido a que la medición de la densidad aparente se ve afectada por la cantidad de agua dentro de la porosidad de la matriz cementante, se tuvo que definir el tiempo y las condiciones para realizar las mediciones. Secar al horno las muestras no sería viable debido a que el calor afectaría considerablemente la matriz cementante, incluso eliminando no solo el agua libre, sino también el agua químicamente ligada a los compuestos hidratados. Por esta razón, se llevaron a cabo mediciones diarias de pérdida de masa en cubos de 2 pulgadas por lado, elaborados con los distintos sistemas aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> durante un periodo de 10 días, posteriores a un curado en inmersión total en agua durante 72 horas, en condiciones de ambiente interior a 23°C.

Los resultados de esto son mostrados en la Figura 37 donde se observa que la pérdida de masa en los 3 primeros días en todos los sistemas supera el 17%, siendo el sistema de 0.7% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> el que registra la mayor pérdida, cercana al 23%. Esto resulta coherente considerando que estos sistemas son los de mayor contenido de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, es decir, los que registrarían una mayor porosidad y por consiguiente una mayor capacidad de absorción de agua. Durante los 7 días posteriores las pérdidas de masa continuaron, sin

embargo, no llegaron a ser mayores al 4% en ningún sistema, además, la pendiente de la curva tiende claramente hacia la estabilización.

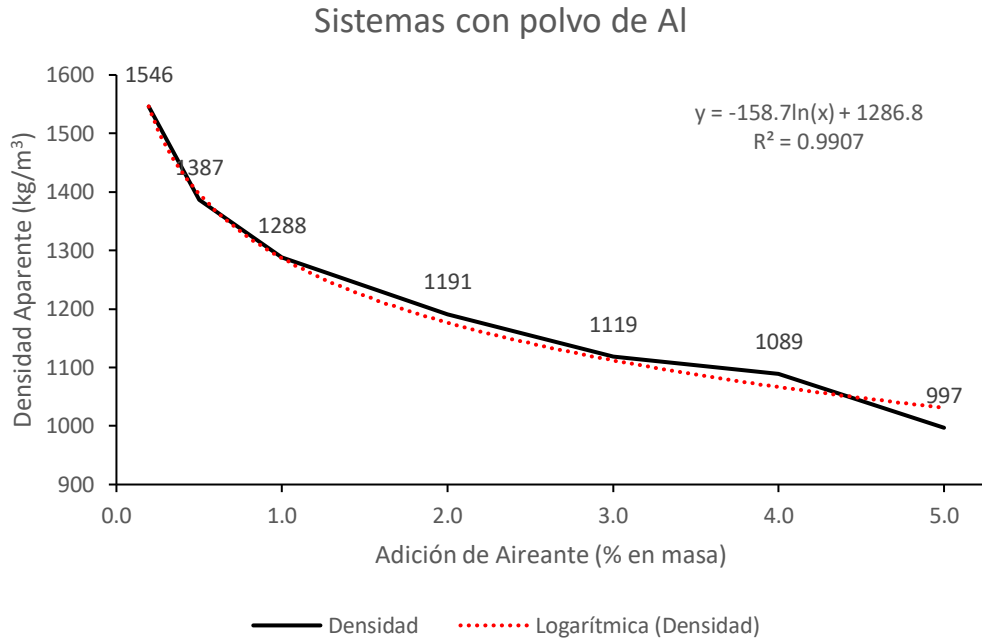


**Figura 37. Pérdida de masa de sistemas aireados con respecto al tiempo**

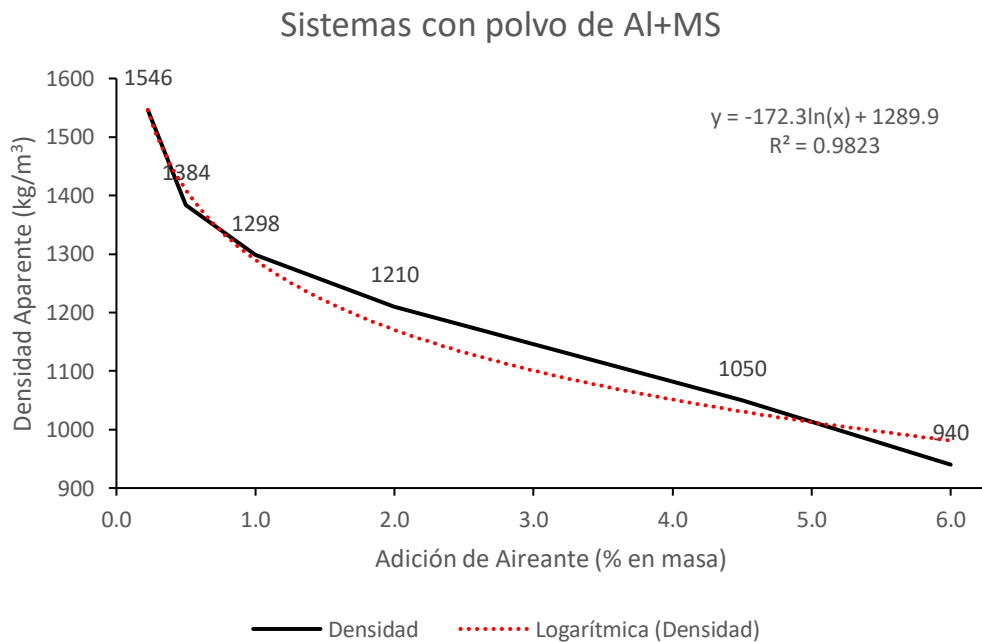
Con base en estos resultados, se definió que transcurridos 3 días en las condiciones mencionadas sería el tiempo adecuado para tomar la lectura de la densidad aparente, ya que la posterior pérdida de masa es considerada mínima. De esta forma, para todos los sistemas y para todas las edades de ensaye a compresión, se tomaron lecturas de densidad en muestras que se mantuvieron en condiciones de ambiente interior a 23°C durante 3 días.

#### 4.3.2 Contenido de Aireante

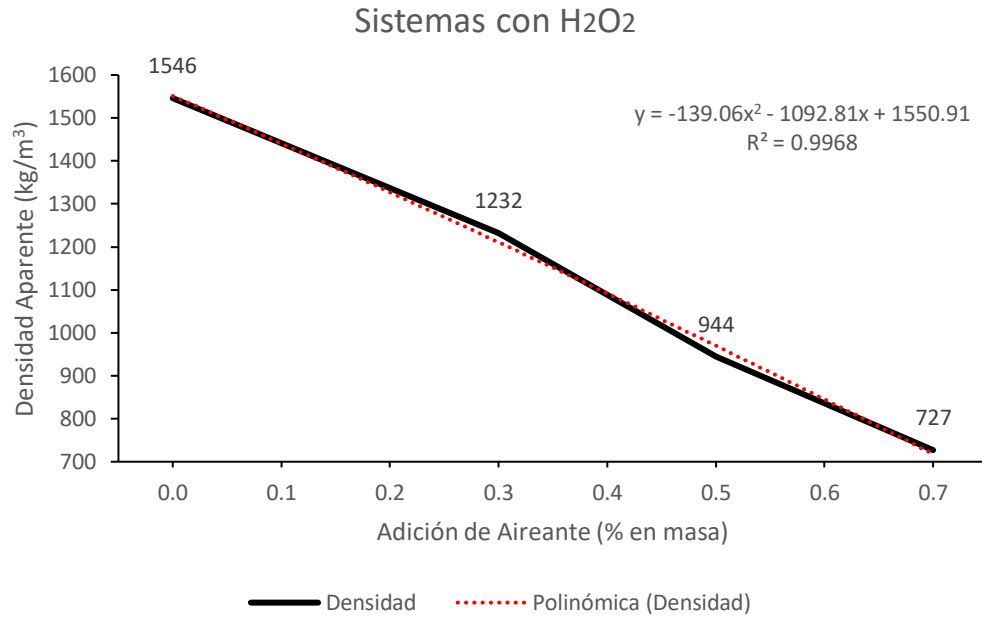
Se elaboró un estudio del comportamiento de la densidad en relación con el contenido de los agentes aireantes para determinar la cantidad de aireante necesario para obtener la densidad deseada para cada uno de los sistemas. Como se observa en las siguientes figuras, el comportamiento es diferente dependiendo del aireante utilizado. En el caso de los sistemas con polvo de aluminio (Ver Figura 38 y Figura 39) la línea de tendencia obtenida obedece a una ecuación logarítmica, mientras que en los sistemas con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Ver Figura 40 y Figura 41) la línea de tendencia obtenida obedece a una ecuación polinómica.



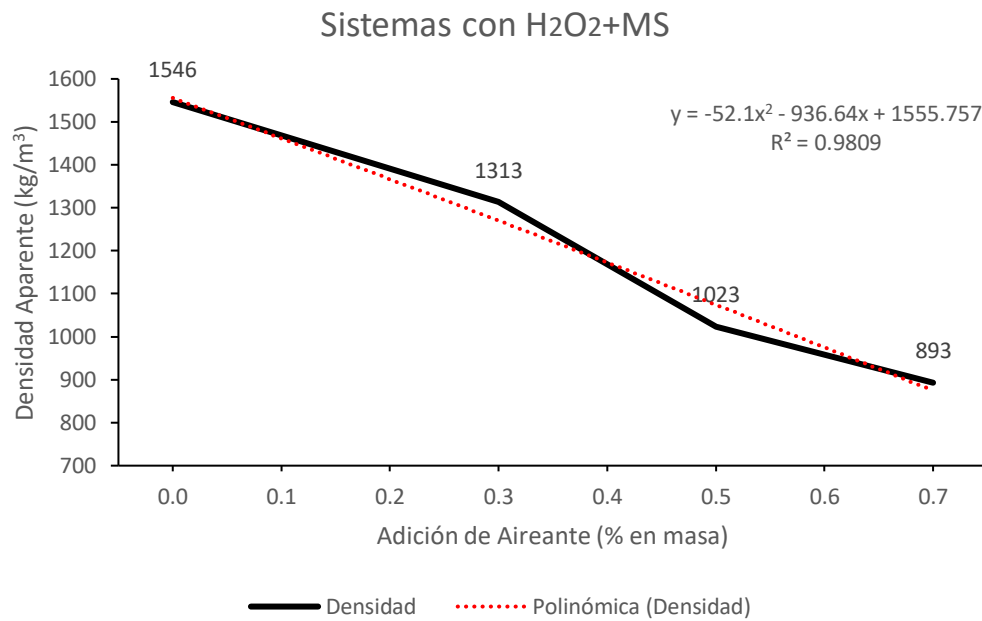
**Figura 38. Comportamiento de la densidad en función de la cantidad de aireante para sistemas con polvo de aluminio**



**Figura 39. Comportamiento de la densidad en función de la cantidad de aireante para sistemas con polvo de aluminio + microsílíce**



**Figura 40. Comportamiento de la densidad en función de la cantidad de aireante para sistemas con peróxido**



**Figura 41. Comportamiento de la densidad en función de la cantidad de aireante para sistemas con peróxido + microsílíce**

De esta manera, fue posible determinar la cantidad aproximada de aditivo aireante para lograr la densidad aparente deseada. De acuerdo con la línea de tendencia, el comportamiento de la densidad aparente en los sistemas con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, ya sea con MS o sin MS, muestran un comportamiento cuasi lineal, en función de la cantidad de aireante adicionado. Mientras que, en los sistemas aireados con Al, la afectación de la densidad en función de la adición de aireante es muy severa, es decir, con una baja adición de aireante disminuye considerablemente la densidad. Sin embargo, la línea de tendencia posteriormente sigue un comportamiento que tiende a la horizontalidad, volviéndose cada vez más difícil seguir disminuyendo la densidad y requiriendo cada vez una mayor adición de aireante para continuar con dicha disminución. Por esta razón se decidió no llegar a los 800 kg/m<sup>3</sup> con polvo de Al, debido a que la demanda de éste para llegar a esa densidad ya era demasiado alta. En los sistemas que contienen MS, independientemente del aireante, fue necesario una mayor adición de éste para llegar a la densidad deseada, probablemente por el mismo efecto de empaquetamiento que genera el tener un material tan fino ocupando los espacios vacíos mencionado en la etapa experimental anterior.

### 4.3.3 Porosidad

En términos generales, la porosidad es una medida de los espacios vacíos en un sólido, comúnmente expresada numéricamente por un número entre 0 y 1, o como un porcentaje. Existe una relación lineal entre la porosidad y la densidad aparente en sólidos [144], reportada en materiales como rocas o mampuestos. Debido precisamente a esta relación entre ambas propiedades, es posible estimar una porosidad a partir de mediciones de densidad aparente.

$$D = \frac{M}{V} \quad (31)$$

De acuerdo a la fórmula (31), la densidad (D) se obtiene como el cociente de la masa (M) entre el volumen (V) que ocupa esa masa. Despejando V a partir de esa fórmula y utilizando los valores de densidad de cada uno de los materiales reportados en la Tabla 9 y los porcentajes en masa con los que fue fabricada la mezcla de referencia, podemos estimar el volumen que ocupa cada uno de los polvos (cementantes y activantes). Los

valores de densidad y masa, tomados de la Tabla 9, y el volumen calculado con la formula (31), son mostrados a continuación (Ver Tabla 10):

**Tabla 10. Masa, densidad y volumen de los constituyentes de la mezcla de referencia.**

| <b>Material</b>       | <b>Masa (gr)</b> | <b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Volumen Calculado (cm<sup>3</sup>)</b> |
|-----------------------|------------------|------------------------------------|---|
| Anhidrita             | 50               | 2.60                               | 19.23                                     |
| Escoria de Alto Horno | 50               | 2.84                               | 17.60                                     |
| CPO                   | 5                | 3.12                               | 1.60                                      |
| Hidróxido de Calcio   | 2                | 2.34                               | 0.85                                      |
| Sulfato de Potasio    | 1.5              | 2.63                               | 0.57                                      |
| Agua                  | 54.25            | 1                                  | 54.25                                     |

En el caso de tratarse de un sólido compuesto por diferentes materiales de densidades diferentes, la formula puede interpretarse de la siguiente manera (32), siempre y cuando se conozcan la fracción correspondiente de cada material en el sólido. De acuerdo al resultado de la ecuación (33), y después de realizar una conversión de unidades, obtenemos que la densidad aparente teórica del sistema de referencia sería de 1730 kg/m<sup>3</sup> aproximadamente, si se tratara de un material sólido con porosidad nula.

$$D_A = \frac{M_1 + M_2 + M_3 \dots M_n}{V_1 + V_2 + V_3 \dots V_n} \quad (32)$$

$$D_A = \frac{50 + 50 + 5 + 2 + 1.5 + 54.25}{19.23 + 17.60 + 1.6 + 0.85 + 0.57 + 54.25} = \frac{162.75 \text{ g}}{94.1 \text{ cm}^3} = 1.730 \text{ g/cm}^3 \quad (33)$$

Sin embargo, al tratarse de mezclas de materiales cementantes, estas siempre contienen un porcentaje de aire atrapado, y en el caso de los concretos ligeros una cantidad de aire inducido intencionalmente. Conociendo el valor teórico de una mezcla con cero

porosidad, es posible estimar la porosidad de una mezcla en la que se haya disminuido la densidad aparente por medio de la inclusión de espacios vacíos por el efecto de un agente aireante.

$$P = 1 - \frac{D}{D_0} \quad (34)$$

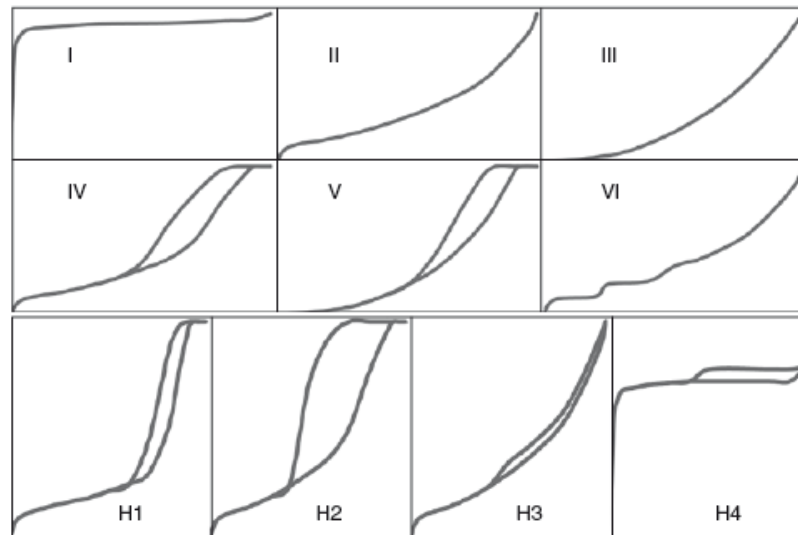
De esta forma (34), la porosidad teórica puede ser calculada a partir de las mediciones de densidad aparente para cada sistema, donde P es la porosidad, D es la densidad aparente de un sistema dado y Do es la densidad aparente teórica del mismo sistema con una porosidad = 0 [144,145]. Las porosidades calculadas de esta forma para las diferentes densidades aparentes propuestas son mostradas en la siguiente tabla:

**Tabla 11. Porosidades teóricas calculadas para cada densidad propuesta.**

| Sistema                                 | Densidad (kg/m <sup>3</sup> ) | Porosidad teórica (%) |
|---|-------------------------------|-----------------------|
| Cero P (Teórico)                        | 1730                          | 0                     |
| REF 1550                                | 1550                          | 10.4                  |
| 1200 Al o H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 1200                          | 30.6                  |
| 1000 Al o H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> | 1000                          | 42.2                  |
| 800 Al o H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>  | 800                           | 53.7                  |

Por medio de análisis de adsorción de nitrógeno (BET) se pudieron analizar los sistemas a un nivel de mesoporos. Los poros se clasifican de acuerdo a su tamaño en microporos, mesoporos y macroporos. Los poros con diámetros menores a 2 nm se consideran microporos, diámetros entre 2 y 50 nm se consideran mesoporos y diámetros mayores a 50 nm se consideran macroporos. Las isotermas mostradas por el análisis BET pueden clasificarse en 6 tipos diferentes, los cuales se nombran con números romanos. A su vez, algunos isotermas muestran lo que se conoce como bucles de histéresis, los cuales se clasifican en 4 tipos, nombrados H1, H2, H3 y H4 (Ver Figura 42) [146,147]. En

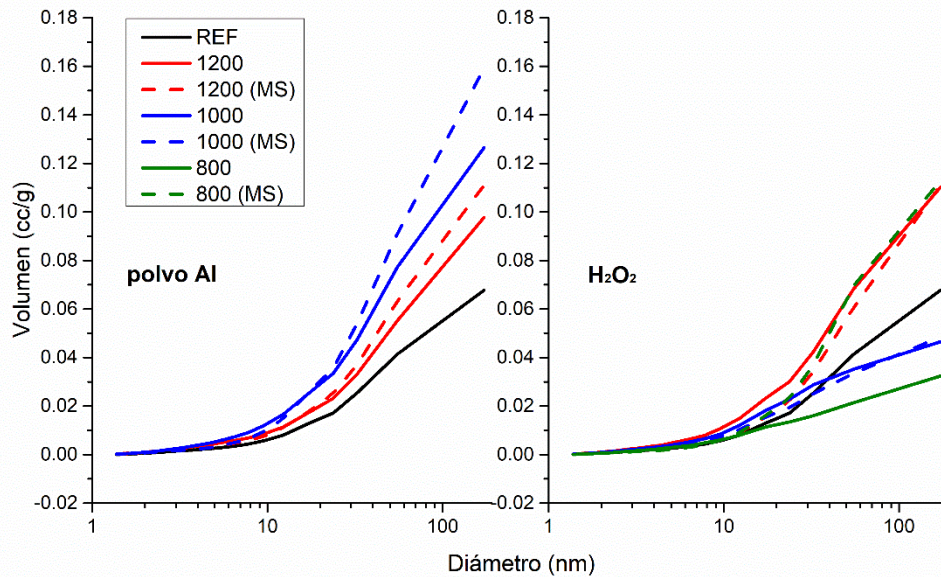
conjunto, la forma de la isoterma y la histéresis permiten, en términos generales, analizar el tipo de porosidad de una muestra y si es mayormente micro, meso o macroporosa.



**Figura 42. Isothermas e histéresis típicos en análisis BET [146].**

En términos generales, la isoterma mostrada por los análisis BET de todos los sistemas, corresponde a una isoterma tipo IV, con un bucle de histéresis H3. Las isothermas tipo IV son típicas de materiales mesoporosos y comúnmente observadas en matrices de materiales cementantes [147]. Por su parte el bucle de histéresis está asociado con la diferencia en la presión de condensación y evaporación capilar que ocurre en los mesoporos durante los procesos de adsorción y desorción. La histéresis H3 no exhibe adsorción limitada a presión relativa alta, describiendo un material con porosidad que también abarca el rango de los macroporos [146].

En cuanto a la cuantificación de los poros, podemos ver en la Figura 43 que los sistemas aireados con polvo de Al, presentan una mayor cantidad de poros con diámetros por debajo de los 100 nm que los aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. La adición de MS en los sistemas aireados con Al parece aumentar la mesoporosidad, mientras que en los aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> parece no tener ningún efecto, únicamente en el sistema de 800 kg/m<sup>3</sup> se puede observar un efecto similar.



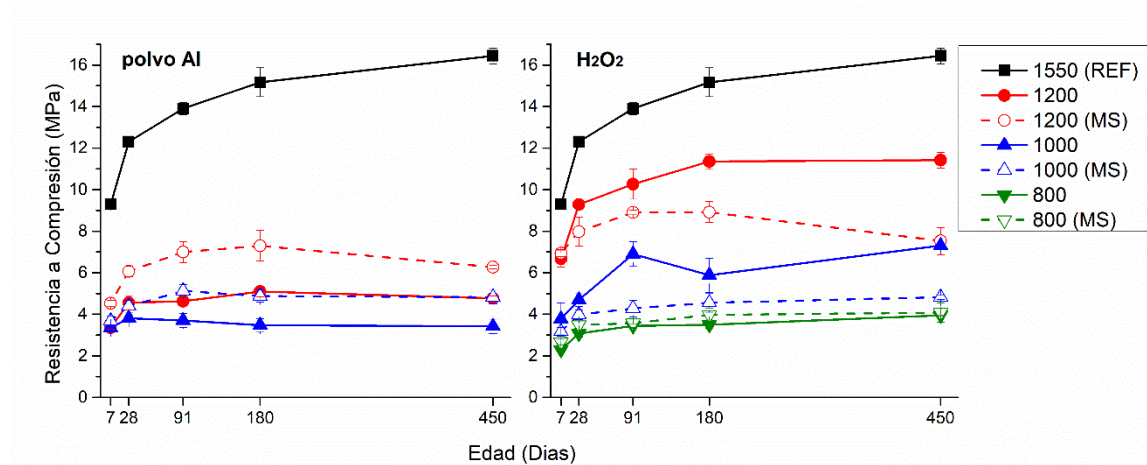
**Figura 43. Resultados de porosidad (BET) de sistemas aireados**

Cabe mencionar, de acuerdo a lo discutido previamente que, para tener una densidad aparente igual independientemente si el sistema es aireado con polvo de Al o con  $H_2O_2$ , el volumen de poros debe ser el mismo, no así su distribución de tamaños. Por esta razón, el hecho de que los sistemas aireados con  $H_2O_2$  muestren menos micro y mesoporos que sus similares aireados con Al, no quiere decir que tengan un menor volumen de poros totales, sino que una mayor fracción del volumen de poros se encuentran en el rango de tamaños correspondientes a los macroporos. La limitación de este análisis permite visualizar únicamente tamaños de poro por debajo de los 200 nm, por lo tanto, un análisis más preciso de la porosidad que incluya el análisis de los macroporos sería necesario.

#### **4.3.4 Resistencia a Compresión**

Los resultados de las pruebas de resistencia a compresión (Ver Figura 44), muestran que el sistema de referencia se mantuvo por encima de todos los demás durante todo el periodo de estudio, superando los 12 MPa desde los 28 días de curado en inmersión en agua y llegando hasta los 16 MPa a los 450 días en las mismas condiciones. Esto resulta coherente ya que éste es el sistema que no tiene aire incluido intencionalmente por el

efecto de algún aireante, mostrando una densidad aparente aproximada de  $1550 \text{ kg/m}^3$ , y la tendencia lógica es que, con la disminución de la densidad, disminuya también la resistencia a compresión por efecto de los huecos formados al interior de la matriz cementante. No obstante, todos los sistemas se mantuvieron por encima de los 2 MPa de resistencia mínima para concretos ligeros aireados de acuerdo a la norma ASTM C1693 [121]



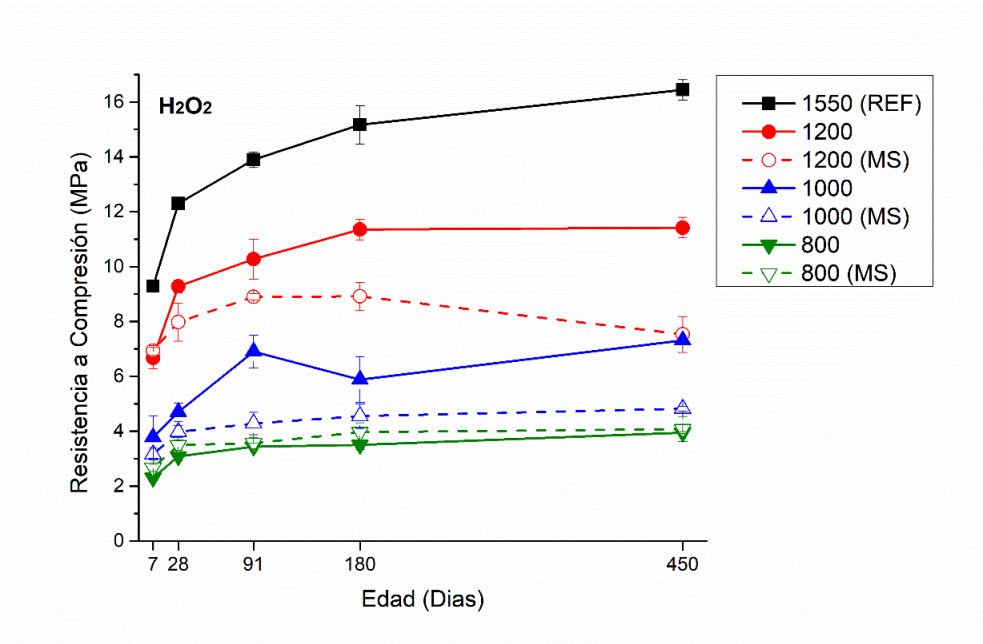
**Figura 44. Resistencia a compresión de sistemas aireados**

En la Figura 45 vemos de forma aislada los sistemas aireados con  $\text{H}_2\text{O}_2$ . En estos sistemas se observa el efecto de la generación de huecos al interior de la matriz cementante, donde la disminución de  $350 \text{ kg/m}^3$  de la densidad aparente del sistema (aproximadamente 23% de la densidad en relación con el sistema de referencia), representó a su vez una disminución en la resistencia a compresión de 3.62 MPa en promedio durante todo el periodo de estudio, es decir, aproximadamente un 27% de pérdida de resistencia, esto para el sistema 1200  $\text{H}_2\text{O}_2$  sin microsílíce. En el sistema similar, 1200  $\text{H}_2\text{O}_2$  con la adición de microsílíce, el efecto en la resistencia a compresión resultó más severo, al mostrar una disminución en este parámetro de 5.36 MPa en promedio, lo cual se traduce en una pérdida de resistencia de aproximadamente el 38%, para la misma disminución de densidad aparente. Ambos sistemas de  $1200 \text{ kg/m}^3$  superaron los 8 MPa a los 28 días y los 9 MPa a los 180 días de curado. El sistema sin

microsílice se mantuvo por encima de su similar durante la mayor parte del periodo de estudio, llegando a los 11.42 MPa a los 450 días de curado.

De la misma forma, para los sistemas 1000 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 1000 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS, donde la disminución de la densidad aparente fue de 550 kg/m<sup>3</sup> (aproximadamente el 35% de la densidad en relación al sistema de referencia), el efecto del aireante en la resistencia a la compresión fue más severo en el sistema con la adición de microsílice. En el caso del sistema 1000 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la disminución de la resistencia a compresión resultó de 7.70 MPa en promedio, que representa una pérdida de resistencia de aproximadamente el 58%. Mientras que para el sistema 1000 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS la disminución de la resistencia a compresión fue de 9.26 MPa en promedio, lo cual representa una pérdida de resistencia de aproximadamente 69% en relación con el sistema de referencia. Ambos sistemas de 1000 kg/m<sup>3</sup> superaron los 4 MPa a los 28 días. El sistema sin la adición de MS se mantuvo por encima de sus similar durante todo el periodo de estudio, reportando cerca de 6 MPa a los 180 días y más de 7 MPa a los 450 días de curado.

En el caso de los dos sistemas de 800 kg/m<sup>3</sup> de densidad, ambos se comportaron de forma muy similar, reportando más de 3 MPa a los 28 días de curado, y llegando a superar los 4 MPa de resistencia a compresión a los 450 días de curado. Estos sistemas, en ningún momento del estudio llegaron a estar a más de 0.5 MPa de diferencia entre sí. Para ambos sistemas, la disminución de la resistencia a compresión fue cercana a los 9.30 MPa en promedio, que representa una pérdida de resistencia de aproximadamente el 73% en relación con el sistema de referencia, para una disminución de la densidad aparente de casi la mitad.

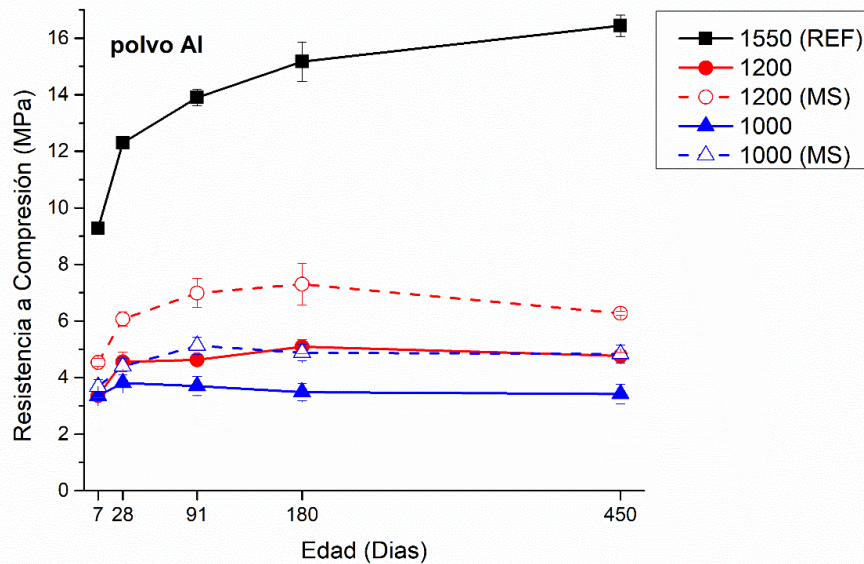


**Figura 45. Resistencia a compresión de sistemas aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

En el caso de los sistemas aireados con polvo de aluminio (Ver Figura 46), el de 1200 kg/m<sup>3</sup>, particularmente el que contiene la adición de MS, mostró una disminución de la resistencia a compresión de 7.19 MPa en promedio, representando una pérdida de aproximadamente el 53% de resistencia. En comparación, el sistema 1200 kg/m<sup>3</sup> sin microsílíce mostró una disminución de la resistencia a la compresión de 8.94 MPa en promedio, representando una pérdida de aproximadamente el 66% de resistencia. Ambos sistemas alcanzaron 6.1 MPa y 4.5 MPa respectivamente a los 28 días, sin embargo, su desarrollo de resistencia a compresión fue mínimo, únicamente superando los 7 MPa y 5 MPa respectivamente a los 180 días de curado y mostrando una tendencia hacia la pérdida de resistencia a compresión después de este periodo. Estos valores son considerablemente inferiores a los mostrados por su similar aireado con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, es decir, la pérdida de resistencia a compresión en función de la disminución de la densidad fue más severa en los sistemas aireados con Al que en los sistemas aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

En forma similar, el sistema 1000 Al+MS mostró una disminución de la resistencia a compresión de 8.84 MPa en promedio, que representa una pérdida de resistencia de aproximadamente el 65%. Mientras que para el sistema 1000 Al sin microsílíce, la

disminución de la resistencia a compresión fue de 9.87 MPa en promedio, lo cual se traduce en una pérdida de resistencia aproximada del 73%. Ambos sistemas alcanzaron cerca de 4 MPa a los 28 días, sin embargo, no continuaron desarrollando considerablemente su resistencia a compresión, llegando a un máximo de 5.13 MPa a los 91 días para el sistema con microsílíce y 3.81 MPa a los 28 días para el sistema sin microsílíce, para posteriormente mostrar una tendencia hacia la pérdida de resistencia.



**Figura 46. Resistencia a compresión de sistemas aireados con polvo de Al**

Como podemos observar, existe una diferencia considerable en cuanto al desarrollo de propiedades mecánicas de la matriz cementante, dependiendo del tipo de aireante utilizado. Por ejemplo, podemos resaltar que para los cuatro sistemas con densidad aparente de 1200 kg/m<sup>3</sup>, los dos sistemas aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> se mantuvieron siempre por encima de los dos aireados con polvo de Al, a pesar de tener la misma densidad. Esto es debido a que, dependiendo del tamaño y la distribución de los poros generados por el aireante, su efecto en las propiedades será diferente. Como se muestra en la Figura 47, la porosidad desarrollada por el polvo de aluminio forma poros de formas muy irregulares, parecidas a grietas u oquedades de tamaños muy variados, mientras que

los aireados con  $H_2O_2$  desarrollan una porosidad con poros más pequeños, de tamaños más uniformes y formas redondeadas.



**Figura 47. Porosidad visible en sistemas 1200 Al (izq.) y 1200  $H_2O_2$  (der.)**

El hecho de que un aireante se adicione como polvo y el otro como líquido pudiera ser la razón de la diferencia en la forma de los poros. El  $H_2O_2$ , al ser adicionado como líquido en el agua de mezcla, logra dispersarse fácilmente. Mientras que el Al probablemente tienda a formar aglomeraciones debido a que es un polvo. Estas aglomeraciones de aluminio, al liberar el aire, forman concentraciones de burbujas que rápidamente tienden a la coalescencia originando una estructura similar a capas o estratos horizontales en la matriz cementante.

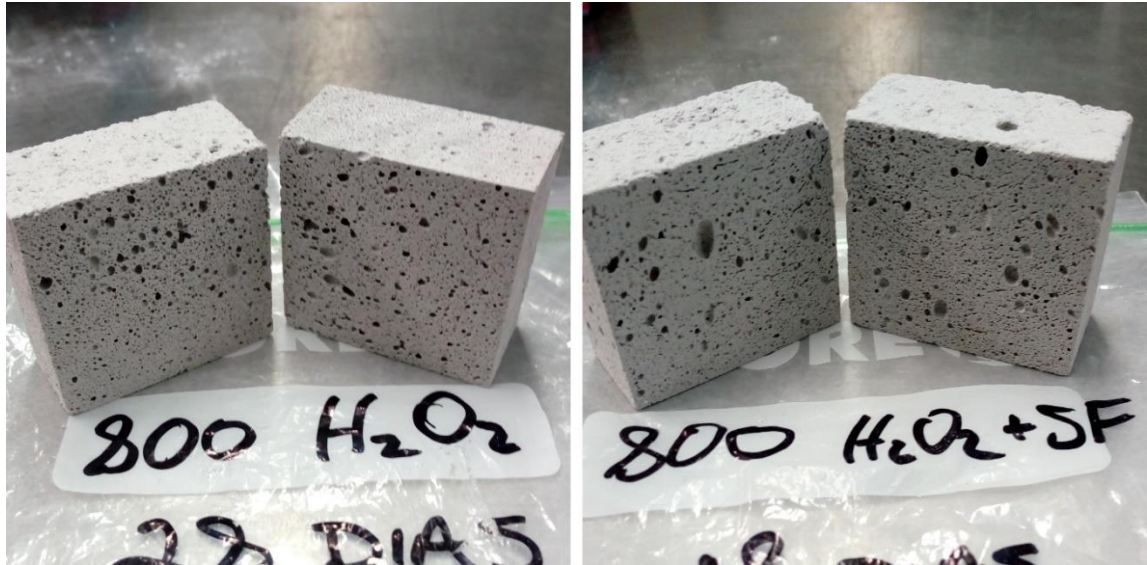
A su vez, esa diferencia en la red de poros podría ser la causa de que las resistencias a compresión sean tan diferentes a pesar de ser sistemas con densidades aparentes similares, debido a que las características de la porosidad como forma, distribución y tamaño de poros afectan al comportamiento mecánico y al mecanismo de falla de los sistemas. Tener una distribución de tamaños de poros más uniforme, así como aumentar el espaciamiento entre poros, permite tener una resistencia a compresión más alta [86,97].

El uso de la MS en los sistemas aireados mostró efectos distintos dependiendo del aireante que se estuviera empleando. En los sistemas aireados con polvo de aluminio, al

comparar entre sistemas con la misma densidad, el que contenía la adición de microsílíce siempre mantuvo una resistencia a compresión superior. Esto significaría que es posible disminuir más la densidad sin afectar las propiedades mecánicas, únicamente con la adición de 5% de microsílíce. Esto es claramente visible si comparamos los sistemas 1200 Al y 1000 Al+MS en la Figura 46, donde se muestra que la resistencia a compresión de ambos sistemas se comporta de forma muy similar, a pesar de su diferencia en densidades.

Mientras que en los sistemas aireados con  $H_2O_2$  la adición de microsílíce no representó ningún beneficio significativo, sino tal vez incluso lo contrario. Al comparar entre sistemas con la misma densidad, aquel con la adición de microsílíce mostró siempre una resistencia a compresión inferior a aquel sin la adición. Únicamente en los sistemas de  $800 \text{ kg/m}^3$  ocurrió lo contrario (Ver Figura 48), sin embargo, la diferencia es tan mínima que podría considerarse despreciable.

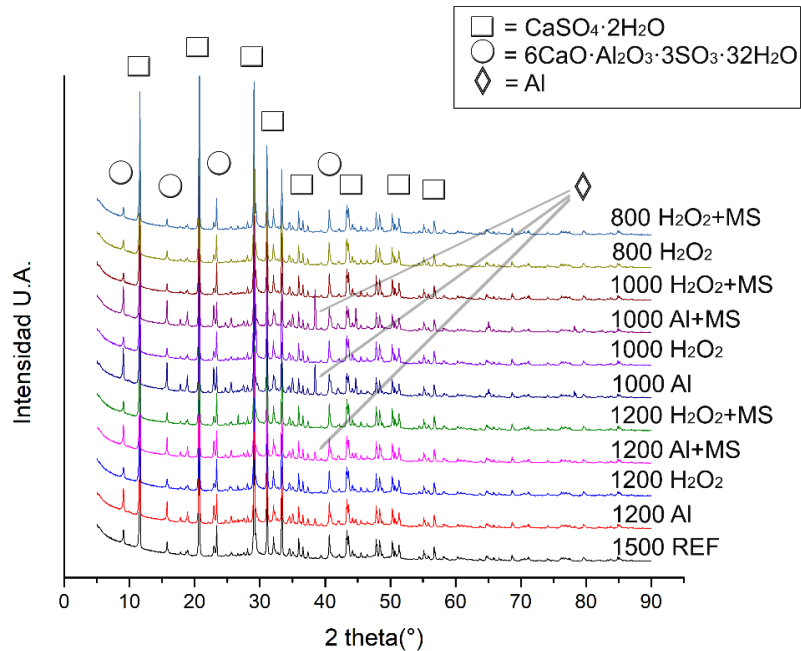
Una vez más, este efecto contradictorio de la adición de MS, pudiera deberse a la diferencia en el tipo de porosidad dependiendo del aireante adicionado. Existe evidencia de que la presencia de un material altamente fino como filler en matrices aireadas aumenta la resistencia a compresión para una densidad dada, promoviendo una distribución más uniforme de tamaños de poros al evitar que las burbujas de aire colapsen y se superpongan unas con otras [97,148]. Sin embargo, también es reportado que la adición de un filler fino, puede generar un aumento en el tamaño promedio de poros [97], al funcionar como relleno de los poros pequeños y requiriendo una mayor adición de aireante para mantener un mismo volumen de poros y por consecuencia una misma densidad aparente. Además, hay que considerar el aporte de la etringita en la resistencia a compresión [7,47,48,68,83], especialmente en el caso de los sistemas aireados con aluminio en los cuales, a juzgar por los difractogramas mostrados en la siguiente sección de este documento, podemos suponer por la intensidad de las reflexiones, que hay una mayor aparición de etringita que en los aireados con  $H_2O_2$ .



**Figura 48. Porosidad visible en sistemas 800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (izq.) y 800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS (der.)**

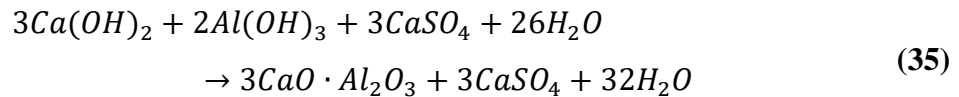
#### **4.3.5 Fases Presentes (DRX)**

Por medio de análisis de difracción de rayos X efectuados en muestras extraídas de los sistemas aireados a 28 días de curado, fue posible identificar las principales fases presentes. De forma general, se observa una similitud entre todos los sistemas, debido a que la matriz cementante es la misma en todos los casos, lo único que está variando es el contenido y tipo de aditivo aireante. Como vemos en la Figura 49, las principales fases presentes en todos los sistemas son el sulfato de calcio dihidratado (yeso), por sus reflexiones características a 11.63°, 20.73° y 29.12° (2 $\theta$ ); y etringita, por sus reflexiones principales en 9.72°, 15.77° y 22.9° (2 $\theta$ ). No fue posible identificar compuestos tipo silicato de calcio hidratado, los cuales se formarían por la reacción de la escoria de alto horno, sin embargo, estos compuestos tienden a ser preferentemente amorfos, razón por la que es difícil identificar reflexiones características de los mismos.

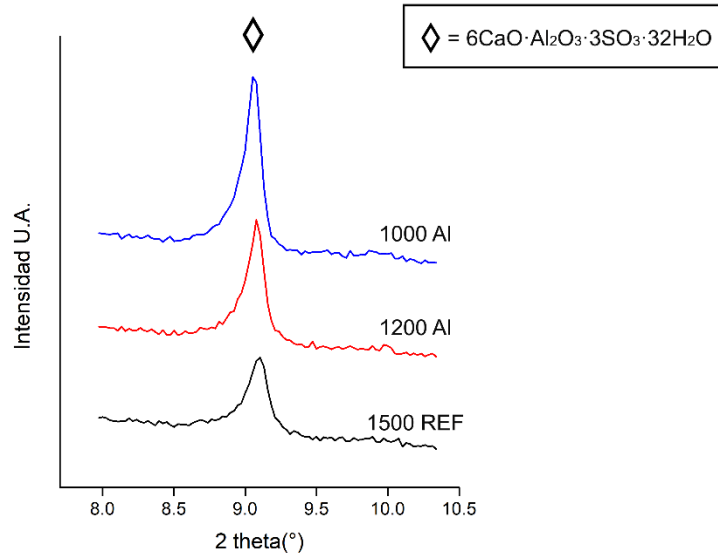


**Figura 49. Fases presentes en los sistemas aireados a 28 días de curado**

Cabe mencionar que las reflexiones de etringita, presentes en todos los difractogramas, muestran una mayor intensidad en los sistemas en los que se adicionó aluminio como agente aireante, además, esta intensidad aumenta a mayor adición de aluminio (Ver Figura 50), indicando que el  $Al(OH)_3$  que queda como remanente de la reacción del Al metálico con el agua para liberar hidrógeno, estaría aportando el aluminio necesario para formar etringita de acuerdo a la ecuación (35), al reaccionar con el hidróxido de calcio y sulfato de calcio disponibles [149].

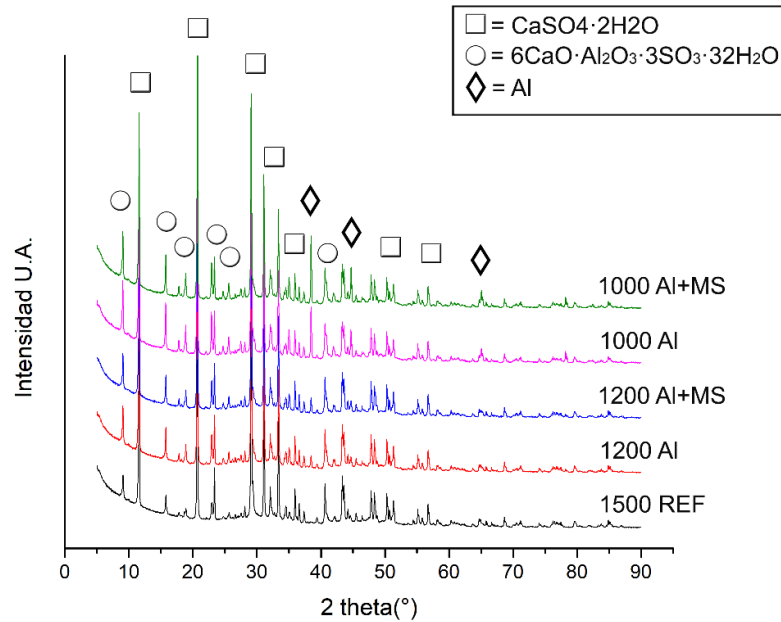


Es difícil inferir que la etringita se encuentre en una mayor cantidad en estos sistemas con base únicamente en el tamaño del pico de difracción, debido a que la técnica de DRX no puede ser considerada como cuantitativa sin hacer refinamiento Rietveld, sin embargo, sí se observa una relación entre la altura de este pico y la adición de aluminio como aireante.



**Figura 50. Diferencia de intensidad en el pico característico de etringita**

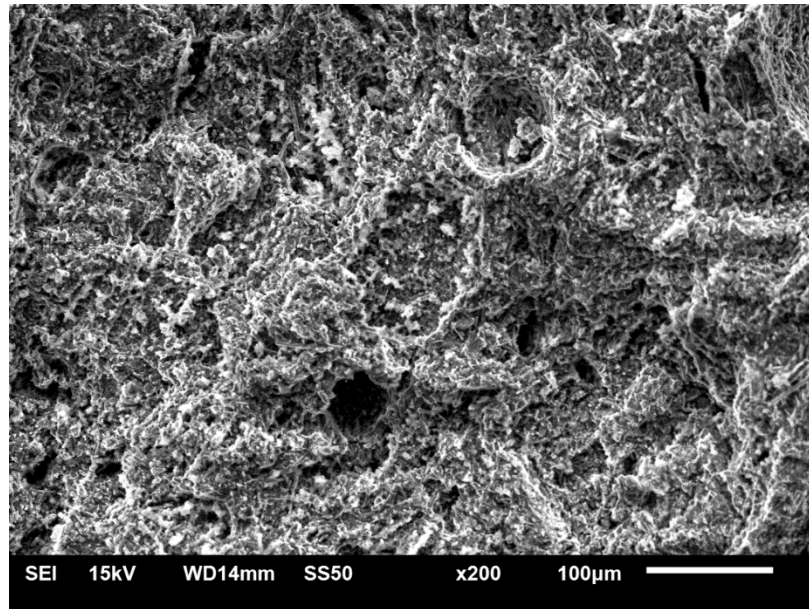
Se pudieron observar reflexiones correspondientes a aluminio en los sistemas aireados con este polvo, identificado por sus reflexiones características en  $38.41^\circ$ ,  $44.65^\circ$  y  $64.98^\circ$  ( $2\theta$ ) (Ver Figura 51). La presencia de este pico es más clara en los sistemas donde se adicionó una mayor cantidad de aluminio, indicando que el aluminio no está reaccionando en su totalidad y una fracción de este permanece como aluminio metálico. El aluminio tiende a recubrirse espontáneamente por una capa pasiva que evita su corrosión, sin embargo, esta capa desaparece en presencia de ácidos o en soluciones alcalinas. El hecho de tener presencia de aluminio metálico estaría indicando que su efecto aireante no se está aprovechando al solo reaccionar parcialmente, probablemente debido a que el pH de la matriz cementante no es lo suficientemente alcalino para provocar la disolución de la capa pasiva y por consecuencia la reacción total del aluminio.



**Figura 51. Fases presentes en los sistemas aireados con polvo de aluminio a 28 días de curado**

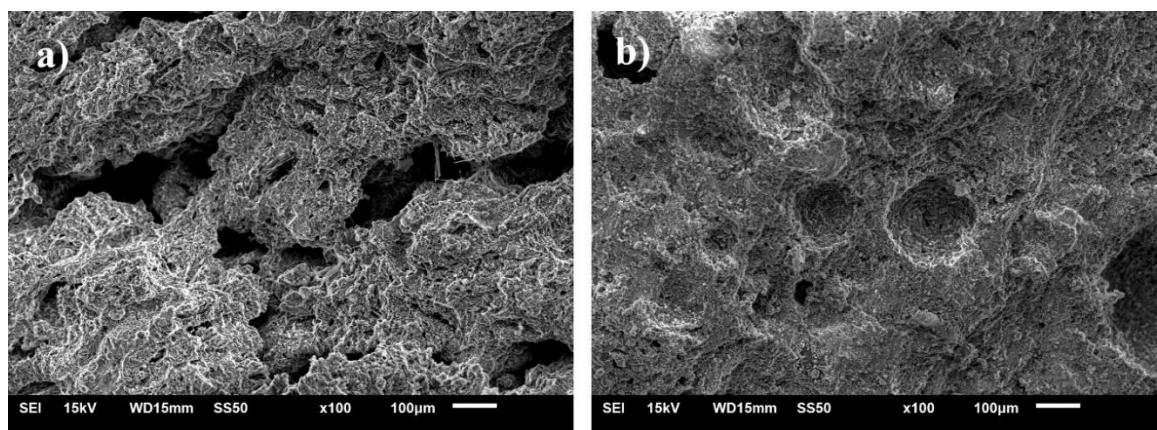
#### 4.3.6 Análisis Microestructural

Se ejecutaron análisis de microscopía electrónica de barrido, con los detectores de electrones secundarios y retrodispersados en muestras tomadas de los fragmentos restantes de las pruebas a compresión a 28 días de curado de los sistemas seleccionados, a diferentes magnificaciones, en muestras a fractura. Como vemos en la Figura 52, en la muestra de referencia a 200x, es decir, el sistema sin adición de un aireante, es posible ver que la matriz formada muestra cierto grado de porosidad. Esta porosidad se pudiera considerar inherente en esta matriz, debido a que no se formó por efecto de algún aireante y no fue influenciada por efecto de una compactación al momento del llenado del molde.



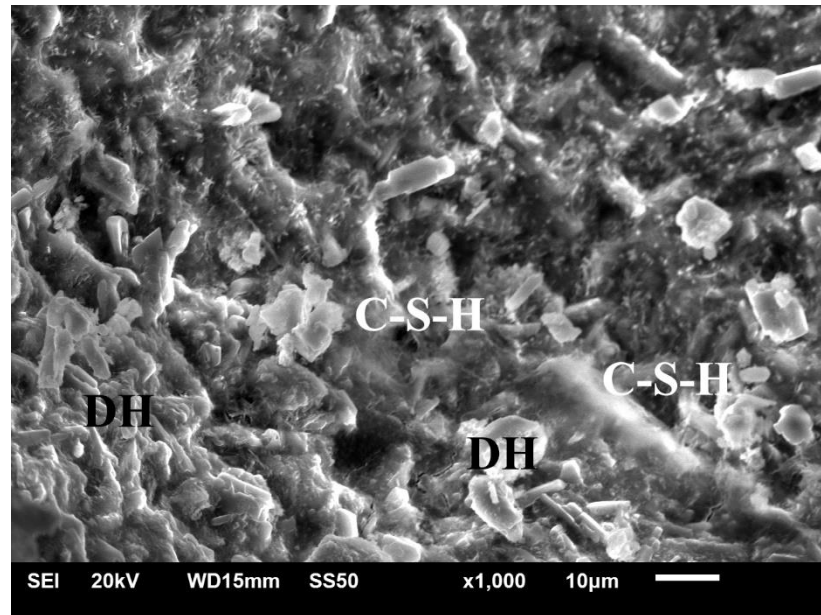
**Figura 52. Porosidad inherente en sistema de referencia sin aireante, a 200x.**

La porosidad formada por los dos diferentes aireantes utilizados es visible al comparar los sistemas 1200Al y 1200 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 100x en la Figura 53. Como ya se había mencionado en la parte final de la sección 4.3.4 de este documento (Resistencia a Compresión), la porosidad mostrada en los sistemas aireados con aluminio forma una estructura similar a capas o estratos horizontales, probablemente generadas por la coalescencia de varias burbujas generadas por el hidrógeno liberado, mientras que la porosidad generada por el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> muestra formas redondeadas y de tamaños más uniformes.



**Figura 53. Porosidad mostrada en sistemas 1200 Al (a) y 1200 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (b).**

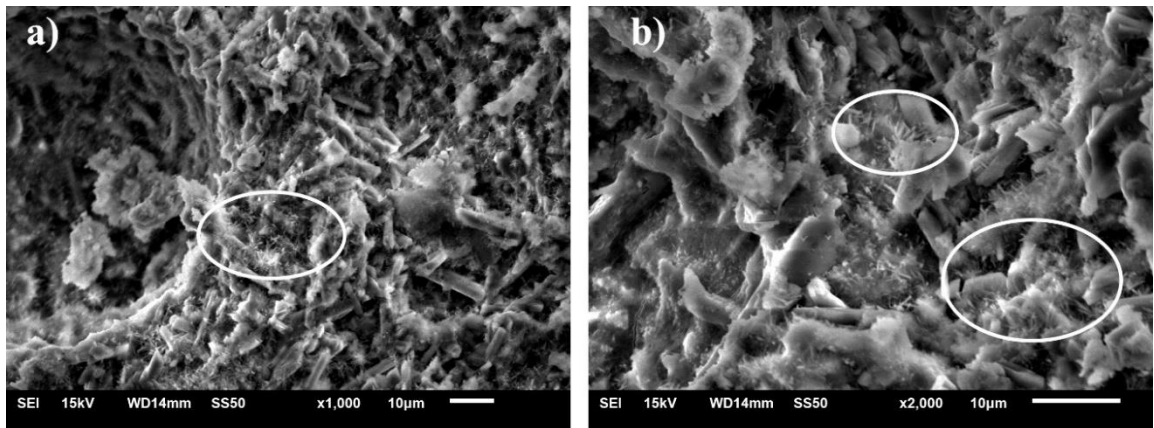
En concordancia con lo reportado en la primera etapa experimental y recordando que la matriz cementante es la misma que en dicha etapa, con la única diferencia de la adición del aireante, fue posible localizar en distintos sistemas los principales productos de reacción. En la Figura 54 se pueden ver aglomeraciones de cristales de yeso dihidratado, recubiertos por el silicato de calcio hidratado (C-S-H) producto de la reacción de la escoria de alto horno.



**Figura 54. Identificación de C-S-H y Cristales de yeso (DH).**

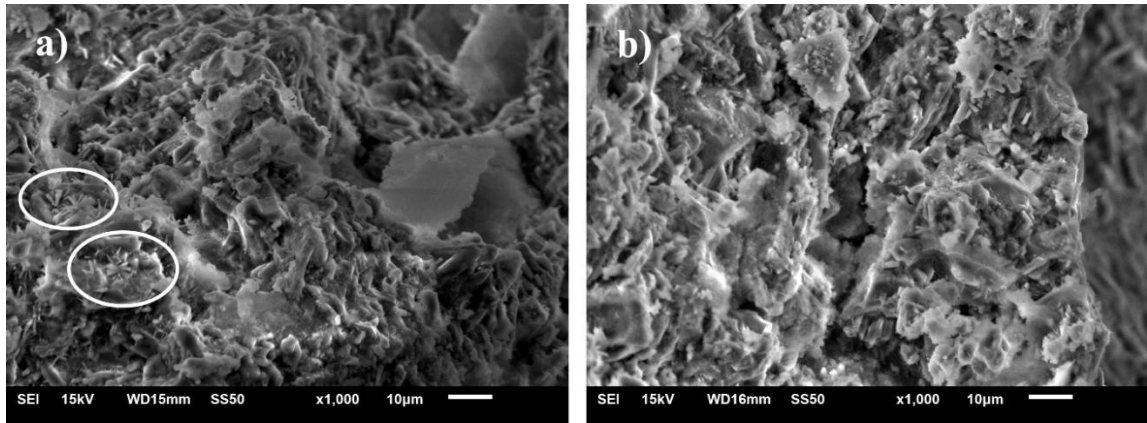
En distintos sistemas, incluyendo el sistema de referencia (Ver Figura 55), se pudieron observar cristales de etringita a 1000x y 2000x, indicados con círculos, en el rango de 1-3 micras de longitud. Estos cristales se ubican muy por debajo del tamaño comúnmente reportado de los cristales de etringita, sin embargo, este tipo de cristales ya han sido reportados con anterioridad por Mehta [141,142] y más recientemente por Telesca y colaboradores [143]. Mehta argumenta que en ausencia (o poca presencia) de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , los cristales de etringita llegan a tamaños de entre 10-100 micras de largo, mientras que en presencia de este solo llegan a tamaños de alrededor de 1-2 micras de longitud. Por su parte, Telesca relaciona la aparición de estos dos tamaños de cristales al índice de nucleación de la etringita, que a su vez depende del grado de saturación de la solución con iones afines a formarla. Aseguran que, si el índice de nucleación es alto, se

formaran muchos puntos de nucleación, dando lugar a cristales pequeños de etringita de no más de 3 micras de largo, mientras que tener pocos puntos de nucleación, procedentes de un índice de nucleación bajo, dan lugar a cristales largos de más de 10 micras de longitud. Tanto Mehta como Telesca coinciden en que los cristales pequeños generan expansiones y esfuerzos internos más elevados.



**Figura 55. Cristales de etringita de 1-3 micras en sistema de referencia a 1000x (a) y 2000x (b).**

Cabe recordar que el sistema mostrado en la Figura 55, el sistema de referencia, está constituido únicamente por anhidrita, escoria de alto horno, y sus respectivos activantes,  $K_2SO_4$ ,  $Ca(OH)_2$  y CPO. Esta adición de  $Ca(OH)_2$  se comprobó benéfica para la activación de la anhidrita en estudios previos [53], sin embargo, siempre se contó con una adición de microsílíce la cual no está presente en este sistema de referencia ni en algunos de los sistemas aireados propuestos en esta tesis. La falta de esta adición de microsílíce pudiera estar modificando la disponibilidad de  $Ca(OH)_2$  y el nivel de saturación de la solución, dando lugar a la formación de cristales de etringita de 1-3 micras de longitud de acuerdo con las teorías de Mehta y Telesca.



**Figura 56. Comparativa entre sistemas 800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sin microsilíce (a) y con microsilíce (b).**

Al comparar entre los sistemas más ligeros, 800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y 800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS (Ver Figura 56), en el que no tiene microsilíce se pueden observar los mismos cristales de etringita de tamaños entre 1-3 micras, sin embargo, en el que si tiene microsilíce no se pudieron localizar estos cristales. El efecto densificante de la microsilíce, y a su vez inhibidor de la formación de etringita, ha sido bien establecido y discutido en la etapa experimental 1 de este documento [10,11], sin embargo, dicho efecto pudiera no solo deberse a una densificación debido a su tamaño, sino que también pudiera estar afectando aspectos como la saturación de la solución de poro y la disponibilidad de Ca(OH)<sub>2</sub>, de acuerdo a las teorías de Mehta y Telesca [141–143], y esto a su vez influenciar el índice de nucleación y la cinética de cristalización de la etringita.

#### **4.3.7 Conductividad Térmica**

Se llevaron a cabo análisis de conductividad térmica por duplicado, por medio de la técnica de flujo de calor, de acuerdo a la normativa ASTM E1530 [123], en las muestras con 28 días de curado (Tabla 12). De forma general se puede observar que hay una relación directa entre la densidad y la transferencia térmica de los sistemas, es decir, con la disminución de la densidad se disminuye también la transferencia térmica del material. Esto resulta coherente, ya que el aire atrapado en los poros tiene una conductividad térmica muy baja, de solo 0.026 W/mK [90].

**Tabla 12. Resultados de conductividad térmica de sistemas aireados con 28 días de curado (W/mK)**

| <b>Sistema</b>                            | <b>Muestra 1</b> | <b>Muestra 2</b> | <b>Promedio</b> |
|---|------------------|------------------|-----------------|
| <b>REF (1550)</b>                         | 0.508            | 0.522            | <b>0.515</b>    |
| <b>1200 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>    | 0.438            | 0.439            | <b>0.439</b>    |
| <b>1200 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS</b> | 0.382            | 0.381            | <b>0.382</b>    |
| <b>1200 Al</b>                            | 0.330            | 0.343            | <b>0.337</b>    |
| <b>1200 Al+MS</b>                         | 0.369            | 0.356            | <b>0.363</b>    |
| <b>1000 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>    | 0.273            | 0.301            | <b>0.287</b>    |
| <b>1000 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS</b> | 0.268            | 0.271            | <b>0.270</b>    |
| <b>1000 Al</b>                            | 0.298            | 0.312            | <b>0.305</b>    |
| <b>1000 Al+MS</b>                         | 0.339            | 0.330            | <b>0.335</b>    |
| <b>800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>     | 0.262            | 0.259            | <b>0.261</b>    |
| <b>800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS</b>  | 0.259            | 0.272            | <b>0.266</b>    |

Las muestras consideradas para el análisis térmico, fueron cortadas verticalmente en dos muestras de una pulgada de espesor. Posteriormente se analizaron ambas muestras de cada cubo y se calculó el promedio de su transferencia térmica. Debido a que la generación de porosidad se da durante la acción del mezclado y continua durante los primeros minutos después de haber colocado la mezcla en los moldes, las burbujas de aire tienden a ir hacia arriba buscando salir de la mezcla, esto ocasiona una tendencia a tener una mayor concentración de poros en el tercio superior de los cubos. Esta pudiera ser la razón de la variación en las dos lecturas de un mismo espécimen.

La adición de MS provocó que los sistemas aireados con aluminio condujeran más fácilmente la temperatura que sus similares sin adición. Esta situación no se observó en los sistemas aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. De manera similar a lo observado en las resistencias a compresión, la MS pareciera tener efectos contradictorios en los sistemas principalmente debido a la diferencia en el tipo de porosidad. En el caso de una porosidad altamente irregular como la que desarrolla el aluminio, la adición de MS promueve una distribución de tamaños de poro más uniforme, sin embargo, en una matriz con una porosidad

inicialmente más uniforme y redondeada como la que desarrolla el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la MS no tiene un efecto considerable en esto, únicamente promueve un aumento del tamaño promedio de poros, por esta razón la transferencia térmica se ve afectada de maneras distintas en sistemas con aireante diferente.

La menor conducción de calor fue registrada por el sistema 800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, el cual reportó 0.261 W/mK de transferencia térmica. Esto significa una reducción del 49% de transferencia térmica con una disminución de la densidad también aproximada al 50% en relación con el sistema de referencia.

**Tabla 13. Conductividad térmica y densidad de distintos materiales comúnmente utilizados en la construcción**

| <b>Material</b>        | <b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Conductividad Térmica (W/mK)</b> |
|------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Concreto [150]         | 2000-2040                          | 1.20-1.46                           |
| Acero [8]              | 7800                               | 64                                  |
| Madera de Abeto [151]  | 528                                | 0.13                                |
| Ladrillo [151]         | 1788                               | 0.91                                |
| Cemento de cal [152]   | 1024                               | 0.18                                |
| Mortero de cal [151]   | 1568                               | 0.70                                |
| Mortero de CP [8]      | 1870                               | 1.3                                 |
| Yeso (Panel) [151,152] | 850                                | <b>0.20</b>                         |
| Yeso (Pasta) [90]      | 850                                | <b>0.20-0.40</b>                    |

Estos valores, como vemos en la Tabla 13, posicionan este material muy por debajo de los valores de transferencia térmica reportados para el concreto, ladrillo, mortero de CP e incluso mortero de cal. Su capacidad de transferencia térmica resulta más similar a lo reportado para paneles de yeso o pastas de yeso, con la diferencia de que este material sería más apto para usarse en exteriores debido a los productos hidratados formados por la EAH.

### 4.3.8 Calor Específico

El calor específico es un valor que indica la cantidad de energía necesaria para aumentar en un grado ( $^{\circ}\text{C}$  o  $^{\circ}\text{K}$ ) la temperatura de un gramo de masa de un material. Los valores de calor específico de cada uno de los sistemas a 28 días de curado fueron obtenidos por medio de análisis de calorimetría diferencial de barrido, elevando la temperatura desde 0 hasta  $100^{\circ}\text{C}$ , en una rampa de  $5^{\circ}\text{C}$  por minuto en atmosfera de argón, procurando normalizar la temperatura a 5 grados por 5 minutos antes de iniciar la rampa. Las muestras analizadas fueron en forma de fragmentos tomados directamente de los cubos elaborados con los sistemas cementantes [153,154]. Los resultados son mostrados en la Tabla 14

**Tabla 14. Valores de Calor Específico de los sistemas a 28 días**

| <b>Sistema</b>                                   | <b>Cantidad en<br/>Medición (mg)</b> | <b>Calor específico<br/>(<math>\text{J/g}^{\circ}\text{K}</math>)</b> |
|--|--------------------------------------|---|
| <b>REF (1550)</b>                                | 62.09                                | 1.120   |
| <b>1200 <math>\text{H}_2\text{O}_2</math></b>    | 69.13                                | 1.184   |
| <b>1200 <math>\text{H}_2\text{O}_2</math>+MS</b> | 58.87                                | 1.162   |
| <b>1200 AI</b>                                   | 56.44                                | 1.075   |
| <b>1200 AI+MS</b>                                | 47.60                                | 1.300   |
| <b>1000 <math>\text{H}_2\text{O}_2</math></b>    | 56.79                                | 1.106   |
| <b>1000 <math>\text{H}_2\text{O}_2</math>+MS</b> | 46.06                                | 1.085   |
| <b>1000 AI</b>                                   | 44.08                                | 1.175   |
| <b>1000 AI+MS</b>                                | 65.06                                | 1.294   |
| <b>800 <math>\text{H}_2\text{O}_2</math></b>     | 47.35                                | 1.080   |
| <b>800 <math>\text{H}_2\text{O}_2</math>+MS</b>  | 66.02                                | 0.919   |

De forma similar a lo ya mencionado en los capítulos de Resistencia a Compresión y Conductividad Térmica de la Etapa Experimental 2, la adición de MS tuvo un efecto diferente en el valor del calor específico dependiendo del aireante utilizado. Como vemos en la Tabla 14, al comparar entre sistemas aireados a la misma densidad con  $\text{H}_2\text{O}_2$ , aquel con la adición de MS mostró en todos los casos, un valor de calor específico ligeramente

menor que aquel sin la adición. Mientras que en los sistemas aireados con polvo de Al sucedió lo contrario, la adición de MS aumentó el valor de calor específico de forma considerable en comparación con los sistemas sin esta adición, es decir, la adición de MS en sistemas aireados con polvo de Al, provocó que fuera necesaria una cantidad mayor de energía para elevar la temperatura de un gramo del sólido.

El valor del calor específico, al no depender de la densidad aparente, se podría suponer que fuera muy similar en todos los sistemas. No obstante, la variación mostrada puede ser ocasionada por ser un material formado por diferentes compuestos, principalmente yeso, C-S-H y etringita. Cada una de estas fases presenta un valor de calor específico diferente (Ver Tabla 15), así que el calor específico de toda la matriz dependerá de la fracción correspondiente a la presencia de cada una de ellas en la muestra tomada para realizar el análisis. De esta forma, tanto la adición de MS como la utilización de Al como aireante, podrían estar modificando las características de calor específico del compuesto. Por un lado, el Al estaría promoviendo una mayor cantidad de etringita mientras que el MS estaría disminuyendo la misma. Y por otro lado la MS estaría formando más C-S-H al reaccionar con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como ya se mencionó en las secciones previas de este capítulo.

**Tabla 15. Valores de Calor Específico típicos de compuestos comúnmente encontrados en matrices cementantes**

| <b>Compuesto</b>  | <b>Calor Específico (J/g°K)</b> |
|---|---------------------------------|
| Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )  | 0.950 [155]                     |
| Etringita ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) | 1.300 [156]                     |
| C-S-H   | 0.90 – 1.0 [157]                |

#### **4.3.9 Resumen de Resultados, Etapa Experimental 2**

El efecto de la inclusión de poros por medio de la acción de aditivos aireantes en las matrices cementantes quedó evidenciado tanto en los resultados de resistencia a compresión, como en los valores de conductividad térmica de los sistemas. Las características de la red de poros formada, así como las propiedades obtenidas, son diferentes dependiendo del aireante utilizado. Al usar polvo de aluminio la porosidad

desarrollada es en forma de grietas u oquedades de tamaños muy variados y formas alargadas, mientras que al usar  $H_2O_2$  la porosidad desarrollada forma poros más pequeños, de tamaños más uniformes y formas redondeadas. De ahí surge también la diferencia en cuanto al comportamiento de la densidad en función de la cantidad de aireante utilizado, mientras la gráfica sigue una tendencia logarítmica al usar polvo de aluminio, esta línea sigue una tendencia polinómica al usar  $H_2O_2$ .

En cuando al comportamiento mecánico, los sistemas aireados con  $H_2O_2$  siempre mostraron mejores propiedades que sus similares aireados con aluminio. No obstante, todos los sistemas, incluyendo los de menor densidad ( $800 \text{ kg/m}^3$ ) se mantuvieron por encima de los 2 MPa de resistencia mínima para concretos ligeros aireados de acuerdo a la norma ASTM C1693 [121]. Los resultados de conductividad térmica posicionan este material muy por debajo de los valores reportados para el concreto, ladrillo, mortero de CP e incluso mortero de cal. Su capacidad de transferencia térmica resulta más similar a lo reportado para paneles de yeso o pastas de yeso.

La presencia o ausencia de microfílice en los sistemas tiene un efecto en la formación de etringita el cual pudiera no solo deberse a un efecto de densificación de la matriz cementante debido a su tamaño tan pequeño, sino que pudiera estar afectando aspectos como la saturación de la solución de poro la disponibilidad de  $Ca(OH)_2$  y esto a su vez tener influencia en el índice de nucleación y la cinética de cristalización de la etringita.

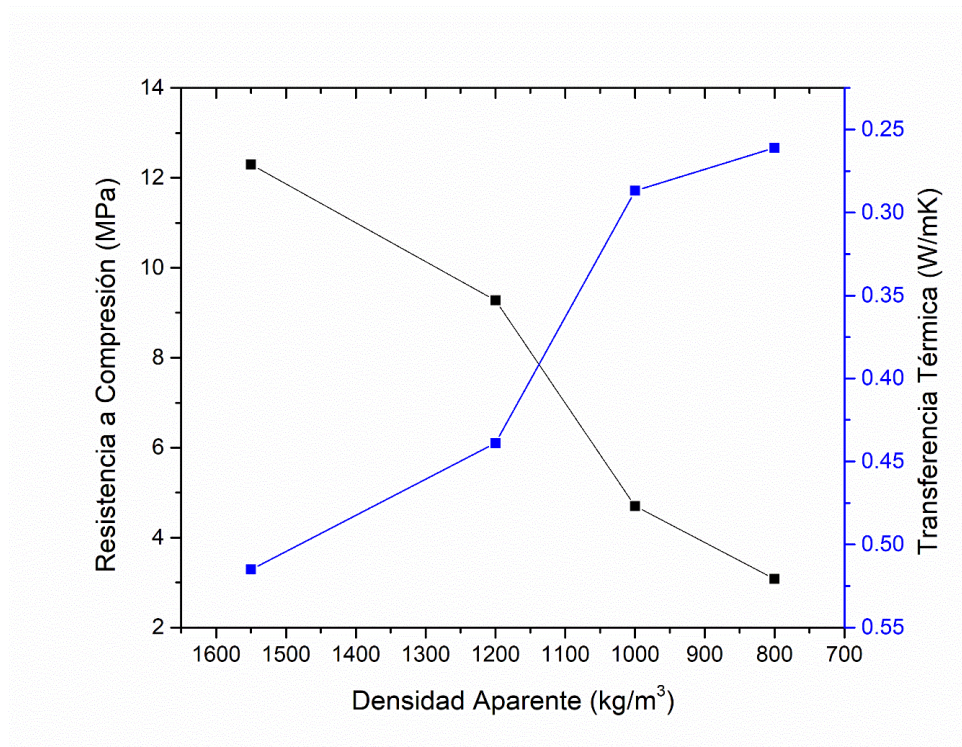
#### **4.4 Etapa Experimental 3. Correlación y Expresión Matemática**

Existe una relación clara entre estos parámetros: al disminuir la densidad aparente por medio de la formación de poros de aire al interior de la matriz cementante, se disminuye la transferencia térmica y a su vez se disminuye la resistencia a compresión. La intención en esta etapa es correlacionar estas tres propiedades del material, estimando que tan ligero y térmico puede llegar a ser el material, mientras mantiene aún una capacidad de compresión que resulte aprovechable como material de construcción. De acuerdo a la norma ASTM C1693 [121], una resistencia a compresión mínima de 2 MPa

es aceptable para concretos aligerados. Posteriormente la propuesta de una expresión que correlacione estos tres parámetros.

#### 4.4.1 Relación Densidad - Resistencia a Compresión - Transferencia Térmica

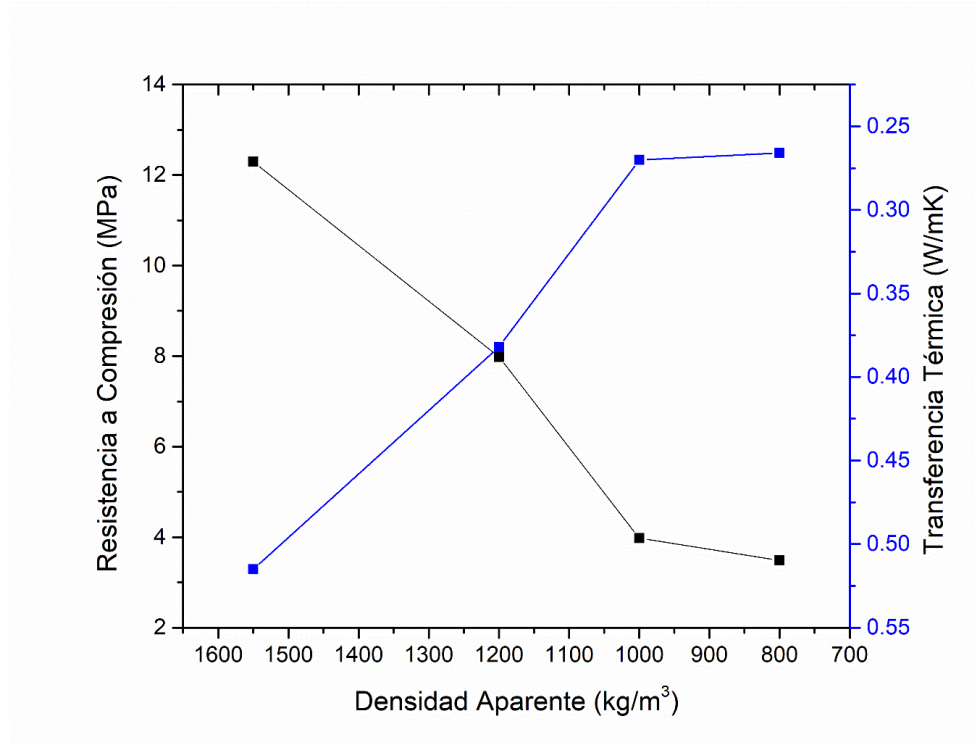
Analizando los datos obtenidos en las dos etapas anteriores, es posible establecer una relación entre la densidad, la resistencia a compresión y la transferencia térmica mostrada por los sistemas. Independientemente del aireante utilizado, se puede decir que existe una relación directa entre el comportamiento de la resistencia a compresión y la transferencia térmica en función de la variación de la densidad, es decir, al disminuir la densidad de una matriz cementante por medio de la formación intencionada de poros, de la misma manera disminuye la transferencia térmica del material, pero también disminuye la resistencia a compresión.



**Figura 57. Relación Densidad-Resistencia-Transferencia de sistemas aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sin adición de MS**

En la Figura 57 se muestra la relación entre densidad, resistencia a compresión y transferencia térmica de los sistemas aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sin adición de MS a una edad de

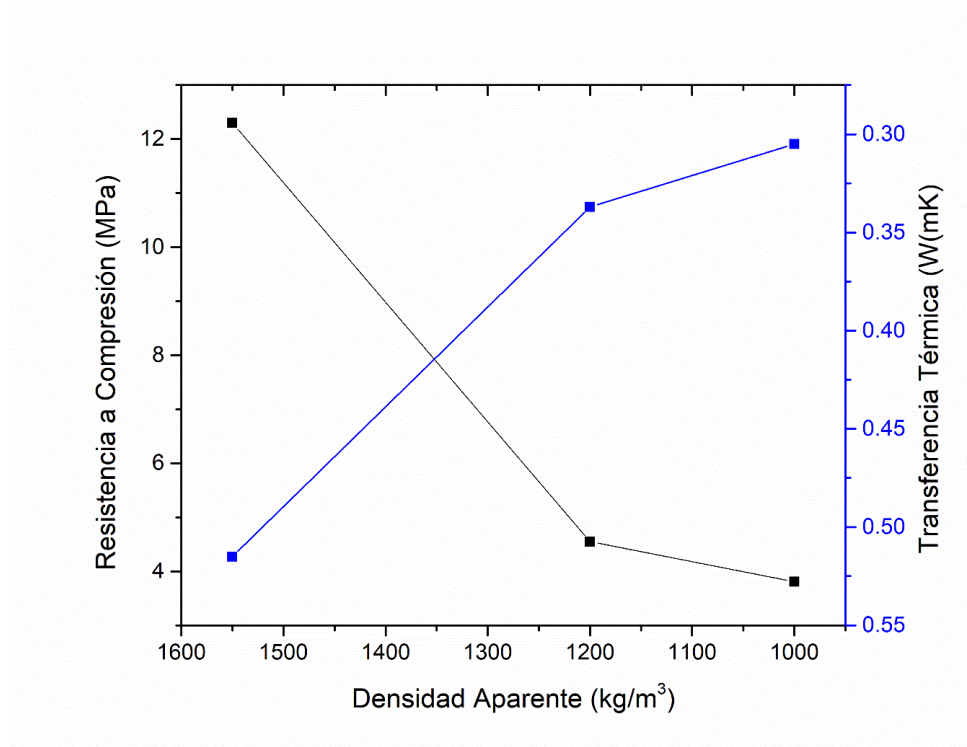
28 días. Como se muestra gráficamente, un buen balance entre resistencia y transferencia sería con una densidad de entre 1100 y 1150 kg/m<sup>3</sup>, donde aún tenemos una resistencia a compresión aproximada de 8 MPa y una transferencia térmica por debajo de 0.40 W/mK. Mientras que en los sistemas aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> con adición de MS (Ver Figura 58), es necesario mantener los sistemas en una densidad de 1200 kg/m<sup>3</sup> para tener características de resistencia y transferencia similares.



**Figura 58. Relación Densidad-Resistencia-Transferencia de sistemas aireados con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + MS**

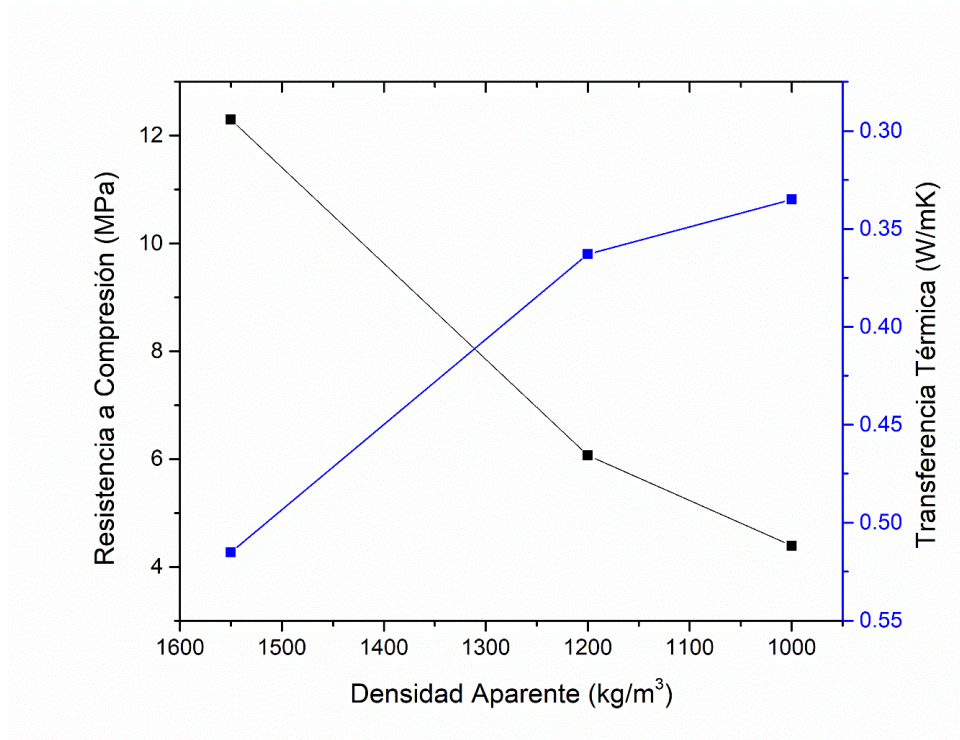
Por su parte, la Figura 59 muestra la relación entre densidad, resistencia a compresión y transferencia térmica de los sistemas aireados con polvo de Al sin adición de MS a una edad de 28 días. Como podemos observar en la gráfica, para mantener la resistencia a compresión de 8 MPa y transferencia térmica de 0.40 W/mK como en los ejemplos anteriores, en estos sistemas aireados con polvo de Al y sin adicionar MS, necesitamos mantener una densidad aproximada de 1350 kg/m<sup>3</sup>. Si quisiéramos disminuir la densidad de estos sistemas a niveles de 1150-1200 kg/m<sup>3</sup> para competir de cierta forma

con el ejemplo de los sistemas aireados con  $H_2O_2$ , estaríamos disminuyendo la transferencia térmica a niveles de  $0.33 \text{ W/mK}$ , pero a su vez estaríamos perdiendo resistencia a compresión hasta cerca de  $4.5 \text{ MPa}$ , casi la mitad de la resistencia de un sistema de la misma densidad aireado con  $H_2O_2$ .



**Figura 59. Relación Densidad-Resistencia-Transferencia de sistemas aireados con polvo de Al sin adición de MS**

Algo similar vemos en los sistemas aireados con polvo de Al con MS adicionado (Ver Figura 60). En este caso, al comparar contra los sistemas aireados con polvo de Al pero sin MS, vemos que en los que tienen MS se pueden obtener propiedades de resistencia y transferencia similares, pero con densidades un poco más bajas. Por ejemplo, retomando la resistencia de  $8 \text{ MPa}$  y la transferencia térmica de  $0.40 \text{ W/mK}$  como comparativa, en estos sistemas estos valores se obtienen a una densidad aproximada de  $1300 \text{ kg/m}^3$ , mientras que en los que no tiene MS la densidad tendría que ser  $1350 \text{ kg/m}^3$ . Sin embargo, esta densidad sigue estando por encima de las densidades obtenidas en los sistemas aireados con  $H_2O_2$ .



**Figura 60. Relación Densidad-Resistencia-Transferencia de sistemas aireados con polvo de Al + MS**

Como se observa, el sistema en el que se tiene el mejor balance de aprovechamiento de propiedades como resistencia a compresión y transferencia térmica, a su vez con la menor densidad, fue el aireado con  $H_2O_2$  sin la adición de MS. Como ya se mencionó con anterioridad, la MS además de tener un efecto de densificación debido a su tamaño tan pequeño, también en matrices base sulfatos de calcio como la propuesta en este trabajo, la MS suele interferir en la hidratación de la AH [10,17]. Aparentemente, en una porosidad redondeada como la formada por el efecto aireante del  $H_2O_2$ , la MS no muestra ningún efecto apreciable en las propiedades, más allá de que fuera necesario adicionar más aireante para llegar a la densidad deseada, así que el único efecto apreciable de la MS es su interferencia en la hidratación de la AH, lo cual si repercute en las propiedades finales del sistema.

#### **4.4.2 Propuesta de Expresión Matemática**

La intención de proponer una expresión en este trabajo, es poder predecir el comportamiento térmico de muestras fabricadas con esta matriz cementante a partir de

parámetros como la densidad y la resistencia a compresión, debido a que es mucho más sencillo medir las propiedades físicas y mecánicas de un material, que las propiedades térmicas del mismo. Se sabe que existe una relación entre estos tres parámetros (densidad-resistencia a compresión-transferencia térmica), sin embargo, es probable que la correlación existente entre los tres sea diferente dependiendo del aireante utilizado y el hecho de que se haya incluido MS o no.

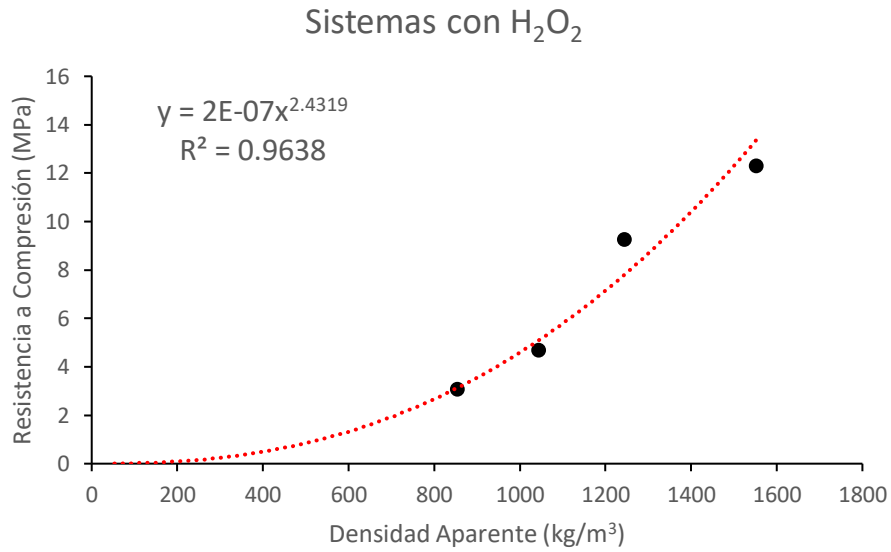
Partiendo de modelos propuestos con anterioridad (Balshin, Tam, etc.) y mostrados previamente en este trabajo de tesis [99,102], se evidencia que el efecto que la porosidad tiene sobre la resistencia a compresión sigue un comportamiento exponencial y se propone el uso de una constante determinada para representar dicho comportamiento. Sin embargo, en este trabajo de tesis la intención es expresar el comportamiento de estos sistemas en función de su densidad y no de su porosidad. Por esta razón, se propone sustituir el parámetro de la porosidad en la ecuación de Balshin (36) por la densidad, sin embargo, para lograr esto será necesario evidenciar que efectivamente la densidad influye de manera similar y muestra un comportamiento de igual manera exponencial.

$$S = S_0(1 - P)^n \quad (36)$$

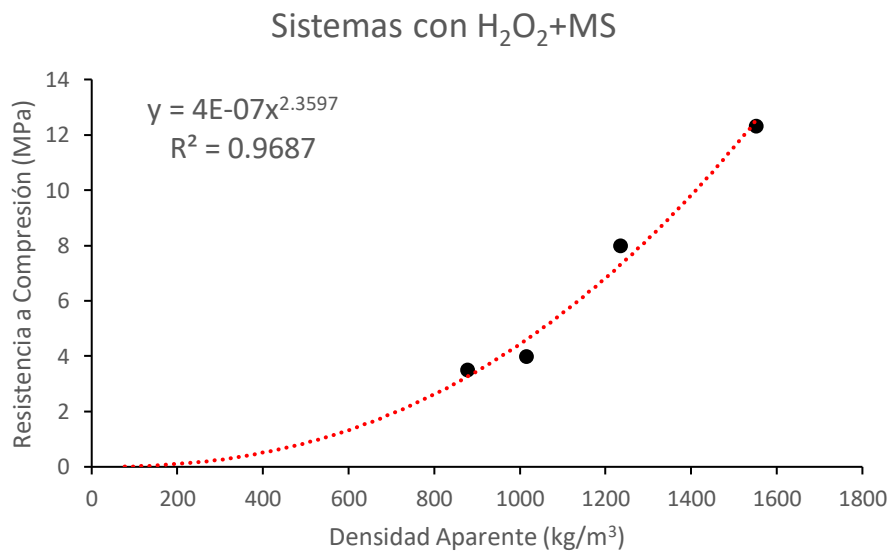
En el modelo de Balshin, la porosidad ( $P$ ) al estar restando a un 1, implica que la porosidad sea tomada como un porcentaje, es decir, como un valor menor a uno que se resta de la situación de porosidad cero, y afecta de forma exponencial por la constante  $n$  a la resistencia a compresión con cero porosidad, representada por  $S_0$ . De esta manera, al analizar una muestra hipotética con porosidad cero,  $S_0$  multiplicaría a  $(1 - 0)$ , siendo  $1^n = 1$ , por lo tanto  $S = S_0$ , siempre que la porosidad sea cero.

Para evidenciar que el comportamiento de los sistemas aireados sigue mostrando una gráfica exponencial considerando densidad en lugar de porosidad, de acuerdo a los gráficos de resistencia a compresión vs densidad (Ver Figura 61, Figura 62, Figura 63 y Figura 64) se observa que efectivamente el comportamiento sigue siendo el mismo. Evidentemente el valor de la constante  $n$ , que era el exponencial en la ecuación de Balshin, será diferente en este caso, dado que el efecto de un parámetro y otro, densidad o

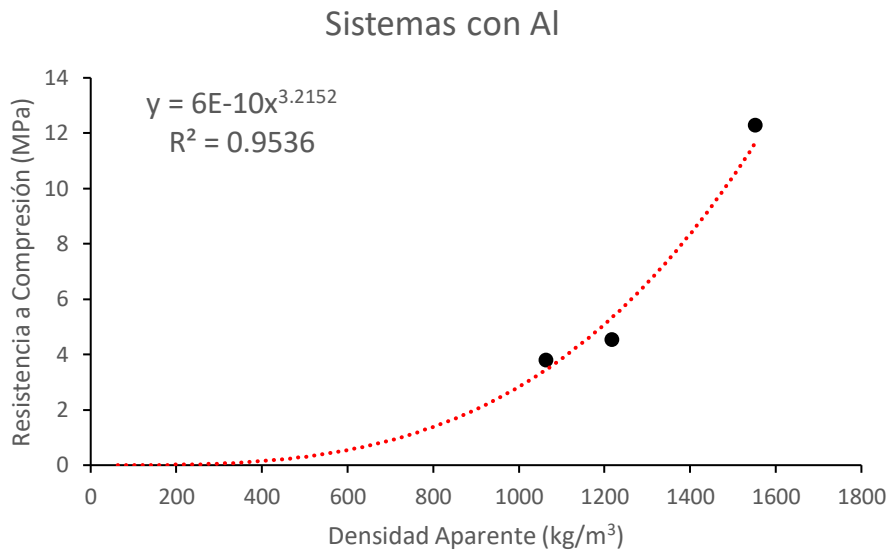
porosidad, será diferente para cada sistema y para cada material, sin embargo, debido a que el grafico muestra un comportamiento exponencial, esta constante  $n$  es la responsable de que la curva siga ese comportamiento.



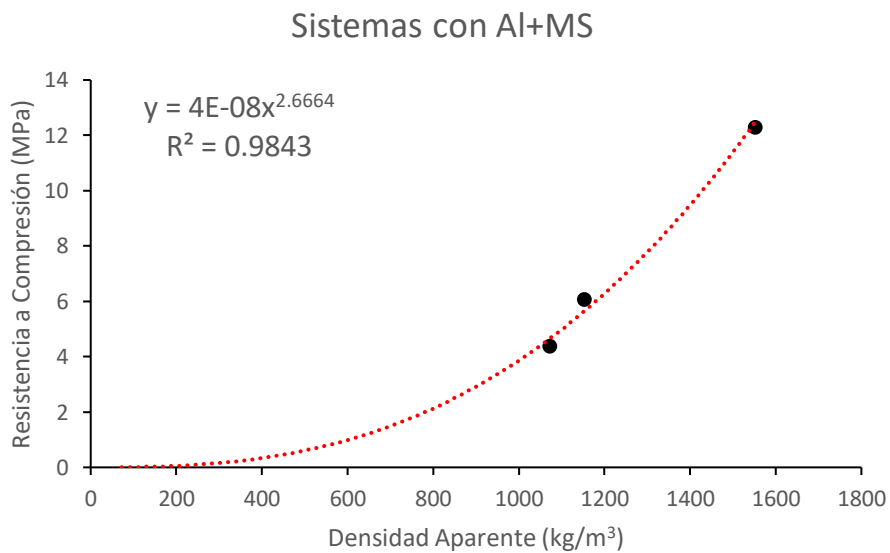
**Figura 61. Comportamiento de la Resistencia a Compresión en función de la densidad en sistemas con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**



**Figura 62. Comportamiento de la Resistencia a Compresión en función de la densidad en sistemas con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS**



**Figura 63. Comportamiento de la Resistencia a Compresión en función de la densidad en sistemas con Al**



**Figura 64. Comportamiento de la Resistencia a Compresión en función de la densidad en sistemas con Al+MS**

En el argot de la construcción o la ingeniería civil, no es común referirse a la resistencia a compresión con el símbolo  $S$ , como lo hace Balshin en su modelo. Por esta razón, se propone la sustitución de este símbolo por uno más comúnmente utilizado en la ingeniería civil:  $f'c$ . De esta forma, el primer paso para elaborar la expresión, donde  $f'c$  es la resistencia a compresión de un sistema dado,  $f'c_0$  es la resistencia a compresión de un sistema sin aireante el cual sería como un equivalente al hipotético porosidad cero de Balshin,  $\rho$  que en este caso ya es densidad y no porosidad y  $n$  que es la constante exponencial que determina el comportamiento de la curva, para lo cual se tomarán los valores de los exponentes mostrados en las figuras anteriores, la expresión queda de la siguiente manera (37):

$$f'c = f'c_0 (1 - \rho)^n \quad (37)$$

Sin embargo, para determinar la densidad a partir de los ensayos de resistencia a compresión, no es posible mantener el valor de la densidad como si se tratara de un porcentaje, debido a que lo que se busca es el valor real de la densidad. Por esta razón, el parámetro  $1 - \rho$  debe de cambiar, ya que este parámetro muestra como resultado la fracción o porcentaje de volumen sólido en la ecuación de Balshin, y en este caso mostraría la fracción o porcentaje de pérdida de densidad. Para obtener el valor de densidad de un caso dado, entonces el parámetro tendría que ser una división entre la densidad máxima (sistema sin aireante) y la densidad de un sistema dado, quedando de la siguiente manera (38):

$$f'c = f'c_0 \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^n \quad (38)$$

De aquí se procede a un despeje (39) para dejar la densidad de un sistema dado en función de la densidad aparente del mismo sistema, pero sin aireante ( $\rho_0$ ), la resistencia a compresión del sistema igual sin aireante ( $f'c_0$ ) y la resistencia a compresión del sistema de estudio ( $f'c$ ).

$$\rho = \rho_0 \cdot \sqrt[n]{\frac{f'c}{f'c_0}} \quad (39)$$

Habiendo definido la densidad en función de la resistencia a compresión, considerando la fórmula para el cálculo de la difusividad térmica de un sólido (40) y conociendo los valores de transferencia térmica ( $k$ ), calor específico ( $C_p$ ) y densidad ( $\rho$ ), valores que ya se reportaron anteriormente en este trabajo, es posible calcular la difusividad térmica de cada uno de los sistemas [158]. De esta forma, utilizando los valores de  $k$  y  $C_p$  reportados en Tabla 12 y Tabla 14 respectivamente, se calcularon los valores de difusividad térmica de cada uno de los sistemas a partir de sus muestras a 28 días, y los resultados son reportados en la Tabla 16.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (40)$$

**Tabla 16. Valores de difusividad calculados de los sistemas aireados.**

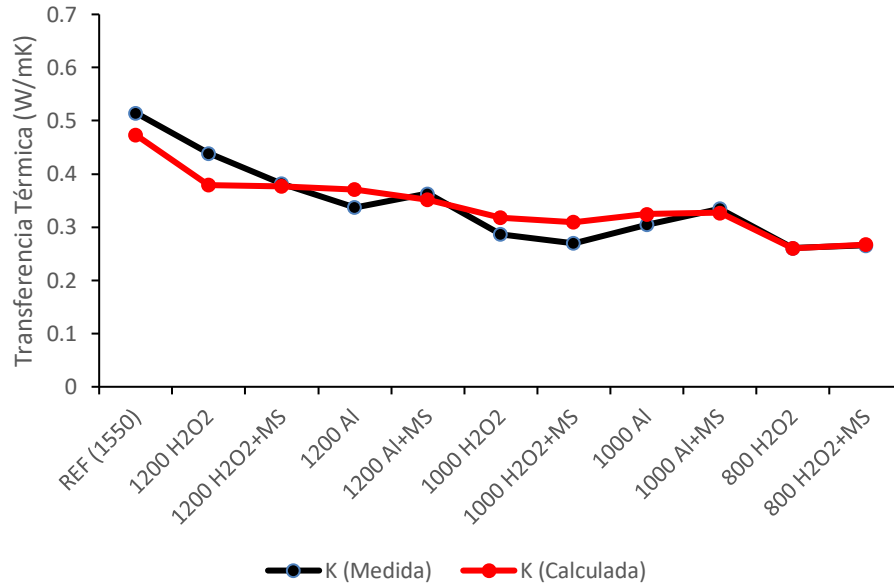
| <b>Sistema</b>                            | <b><math>\rho</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b><math>k</math> (W/mK)</b> | <b><math>C_p</math> (J/gK)</b> | <b><math>\alpha</math> (cm<sup>2</sup>/s)</b> |
|---|---|------------------------------|--------------------------------|---|
| <b>REF (1550)</b>                         | 1552  | 0.515                        | 1.120                          | <b>0.00296</b>                                |
| <b>1200 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>    | 1244  | 0.439                        | 1.184                          | <b>0.00298</b>                                |
| <b>1200 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS</b> | 1235  | 0.382                        | 1.162                          | <b>0.00266</b>                                |
| <b>1200 Al</b>                            | 1216  | 0.337                        | 1.075                          | <b>0.00258</b>                                |
| <b>1200 Al+MS</b>                         | 1153  | 0.363                        | 1.300                          | <b>0.00242</b>                                |
| <b>1000 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>    | 1043  | 0.287                        | 1.106                          | <b>0.00249</b>                                |
| <b>1000 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS</b> | 1014  | 0.270                        | 1.085                          | <b>0.00245</b>                                |
| <b>1000 Al</b>                            | 1063  | 0.305                        | 1.175                          | <b>0.00244</b>                                |
| <b>1000 Al+MS</b>                         | 1072  | 0.335                        | 1.294                          | <b>0.00241</b>                                |
| <b>800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>     | 853   | 0.261                        | 1.080                          | <b>0.00283</b>                                |
| <b>800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS</b>  | 877   | 0.266                        | 0.919                          | <b>0.00330</b>                                |

En este caso, para el cálculo de la difusividad térmica, se emplearon los valores de densidad calculados para cada uno de los especímenes que fueron utilizados para la medición tanto de la transferencia térmica como del calor específico. Los valores de difusividad térmica calculados, son coherentes con valores de difusividad reportados para matrices de yeso a partir de hemihidrato [94] y matrices de yeso a partir de sulfato de calcio de desulfuración de gases (desulfoyeso) [159].

Si se calcula el promedio de todos los valores de difusividad térmica y calor específico obtenidos, es posible obtener valores fijos para este tipo de materiales, sin embargo, eso genera un error o una variación debido a que, para mejorar la precisión, se tendría que utilizar el valor correspondiente a cada sistema en caso de estudio, no obstante, eso complicaría mucho el poder determinar una expresión que pueda ser utilizada ampliamente. Utilizando los valores promedio de la difusividad térmica ( $0.00268 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) y calor específico ( $1.136 \text{ J/gK}$ ), y calculando de forma inversa la conductividad térmica por medio de la fórmula despejada (41), se observa la variación entre los resultados obtenidos al utilizar los promedios ya mencionados y los obtenidos al utilizar los valores medidos de cada sistema en la Figura 65, utilizando en ambos casos las densidades medidas de cada sistema.

$$k = \alpha C_p \rho \quad (41)$$

La máxima variación fue observada en el sistema  $1000 \text{ H}_2\text{O}_2 + \text{MS}$ , donde el valor de la transferencia térmica pasó de ser de  $0.270$  a  $0.309 \text{ W/mK}$ , lo cual equivale a una diferencia de  $0.039 \text{ W/mK}$  entre ambos resultados, medición y calculada. Otro sistema con una variación considerable es el  $1200 \text{ H}_2\text{O}_2$ , donde la transferencia térmica pasó de  $0.439$  a  $0.380 \text{ W/mK}$ , que equivale a  $0.059 \text{ W/mK}$  de diferencia. De todos los valores restantes, ninguno supera el 10% de variación, incluso cinco sistemas se localizan por debajo del 3%.



**Figura 65. Variación en el valor de transferencia térmica medida vs calculada, usando valores promedio de  $\alpha$  y  $C_p$ , y densidades medidas**

De esta forma entonces, la expresión propuesta en este trabajo quedaría como se muestra en (42), siendo  $k$  la transferencia térmica del material,  $\alpha$  y  $C_p$  los promedios de difusividad térmica y calor específico del material, calculados a partir de mediciones a distintas densidades aparentes,  $\rho_0$  es la densidad aparente de un sistema sin aireante,  $f'c_0$  es la resistencia a compresión del mismo sistema sin aireante,  $f'c$  es la resistencia a compresión de un sistema dado y  $n$  es la constante determinada a partir de la gráfica de resistencia a compresión-densidad aparente.

$$k = \alpha C_p \left( \rho_0 \cdot \sqrt[n]{\frac{f'c}{f'c_0}} \right) \quad (42)$$

Con esta expresión es posible estimar la capacidad de transferencia térmica de un material aireado principalmente a partir de la relación entre su resistencia a compresión y la resistencia a compresión del mismo material sin aireante. Para ello es necesario previamente hacer una serie de sistemas variando únicamente el contenido de aireante, de esta forma obtener distintas densidades y resistencias a compresión para hacer la gráfica

correspondiente que relaciones ambas propiedades y obtener el valor de la constante  $n$ . Posteriormente, tomar muestras de estos sistemas para medir la difusividad térmica y el calor específico y obtener sus promedios. Conociendo estos valores y la densidad aparente y resistencia a compresión del sistema sin aireante, solo es necesario ensayar a compresión cualquier sistema aireado de este mismo material para poder estimar la transferencia térmica del mismo.

Para ejemplificar, empleando la formula (42) y sustituyendo los datos de difusividad térmica y calor específico para el sistema 800 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, da como resultado un valor  $k$  de 0.267 W/mK (43), el cual resulta muy cercano al 0.261 obtenido en la medición de la transferencia térmica del mismo sistema.

$$k_{800H_2O_2} = (0.00268 \text{ cm}^2/\text{s}) (1.136 \text{ J/gK}) \left( 1552 \text{ kg/m}^3 \cdot \sqrt[2.4319]{\frac{3.08 \text{ MPa}}{12.3 \text{ MPa}}} \right) \quad (43)$$

$$k_{800H_2O_2} = 0.267 \text{ W/mK}$$

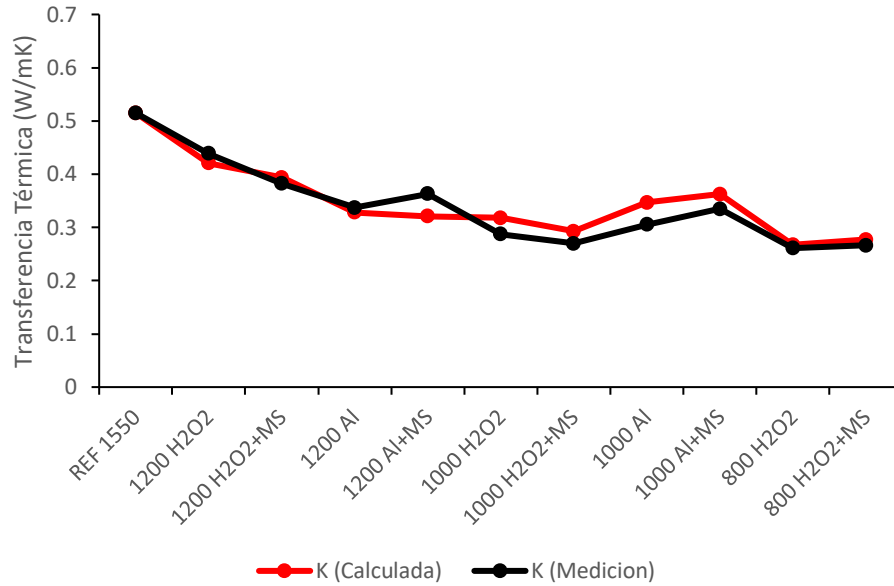
De igual manera, considerando el sistema 1200 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>+MS y aplicando la formula utilizando los valores de los promedios de difusividad térmica y calor específico, el resultado es 0.393 W/mK (44), cercano al 0.382 obtenido en la medición de transferencia térmica del sistema.

$$k_{1200H_2O_2+MS} = (0.00268 \text{ cm}^2/\text{s}) (1.136 \text{ J/gK}) \left( 1552 \text{ kg/m}^3 \cdot \sqrt[2.3597]{\frac{7.98 \text{ MPa}}{12.3 \text{ MPa}}} \right) \quad (44)$$

$$k_{1200H_2O_2+MS} = 0.393 \text{ W/mK}$$

Utilizando esta expresión se puede tener una buena aproximación a las propiedades de transferencia térmica del material, únicamente variando el valor de la resistencia a compresión de éste, y empleando el valor de  $n$  correspondiente de acuerdo al tipo de aireante utilizado. Sin embargo, existe cierta variación entre el valor de la transferencia térmica calculado de esta manera y el valor obtenido por el método de flujo de calor [123].

Esta variación se puede observar gráficamente en la Figura 66 y numéricamente en la Tabla 17.



**Figura 66. Variación en el valor de transferencia térmica medida vs calculada, usando la expresión propuesta**

**Tabla 17. Diferencia entre K medida y K calculada (W/mK)**

| Sistema                                | K (Medición) | K (Calculada) | Diferencia   |
|--|--------------|---------------|--------------|
| 1200 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>     | 0.439        | 0.421         | <b>0.018</b> |
| 1200 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +MS | 0.382        | 0.393         | <b>0.011</b> |
| 1200 Al                                | 0.337        | 0.328         | <b>0.009</b> |
| 1200 Al+MS                             | 0.363        | 0.321         | <b>0.042</b> |
| 1000 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>     | 0.287        | 0.318         | <b>0.031</b> |
| 1000 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +MS | 0.270        | 0.293         | <b>0.023</b> |
| 1000 Al                                | 0.305        | 0.347         | <b>0.042</b> |
| 1000 Al+MS                             | 0.335        | 0.363         | <b>0.028</b> |
| 800 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>      | 0.261        | 0.267         | <b>0.006</b> |
| 800 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +MS  | 0.266        | 0.277         | <b>0.011</b> |

#### **4.4.3 Resumen de Resultados, Etapa Experimental 3**

Existe una relación directa entre la densidad, la resistencia a compresión y la transferencia térmica en sistemas cementantes aireados de este tipo. Es decir, al disminuir intencionalmente la densidad de un material de este tipo por la adición de un agente aireante, de igual forma se disminuye la capacidad mecánica del material, así como su capacidad de transferencia térmica, volviéndolo más aislante.

Por esta razón, es posible estimar la transferencia térmica de un sistema aireado dado por medio de la ecuación (42), partiendo únicamente de su resistencia a la compresión. Para ello es necesario realizar algunas pruebas preliminares para estimar la difusividad térmica y el calor específico de una matriz de este material, y la densidad y resistencia a compresión de una matriz de este mismo material, pero sin la adición de un aireante. La utilidad de esta ecuación radica en poder estimar la capacidad aislante de una matriz de material cementante, a partir únicamente de su resistencia a compresión, debido a que realizar pruebas de transferencia térmica requiere más tiempo y una mayor preparación de muestra y a veces no se cuenta con equipo necesario.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES**

#### **5.1 Conclusiones**

La adición de un material fino (microsílice, carbonato de calcio o carburo de silicio), con un tamaño de partícula menor a las 45 micras, resultó en mejoramiento de la resistencia a compresión y la estabilidad dimensional de los sistemas base anhidrita-escoria de alto horno. Particularmente la adición de microsílíce proporcionó mejor estabilidad dimensional, evidenciado por pruebas de cambio de longitud en barras con sección cuadrada, según normativa ASTM. Los sistemas que contenían la adición de microsílíce se mantuvieron por debajo del 0.06% de expansión incluso hasta los 270 días de curado, mientras los demás sistemas, incluyendo el de referencia, superaron el 0.11% de expansión ya desde los 56 días de curado.

De igual forma, esta adición de microsílíce mejoró el desempeño mecánico de los sistemas elevando su resistencia a compresión llegando a superar los 26 MPa a 360 días de curado (sistema 5% MS), a diferencia del de referencia que apenas superó los 16 MPa. Sin embargo, al aumentar la cantidad de adición se pudo notar una disminución en dicho desempeño, debido a que la microsílíce interfiere en la hidratación de la anhidrita. De tal forma que el desempeño mecánico de estos sistemas se ve afectado de forma positiva por la adición de microsílíce debido a un efecto de empaquetamiento y densificación por su alta finura, y de forma negativa debido a esta interferencia en la hidratación de la anhidrita.

Por lo tanto, se corrobora que la adición de MS en sistemas base anhidrita y escoria de alto horno, beneficia las propiedades de resistencia a compresión y estabilidad dimensional, mostrando una mejora en ambas propiedades por encima de lo mostrado por los otros dos materiales de prueba (CC y SiC) y la referencia. No es recomendable una adición de más del 5% de MS, debido a que interfiere en el proceso de hidratación de la anhidrita al consumir el  $\text{Ca(OH)}_2$  inicialmente adicionado como activante, además de no mostrar mayores beneficios al adicionar una mayor cantidad.

Por medio de análisis en microscopio electrónico de barrido fue posible identificar la formación de tres principales productos de hidratación: yeso, fases tipo C-S-H y etringita. La inclusión de un agente aireante, con la intención de formar una red de poros para mejorar la capacidad de aislamiento térmico de la matriz cementante, afectó negativamente la resistencia a compresión y a su vez también disminuyó la capacidad de transferencia térmica, volviendo a la matriz efectivamente más aislante.

La porosidad formada al utilizar polvo de aluminio como aireante, forma grietas u oquedades de tamaños muy variados y formas alargadas, mientras que al utilizar  $\text{H}_2\text{O}_2$  la porosidad forma poros más pequeños, con una distribución de tamaños más uniforme y con formas redondeadas. El hecho de que un aireante se adicione como polvo y otro como líquido, genera una diferencia en la dispersión y por consecuencia en la porosidad. El polvo de Al tiende a aglomerarse y al liberar aire forma concentraciones de burbujas que rápidamente tienden a la coalescencia, mientras que el  $\text{H}_2\text{O}_2$ , al ser adicionado en líquido, se dispersa de manera más uniforme.

En cuanto a la resistencia a compresión, los sistemas aireados con  $\text{H}_2\text{O}_2$  mostraron siempre mejores resultados que sus similares aireados con polvo de aluminio. Los resultados de conductividad térmica posicionan este material por debajo de valores reportados para el concreto, ladrillo, mortero de cemento portland y mortero de cal, siendo más similar a los valores reportados para paneles de yeso y pastas de yeso. Sin embargo, a diferencia del yeso convencional, este material al estar adicionado con escoria de alto horno, presenta menor disolución en agua.

La aparición de reflexiones características de aluminio en los análisis de DRX de sistemas aireados con este material, indican que el aluminio no está reaccionando en su totalidad, y una fracción de este permanece como aluminio metálico. Probablemente el pH de la matriz cementante no es suficientemente alcalino para provocar la reacción total del aluminio. Las reflexiones características de etringita mostraron una mayor intensidad en los sistemas aireados con polvo de Al, indicando que el  $\text{Al}(\text{OH})_3$  que queda como remanente estaría aportando el aluminio necesario para la formación de etringita.

De esta manera queda comprobado que se obtienen mejores resultados al utilizar  $\text{H}_2\text{O}_2$  como aireante en matrices base anhidrita y escoria de alto horno que al utilizar polvo de aluminio. Por un lado, con el uso de  $\text{H}_2\text{O}_2$  la porosidad obtenida es más redondeada, permitiendo así mejores resistencias a compresión. Por otro lado, el polvo de Al interviene en la formación de etringita y una fracción de polvo de Al permanece sin reaccionar, desaprovechándose parte del material adicionado.

La presencia o ausencia de microsílíce en los sistemas tiene un efecto en la formación de etringita el cual pudiera no solo deberse a un efecto de densificación de la matriz cementante debido a su tamaño tan pequeño, sino que pudiera estar afectando aspectos como la saturación de la solución de poro la disponibilidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y esto a su vez tener influencia en el índice de nucleación y la cinética de cristalización de la etringita.

Por otro lado, fue posible expresar la relación existente entre densidad, resistencia a compresión y transferencia térmica de una matriz cementante en una sola ecuación. De modo que es posible estimar la transferencia de un sistema aireado dado por medio de la ecuación mostrada en este trabajo de investigación, partiendo únicamente de su resistencia a compresión. Para ello es necesario conocer los parámetros de difusividad térmica y calor específico de la matriz cementante, además de la densidad y resistencia a compresión de una matriz del mismo material, pero sin aireante.

La utilidad de la ecuación propuesta en este trabajo, radica en poder estimar la capacidad aislante de una matriz de material cementante sin tener que forzosamente realizar pruebas térmicas al mismo, ya que realizar estas pruebas suele requerir más

tiempo y preparación de muestra, además de que en ocasiones no se cuenta con el equipo necesario.

## **5.2 Recomendaciones**

El sulfato de calcio o yeso, es un material con características de disolución en ambientes húmedos, por lo tanto, se recomienda el estudio de la durabilidad de los sistemas base sulfato de calcio. Los productos hidratados formados por la reacción de la escoria de alto horno, proporcionan protección a los sistemas contra la humedad, sin embargo, someter los sistemas a ciclos de humectación y secado puede resultar en la pérdida de propiedades mecánicas.

Es recomendable dar un seguimiento al comportamiento y desarrollo de los sistemas por un periodo de tiempo más prolongado, debido a que la formación de etringita, aunque no represento un proceso deletéreo durante el desarrollo de esta tesis, su presencia puede representar problemas a edades posteriores.

El método por intrusión de mercurio no se consideró como una opción, ya que no es recomendable para materiales aireados o espumados, debido a que la presión ejercida durante la prueba, puede fracturar la estructura porosa de las muestras. Por otro lado, la técnica por adsorción de nitrógeno (BET) se limita al análisis de mesoporosidad y un rango muy pequeño de macroporosidad. La medición de la porosidad, considerando especialmente meso y macroporosidad, permitiría una discusión más amplia de las propiedades en función de la distribución de tamaños de poro.

De la misma manera, la formación y crecimiento de cristales de etringita, sobre todo en los espacios disponibles, podría llenar los poros creados por los agentes aireantes, afectando la conductividad térmica del material, debido a que un cuerpo sólido conduce mejor la temperatura que el aire. Realizar mediciones de conductividad térmica en sistemas a edades más avanzadas es necesaria para determinar si la etringita está teniendo algún efecto en la capacidad aislante del material.

La comprobación de la expresión propuesta en este trabajo de tesis, requiere de la elaboración de una nube de datos más amplia, que proporcione una aproximación más

confiable. Por otro lado, probar esta expresión en matrices cementantes con características diferentes, permitiría ver si es adaptable a otros materiales. De la misma manera, analizar la variación de la conductividad térmica en función del tiempo, permitiría considerar la adición de alguna variable en la expresión que describa este fenómeno.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] U.S. Geological Survey, MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2018.
- [2] International Energy Agency, Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry, (2018) 66. doi:10.1007/SpringerReference\_7300.
- [3] E. Gartner, H. Hirao, A review of alternative approaches to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete, *Cem. Concr. Res.* 78 (2015) 126–142. doi:10.1016/j.cemconres.2015.04.012.
- [4] A. Bonakdar, F. Babbitt, B. Mobasher, Physical and mechanical characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC), *Cem. Concr. Compos.* 38 (2013) 82–91. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.03.006.
- [5] K. Yang, K. Lee, Tests on high-performance aerated concrete with a lower density, *Constr. Build. Mater.* 74 (2015) 109–117. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.030.
- [6] E. Gartner, Industrially interesting approaches to ““ low-CO<sub>2</sub> ”” cements, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 1489–1498. doi:10.1016/j.cemconres.2004.01.021.
- [7] M.A. Guerra-Cossío, J.R. González-López, R.X. Magallanes-Rivera, A.A. Zaldívar-Cadena, M.Z. Figueroa-Torres, Anhydrite, blast-furnace slag and silica fume composites: properties and reaction products, *Adv. Cem. Res.* 31 (2019) 362–369. doi:10.1680/jadcr.17.00216.
- [8] R. Vicente, T. Silva, Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach, *Appl. Therm. Eng.* 67 (2014) 24–34. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.02.069.

- [9] M. Whittaker, L. Black, Current knowledge of external sulfate attack, *Adv. Cem. Res.* 27 (2015) 532–545. doi:<http://dx.doi.org/10.1680/adcr.14.00089>.
- [10] R.X. Magallanes-Rivera, C.A. Juarez-Alvarado, P. Valdez, J.M. Mendoza-Rangel, Modified gypsum compounds : An ecological – economical choice to improve traditional plasters, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 591–596. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2012.07.054](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.054).
- [11] K. Kovler, Setting and hardening of gypsum-portland cement-silica fume blends, part 1: temperature and setting expansion, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 423–437.
- [12] H.Z. Wang, D.Y.C. Leung, M.K.H. Leung, M. Ni, A review on hydrogen production using aluminum and aluminum alloys, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2009) 845–853. doi:[10.1016/j.rser.2008.02.009](https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.009).
- [13] X. Huang, T. Gao, X. Pan, D. Wei, C. Lv, L. Qin, Y. Huang, A review: Feasibility of hydrogen generation from the reaction between aluminum and water for fuel cell applications, *J. Power Sources.* 229 (2013) 133–140. doi:[10.1016/j.jpowsour.2012.12.016](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.016).
- [14] V. Shmelev, V. Nikolaev, J.H. Lee, C. Yim, Hydrogen production by reaction of aluminum with water, *Int. J. Hydrogen Energy.* 41 (2016) 16664–16673. doi:[10.1016/j.ijhydene.2016.05.159](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.159).
- [15] V. Ducman, L. Korat, Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as foaming agents, *Mater. Charact.* 113 (2016) 207–213. doi:[10.1016/j.matchar.2016.01.019](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.01.019).
- [16] M. Şahin, S.T. Erdoğan, Ö. Bayer, Production of lightweight aerated alkali-activated slag pastes using hydrogen peroxide, *Constr. Build. Mater.* 181 (2018) 106–118. doi:[10.1016/j.conbuildmat.2018.05.267](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.267).
- [17] R.X. Magallanes-Rivera, J.I. Escalante-Garcia, Hemihydrate or waste anhydrite in composite binders with blast-furnace slag : Hydration products , microstructures and dimensional stability, *Constr. Build. Mater.* 71 (2014) 317–326.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.08.054.

- [18] B. Quiroga Martinez, La electricidad frente al combustible, Twenergy. (2017). <https://twenergy.com/a/la-electricidad-frente-al-combustible-2734>.
- [19] F. Ramirez Hernandez, Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, Inst. Nac. Ecol. y Cambio Climático. (2018). [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/312045/INEGYCEI6CN\\_26\\_marzo\\_2018.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/312045/INEGYCEI6CN_26_marzo_2018.pdf).
- [20] Secretaría de Energía y Comisión Federal de Electricidad, Atlas de almacenamiento geológico de CO2 en México, (2012) 18.
- [21] El suministro y consumo de energía produce el 79% de las emisiones de gases efecto invernadero de la UE, Factor CO2. (2017). <https://www.factorco2.com/es/el-suministro-y-consumo-de-energia-produce-el-79-de-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-de-la-ue/noticia/1808>.
- [22] M. Syal, M. Hastak, M. Mullens, A. Sweaney, United States-India collaborative research directions in urban housing and supporting infrastructure, J. Archit. Eng. 12 (2006) 163–167. doi:10.1061/(ASCE)1076-0431(2006)12:4(163).
- [23] WBCSD, Transforming the Market: Energy Efficiency in Buildings, 2009. [http://wbcstdservers.org/wbcstdpublications/cd\\_files/datas/business-solutions/eeb/pdf/EEB-TransformingTheMarket.pdf](http://wbcstdservers.org/wbcstdpublications/cd_files/datas/business-solutions/eeb/pdf/EEB-TransformingTheMarket.pdf).
- [24] Y.L. Li, M.Y. Han, S.Y. Liu, G.Q. Chen, Energy consumption and greenhouse gas emissions by buildings: A multi-scale perspective, Build. Environ. (2019). doi:10.1016/j.buildenv.2018.11.003.
- [25] J. Hong, Q. Shen, F. Xue, A multi-regional structural path analysis of the energy supply chain in China's construction industry, Energy Policy. 92 (2016) 56–68. doi:10.1016/j.enpol.2016.01.017.
- [26] B. Liu, D. Wang, Y. Xu, C. Liu, M. Luther, Embodied energy consumption of the construction industry and its international trade using multi-regional input–output

- analysis, *Energy Build.* 173 (2018) 489–501. doi:10.1016/j.enbuild.2018.05.040.
- [27] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta, E. Gartner, Cement and carbon emissions, *Mater. Struct.* 47 (2014) 1055–1065. doi:10.1617/s11527-013-0114-5.
- [28] R. Drochytka, J. Zach, A. Korjenic, J. Hroudová, Improving the energy efficiency in buildings while reducing the waste using autoclaved aerated concrete made from power industry waste, *Energy Build.* 58 (2013) 319–323. doi:10.1016/j.enbuild.2012.10.029.
- [29] J.I. Escalante-Garcia, Materiales alternativos al cemento Pórtland, *Av. y Perspect.* 21 (2002) 79–88.
- [30] A.R. Sakulich, Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and durability, *Sustain. Cities Soc.* 1 (2011) 195–210. doi:10.1016/j.scs.2011.07.009.
- [31] H. Ludwig, W. Zhang, Research review of cement clinker chemistry, *Cem. Concr. Res.* 78 (2015) 24–37. doi:10.1016/j.cemconres.2015.05.018.
- [32] ASTM International, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2010). doi:10.1520/C0618.
- [33] ASTM International, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2010). doi:10.1520/C0989-09A.2.
- [34] S.H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W.C. Panarese, J. Tanesi, Ceniza Volante, Escoria, Humo de Sílice y Puzolanas Naturales, in: *Diseño y Control Mezclas Concreto*, Portland Cement Association, 2004: pp. 77–94.
- [35] ACI Comitee 233, *Ground Granulated Blast Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete*, 2000.
- [36] R.X. Magallanes-Rivera, Efecto de la formulación y las condiciones de curado sobre los productos de hidratación y desarrollo de propiedades en materiales de

construcción a base de yeso, Ph.D. Thesis, Cinvestav, IPN, Coahuila, México, 2009.

- [37] M. Moranville-Regourd, Cements Made From Blastfurnace Slag, in: P.C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chemistry Cem. Concr.*, 4th ed., Elsevier Ltd, 2004: pp. 637–678.
- [38] R. Siddique, M. Iqbal Khan, *Supplementary Cementing Materials*, Engineering Materials Series, Springer, 2011.
- [39] F. Massazza, Pozzolana and Pozzolanitic Cements, in: P.C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chemistry Cem. Concr.*, 4th ed., Elsevier Ltd, 2004: pp. 471–635.
- [40] R. Siddique, Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties, *Resour. Conserv. Recycl.* 55 (2011) 923–932. doi:10.1016/j.resconrec.2011.06.012.
- [41] S. Chandra, L. Berntsson, Use of silica fume in concrete, in: *Waste Mater. Used Concr. Manuf.*, William Andrew, 1996: pp. 554–623. doi:http://dx.doi.org/10.1016/B978-081551393-3.50012-0.
- [42] P. Fidjestol, M. Dastol, The History of Silica Fume in Concrete - from Novelty to Key Ingredient in High Performance Concrete, in: *Ibracon (Congresso Bras. Do Concreto) 50CBC*, 2008.
- [43] M. Iqbal Khan, R. Siddique, Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties, *Resour. Conserv. Recycl.* 57 (2011) 30–35. doi:10.1016/j.resconrec.2011.09.016.
- [44] M. Jalal, A. Pouladkhan, O.F. Harandi, D. Jafari, Comparative study on effects of Class F fly ash , nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 90–104. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001.
- [45] G. Sua-iam, N. Makul, Rheological and mechanical properties of cement – fly ash self-consolidating concrete incorporating high volumes of alumina-based material as fine aggregate, *Constr. Build. Mater.* 95 (2015) 736–747.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.180.

- [46] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. Van Deventer, Geopolymer technology : the current state of the art, *J. Mater. Sci.* 42 (2007) 2917–2933. doi:10.1007/s10853-006-0637-z.
- [47] M. Singh, M. Garg, Activation of gypsum anhydrite-slag mixtures, *Cem. Concr. Res.* 25 (1995) 332–338. doi:10.1016/0008-8846(95)00018-6.
- [48] P.E. Fraire-Luna, J.I. Escalante-Garcia, A. Gorokhovskiy, Composite systems fluorgypsum-blastfurnance slag-metakaolin, strength and microstructures, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 1048–1055. doi:10.1016/j.cemconres.2006.02.017.
- [49] I. Odler, *Special Inorganic Cements*, Modern Concrete Technology Series 8, Taylor & Francis Group, 2000.
- [50] P.C. Aitcin, *Binders for durable and sustainable concrete*, Modern Concrete Technology Series 16, Taylor & Francis Group, 2008.
- [51] R.A. Kuntze, *Gypsum. Connecting Science and Technology*, ASTM International, 2009.
- [52] R.X. Magallanes-Rivera, J.I. Escalante-Garcia, Anhydrite / hemihydrate-blast furnace slag cementitious composites : Strength development and reactivity, *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 20–28. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.056.
- [53] M.A. Guerra-Cossío, Efecto de la temperatura de calcinación sobre la reactividad de cementantes hidráulicos a base de yeso de desecho, MSc Thesis, Fac. de Ing. Civil, UANL, Nuevo León, México, 2016.
- [54] P. Yan, Y. You, Studies on the binder of fly ash-fluorgypsum-cement, *Cem. Concr. Res.* 28 (1998) 135–140.
- [55] P. Yan, W. Yang, X. Qin, Y. You, Microstructure and properties of the binder of fly ash fluorogypsum-Portland cement, *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 349–354. doi:10.1016/S0008-8846(98)00214-2.

- [56] P. Yan, W. Yang, The cementitious binder derived with fluorogypsum and low quality of fly ash, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 275–280. doi:10.1016/S0008-8846(99)00245-8.
- [57] M. Singh, M. Garg, Making of anhydrite cement from waste gypsum, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 571–577.
- [58] W. Roszczynialski, M. Gawlicki, W. Nocud-Wczelik, Production and use of by-product gypsum in the construction industry, in: S. Chandra (Ed.), *Waste Mater. Used Concr. Manuf.*, Ed. William Andrew, Elsevier, 1996: pp. 53–141.
- [59] C.D. Lawrence, The Production of Low-Energy Cements, in: P.C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chemistry Cem. Concr.*, 4th ed., Elsevier Ltd, 2004: pp. 421–470.
- [60] A. Bentur, K. Kovler, A. Goldman, Gypsum of improved performance using blends with Portland cement and silica fume, *Adv. Cem. Res.* 6 (1994) 109–116. doi:10.1680/adcr.1994.6.23.109.
- [61] K. Kovler, Strength and water absorption for gypsum-cement-silica fume blends of improved performance, *Adv. Cem. Res.* 10 (1998) 81–92.
- [62] M. Singh, M. Garg, Investigation of a durable gypsum binder for building materials, *Constr. Build. Mater.* 6 (1992) 52–56. doi:10.1016/0950-0618(92)90030-3.
- [63] J.I. Escalante-Garcia, R.X. Magallanes-Rivera, A. Gorokhovskiy, Waste gypsum – blast furnace slag cement in mortars with granulated slag and silica sand as aggregates, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2851–2855. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.032.
- [64] G. Camarini, J.A. De Milito, Gypsum hemihydrate – cement blends to improve renderings durability, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 4121–4125. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.048.
- [65] NBR-5735, Cimento Portland de alto-forno, ABNT Assoc. Bras. Normas Tec. (1991).

- [66] M. Singh, M. Garg, Phosphogypsum - Fly ash cementitious binder - Its hydration and strength development, *Cem. Concr. Res.* 25 (1995) 752–758. doi:10.1016/0008-8846(95)00065-K.
- [67] V.P. Mehrotra, A.S.R. Sai, P.C. Kapur, Plaster of Paris activated supersulfated slag cement, *Cem. Concr. Res.* 12 (1982) 463–473. doi:10.1016/0008-8846(82)90061-8.
- [68] M.C.G. Juenger, F. Winnefeld, J.L. Provis, J.H. Ideker, Advances in alternative cementitious binders, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 1232–1243. doi:10.1016/j.cemconres.2010.11.012.
- [69] S. Ding, Z. Shui, W. Chen, J. Lu, S. Tian, Properties of Supersulphated Phosphogypsum- slag Cement ( SSC ) Concrete, *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 29 (2014) 109–113. doi:10.1007/s11595-014-0876-9.
- [70] H.-A. Nguyen, T.-P. Chang, J.-Y. Shih, C.-T. Chen, Formulating for Innovative Self-Compacting Concrete with Low Energy Super-Sulfated Cement Used for Sustainability Development, *J. Mater. Sci. Chem. Eng.* 4 (2016) 22–28. doi:10.4236/msce.2016.47004.
- [71] N.T. Dung, T.P. Chang, C.T. Chen, Engineering and sulfate resistance properties of slag-CFBC fly ash paste and mortar, *Constr. Build. Mater.* 63 (2014) 40–48. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.009.
- [72] S. Zhong, K. Ni, J. Li, Properties of mortars made by uncalcined FGD gypsum-fly ash-ground granulated blast furnace slag composite binder, *Waste Manag.* 32 (2012) 1468–1472. doi:10.1016/j.wasman.2012.02.014.
- [73] H.A. Nguyen, T.P. Chang, J.Y. Shih, C.T. Chen, Influence of low calcium fly ash on compressive strength and hydration product of low energy super sulfated cement paste, *Cem. Concr. Compos.* 99 (2019) 40–48. doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.02.019.
- [74] C.W. Hargis, B. Lothenbach, C.J. Müller, F. Winnefeld, Further insights into

- calcium sulfoaluminate cement expansion, *Adv. Cem. Res.* 31 (2018) 160–177. doi:10.1680/jadcr.18.00124.
- [75] H.F.W. Taylor, *Cement Chemistry*, 2nd Ed., Thomas Telford Publishing, 1997. doi:10.1146/annurev.pc.10.100159.002325.
- [76] I. Odler, Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement, in: P.C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chemistry Cem. Concr.*, 4th ed., Elsevier Ltd, 2004: pp. 241–297.
- [77] J.P. Skalny, J. Marchand, I. Odler, *Sulfate Attack on Concrete*, Modern Concrete Technology Series 10, Taylor & Francis Group, 2002.
- [78] I. Odler, J. Colán-Subauste, Investigations on cement expansion associated with ettringite formation, 29 (1999) 731–735.
- [79] M. Collepardi, A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 401–407. doi:10.1016/S0958-9465(02)00080-X.
- [80] M. Eglinton, Resistance of Concrete to Destructive Agencies, in: P.C. Hewlett (Ed.), *Lea's Chemistry Cem. Concr.*, 4th ed., Elsevier Ltd, 2004: pp. 299–342.
- [81] P.J.M. Monteiro, K.E. Kurtis, Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack, *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 987–993. doi:10.1016/S0008-8846(02)01097-9.
- [82] Z. Liu, F. Zhang, D. Deng, Y. Xie, G. Long, X. Tang, Physical sulfate attack on concrete lining—A field case analysis, *Case Stud. Constr. Mater.* 6 (2017) 206–212. doi:10.1016/j.cscm.2017.04.002.
- [83] M. Garg, A. Pundir, Comprehensive study of fly ash binder developed with fly ash - alpha gypsum plaster - Portland cement, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 758–765. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.018.
- [84] R. Valore, Cellular Concrete Part 1 Composition and Methods of Production, *ACI J.* 50 (1954) 773–796.
- [85] R. Valore, Cellular Concretes Part 2 Physical Properties, *ACI J.* 50 (1954) 817–

- [86] N. Narayanan, K. Ramamurthy, Structure and properties of aerated concrete : a review, *Cem. Concr. Compos.* 22 (2000) 321–329.
- [87] K. Ramamurthy, E.K.K. Nambiar, G. Indu Siva Ranjani, A classification of studies on properties of foam concrete, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 388–396. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006.
- [88] N. Narayanan, K. Ramamurthy, Microstructural investigations on aerated concrete, *Cem. Concr. Res.* 30 (2000) 457–464.
- [89] A. Vimmrová, M. Keppert, L. Svoboda, R. Černý, Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 84–89. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.09.011.
- [90] P. Umponpanarat, S. Wansom, Thermal conductivity and strength of foamed gypsum formulated using aluminum sulfate and sodium bicarbonate as gas-producing additives, *Mater. Struct.* 49 (2016) 1115–1126. doi:10.1617/s11527-015-0562-1.
- [91] A. Çolak, Density and strength characteristics of foamed gypsum, *Cem. Concr. Compos.* 22 (2000) 193–200. doi:10.1016/S0958-9465(00)00008-1.
- [92] O.A. Martinez-Aguilar, P. Castro-Borges, J.I. Escalante-Garcia, Hydraulic binders of Fluorgypsum-Portland cement and blast furnace slag, stability and mechanical properties, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 631–639. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.11.006.
- [93] J.I. Escalante-Garcia, O.A. Martínez-Aguilar, L.Y. Gomez-Zamorano, Calcium sulphate anhydrite based composite binders; effect of Portland cement and four pozzolans on the hydration and strength, *Cem. Concr. Compos.* 82 (2017) 227–233. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.05.012.
- [94] J.C. Rubio-Avalos, A. Manzano-Ramírez, J.M. Yañez-Limón, M.E. Contreras-García, E.M. Alonso-Guzmán, J. González-Hernández, Development and

- characterization of an inorganic foam obtained by using sodium bicarbonate as a gas generator, *Constr. Build. Mater.* 19 (2005) 543–549. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.12.001.
- [95] E. Badens, S. Veessler, R. Boistelle, Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives, *J. Cryst. Growth.* 198–199 (1999) 704–709. doi:10.1016/S0022-0248(98)01206-8.
- [96] R.X. Magallanes-Rivera, J.I. Escalante-Garcia, A. Gorokhovskiy, Hydration reactions and microstructural characteristics of hemihydrate with citric and malic acid, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1298–1305. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.022.
- [97] E.K.K. Nambiar, K. Ramamurthy, Air-void characterisation of foam concrete, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 221–230. doi:10.1016/j.cemconres.2006.10.009.
- [98] L.K.A. Sear, J. Dews, B. Kite, F.C. Harris, J.F. Troy, Abrams law, air and high water-to-cement ratios, *Constr. Build. Mater.* 10 (1996) 221–226. doi:10.1016/0950-0618(95)00079-8.
- [99] E.K.K. Nambiar, K. Ramamurthy, Models for strength prediction of foam concrete, *Mater. Struct.* 41 (2008) 247–254. doi:10.1617/s11527-007-9234-0.
- [100] G.C. Hoff, Porosity-strength considerations for cellular concrete, *Cem. Concr. Res.* 2 (1972) 91–100. doi:10.1016/0008-8846(72)90026-9.
- [101] E.P. Kearsley, P.J. Wainwright, The effect of porosity on the strength of foamed concrete, *Cem. Concr. Res.* 32 (2002) 233–239.
- [102] C.T. Tam, T.Y. Lim, R. Sri Ravindrarajah, S.L. Lee, Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete, *Mag. Concr. Res.* 39 (1987) 12–18. doi:10.1680/mac.1987.39.138.12.
- [103] A. Boudchicha, M.C. Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche, Analysis of the effects of mineral admixtures on the strength of mortars: application of the predictive model of Feret, *J. Civ. Eng. Manag.* 13 (2007) 87–96.

doi:10.1080/13923730.2007.9636424.

- [104] E. Júlio, N. Dias, J. Lourenço, J. Silva, Feret coefficients for white self-compacting concrete, *Mater. Struct.* 39 (2006) 585–591. doi:10.1617/14364.
- [105] E. Ryshkewitch, Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia, *J. Am. Ceram. Soc.* 36 (1953) 65–68.
- [106] D.P.H. Hasselman, Relation Between Effects of Porosity on Strength and on Young's Modulus of Elasticity of Polycrystalline Materials, *J. Am. Ceram. Soc.* 46 (1963) 564–565. doi:10.1111/j.1151-2916.1963.tb14615.x.
- [107] K.K. Schiller, Skeleton strength and critical porosity in set sulphate plasters, *Br. J. Appl. Phys.* 11 (1960) 338–342.
- [108] I. SOROKA, P.J. SEREDA, Interrelation of Hardness, Modulus of Elasticity, and Porosity in Various Gypsum Systems, *J. Am. Ceram. Soc.* 51 (1968) 337–340. doi:10.1111/j.1151-2916.1968.tb15949.x.
- [109] Yesera Monterrey, Yeso Maximo, (2019). <https://www.yeseramonterrey.com/marca.php?pid=1&mid=35>.
- [110] Norchem, Silica Fume Technical Data Sheet, (2019). <https://www.norchem.com/technical-data-sheet.html>.
- [111] ASTM International, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.02 (2005). doi:10.1520/C1240-05.2.
- [112] Panadyne, Quick Reference Mesh and Grit Sizing, (2019). <http://www.panadyne.com/gritmesh.html>.
- [113] Panadyne, Green Silicon Carbide Micro Grit, (2019). [http://www.panadyne.com/greensiliconcarbide\\_tech.html](http://www.panadyne.com/greensiliconcarbide_tech.html).
- [114] Rebasa, Unidad Monclova. Especificacion Tecnica, Cal Hidratada, (2019). <http://www.rebasa.com.mx/unidad-monclova.php>.

- [115] ONNCCE, NMX-C-414-ONNCCE-2017, Build. Ind. Cem. Specif. Test. Methods. (2017) [In Spanish].
- [116] Alpha Chemicals, Polvo de aluminio de 30 micras, (2019). [https://www.alphachemicals.com/30\\_micron](https://www.alphachemicals.com/30_micron).
- [117] ASTM International, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, Annu. B. ASTM Stand. 04.01 (2010). doi:10.1520/C0305-06.2.
- [118] ASTM International, Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste , Mortar , and Concrete, Annu. B. ASTM Stand. 04.01 (2011). doi:10.1520/C0490.
- [119] F. Winnefeld, A. Scholer, B. Lothenbach, Sample Preparation, in: K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach (Eds.), *A Pract. Guid. to Microstruct. Anal. Cem. Mater.*, Taylor & Francis Group, 2016: pp. 1–36.
- [120] ACI Comitte 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318S-14), American Concrete Intitute, Farmington Hills, MI, 2014.
- [121] ASTM International, Standard Specification for Autoclaved Aerated Concrete (AAC), Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2011). doi:10.1520/C1693-11.2.
- [122] ASTM International, Standard Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-State Conditions, Annu. B. ASTM Stand. 04.02 (2012). doi:10.1520/C1045-07.References.
- [123] ASTM International, Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique, Annu. B. ASTM Stand. (2011). doi:10.1520/E1530-11.2.
- [124] ASTM International, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), Annu. B. ASTM Stand. 04.01 (2010). doi:10.1520/C0109.

- [125] S.B. Singh, P. Munjal, N. Thammishetti, Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar, *J. Build. Eng.* 4 (2015) 94–100. doi:10.1016/j.job.2015.09.003.
- [126] X. Chen, S. Wu, Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 804–812. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.09.058.
- [127] S.L. Sarkar, X. Aimin, D. Jana, Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis of Concretes, in: V.S. Ramachandran, J.J. Beaudoin (Eds.), *Handb. Anal. Tech. Concr. Sci. Technol.*, William Andrew Inc., 2001: pp. 231–274.
- [128] K. Scrivener, A. Bazzoni, B. Mota, J.E. Rossen, Electron Microscopy, in: K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach (Eds.), *A Pract. Guid. to Microstruct. Anal. Cem. Mater.*, Taylor & Francis Group, 2016: pp. 351–417.
- [129] U. Busch, Wilhelm Conrad Roentgen. El descubrimiento de los rayos X y la creación de una nueva profesión médica, *Rev. Argentina Radiol.* 80 (2016) 298–307. doi:10.1016/j.rard.2016.08.003.
- [130] A.K. Chatterjee, X-Ray Diffraction, in: V.S. Ramachandran, J.J. Beaudoin (Eds.), *Handb. Anal. Tech. Concr. Sci. Technol.*, William Andrew Inc., 2001: pp. 275–332. doi:10.1016/B978-081551437-4.50011-4.
- [131] R. Snellings, X-ray powder diffraction applied to cement, in: K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach (Eds.), *A Pract. Guid. to Microstruct. Anal. Cem. Mater.*, Taylor & Francis Group, 2016: pp. 107–176.
- [132] B. Beckhoff, B. Kanngießler, N. Langhoff, R. Wedell, H. Wolff, *Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis*, Springer, 2006. doi:10.1007/978-3-540-36722-2.
- [133] M.S. Shackley, *X-Ray fluorescence spectrometry (XRF) in geoarchaeology*, Springer, 2011. doi:10.1007/978-1-4419-6886-9\_1.
- [134] ASTM International, *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux*

- Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus, *Annu. B. ASTM Stand.* (2010). doi:10.1520/G0154-12A.
- [135] ASTM International, Standard Practice for Guarded-Hot-Plate Design Using Circular Line-Heat, *Annu. B. ASTM Stand.* (2013). doi:10.1520/C1043-06R10.2.
- [136] ASTM International, Standard Test Method for the Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus, *Annu. B. ASTM Stand.* (1997). doi:10.1520/C1363-11.
- [137] V.S. Ramachandran, R.M. Paroli, J.J. Beaudoin, A.H. Delgado, eds., Thermoanalytical Techniques, in: *Handb. Therm. Anal. Constr. Mater.*, Noyes Publications/William Andrew Publishing, 2002: pp. 1–34.
- [138] ASTM International, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.01 (2011). doi:10.1520/C0188-09.2.
- [139] ASTM International, Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus, *Annu. B. ASTM Stand.* 04.01 (2011). doi:10.1520/C0204-07.2.
- [140] F. Puertas, Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico, *Mater. Construcción.* 43 (1993) 37–48.
- [141] P.K. Mehta, Mechanism of Expansion Associated with Ettringite Formation, *Cem. Concr. Res.* 3 (1973) 1–6.
- [142] P.K. Mehta, Mechanism of sulfate attack on Portland Cement concrete - Another look, *Cem. Concr. Res.* 13 (1983) 401–406.
- [143] A. Telesca, M. Marroccoli, M.L. Pace, M. Tomasulo, G.L. Valenti, P.J.M. Monteiro, A hydration study of various calcium sulfoaluminate cements, *Cem. Concr. Compos.* 53 (2014) 224–232. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.07.002.
- [144] C. Hall, A. Hamilton, Porosity – density relations in stone and brick materials, *Mater. Struct.* 48 (2013) 1265–1271. doi:10.1617/s11527-013-0231-1.

- [145] H.H. Rieke, G.V. Chilingarian, Interrelationships among density, porosity, remaining moisture content, pressure and depth, in: *Compact. Argillaceous Sediments*, Elsevier, 1974: pp. 31–86.
- [146] M. Yates Buxcey, Área Superficial, Textura y Distribución Porosa, in: M. Faraldos, C. Goberna (Eds.), *Técnicas Análisis y Caracter. Mater.*, Segunda Ed, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 2011: pp. 623–650.
- [147] M. Palacios, H. Kazemi-Kamyab, S. Mantellato, P. Bowen, Laser Diffraction and Gas Adsorption Techniques, in: K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach (Eds.), *A Pract. Guid. to Microstruct. Anal. Cem. Mater.*, Taylor & Francis Group, 2016: pp. 445–483.
- [148] E.K.K. Nambiar, K. Ramamurthy, Influence of filler type on the properties of foam concrete, *Cem. Concr. Compos.* 28 (2006) 475–480. doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001.
- [149] X. Aimin, S.L. Sarkar, Microstructural Study of Gypsum Activated Fly Ash Hydration in Cement Paste, *Cem. Concr. Res.* 21 (1991) 1137–1147.
- [150] H. Uysal, R. Demirboga, R. Şahin, R. Gül, The effects of different cement dosages, slumps, and pumice aggregate ratios on the thermal conductivity and density of concrete, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 845–848. doi:10.1016/j.cemconres.2003.09.018.
- [151] M. Harrestrup, S. Svendsen, Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades, *Build. Environ.* 99 (2016) 59–72. doi:10.1016/j.buildenv.2016.01.019.
- [152] B. Gassenfeit, D. Brüggemann, Monolithic masonry with PCM for thermal management, *Energy Procedia.* 48 (2014) 1355–1364. doi:10.1016/j.egypro.2014.02.153.
- [153] E. Serri, M.Z. Suleiman, M.A. Othuman Mydin, The Effects of Oil Palm Shell Aggregate Shape on the Thermal Properties and Density of Concrete, *Adv. Mater.*

Res. 935 (2014) 172–175. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.935.172.

- [154] E. Serri, M.A. Othuman Mydin, M.Z. Suleiman, Thermal Properties of Oil Palm Shell Lightweight Concrete with Different Mix Designs, *J. Teknol.* 70 (2014) 155–159.
- [155] C.N. Ang, Y.C. Wang, Effect of moisture transfer on specific heat of gypsum plasterboard at high temperatures, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 675–686. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.02.016.
- [156] L.J. Struble, P.W. Brown, Heats of Dehydration and Specific Heats of Compounds Found in Concrete and Their Potential for Thermal Energy Storage, *Sol. Energy Mater.* 14 (1986) 1–12.
- [157] M.J. Abdolhosseini-Qomi, F. Ulm, R.J. Pellenq, Physical Origins of Thermal Properties of Cement Paste, *Phys. Rev. Appl.* 3 (2015) 1–17. doi:10.1103/PhysRevApplied.3.064010.
- [158] Á. Lakatos, I. Csáky, F. Kalmár, Thermal conductivity measurements with different methods : a procedure for the estimation of the retardation time, *Mater. Struct.* 48 (2015) 1343–1353. doi:10.1617/s11527-013-0238-7.
- [159] P. Tesárek, J. Drchalová, J. Kolísko, P. Rovnaníková, R. Černý, Flue gas desulfurization gypsum: Study of basic mechanical, hydric and thermal properties, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1500–1509. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.009.