

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**EFECTO SINÉRGICO DE LA ADICIÓN DE RESIDUOS  
INDUSTRIALES EN SISTEMAS CEMENTANTES BASE  
CEMENTO PORTLAND Y METACAOLÍN PARA EL  
MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO –  
MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD**

Por:

**MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ**

Como requisito parcial para obtener el Grado de MAESTRÍA EN  
CIENCIAS con Orientación en Materiales de Construcción

**Junio, 2022**



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

Cd. Universitaria, 2022/01/21

**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 “**EFFECTO SINÉRGICO DE LA ADICIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN SISTEMAS CEMENTANTES BASE CEMENTO PORTLAND Y METACAOLÍN PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD**”, que presenta el **ING. MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

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. José Manuel Mendoza Rangel**

Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tels. (81) 14424400 ext. 6724 y 4447, 83294000 ext. 7216,7284  
[www.ingenieriacivil.uanl.mx](http://www.ingenieriacivil.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  
Facultad de Ingeniería Civil, UANL  
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 **“EFECTO SINÉRGICO DE LA ADICIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN SISTEMAS CEMENTANTES BASE CEMENTO PORTLAND Y METACAOLÍN PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD”**, que presenta el **ING. MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

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

“Alere Flammam Veritatis”

Ciudad Universitaria, 17 de enero de 2022



**DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA**

Jefe de Departamento de Tecnología del Concreto



2022/01/09

**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 **“EFECTO SINÉRGICO DE LA ADICIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN SISTEMAS CEMENTANTES BASE CEMENTO PORTLAND Y METACAOLÍN PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD”**, que presenta el **ING. MARIO IVÁN VELÁSQUEZ HERNÁNDEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

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. Miguel Angel Baltazar Zamora  
Evaluador

Responsable del Cuerpo Académico en Consolidación: UV-CA-458  
“Sustentabilidad y Durabilidad de Materiales para la Infraestructura Civil”  
CA: SYDMAT-IC



## Comprobante de corrección de escritos

ESTUDIANTE  PROFESOR

NOMBRE: MARIO IVÁN VELÁZQUEZ HERNÁNDEZ

TIPO DE DOCUMENTO: ARTÍCULO  TESIS  PI  OTRO

TÍTULO DEL DOCUMENTO A REVISAR:  
EFFECTO SINÉRGICO DE LA ADICIÓN DE RESIDUOS INDUS-  
TRIALES EN SISTEMAS CEMENTANTES, CON BASE EN CEMENTO  
PORTLAND Y METACAOLÍN, PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS  
PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD.

RECOMENDACIONES ADICIONALES:  
REALIZAR LAS CORRECCIONES QUE APAREZCAN EN  
LA TESIS IMPRESA.

\*Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo arriba identificado, en los aspectos: ortográfico, metodológico y estilístico.

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez  
Asesor Profesional de Apoyo

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel  
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación  
Ciudad Universitaria, 19 de Mayo de 2022



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



## **DEDICATORIA**

A mis abuelos, **Ofelia Hernández Rodríguez y Fulgencio Velásquez López**, por ser ellos mi apoyo y motivación más grande para alcanzar cada meta propuesta hasta ahora y por ser las personas que se preocuparon, me aconsejaron y guiaron en cada momento de mi vida.

A mi tía, **María de los Ángeles Velásquez Hernández**, por ser como una madre para mí. Por orientarme y acompañarme en los momentos difíciles de la vida, dándome sus sabios consejos y guiándome para llegar a ser una persona de bien.

A mis hermanos y a mi prima, **Diana Velásquez Hernández, Harim Uriel Villalobos Velásquez y Arlet Esmeralda Montero Velásquez**, porque, sin importar los momentos complicados que hemos vivido, me han brindado su apoyo, comprensión y cariño para salir adelante.

*Solo se puede decir que estamos vivos en esos  
momentos cuando nuestros corazones están  
conscientes de nuestros tesoros.*

***Thornton Wilder***

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias especiales a mi director, el **Dr. José Manuel Mendoza Rangel**, por aceptarme como su tesista y confiar en mí, por orientarme, apoyarme, guiarme y compartirme su experiencia para el desarrollo del tema y para así llevar a buen puerto esta investigación.

A mí co – director, **el Dr. Alejandro Durán Herrera**, por el tiempo, la disponibilidad y el conocimiento que me brindó, así como por asesorarme y orientarme para realizar todo lo correspondiente a este trabajo de la mejor manera.

A mí asesor, el **Dr. Miguel Ángel Baltazar Zamora**, por su apoyo, comentarios y sugerencias que aportaron conocimiento y experiencias para la elaboración y conclusión de este trabajo.

Así mismo, agradezco a todo **el personal académico, profesional, técnico y humano** que aportaron granos de arena que contribuyeron en el desarrollo y conclusión de este proyecto.

Agradezco también al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico brindado durante la estancia en el posgrado.

Finalmente, gracias a la **Universidad Autónoma de Nuevo León** por brindarme las herramientas y la calidad necesaria para mi formación profesional y personal, por permitirme ser parte de un sistema integral para ser una persona productiva y por abrirme las puertas para entrar y concluir esta etapa de mi vida.

*La raíz de todo bien reposa en la tierra de la gratitud.*

***Dalai Lama***

## **RESUMEN**

La durabilidad de las estructuras es un tema que involucra diversos factores y procesos de deterioro. Algunos de ellos afectan directamente las matrices cementantes o el acero de refuerzo embebido en la matriz. La carbonatación producida por el ingreso del dióxido de carbono concentrado en la atmósfera a las estructuras de concreto reforzado y el ataque por sulfatos son algunos de estos procesos químicos nocivos para las edificaciones actuales.

El empleo de materiales puzolánicos se ha planteado por algunos investigadores como alternativa para la mejora de la durabilidad de las estructuras de concreto ante los agentes nocivos mencionados. El metacaolín, la ceniza volante y la ceniza de bagazo de caña son algunos de estos materiales, los cuales, desde años atrás han sido empleados de forma aislada únicamente en combinación con el cemento Portland, encontrándose resultados variados con ciertos beneficios en términos de propiedades físico – mecánicas y de durabilidad. No obstante, algunos investigadores sugieren que la combinación de materiales puzolánicos en proporciones adecuadas puede propiciar la mejora de las propiedades de las estructuras de concreto mediante lo que se conoce como efecto sinérgico, donde un material puzolánico compensa las debilidades del otro. Lo anterior con base y fundamento en los diferentes periodos de reacción.

Por lo anterior, en este trabajo se estudió el efecto sinérgico propiciado por las combinaciones metacaolín – ceniza volante y metacaolín – ceniza de bagazo, tomando como referencia que el metacaolín es un material de reactividad temprana y las cenizas son puzolanas de reactividad tardía. Este efecto se evaluó en propiedades físico – mecánicas en estado endurecido y en aspectos de la durabilidad tales como la carbonatación y el ataque de sulfato de magnesio. Lo anterior por un periodo de 180 días de exposición en cada ambiente de deterioro posterior a un curado previo de 28 días.

Los resultados sugieren que el metacaolín por sí sólo puede generar efectos positivos mayores que lo generado por el efecto sinérgico en condiciones de exposición acelerada, sin embargo, algunas estimaciones corroboran que, en exposición natural, el efecto sinérgico propiciado por la ceniza volante y la ceniza de bagazo brindan mejoras considerables en términos de propiedades físico – mecánicas y de durabilidad.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO 1. Introducción .....</b>   | <b>1</b>   |
| 1.1. Planteamiento del problema.....  | 2          |
| 1.2. Hipótesis.....   | 4          |
| 1.3. Objetivos .....  | 4          |
| 1.4. Justificación.....   | 5          |
| <b>CAPÍTULO 2. Marco teórico.....</b>   | <b>8</b>   |
| 2.1. Generalidades de los sistemas cementantes .....  | 8          |
| 2.2. Generalidades del cemento portland .....   | 9          |
| 2.3. Materiales cementantes suplementarios.....   | 17         |
| 2.4. Caracterización de los cementantes y las puzolanas .....   | 27         |
| 2.5. Agregados .....  | 29         |
| 2.6. Aditivos.....  | 32         |
| 2.7. Propiedades de los sistemas cementantes en estado fresco.....  | 35         |
| 2.8. Propiedades de los sistemas cementantes en estado endurecido.....  | 38         |
| 2.9. Durabilidad de los sistemas cementantes.....   | 42         |
| 2.10. Efectos de las puzolanas en los sistemas cementantes.....   | 51         |
| 2.11. Efecto de las combinaciones de puzolanas en sistemas cementantes .....  | 69         |
| <b>CAPÍTULO 3. Antecedentes.....</b>  | <b>74</b>  |
| 3.1. Comportamiento de sistemas cementantes con MK ante CO <sub>2</sub> y SO <sub>4</sub> .....                         | 74         |
| 3.2. Comportamiento de sistemas cementantes con CV y CB ante CO <sub>2</sub> y SO <sub>4</sub> .....                    | 77         |
| 3.3. Comportamiento de sistemas cementantes con combinaciones de puzolanas ante CO <sub>2</sub> y SO <sub>4</sub> ..... | 80         |
| <b>CAPÍTULO 4. Método experimental .....</b>  | <b>82</b>  |
| 4.1. Etapa I. Diseño, optimización y elaboración de mezclas.....  | 82         |
| 4.2. Etapa II. Evaluación de propiedades físicas y resistencia a compresión .....                                       | 99         |
| 4.3. Etapa III. Evaluación de la durabilidad.....   | 105        |
| 4.4. Etapa IV. Análisis microestructural de los sistemas en estudio.....  | 113        |
| <b>CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones .....</b>   | <b>116</b> |
| 5.1. Etapa I. Diseño, optimización y elaboración de mezclas.....  | 116        |
| 5.2. Etapa II. Evaluación de propiedades físicas y resistencia a compresión .....                                       | 132        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.3. Etapa III. Evaluación de durabilidad.....                           | 162        |
| 5.4. Etapa IV. Análisis microestructural de los sistemas en estudio..... | 187        |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>   | <b>214</b> |
| <b>REFERENCIAS .....</b>   | <b>216</b> |

## LISTA DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1.- Composición aproximada del cemento portland, expresada en óxidos.....                   | 12  |
| Tabla 2.- Fases principales del cemento portland .....  | 12  |
| Tabla 3.- Tipos de cemento NMX y ASTM .....   | 14  |
| Tabla 4.- Porcentajes de sustitución de CP por MCS .....  | 95  |
| Tabla 5.- Conexiones de cables de celda del potenciostato Gamry .....                             | 112 |
| Tabla 6.- Composición química del CP y los MCS .....  | 117 |
| Tabla 7.- Densidades del CP y los MCS .....   | 123 |
| Tabla 8.- Índices de actividad puzolánica .....   | 124 |
| Tabla 9.- Características físicas del agregado fino.....  | 126 |
| Tabla 10.- Cantidades de aditivo óptimo por sistema cementante.....                               | 131 |
| Tabla 11.- Cantidades de mezcla para 1 m <sup>3</sup> de mortero.....                             | 132 |
| Tabla 12 Tipo de porosidad del concreto en función de los valores de resistividad eléctrica ..... | 141 |
| Tabla 13 Clasificación del concreto de acuerdo con su velocidad de pulso .....                    | 148 |
| Tabla 14.- Condiciones de corrosión para diferentes tipos de electrodos.....                      | 173 |
| Tabla 15.- Condiciones de densidad de corrosión .....   | 181 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1.- Representación esquemática del proceso de fabricación del cemento portland ..... | 11  |
| Figura 2.- Proceso de hidratación del CP .....  | 17  |
| Figura 3.- Proceso de hidratación de las puzolanas .....                                    | 19  |
| Figura 4.- Carbón bituminoso y residuo de CV .....  | 20  |
| Figura 5.- Caolinita sin calcinar y metacaolín postcalcificación.....                       | 24  |
| Figura 6.- Bagazo de caña típico y residuo postcalcificación (CB) .....                     | 26  |
| Figura 7.- Distribución de tamaños de los agregados pétreos.....                            | 30  |
| Figura 8.- Concreto trabajable.....   | 35  |
| Figura 9.- Segregación y sangrado de sistemas cementantes.....                              | 37  |
| Figura 10.- Representación de la porosidad y permeabilidad del concreto .....               | 42  |
| Figura 11.- Representación esquemática del avance de carbonatación .....                    | 43  |
| Figura 12.- Proceso electroquímico en el concreto reforzado.....                            | 49  |
| Figura 13.- Cemento portland y puzolanas de estudio.....                                    | 83  |
| Figura 14.- Ceniza de bagazo de caña (a) y ceniza volante sin tratamiento (b).....          | 85  |
| Figura 15.- Cuarteo de cementantes.....   | 85  |
| Figura 16.- Cuarteo del agregado fino .....   | 89  |
| Figura 17.- Tamices para granulometría del agregado fino .....                              | 90  |
| Figura 18.- Determinación de PVSS y PVSC.....   | 91  |
| Figura 19.- Determinación del contenido de humedad en el agregado fino .....                | 92  |
| Figura 20.- Equipo para densidad y absorción del agregado fino.....                         | 93  |
| Figura 21.- Especímenes para resistencia a compresión ASTM C 109 .....                      | 95  |
| Figura 22.- Prueba de fluidez en matriz de referencia (MC) ASTM 1437 .....                  | 96  |
| Figura 23.- Proceso de mezclado de los sistemas cementantes .....                           | 98  |
| Figura 24.- Prensa hidráulica y cubo post-ensayo .....                                      | 100 |
| Figura 25.- Equipo de resistividad eléctrica y zonas de medición.....                       | 102 |
| Figura 26.- Medidor de pulso ultrasónico Pundit Lab .....                                   | 103 |
| Figura 27.- Permeabilímetro al aire Torrent .....   | 104 |
| Figura 28.- Recubrimiento epóxico en barras de carbonatación y cámara de exposición .....   | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 29.- Mediciones de avance de carbonatación (Matriz de referencia a 49 días de exposición) .....   | 107 |
| Figura 30.- Solución de $MgSO_4$ y medición de masa .....  | 109 |
| Figura 31.- micrómetro de medición y barras expuestas a sulfatos .....   | 110 |
| Figura 32.- Diseño de probetas para pruebas electroquímicas.....   | 111 |
| Figura 33.- Equipo y medición de pruebas electroquímicas .....   | 112 |
| Figura 34.- Fases minerales del CP y los MCS.....  | 119 |
| Figura 35.- Curvas granulométricas del CP y los MCS .....  | 120 |
| Figura 36.- Distribución de las partículas del CP y los MCS .....  | 121 |
| Figura 37.- Morfología de las partículas .....   | 122 |
| Figura 38.- Curva granulométrica del agregado fino .....   | 126 |
| Figura 39.- Evaluación de porcentajes de MK.....   | 128 |
| Figura 40.- Evaluación de porcentajes de CV.....   | 129 |
| Figura 41.- Evaluación de porcentajes de CB .....  | 129 |
| Figura 42.- Curva de fluidez de la matriz de control (MC) .....  | 131 |
| Figura 43.- Resistencia a la compresión de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 210 días .....                                      | 136 |
| Figura 44.- Resistencia a la compresión de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de $CO_2$ al 8% durante 180 días postcurado estándar .....          | 138 |
| Figura 45.- Resistencia a la compresión de las matrices expuestas en inmersión en una solución de $MgSO_4$ con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar ..... | 140 |
| Figura 46.- Resistividad eléctrica de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 210 días.....  | 142 |
| Figura 47.- Resistividad eléctrica de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de $CO_2$ al 8% durante 180 días postcurado estándar .....               | 146 |
| Figura 48.- Resistividad eléctrica de las matrices expuestas en inmersión en una solución de $MgSO_4$ con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar.....       | 147 |
| Figura 49.- Velocidad de pulso ultrasónico de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 210 días .....                                   | 151 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 50.- Velocidad de pulso ultrasónico de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO <sub>2</sub> al 8% durante 180 días postcurado estándar .....                | 153 |
| Figura 51.- Velocidad de pulso ultrasónico de las matrices expuestas en inmersión en una solución de MgSO <sub>4</sub> con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar .....       | 154 |
| Figura 52.- Coeficiente de permeabilidad al aire de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 210 días .....   | 157 |
| Figura 53.- Coeficiente de permeabilidad al aire de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO <sub>2</sub> al 8% durante 180 días postcurado estándar .....          | 159 |
| Figura 54.- Coeficiente de permeabilidad al aire de las matrices expuestas en inmersión en una solución de MgSO <sub>4</sub> con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar ..... | 161 |
| Figura 55.- Avance de carbonatación de las matrices en condición acelerada con una concentración de CO <sub>2</sub> del 8% .....   | 163 |
| Figura 56.- Avance de carbonatación de las matrices expuestas en un ambiente urbano – industrial con alta concentración de CO <sub>2</sub> .....   | 166 |
| Figura 57.- Variación de masa de las matrices expuestas en inmersión en una solución de MgSO <sub>4</sub> con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar.....                     | 170 |
| Figura 58.- Variación de longitud (expansión) de las matrices expuestas en inmersión en una solución de MgSO <sub>4</sub> con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar .....    | 172 |
| Figura 59.- Potenciales de corrosión de las matrices en condiciones de laboratorio con humedad y temperatura controladas durante 210 días .....  | 175 |
| Figura 60.- Potenciales de corrosión de las matrices expuestas en un proceso de carbonatación acelerada con una concentración de CO <sub>2</sub> del 8% durante 240 días.....                        | 180 |
| Figura 61.- Potenciales de corrosión de las matrices expuestas en un ambiente urbano – industrial con alta concentración de CO <sub>2</sub> durante 240 días.....                                    | 181 |
| Figura 62.- Densidad de corrosión de las matrices en condiciones de laboratorio con humedad y temperatura controladas durante 210 días .....   | 183 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 63.- Densidad de corrosión de las matrices expuestas en un proceso de carbonatación acelerada con una concentración de CO <sub>2</sub> del 8% durante 240 días..... | 185 |
| Figura 64.- Densidad de corrosión de las matrices expuestas en un ambiente urbano – industrial con alta concentración de CO <sub>2</sub> durante 240 días.....             | 187 |
| Figura 65.- Difractogramas de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 28 días .....  | 189 |
| Figura 66.- Difractogramas de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 90 días .....  | 190 |
| Figura 67.- Difractogramas de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 180 días .....   | 191 |
| Figura 68.- Difractogramas de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO <sub>2</sub> al 8% durante 28 días .....                           | 192 |
| Figura 69.- Difractogramas de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO <sub>2</sub> al 8% durante 90 días .....                           | 193 |
| Figura 70.- Difractogramas de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO <sub>2</sub> al 8% durante 180 días .....                          | 194 |
| Figura 71.- Difractogramas de las matrices expuestas en inmersión en una solución de MgSO <sub>4</sub> con una concentración del 5% durante 28 días .....                  | 196 |
| Figura 72.- Difractogramas de las matrices expuestas en inmersión en una solución de MgSO <sub>4</sub> con una concentración del 5% durante 90 días .....                  | 197 |
| Figura 73.- Difractogramas de las matrices expuestas en inmersión en una solución de MgSO <sub>4</sub> con una concentración del 5% durante 180 días .....                 | 198 |
| Figura 74.- Micrografías de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 28 días (100x).....  | 200 |
| Figura 75.- Micrografías de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 28 días (1000x).....                                       | 203 |
| Figura 76.- Espectros EDS de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 28 días .....   | 204 |
| Figura 77.- Micrografías de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 180 días .....   | 206 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 78.- Espectros EDS de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 180 días .....                           | 207 |
| Figura 79.- Micrografías de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO <sub>2</sub> al 8% durante 180 días .....           | 209 |
| Figura 80.- Espectros EDS de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO <sub>2</sub> al 8% durante 180 días .....          | 210 |
| Figura 81.- Micrografías de las matrices expuestas en inmersión en una solución de MgSO <sub>4</sub> con una concentración del 5% durante 180 días .....  | 212 |
| Figura 82.- Espectros EDS de las matrices expuestas en inmersión en una solución de MgSO <sub>4</sub> con una concentración del 5% durante 180 días ..... | 213 |

## **CAPÍTULO 1. Introducción**

Uno de los temas de mayor importancia en los últimos años dentro de la industria de la construcción es la vida útil o de servicio de las estructuras, específicamente las estructuras de concreto reforzado, dado que en la actualidad es el material de construcción de mayor uso (Scrivener et al., 2018). Este material se encuentra en constante exposición a la acción de agentes nocivos, dadas las condiciones de uso y del ambiente en el que se encuentra. Algunos de estos agentes son compuestos químicos tales como los sulfatos ( $\text{SO}_4$ ) presentes en el suelo por la disolución de minerales en el agua subterránea y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como gas presente en el aire en zonas urbanas e industriales, siendo éstos de los más destacables por el daño que provocan en las estructuras de concreto reforzado, los cuales atacan directamente la matriz cementante para posteriormente dañar o permitir el daño en el acero de refuerzo, disminuyendo así la durabilidad de las estructuras (Ariza et al., 2019).

Con el fin de hacer frente a los problemas de durabilidad de las estructuras de concreto causadas por agentes nocivos, la comunidad científica e industrial ha planteado el uso de materiales puzolánicos, también conocidos como adiciones minerales. Recientemente, entre estas adiciones ha destacado el uso del metacaolín (MK) principalmente por su reactividad temprana y desarrollo de propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad. Algunas otras adiciones, tales como la ceniza volante (CV) y la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CB), han sido estudiadas años atrás por los beneficios encontrados a edades avanzadas dentro de matrices cementantes, dada su reactividad tardía, aunado a los beneficios económicos y ambientales que su uso supone (Gill y Siddique, 2018; Baltazar et al., 2019).

El empleo de estos materiales puzolánicos dentro de matrices cementantes es comúnmente encontrado en combinaciones aisladas CP-puzolana; no obstante, existe un vacío considerable de conocimiento e información en cuanto al empleo de estas puzolanas combinadas entre sí y a su vez con el CP, dada la poca bibliografía reportada. Es por lo anterior que en este trabajo se analizó el efecto sinérgico de la combinación del MK con puzolanas consideradas residuos como la CV y CB, frente al deterioro

provocado por el ataque de  $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_4$ , dado que los diferentes tiempos de reacción podrían propiciar el desarrollo de propiedades físico – mecánicas y mejoras en la durabilidad por mayores periodos de tiempo.

Este trabajo se dividió en cuatro etapas. La primera correspondiente al diseño y optimización de las matrices cementantes con base en diferentes porcentajes evaluados mecánicamente, así como por la fluidez y la trabajabilidad. La segunda etapa contempló el seguimiento del desarrollo de propiedades físicas y resistencia a la compresión, tanto en ambiente controlado como en exposición a los agentes nocivos. A la par, la tercer etapa comprendió la evaluación de la durabilidad de los sistemas cementantes ante los ambientes agresivos propuestos. Y la última etapa correspondió a la caracterización y análisis microestructural de las matrices cementantes. Lo anterior con la finalidad de obtener un análisis y evaluación completa sobre el comportamiento de estos sistemas en cuanto a desarrollo de propiedades físico – mecánicas, así como su comportamiento en cuanto a durabilidad.

### **1.1. Planteamiento del problema**

El empleo del concreto como material de construcción comenzó desde las primeras civilizaciones, con los egipcios y los romanos. Sin embargo, no fue sino hasta 1817 cuando Louis Joseph Vicat, un científico francés, inventó el cemento artificial (patentado por Joseph Aspdin en 1824) y propuso el procedimiento para fabricar mezclas de concreto como hoy en día se conoce. Este material se ha posicionado a lo largo del tiempo como el material de construcción principal en la industria, debido a las propiedades mecánicas que desarrolla por sí solo y las mejores propiedades que obtiene en combinación con el acero (Scrivener et al., 2018). Además, en sus inicios, se creía que este material disponía de una larga vida útil o de servicio, factores que le otorgaron la etiqueta de material durable (Trout, 2019).

La durabilidad del concreto, de acuerdo con el ACI – 201 , puede definirse como la capacidad de resistir las condiciones de servicio como ataques químicos, abrasión y/o cualquier proceso de deterioro a lo largo del tiempo, manteniendo principalmente su forma, la calidad y las condiciones de uso originales. No obstante, en los últimos años, el gran número de edificaciones que han presentado problemas principalmente atribuibles

al ataque de agentes externos nocivos han dado paso al desarrollo de investigaciones con miras a obtener un material hecho con base en cementantes con mejor durabilidad.

Entre los agentes nocivos más destacables y comunes para el deterioro del concreto se encuentra el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y los sulfatos ( $\text{SO}_4$ ). Por un lado, el  $\text{CO}_2$  concentrado en el aire penetra las estructuras a través de los poros y reacciona con la humedad presente, formando ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), el cual reacciona con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), formado como producto de reacción entre el agua y el cemento portland, convirtiéndolo en carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), producto con bajo pH que conlleva a la pérdida de alcalinidad en el concreto, fenómeno mejor conocido como carbonatación (Cole et al., 2019); el cual, a su vez, provoca que se pierda la capa pasiva que el concreto provee al acero para protegerlo de fenómenos como la corrosión, conllevando al deterioro y debilitación de las estructuras y, por ende, a una menor vida útil.

En el caso de los  $\text{SO}_4$ , éstos son compuestos químicos encontrados comúnmente en casi todas las aguas naturales de la tierra, debido a la disolución de los sulfatos contenidos en los minerales del suelo. Estos compuestos, al igual que el  $\text{CO}_2$ , entran en contacto con los compuestos hidratados de la pasta del concreto mediante el agua, produciendo yeso y etringita mediante las reacciones químicas que se producen con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y la Celita ( $\text{C}_3\text{A}$ ), respectivamente. Dichos productos de reacción tienden a expandirse provocando la desintegración del concreto mediante agrietamientos que provocan la pérdida de resistencia mecánica, debilitando las estructuras y repitiendo las pérdidas en cuanto a durabilidad que provoca el fenómeno de la carbonatación (Zhou et al., 2016).

Ambos agentes nocivos reaccionan principalmente con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente en las matrices con base en cemento. Por tal razón, diversos investigadores han propuesto el uso de materiales puzolánicos suplementarios (MCS), considerando que éstos basan su desempeño y desarrollo de propiedades en el consumo del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a edades tempranas o avanzadas, lo que puede permitir una falta de este compuesto y prevenir las reacciones químicas de ambos agentes nocivos. Así mismo, la formación de productos de reacción y la densificación de las matrices cementantes por acción de los MCS han brindado mejoras en el concreto, principalmente en términos de durabilidad.

De lo anterior, buscando el consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el desarrollo de propiedades en las matrices cementantes por periodos de tiempo prolongados, se estudiará el efecto sinérgico de una puzolana reactiva a edades tempranas, como el metacaolín (MK), en combinación con puzolanas de reactividad tardía provenientes de residuos como la ceniza volante (CV) y la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CB) y su contribución en el desarrollo de propiedades físico – mecánicas y de durabilidad de los sistemas cementantes expuestos a  $\text{CO}_2$  y  $\text{MgSO}_4$ .

## **1.2. Hipótesis**

El efecto sinérgico en sistemas cementantes ternarios base cemento portland y metacaolín con la adición de un residuo tal como la ceniza volante o la ceniza de bagazo de caña de azúcar propiciará el desarrollo de propiedades físico – mecánicas y de durabilidad durante mayores periodos de tiempo, dadas las diferentes etapas de reacción, haciendo posible la obtención de sistemas cementantes resistentes frente a agentes nocivos para el concreto, tales como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ).

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Entender el efecto y el comportamiento del metacaolín, en combinación con residuos industriales y agroindustriales en sistemas cementantes ternarios, ante el ataque de agentes nocivos, para su aplicación en elementos estructurales acorde con los requerimientos de mayor durabilidad establecidos en la norma mexicana NMX – C – 530.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- 1) Corroborar la factibilidad de uso de los materiales puzolánicos suplementarios y los agregados pétreos en la dosificación de los sistemas cementantes en estudio, mediante el conocimiento de sus propiedades físicas y químicas.
- 2) Determinar los porcentajes óptimos de sustitución parcial de cemento portland por puzolanas, con base en la resistencia a compresión de diferentes matrices cementantes.

- 3) Evaluar la influencia de los materiales puzolánicos sobre las propiedades físicas de los sistemas cementantes optimizados, en estado fresco.
- 4) Evaluar la resistencia a la compresión de los sistemas cementantes en estudio, expuestos a un ambiente controlado y al ataque de CO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub>.
- 5) Estudiar los efectos del ataque de CO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub> en la permeabilidad, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico, así como en la microestructura de los sistemas en estudio.
- 6) Evaluar el fenómeno de corrosión del acero embebido en los diferentes sistemas cementantes, mediante pruebas electroquímicas, para determinar los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ) y la densidad de corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ).
- 7) Analizar la microestructura y el efecto de la combinación de metacaolín con residuos industriales y agroindustriales sobre la durabilidad de los sistemas cementantes en estudio.
- 8) Determinar, con base en los resultados obtenidos, el sistema cementante de mejor comportamiento en cuanto a parámetros de durabilidad, resistencia a la compresión y trabajabilidad.

#### **1.4. Justificación**

Es sabido que en los últimos años la comunidad científica ha buscado implementar MCS provenientes de la calcinación de arcillas y calizas, como lo es el MK, dado que se ha catalogado como un material aportador de beneficios en parámetros de sustentabilidad, principalmente por la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de energía para su producción. Producir MK demanda menor energía térmica, dado que su calcinación se logra con temperaturas que van de 500° a 800°C y emite tan sólo 175 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada producida de material (Kavitha et al., 2016), en contraste con el CP, el cual requiere cerca del doble de energía térmica (1400°C) y emite al menos 5 veces más CO<sub>2</sub> (820 kg-CO<sub>2</sub>/ton) (Rahla et al., 2019). Sin embargo, el MK al igual que el CP demanda la explotación de recursos no renovables para su uso como materias primas.

Es por esto que, buscando contribuir en la disminución de la explotación de recursos no renovables, se han considerado otros materiales puzolánicos que además requieren menor cantidad de energía para su producción y emiten menores cantidades de CO<sub>2</sub>, en

comparación con el CP. Estos son la CV y la CB. La CV es un residuo que emite tan solo 4 kg-CO<sub>2</sub>/ton (Rahla et al., 2019) y ha alcanzado producciones de 700 Mton/año para el 2015 y de 900 Mton/año para el 2017, en el nivel mundial, (Titov, 2015; Roychand et al., 2017), de los cuales en México se producen entre 985,500 ton/año y hasta 1.5 Mton/año desde el 2010 a la fecha. Esto a pesar de los decretos establecidos para buscar la disminución de este residuo (Medina et al., 2010; IMT, 2019). Por su parte, la CB es un residuo agroindustrial que año tras año, en época de zafra, se produce por la calcinación de la caña de azúcar. Tan sólo en México en la zafra, 2019 – 2020, se molió un total de 51,292,545 toneladas de caña y el residuo CB rondó entre 2.1 y 9.2 millones de toneladas; es decir, entre el 4 y el 18% del peso de la caña molida (CONADESUCA, 2021; USDA, p. 18, 2013, citado por Paris et al., 2016) y se emitieron 360 kg-CO<sub>2</sub>/ton (Yadav et al., 2020).

Por otro lado, el empleo de MCS por lo general genera incertidumbre sobre los costos de producción y empleo dentro de matrices cementantes. Si bien, algunos MCS, como el MK, llegan a ser relativamente más costosos que el CP, los residuos como las cenizas, disminuyen el costo del concreto, en comparación con el concreto convencional, variando el porcentaje de disminución, en función de algunos factores como la recolección del material, la mano de obra, el proceso de combustión, los tratamientos y el transporte (Apriantis et al., 2015; Meyer, 2009; Wu et al., 2018). Algunos autores, mediante estimaciones, han establecido porcentajes de reducción en costos de concreto con MCS, los cuales oscilan entre el 7 y el 10%, siendo comúnmente reducciones cercanas al 9% (Bumanis et al., 2020).

Aunado a lo anterior, otro aspecto importante al que se le ha dado mayor peso dentro de la industria de la construcción es la durabilidad de las estructuras; para lo cual, algunos investigadores han hecho uso de MCS debido a la mejora de propiedades y efectos de densificación que pueden causar dentro de las matrices cementantes. En el caso específico de la carbonatación, el uso de estos materiales impide en algunas ocasiones el avance de este fenómeno por la menor porosidad presentada para el ingreso del CO<sub>2</sub> y en otras ocasiones, por el alto consumo de portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>). En el caso del ataque por sulfatos, los beneficios van encaminados a la disminución del aluminato tricálcico

presente por el CP, con lo cual se obtiene menor formación de etringita y, por ende, menor daño.

Dicho lo anterior, este trabajo se justifica mediante los aportes a la sustentabilidad y durabilidad del material de construcción de mayor uso en el nivel mundial, los cuales se resumen en la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el consumo de menor cantidad de energía en la producción de los materiales, la menor explotación de recursos no renovables, la disposición final de residuos industriales y agroindustriales y el mejoramiento de las propiedades atribuibles a la durabilidad de las estructuras.

## **CAPÍTULO 2. Marco teórico**

### **2.1. Generalidades de los sistemas cementantes**

Se conoce como concreto hidráulico al material creado a partir de dos componentes principales, como la pasta y los agregados. La pasta es la combinación de materiales cementantes con agua (comúnmente se utiliza el cemento portland, aunque existen otros materiales tales como las adiciones minerales o puzolanas). Ésta funciona como aglomerante para unir los agregados finos y gruesos en una masa que endurece debido a las reacciones de hidratación que se producen, obteniéndose así una roca artificial con propiedades físico – mecánicas y de durabilidad que lo vuelven un material útil en la construcción (Kosmatka et al., 2011).

El término sistema o matriz cementante engloba aquellos materiales que basan su elaboración en el uso de cementantes en combinación con agua, no importando el uso de agregados finos o gruesos; es decir, se conocen como sistemas cementantes a materiales de construcción tales como la misma pasta o la lechada (agua – cementante), el mortero (agua – cementante – agregado fino) y el concreto (agua – cementante – agregado fino y grueso).

#### **2.1.1. Diseño y proporcionamiento de mezcla**

La selección y especificación de características y requerimientos de un sistema cementante, tales como las propiedades en estado fresco y endurecido, la adición o exclusión de ingredientes específicos y los requerimientos de durabilidad, se conoce como diseño de mezcla. Por su parte, el proceso realizado para estimar las cantidades de cada ingrediente del sistema cementante para cumplir los requisitos del diseño de mezcla, se conoce como proporcionamiento o dosificación de mezcla (Kosmatka et al., 2011).

Ambos conceptos aplican en la elaboración de cualquier sistema cementante, en función del tipo de sistema y el uso que se le dará. En el caso del concreto hidráulico, existen diferentes métodos para diseñar y proporcionar mezclas. Entre los más conocidos se encuentran el método Füller, Walker, módulo de fineza, ACI 211.1 y el PCA, cada uno con sus pasos a seguir; no obstante, todos enfocados en el desarrollo de mezclas

económicas y con propiedades adecuadas, de acuerdo con las especificaciones requeridas. En el caso de los morteros y las lechadas, los proporcionamientos se basan en relaciones en peso o volumen de los materiales, ya sea agua – cementante, agregado fino – cementante o ambas, tomando en consideración aspectos como el módulo de finura del agregado fino, la cantidad de vacíos que presenta y la fluidez de las mezclas.

### **2.1.2. Tipos de sistemas cementantes**

De manera general, existen tres tipos de sistemas cementantes, abordados en el apartado 2.1. No obstante, estos tipos de sistemas se subdividen en función de las características y usos especiales que se les dan. Dentro de la rama del concreto, se encuentran, además del concreto normal, algunos tipos de concreto, tales como los concretos ligeros, los aislantes, los de resistencia moderada, los de ultra alto desempeño, los celulares, los densos, los masivos, algunos con agregado precolocado, otros sin revenimiento, otros de compactado con rodillos, el lanzado, el poroso, el blanco o el coloreado, los polimerizados y los autocompactables, entre otros. Por su parte, además de los morteros de cemento portland, se pueden encontrar los morteros elaborados con base en otros materiales cementantes, como la cal y el yeso. Entre estos morteros se pueden encontrar principalmente los denominados morteros de albañilería, de revoque y especiales, los cuales abarcan otros tipos de morteros como los bastardos, los aéreos, los hidráulicos, los justacken, los expansivos, los refractarios, con aireantes, los ignífugos, los de cemento cola, los aislados de finos, los aligerados, los no expansivos, los hidrófugos, los coloreados y los autonivelantes, entre otros. Caso similar es el de las pastas, las cuales presentan connotaciones atribuibles a la viscosidad, la composición y las relaciones de materiales, comúnmente elaboradas con cemento portland, cal y yeso, en combinación con agua. Sin embargo, no importando el tipo de matriz cementante por las características especiales que presentan, todos los sistemas cuentan con un factor común, como el uso de materiales cementantes con o sin adiciones minerales (Bustillo, 2021).

### **2.2. Generalidades del cemento portland**

El cemento y los cementantes son polvos finos que presentan propiedades adhesivas, cohesivas y aglutinantes, al entrar en contacto con el agua, reacción que provoca el endurecimiento de estos y, a su vez, el desarrollo de propiedades físicas, mecánicas y de

durabilidad útiles en la construcción. El cemento mayormente conocido y utilizado en la industria como material de construcción es el cemento portland, el cual es un compuesto cristalino conformado principalmente por óxidos de calcio mezclados con sílice y aluminio, que al entrar en contacto con el agua forman una masa aglutinante que endurece y desarrolla propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad con el avance del tiempo (Makul, 2021). Su uso se remonta a 1824 cuando fue patentado por Joseph Aspdin, aunque desde las antiguas civilizaciones como la de los egipcios y la de los romanos, se hacía uso de materiales cementantes, tales como la cal, la arcilla y la caliza; materiales que hoy día funcionan como materia prima en la fabricación de cemento portland, por ser ricos en compuestos de calcio, sílice y alúmina (Trout, 2019).

### **2.2.1. Fabricación**

La fabricación del cemento portland consta de cuatro etapas principales, divididas en varios pasos (Figura 1). La primer etapa corresponde a la obtención y adecuación de la materia prima, comúnmente siendo ésta combinaciones de caliza, marga y esquito, arcilla, arena o mineral de hierro. La materia prima obtenida pasa por un proceso de adecuación que consiste en reducir el tamaño de las rocas hasta 125 mm y posteriormente a 20 mm mediante trituración. El material triturado es almacenado para consecutivamente pasar por un proceso de prehomogenización y molienda en la segunda etapa, la cual puede llevarse a cabo como proceso seco o húmedo. En el proceso seco la materia prima es dosificada en función del tipo de cemento a elaborar y llevada a un molino rotatorio en el cual se muelen los materiales, posteriormente pasan por un calentador de aire para ser secados y finalmente llegan a silos, donde se mezclan y almacenan en forma de polvos. En el proceso húmedo la materia prima pasa por el mismo método de molienda y posteriormente se mezcla con agua, formando así una pasta o lechada, previo a la tercera etapa. Cabe mencionar que el proceso húmedo es en la actualidad el más empleado por la industria cementera. La tercer etapa corresponde al proceso de calcinación, también conocido como clinkerización. En esta etapa, la materia prima molida y homogeneizada es calcinada en un horno rotatorio a temperaturas entre 1300 y 1450°C, donde se forman esferas por acción de la fundición y la rotación del horno. Estas esferas, al salir del horno, pasan por un enfriador de aire previo a ser almacenadas, mezcladas y molidas con algunos ingredientes, tales como el yeso en la

cuarta etapa. En esta etapa el Clinker y el yeso se dosifican en función del tipo de cemento, para posteriormente ser llevados a un molino rotatorio en el que las esferas se convierten en un polvo fino, conocido como cemento portland, el cual, a partir de este punto, se encuentra listo para su comercialización (Kosmatka et al., 2011).



Figura 1.- Representación esquemática del proceso de fabricación del cemento portland

Fuente: Jiménez-Quero, V., (2013).

### 2.2.2. Composición química

La composición del cemento portland se basa principalmente en óxidos de calcio, sílice, alúmina y hierro (Tabla 1), conforme a los compuestos encontrados en la materia prima utilizada para su elaboración; la cual, durante el proceso de clinkerización, transforma sus compuestos principales en fases de Clinker con adiciones de yeso o sulfatos (Tabla 2), mismas que se mantienen como fases del cemento portland.

Tabla 1.- Composición aproximada del cemento portland, expresada en óxidos

| Óxido   | Porcentaje en la composición |
|---|------------------------------|
| CaO   | 60 – 67                      |
| SiO <sub>2</sub>                              | 17 – 25                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 3 – 8                        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                | 0.5 – 6                      |
| MgO   | 0.1 – 4                      |
| Álcalis (K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O) | 0.4 – 1.3                    |
| SO <sub>3</sub>                               | 1.3 – 3                      |

\*Fuente: Bustillo, 2021

Tabla 2.- Fases principales del cemento portland

| Mineral                       | Formula química  | Composición  | Abreviación       |
|-------------------------------|--|--|-------------------|
| Silicato tricálcico           | Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>                                 | 3CaO.SiO <sub>2</sub>                                | C <sub>3</sub> S  |
| Silicato dicálcico            | Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>                                 | 2CaO.SiO <sub>2</sub>                                | C <sub>2</sub> S  |
| Aluminato tricálcico          | Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>                   | 3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | C <sub>3</sub> A  |
| Ferroaluminato tetracálcico   | Ca <sub>4</sub> Al <sub>n</sub> Fe <sub>2-n</sub> O <sub>7</sub> | 4CaO.Al <sub>n</sub> O <sub>2-n</sub> O <sub>3</sub> | C <sub>4</sub> AF |
| Sulfato de calcio dihidratado |  | CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O                 | CSH <sub>2</sub>  |

\*Nota: Adaptada de Bustillo, 2021 y Makul, 2021

La formación de las fases mencionadas se logra durante el proceso de calcinación de la materia prima, siguiendo las reacciones del proceso, en función del aumento de la temperatura. En principio, llegados los 100°C el agua libre de los materiales comienza a evaporarse. En el intervalo de los 500 – 800°C comienza la descomposición de los minerales de arcilla, para posteriormente pasar a la descarbonatación de los compuestos de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), a temperaturas entre 900 y 1000°C, donde se obtiene el CaO necesario en la composición del cemento portland y se emite CO<sub>2</sub> a la atmosfera. A la par, pasados los 900°C y hasta los 1200°C, comienzan las reacciones de formación de C<sub>2</sub>S, el cual, entre los 1300 y 1450°C, reacciona con el CaO para formar el C<sub>3</sub>S y, a su vez, se forman el resto de los compuestos (C<sub>3</sub>A y C<sub>4</sub>AF)(Bustillo, 2021).

#### Formación de fases del cemento portland





Cada fase formada representa diferentes tiempos de reacción dentro de las matrices cementantes y, a su vez, intervienen de diferentes maneras en el desarrollo de resistencia a compresión, principalmente.

La alita ( $C_3S$ ), al interactuar con el agua, endurece las matrices cementantes de manera rápida y genera la resistencia a edades tempranas. La belita ( $C_2S$ ), por el contrario, endurece lentamente y desarrolla resistencia a edades mayores que 7 días. En el caso de los aluminatos, su contribución se enfoca más en la producción del cemento. La celita ( $C_3A$ ) actúa como fundente reduciendo la temperatura de cocción del Clinker, lo que facilita la combinación de la cal y la sílice. Aunado a esto, durante los primeros días de hidratación libera gran cantidad de calor en el concreto, lo que contribuye en el endurecimiento y desarrollo de resistencia temprana. De igual forma, la ferrita ( $C_4AF$ ) actúa como fundente en la producción del cemento y se hidrata de manera rápida por lo que es necesario añadir sulfato de calcio dihidratado (yeso) en el cemento para evitar el fraguado excesivamente rápido provocado por los aluminatos, sin embargo y por el contrario de la celita, este compuesto no contribuye de manera significativa en el desarrollo de resistencia mecánica (Neville, 1999).

### **2.2.3. Tipos de cemento**

La industria del cemento en la actualidad designa los tipos de cemento en función de las propiedades y/características especiales que presentan, así como por la composición en cuanto a materia prima y adiciones, presentándose una gran gama para ser aplicados en diferentes condiciones o para diversas necesidades. En México, los tipos de cemento se encuentran clasificados por la norma NMX – C – 414 – ONNCCE en función de la cantidad de Clinker y adiciones que presentan. En el caso de Estados Unidos, la designación está dada por la norma ASTM C 150, en función de las propiedades que desarrolla el cemento en las matrices cementantes (Tabla 3).

Tabla 3.- Tipos de cemento NMX y ASTM

| <b>Designación NMX</b> |  | <b>Designación ASTM</b> |                                     |
|------------------------|--|-------------------------|-------------------------------------|
| CP                     | Cemento Portland Ordinario                           | Tipo I                  | Normal                              |
| CPC                    | Cemento Portland Compuesto                           | Tipo II                 | Moderada resistencia a los sulfatos |
| CPP                    | Cemento Portland Puzolánico                          | Tipo III                | Alta resistencia inicial            |
| CPS                    | Cemento Portland con Humo de Sílice                  | Tipo IV                 | Bajo calor de hidratación           |
| CPEG                   | Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno | Tipo V                  | Alta resistencia a los sulfatos     |
| CEG                    | Cemento con Escoria de Alto Horno                    |                         |                                     |

\*Fuente: Kosmatka et al., (2004)

En el caso de la designación NMX, el CP es aquél que presenta en su composición al menos 95% de Clínker y máximo 5% de adiciones, tales como puzolanas, humo de sílice, escoria, etc. El CPC es un cemento portland elaborado a partir de la combinación de adiciones de escoria, puzolanas y caliza, con porcentajes de entre 6 y 35%, así como humo de sílice de entre 1 y 10%, siempre que se cumpla una cantidad mínima de Clínker del 50% y máxima del 94%. El CPP corresponde a un cemento portland con adición únicamente de material puzolánico de entre 6 y 50% y el CPS corresponde al cemento portland adicionado con humo de sílice, con porcentajes de entre 1 y 10%. Los cementos CPEG y CEG se elaboran a partir de escoria; no obstante, su diferencial radica en que el CPEG es un cemento portland, es decir, se elabora con Clínker y se adiciona de entre el 6 y el 60% de escoria y el CEG es un cemento elaborado con porcentajes de escoria de entre 61 y 80%.

Adicionalmente, estos cementos pueden cambiar sus designaciones en función de cuatro características especiales: la resistencia a los sulfatos, la baja reactividad álcali – agregado, el bajo calor de hidratación y el color blanco, para lo cual se añaden las iniciales RS, BRA, BCH y B, respectivamente, así como por lo que se conoce como clase resistente (resistencia a compresión mínima a 28 días), las cuales son 20, 30 y 40, correspondientes a los MPa alcanzados como mínimo a esa edad. En el caso de las clases 30 y 40, estos pueden ser representadas con una R adicional, en el caso de contar con resistencia mínima a los tres días de 20 y 30 MPa, respectivamente. En resumen, los

cementos se designan de acuerdo con la norma NMX – C – 414, por uno de los seis tipos de la Tabla 3, seguido de la clase resistente y la característica especial. Un ejemplo de designación con todos los aspectos mencionados es CPO 40R RS, el cual es un cemento portland ordinario de clase resistente 40R, resistente a los sulfatos.

Por otro lado, en el caso de la designación ASTM C 150, el tipo I corresponde al cemento portland de uso general, sin propiedades especiales; el tipo II corresponde al cemento recomendado para situaciones donde se deban tomar precauciones ante el ataque de sulfatos por concentraciones bajas de los mismos, a diferencia del tipo V, el cual se recomienda para ambientes con concentraciones altas de sulfatos; el tipo III corresponde al cemento con la capacidad de desarrollar alta resistencia de manera rápida; y el tipo IV corresponde al cemento con poca generación de calor, recomendado principalmente en concretos masivos, para mitigar los cambios volumétricos presentados por el calor de hidratación. Adicionalmente, estas designaciones pueden modificarse añadiendo una A posterior al número romano para especificar que son cementos con aire incluido, únicamente siendo posible esta condición en los cementos tipo I, II y III.

#### **2.2.4. Hidratación del cemento portland**

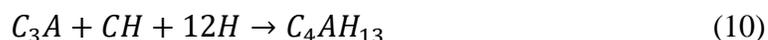
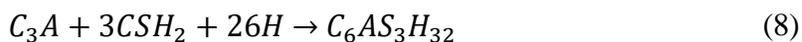
El cemento portland es también conocido como cemento hidráulico, dado que el desarrollo de propiedades físico – mecánicas y de durabilidad se basa en reacciones químicas y exotérmicas, las cuales se dan por la interacción de los compuestos presentes en el material con el agua.

El  $C_3S$  y el  $C_2S$  constituyen del 50 al 70% y del 15 al 30% del Clínker, respectivamente. Estos silicatos, al entrar en contacto con el agua, forman principalmente compuestos de hidróxido de calcio o portlandita ( $Ca(OH)_2$ ) y silicato de calcio hidratado o gel de Tobermorita (CSH), compuestos que, por lo general, son responsables del desarrollo de resistencia mecánica, así como algunas otras propiedades físicas (6)(7). En el caso del  $C_3S$ , su hidratación es rápida, por lo que se considera el compuesto responsable del inicio del fraguado y el desarrollo de resistencia temprana. Por su parte, el  $C_2S$  presenta hidratación lenta, por lo que su función y formación de compuestos contribuye en el desarrollo de resistencia a partir de siete días (Kosmatka, 2011; Bustillo, 2021).

El  $C_3A$ , por su parte, presenta principalmente tres reacciones químicas para la formación de compuestos en las matrices con base en cemento. En primera instancia, la hidratación de este compuesto es inmediata, por lo que es requerida la adición de compuestos tales como el yeso para obtener cementos de fraguado normal, que sean útiles para obras civiles. La presencia de sulfato de calcio dihidratado (yeso) o cualquier otra fuente de sulfato, provoca la interacción con el  $C_3A$  y, al contacto con el agua, forman trisulfoaluminato de calcio hidratado mejor conocido como etringita (8), un compuesto altamente expansivo. La formación de este compuesto reacciona con el  $C_3A$  restante en la matriz cementante y el agua para producir monosulfoaluminato de calcio y algunos otros compuestos similares (9). De igual forma y en segunda instancia, el  $Ca(OH)_2$ , formado a partir de la hidratación de los silicatos de calcio, reacciona con el  $C_3A$  restante y el agua para formar aluminato tetracálcico hidratado (10)(Kurdowski, 2014).

Por último, el  $C_4AF$  presente en el cemento, dada la materia prima requerida para el control de la temperatura de clinkerización durante la fabricación del cemento, reacciona al contacto con el agua formando ferroaluminato de calcio hidratado (11), un compuesto que contribuye poco en el desarrollo de resistencia a la compresión y propiedades físicas (Kosmatka, 2004; Bustillo, 2021).

### Productos de hidratación del cemento portland



Lo anterior, se puede representar esquemáticamente como la densificación de la matriz con el paso del tiempo mediante la formación de geles CSH, CAH y CASH, como se muestra en la Figura 2, donde los puntos verdes representan las partículas de CP, las zonas amarillas la hidratación de las partículas y los salientes color negro la formación de productos de hidratación.

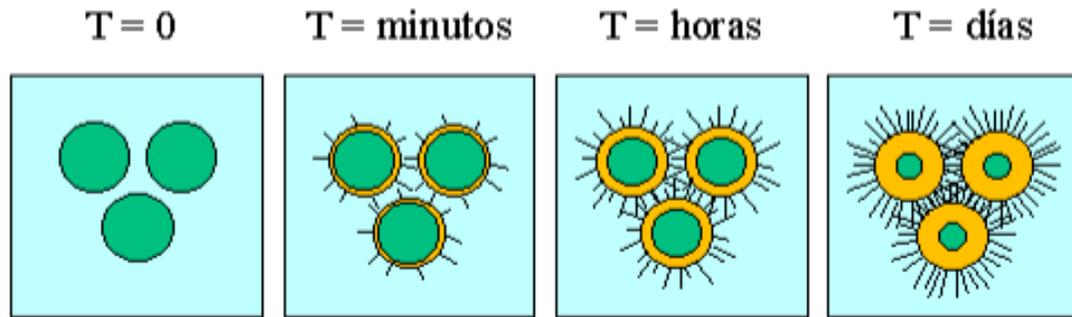


Figura 2.- Proceso de hidratación del CP  
 Fuente: Marroquín, J. B. (2008)

### 2.3. Materiales cementantes suplementarios

Los materiales cementantes suplementarios (MCS o SCM por sus siglas en inglés), también llamados adiciones minerales, son un conjunto de materiales comúnmente utilizados en combinación con el cemento portland, para contribuir en el desarrollo de propiedades debido a los compuestos cementantes formados a partir de reacciones de hidratación. Estos materiales pueden ser utilizados como adiciones o remplazos parciales que van de entre el 10 y el 50% en masa o volumen del cemento portland (Kosmatka, 2011).

Los MCS han sido incorporados en sistemas con base en cemento portland no sólo por el desarrollo de propiedades, sino también por la contribución de éstos en la conservación de energía y beneficios ambientales, tales como la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> por la reducción en la producción de cemento, la disposición final de residuos y la mitigación de explotación de recursos naturales (Siddique, 2011).

Las adiciones minerales, en general, se subdividen en dos grupos: los cementantes alternativos y las puzolanas. Un cementante alternativo o simplemente material cementante es aquél que por sí sólo presenta reacciones hidráulicas que lo hacen fraguar y endurecer, pudiendo o no desarrollar alta resistencia mecánica (Kosmatka, 2011). Entre los principales cementantes alternativos se encuentran el yeso y la cal, materiales obtenidos a partir de la calcinación de rocas calcáreas, aunque también es considerada como cementante la escoria de alto horno debido a su alta reactividad. En contraparte, las puzolanas son aquellos materiales silíceos o aluminio – silíceos que por sí solos

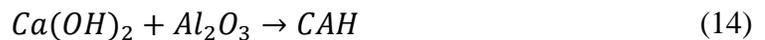
presentan poca o nula reactividad; pero que, en combinación con cemento portland o materiales ricos en  $\text{Ca(OH)}_2$  y en presencia del agua, reaccionan químicamente para formar CSH y otros compuestos que provocan endurecimiento y desarrollo de propiedades (Ramezaniapour, 2014).

Lo anterior ocurre mediante el proceso conocido como reacciones puzolánicas, las cuales involucran el agua, el material puzolánico y el hidróxido de calcio producto primario de la hidratación de los silicatos de calcio del cemento portland (12), el cual actúa como activador de dichas puzolanas. La presencia de silicato y alúmina en las puzolanas provoca que se generen productos de hidratación secundarios, tales como el silicato de calcio hidratado (CSH)(13), el cual es similar al producido únicamente por el cemento portland y el agua, además de aluminato de calcio hidratado (CAH)(14), los cuales, en conjunto, llegan a formar hidratos de aluminosilicatos de calcio (CASH). Dichos productos de hidratación son los principales responsables de la densificación de la matriz cementante (Figura 3), lo que a la postre les otorga propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad (Kurdowski, 2014). Estas reacciones se pueden describir de la siguiente manera:

**Productos de hidratación primarios**



**Productos de hidratación secundarios**



A partir de lo anterior, algunas de las propiedades de mayor beneficio que se han encontrado con el empleo de puzolanas en matrices cementantes se resumen en la mejora de la trabajabilidad, la mitigación de segregación, la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la mitigación de cambios volumétricos por generación de calor, la densificación de la microestructura, la disminución de la porosidad y la permeabilidad, la resistencia al ataque de sulfatos e iones cloruro, la resistencia a reacciones álcali – agregado y al congelamiento-deshielo, por mencionar algunas. Cada mejora, en función de la puzolana utilizada y el porcentaje de reemplazo o adición, dado que no todas presentan el mismo efecto dentro de los sistemas cementantes. Algunos de

los MCS que desarrollan mejoras en los sistemas cementantes, principalmente cubriendo el grupo de materiales puzolánicos son la ceniza volante, la escoria, el humo de sílice, las puzolanas naturales, el metacaolín, la ceniza de bagazo de caña de azúcar y la ceniza de cáscara de arroz.

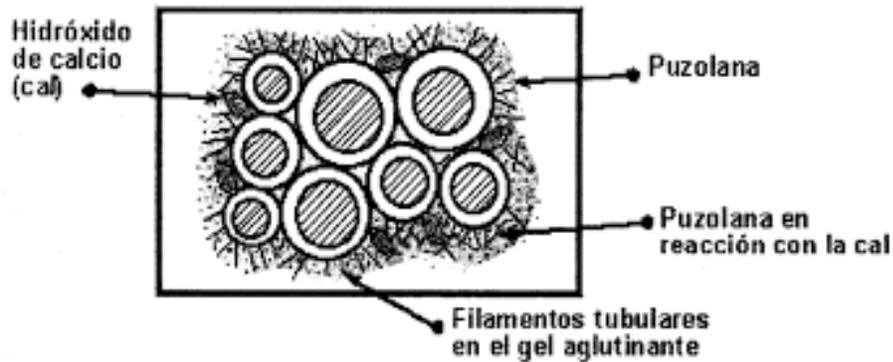


Figura 3.- Proceso de hidratación de las puzolanas

Fuente: Hermenejildo, A., et al., (s.f)

### 2.3.1. Ceniza volante

La ceniza volante es un subproducto industrial proveniente de la quema de carbón o lignito en las plantas generadoras de electricidad que utilizan esta materia prima (plantas carboeléctricas). Durante la combustión los minerales presentes en el carbón, tales como la arcilla, el feldespato, el cuarzo y el esquitto, se fusionan mientras son elevados y expulsados de la cámara de combustión, momento en el que adquieren formas esféricas por el rodamiento. Fuera de la cámara, las partículas se enfrían convirtiéndose en partículas sólidas vidriosas esféricas. Posteriormente son recolectadas mediante precipitadores o filtros, variando el porcentaje de recuperación de entre 85 y 99%, en función del método de recolección. La ceniza volante es una de las puzolanas de mayor producción y uso en matrices cementantes, remontando su uso a los años 50's (Figura 4) (De Belie, 2018).

Existen, en general, dos tipos de ceniza volante conocidos, los cuales se diferencian principalmente por el tipo de carbón utilizado y por su composición mineralógica. Algunos otros aspectos que otorgan variabilidad a los tipos de cenizas son el grado de pulverización, el tipo de horno y las condiciones de oxidación y la forma de recolección. No obstante, es común encontrar propiedades similares en composición y características

físicas (Siddique, 2011). Algunas de éstas son el tamaño de las partículas, los cuales van de 1 a 150  $\mu\text{m}$  y su densidad relativa, la cual ronda entre 1.90 y 2.80  $\text{g}/\text{cm}^3$ .



Figura 4.- Carbón bituminoso y residuo de CV

Fuente: Ryans, P.H., (2019)

En cuanto a la composición química, las cenizas volantes presentan altos contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tanto en estado cristalino como amorfo, lo que les otorga reactividad al estar en contacto con el cemento portland. Estos residuos también presentan en su composición  $\text{CaO}$ , no obstante, las cantidades son variables en función del tipo de carbón: bituminoso o subbituminoso. Por lo general, existe mayor presencia de  $\text{CaO}$  en cenizas volantes provenientes de carbón subbituminoso, siendo de alrededor del 10%, lo que les da la clasificación C en cenizas volantes. Por otro lado, contenidos de  $\text{CaO}$  menores que el 10% otorgan la clasificación F, lo cual, en términos generales, da pauta a saber si la ceniza volante presenta mayor o menor reactividad, dado que, a mayor  $\text{CaO}$ , mayor es el mejoramiento de las propiedades.

De lo anterior, se han estimado diferentes porcentajes de sustitución parcial de cemento portland por ceniza volante, los cuales van del 15 al 25% para la clase F y del 15 al 40% para la clase C. Esto con la finalidad de producir beneficios puntuales en propiedades frescas y endurecidas de las matrices cementantes, tales como la reducción de sangrado y segregación, mejora de la trabajabilidad, reducción del calor de hidratación, mejora de resistencia a edades avanzadas, reducción de la permeabilidad, incremento de la resistencia al ataque de sulfatos, mejora de la resistencia a la corrosión, incremento de la

resistencia a la reactividad álcali – sílice, por mencionar algunos (Ramezaniapour, 2014).

### **2.3.2. Escoria de alto horno**

La escoria de alto horno es un subproducto no metálico de los altos hornos utilizados para fabricar hierro, los cuales se alimentan principalmente de mezclas de mineral de hierro, coque y piedra caliza, calcinadas a temperaturas de alrededor de 1500°C. A estas temperaturas, las mezclas utilizadas se funden produciendo hierro y escoria fundidos. Posteriormente, se realiza un enfriamiento rápido mediante chorros de agua a presión, lo que forma partículas de escoria de hasta 5 mm y evita la formación de productos cristalinos inertes (sin propiedades cementantes) por lo que el resultado final es un material granular de 95% aluminosilicatos de calcio amorfo, que le otorgan alta reactividad. Posteriormente, la escoria es secada y molida en un molino de bolas para obtener un polvo fino conocido como escoria granulada de alto horno o cemento de escoria, la cual es principalmente empleada en mezclas cementantes con porcentajes de reemplazo que van del 30 al 85% (Siddique, 2011).

En cuanto a propiedades físicas, el polvo finamente molido de la escoria llega a presentar finura similar a la del cemento portland. Por lo general, la escoria presenta tamaños de partícula menores que 45  $\mu\text{m}$ , con una densidad relativa dentro del intervalo de 2.85 a 2.95  $\text{g/cm}^3$ , además de presentar apariencia similar a la del cemento blanco posterior a todo el proceso de producción. En cuanto a composición química, la escoria presenta principalmente silicatos y alúmina del mineral de hierro original combinados con óxidos de piedra caliza, tales como el CaO y MgO, los cuales constituyen al menos el 95% de toda la composición química de las escorias. Sin embargo, al igual que el resto de las puzolanas, la composición puede variar en función de las cantidades utilizadas como mezcla al cargar el alto horno y el proceso y control en la producción de cada planta. Lo anterior pudiendo afectar la clasificación de las escorias o los grados de reactividad, los cuales son 80, 100 y 120. A mayor grado de reactividad, mayor índice de actividad puzolánica o mayor desarrollo de resistencia a la compresión presentan las escorias (Kosmatka, 2011).

Aunado a lo anterior, las propiedades físicas y químicas influyen directamente en el mejoramiento de propiedades de los sistemas cementantes, entre las que se pueden mencionar algunas tales como la trabajabilidad, la reducción del sangrado y segregación, la mejora de propiedades mecánicas, la mejora del módulo de elasticidad, la reducción de cambios volumétricos, el refinamiento de poros, la reducción de permeabilidad, el incremento de resistencia a ataques químicos de cloruros y sulfatos y la mejora de resistencia al congelamiento-deshielo (Ramezaniapour, 2014).

### **2.3.3. Humo de sílice**

El humo de sílice o microsíllice es sílice ultrafina no cristalina, producida en hornos de arco eléctrico como subproducto industrial de la producción de metales de silicio y aleaciones de ferrosilicio. Durante la producción de silicio metálico, se emplea una fuente de sílice de alta pureza, astillas de madera y carbón, las cuales se calientan en los hornos de arco eléctrico a 2000°C, aproximadamente. El vapor de la combustión resulta en el humo de sílice, el cual, al enfriarse, se recoge en filtros para posteriormente ser procesado, buscando eliminar impurezas.

Físicamente, el humo de sílice es un polvo fino con coloración similar a la del cemento portland. Se compone principalmente de partículas esféricas amorfas de alrededor de 0.1 y 1  $\mu\text{m}$ , lo que le brindan alta reactividad, al estar en contacto con el cemento hidratado. Además, su densidad relativa comúnmente ronda el intervalo de entre 2.20 y 2.50  $\text{g/cm}^3$ . Químicamente, el humo de sílice se constituye de entre 90 y 99% de  $\text{SiO}_2$  amorfo. La calidad del humo de sílice está en función de la aleación que se produce y el contenido de sílice no cristalina de esas aleaciones. Estas propiedades lo han convertido en un material altamente reactivo al interactuar con el cemento portland, principalmente siendo utilizado en cantidades pequeñas que van del 5 al 10% de sustitución parcial (Kosmatka, 2011).

Algunos de los beneficios que el humo de sílice aporta a las matrices cementantes son: incremento de cohesión en las mezclas, estabilización reológica de las matrices, incremento de resistencia a la compresión, mitiga contracciones y cambios volumétricos, refinamiento de la estructura de poros y presenta mejorías en aspectos de la durabilidad,

tales como la resistencia al ataque de cloruros y sulfatos, previene las reacciones álcali – agregados y disminuye los problemas del congelamiento – deshielo (Siddique, 2011).

#### **2.3.4. Puzolanas naturales**

Las puzolanas naturales se producen a partir de minerales naturales crudos o calcinados que presentan propiedades puzolánicas tales como la pumicita, tobas, lutitas, tierras de diatomeas e incluso el metacaolín. No obstante, algunos autores sugieren que el término puzolana natural se refiere a aquellos materiales que requieren el mínimo tratamiento para adquirir propiedades puzolánicas, tal como el triturado. El resto de los materiales que requieren de tratamientos avanzados, como la calcinación, se categorizan como puzolanas artificiales. No importando la categoría, estos tipos de puzolanas fueron los primeros materiales con propiedades cementantes utilizados, en combinación con cal, desde el 1600 a.C., como material de construcción (Ramezaniapour, 2014).

Si bien, existe gran variedad de puzolanas naturales o artificiales, gran parte de éstas se clasifican como tipo N, de acuerdo con la norma ASTM C 618, por provenir de depósitos minerales con o sin tratamiento de calcinación. Además de la clasificación, las puzolanas naturales comparten propiedades físicas y químicas que les brindan reactividad puzolánica. Físicamente, estos materiales presentan densidad relativa de entre 2.40 y 2.61 g/cm<sup>3</sup> y tamaños de partícula variados que, en promedio, rondan entre 1 y 2 µm. En cuanto a su composición química, se basan en contenidos altos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y compuestos minoritarios con porcentajes variados, en función del mineral procesado, llegando a ser de entre 90 y 95% de la composición total, además de contener CaO de entre 5 y 10%, lo que les da propiedades hidráulicas y mayor reactividad (Kosmatka, 2011).

Este tipo de puzolanas presentan, dentro de las matrices cementantes, beneficios enfocados principalmente en la durabilidad, tales como la resistencia al ingreso y al ataque de agentes nocivos como los cloruros y los sulfatos, la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo y la resistencia a la carbonatación en algunos casos. El desarrollo de propiedades en estado fresco y endurecido es variable, en función de la puzolana utilizada, no obstante, algunas de las características que se benefician, en general, son la

cohesión de las mezclas, la prevención del sangrado y la segregación y el desarrollo de resistencia a la compresión (Ramezaniapour, 2014).

### 2.3.5. Metacaolín

El metacaolín es un material de alta reactividad puzolánica producido a partir de la calcinación de arcillas caoliníticas a temperaturas dentro del intervalo de 500 a 900°C. El proceso de calcinación del caolín provoca la deshidroxilización del material o la pérdida del agua química, lo cual lo provee de características puzolánicas atribuibles principalmente a sus características físicas y químicas (Figura 5) (De Belie, 2018).

El caolín es una arcilla fina y blanca, utilizada comúnmente en la fabricación de porcelana. La caolinita es el término mineral dado a las arcillas caoliníticas, conocida también como aluminosilicato hidratado. El uso de este material se remonta a mediados de los 90's (Gill y Siddique, 2018) y es comúnmente considerada una puzolana clase N, de acuerdo con la ASTM C 618.

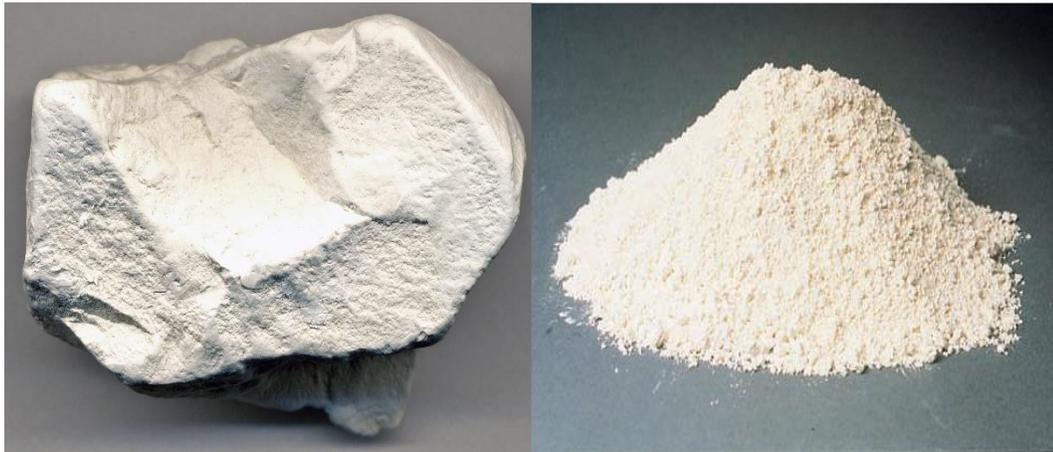


Figura 5.- Caolinita sin calcinar y metacaolín postcalcinación

Fuente: Kosmatka y Wilson (2011)

En primera instancia, físicamente el metacaolín presenta tamaños de partícula que van de 1 a 20  $\mu\text{m}$ , en promedio, siendo similar e incluso menor que el tamaño del cemento portland. Este material presenta coloración blanca, en algunos casos con destellos rosa o rojizos, por el proceso de producción. En cuanto a su gravedad específica, ésta es variable; sin embargo, comúnmente ronda los 2.4 y 2.5  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Por otro lado, en cuanto a características químicas y mineralógicas, el metacaolín contiene alta cantidad de  $\text{SiO}_2$ ,

rondando el 50% de su composición, aunado a altas cantidades de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  con porcentajes variables entre 20 y 45%. Algunos otros óxidos como el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , el  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  se encuentran como compuestos minoritarios (Ramezaniapour, 2014).

Algunos de los beneficios que el metacaolín aporta a los sistemas cementantes de manera general son el incremento de resistencia mecánica a la compresión, la tensión y la flexión, reducción de permeabilidad, incremento de resistencia a los ataques químicos de cloruros y sulfatos, reducción de reactividad álcali – sílice, reducción de contracción y cambios volumétricos por el empaquetamiento de las partículas, reducción de potenciales por eflorescencia y, en algunos casos particulares poco comunes, existe la mejora de la trabajabilidad (Siddique, 2011).

### **2.3.6. Ceniza de bagazo de caña de azúcar**

El bagazo de caña es un residuo fibroso obtenido a partir del aplastamiento de los tallos de caña de azúcar para extraer su jugo. Dicho residuo se utiliza en los ingenios azucareros como combustible para producir vapor útil en los procesos de manufactura y en la generación de la energía eléctrica de estos lugares. El subproducto obtenido a partir de la combustión del bagazo de caña es considerado un residuo agrícola, mejor conocido como ceniza de bagazo de caña de azúcar, material puzolánico que se ha empleado como sustituto parcial del cemento portland desde finales de los 90's (Figura 6) (Baltazar et al., 2019).

Esta puzolana sin tratamiento presenta partículas tubulares e irregulares grandes con alta porosidad (23  $\mu\text{m}$  de tamaño promedio). Con tratamiento de molienda y calcinación el tamaño de partícula se hace más pequeño, llegando a 10  $\mu\text{m}$  en promedio, lo que las hace más densas (1.85 a 2.60  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), aunque siguen presentando morfología irregular. Su composición química se constituye de alrededor de un 75% de  $\text{SiO}_2$ , cerca del 10% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y porcentajes menores que el 10 y el 5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$ , respectivamente. Además, presenta compuestos minoritarios, entre los que destacan álcalis tales como el  $\text{K}_2\text{O}$  y el  $\text{Na}_2\text{O}$ . Lo anterior está condicionado principalmente a las temperaturas de combustión, las cuales rondan los 350 y 600°C y al tratamiento de calcinación posterior a la recolección, dado que estos procesos influyen directamente en la formación de sílice

amorfa y en la reducción del contenido de carbón, lo que, a la postre, le otorga mayor reactividad para ser empleadas en mezclas cementantes.



Figura 6.- Bagazo de caña típico y residuo postcalcificación (CB)

Fuente: Smart Green (s.f)

Por sus características, el bagazo es comúnmente empleado como puzolana reactiva o como adición de relleno (efecto *filler*). En ambos casos esta puzolana contribuye principalmente en la mejora de aspectos de la durabilidad, tales como la mayor resistencia al ataque de cloruros y de sulfatos, así como la protección del acero de refuerzo ante el fenómeno de la corrosión. En cuanto a propiedades en estado fresco, la porosidad de las partículas de la ceniza provoca un mayor consumo de agua y pérdida de trabajabilidad, aunque proveen a las mezclas de mayor resistencia a la segregación. En el caso de las propiedades mecánicas, la ceniza de bagazo es reconocida por su reactividad tardía y desarrollo de propiedades mecánicas a edades avanzadas.

### **2.3.7. Ceniza de cáscara de arroz**

La cáscara de arroz es un residuo agrícola obtenido a partir de la molienda de los granos de arroz. Esta cáscara corresponde al 20% del peso del arroz y está formada principalmente por celulosa, lignina y sílice. A partir de la combustión de la cáscara de arroz a temperaturas de entre 550 y 700°C, durante una hora, se obtiene la ceniza de cáscara de arroz, dado que, al quemarse, la celulosa y la lignina se eliminan quedando una ceniza rica en sílice amorfa. Esta ceniza posteriormente pasa por procesos de

molienda para obtener un polvo fino que es comúnmente mezclado con cemento portland (Ramezianpour, 2014).

Físicamente, la cáscara de arroz presenta coloración gris, violeta o blanca según las impurezas presentes, mientras que la ceniza presenta coloración negra debido al carbón presente en la combustión. Su densidad relativa oscila entre 2.05 y 2.10 g/cm<sup>3</sup>. El tamaño de sus partículas se encuentra dentro del intervalo de 5 a 10 μm, aunque los valores presentan variabilidad en función del tratamiento llevado a cabo después de la recolección (molienda y/o cribado). Mientras que, químicamente, la ceniza de cáscara de arroz se compone de alrededor del 80 al 85% de SiO<sub>2</sub> amorfo, con compuestos minoritarios como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O. Lo anterior, aunado a la estructura porosa de sus partículas, le otorgan mayor reactividad, en comparación con algunos otros residuos de origen agrícola.

Se sabe que la ceniza de cáscara de arroz se ha empleado como adición puzolánica en mezclas cementantes por las ventajas que brinda en cuanto a la mejora de resistencia mecánica y propiedades de durabilidad, así como por contribuir en la reducción de costos y en la mitigación del impacto ambiental, por la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y disposición final de residuos (Siddique, 2011).

## **2.4. Caracterización de los cementantes y las puzolanas**

Buscando conocer las características físico – químicas particulares de cada material empleado en los sistemas cementantes, se han realizado análisis microestructurales a los cementantes y a las puzolanas a lo largo del tiempo, teniendo como premisa que el conocimiento de dichas características puede ayudar a comprender las propiedades y el comportamiento desarrollado en las matrices cementantes, mediante las reacciones de hidratación (Scrivener et al., 2018). Los análisis comúnmente empleados se describen a continuación.

### **2.4.1. Fluorescencia de Rayos X**

La fluorescencia de rayos X, también conocida como espectroscopia de fluorescencia de rayos X, es una técnica analítica empleada principalmente para conocer la composición química de muestras líquidas y sólidas. Su principio se basa en la emisión atómica de un

haz de rayos X para excitar las muestras, de lo cual se emiten energías discretas características de cada elemento químico presente en la muestra, con lo cual se puede llegar a identificar tanto el compuesto químico en forma estable (óxido) como la intensidad o presencia del componente dentro de la muestra (concentración)(Faraldos y Goberna, 2011)

#### **2.4.2. Difracción de Rayos X**

La difracción de rayos X es una técnica de caracterización microestructural que basa su principio en la incidencia de un haz de rayos X monocromático sobre una muestra policristalina, con presencia de muchas partículas. Al incidir el rayo en alguna de las caras de la estructura cristalina de cada partícula orientada de manera aleatoria, éste se refleja con un cierto ángulo de difracción característico de cada fase mineral presente en un material. Es decir, el empleo de un difractómetro para caracterización microestructural ayuda a conocer las estructuras cristalinas o fases minerales presentes en él, así como la estimación cualitativa de éstos al interpretar las intensidades de los picos de difracción (Scrivener et al., 2018).

#### **2.4.3. Distribución del tamaño de las partículas**

El conocimiento de los tamaños de partícula dentro de un cementante o puzolana empleado en sistemas cementantes, al igual que los agregados pétreos, juega un rol importante dada su contribución principal en el refinamiento de la estructura de poros. El principio de esta técnica se basa en la difracción láser. Un haz de luz incide en la muestra sólida en polvo y pasa a través de las partículas, las cuales, en función del tamaño, la orientación y la cantidad de estas, dispersan el haz de luz creando patrones de dispersión, los cuales son traducidos y analizados para calcular el tamaño de las partículas dentro de las muestras, obteniéndose finalmente cada tamaño de partícula encontrado, así como la cantidad presente de este tamaño dentro de la composición de la muestra (Xu, 2006)

#### **2.4.4. Microscopía electrónica de barrido**

El funcionamiento de la microscopía electrónica como herramienta de caracterización se basa en el barrido mediante un haz de electrones sobre una superficie conductora. Dicho

haz es reflejado, recogido y procesado para obtener una imagen con las características superficiales de la muestra analizada, tales como la morfología y los tamaños de las partículas, las cuales pueden ser observadas con aumentos desde 10x y hasta 5,000x, en función del equipo utilizado.

En general, esta técnica se emplea para la caracterización cualitativa de los materiales; no obstante, las constantes evoluciones en los equipos de caracterización han permitido el desarrollo de accesorios que permiten el análisis de la composición elemental de las muestras analizadas, siendo éste únicamente en zonas específicas de la muestra (Xu, 2006).

#### **2.4.5. Índice de actividad puzolánica**

El índice de actividad puzolánica es una técnica macroestructural regida por la norma ASTM C 109 y se emplea para estimar el comportamiento y la reactividad puzolánica de los materiales cementantes en los primeros 28 días de hidratación e interacción con el cemento portland. El principio se basa en la determinación de la resistencia mecánica a compresión de cubos de mortero elaborados con porcentajes de sustitución de cemento portland por puzolanas en un 20% en masa, manteniendo una fluidez dentro del intervalo de  $110 \pm 5\%$ . Las resistencias obtenidas a 7 y 28 días divididas entre la resistencia de probetas con únicamente cemento portland, representan el índice de actividad puzolánica, expresado en porcentaje, el cual, en función de la puzolana utilizada, puede regirse por un mínimo a cada edad.

#### **2.5. Agregados**

Los agregados son materiales granulares tales como arena, grava, concreto triturados, escoria triturada, entre otros, los cuales se utilizan como relleno en matrices cementantes, para formar concreto o mortero. Estos influyen de forma importante en las propiedades físico – mecánicas de las mezclas, tanto en estado fresco como endurecido, así como en las proporciones y en la economía de las mismas. Estos constituyen entre el 70 y el 85% de la masa total del concreto o, expresado en volumen, entre el 60 y el 75%, de ahí su relevancia e influencia sobre las propiedades de las mezclas cementantes.

### 2.5.1. Clasificación

Existen en la actualidad diferentes formas de clasificar los agregados para mezclas cementantes. Algunas clasificaciones se basan en el origen de las rocas para agregados, tales como metamórficas, ígneas o sedimentarias; también se pueden clasificar por la forma de obtención (naturales, triturados, mixtos), por la densidad que presentan (ligeros, normales, densos) y por la forma o textura (redondeados, irregulares, aplanados, angulares, elongados, cristalinos, porosos, vidriados, suaves, granulares, rugosos, etc.); sin embargo, la clasificación más común en la industria se basa en el tamaño de las partículas del agregado. Por lo que los agregados se subdividen en dos grupos: los agregados finos y los agregados gruesos.

Los agregados finos son comúnmente arena o roca triturada, con tamaños de partícula no mayor que 4.75 mm; caso contrario, el agregado grueso presenta tamaños mínimos de partícula mayores que los 4.75 mm y máximos de entre 9.5 y 37.5mm, siendo éstos por lo general combinaciones de gravas y rocas trituradas, así como partículas de concreto triturado denominado agregado reciclado (Figura 7). Estos tipos de agregados en conjunto forman masas de agregado homogéneo con una distribución de partículas óptima para eliminar la mayor cantidad de aire atrapado entre partículas, con lo cual se contribuye en las propiedades de las mezclas cementantes, no obstante, para que esto ocurra, los agregados deben cumplir especificaciones y propiedades físicas que les otorguen la etiqueta de agregados de calidad y funcionales para las mezclas cementantes.



Figura 7.- Distribución de tamaños de los agregados pétreos

Fuente: ACI, edición Noreste de México, p. 26, en Cayambe y Pérez (2013)

### 2.5.2. Propiedades

Los agregados, tanto finos como gruesos, deben cumplir algunas propiedades que determinan su calidad y funcionalidad dentro de las mezclas cementantes. Entre las más importantes se encuentran la granulometría, la forma y textura de la partículas, la densidad, la absorción y la humedad.

- La granulometría de los agregados hace referencia a la distribución de los tamaños de partícula de cada agregado, la cual se determina mediante el cribado de una porción del material a través de mallas ordenadas por tamaño de abertura, desde el más grande hasta el más pequeño. El análisis granulométrico y el cumplimiento de los límites especificados en las normativas correspondientes tales como la ASTM C 33, tienen impacto directo en algunas propiedades de las mezclas finales tales como las proporciones, demanda de agua y de cemento, economía, uniformidad, trabajabilidad, porosidad, contracción y durabilidad, entre otras.
- Dentro de las mezclas cementantes, la forma y textura de las partículas de los agregados juegan un rol muy importante, principalmente en cuanto a propiedades en estado fresco. Las partículas de los agregados pueden ser ásperas, angulares, elongadas, redondeadas, lisas, etc. Esta características superficiales, principalmente tienen influencia sobre el consumo de agua y cemento; las partículas con textura áspera o formas angulares requieren mayor cantidad de agua y cemento para producir mezclas trabajables. Algunas otras características en las que influyen son la adherencia entre la pasta cementante y el agregado, así como la cantidad de vacíos entre agregados finos y gruesos por el óptimo o deficiente acomodo de las partículas.
- La densidad hace referencia a la masa o el peso de un material para llenar un volumen conocido. En el caso de los agregados, existen dos densidades que se requiere conocer: la densidad suelta o peso volumétrico seco suelto; es decir, sin aplicar ningún procedimiento de compactación para eliminar vacíos, permitiendo el acomodo por gravedad de las partículas del material; y la densidad relativa o gravedad específica, la cual es la relación entre su masa con la masa del agua con el mismo volumen, en las cuales influyen algunas características tales como la forma y la distribución granulométrica. Ambas densidades con poco aporte dentro de las

propiedades de las mezclas cementantes, pero muy útiles en el proporcionamiento de las mezclas, dado que los agregados representan un volumen ocupado dentro de la masa de concreto o mortero.

- La absorción de los agregados hace referencia a la cantidad de agua que consumen para saturar sus poros internos y la humedad hace referencia a la cantidad de agua presente en el agregado sin tener un proceso de humedecimiento o secado previo; es decir, la humedad propia de las condiciones ambientales en las que se encuentra el material. Estos parámetros influyen directamente en el proporcionamiento y diseño de mezcla, dado que la absorción y humedad que presentan los agregados pueden alterar las relaciones agua – cementante, por lo que es requerido realizar ajustes en la cantidad de agua a adicionar en función de las condiciones de humedad de los agregados, las cuales se clasifican en cuatro: secado al horno (sin agua y totalmente absorbente), secado al aire (superficie seca con humedad en el interior y ligeramente absorbente), saturado superficialmente seco (contienen agua en todo su interior por lo que no absorben ni ceden agua a las mezclas) y húmedo (contienen exceso de humedad que sobresale de la superficie).

## **2.6. Aditivos**

Los aditivos son materiales que se añaden a las mezclas de concreto o mortero con la finalidad de modificar sus propiedades físicas o mecánicas en estado fresco y/o endurecido. Las adiciones utilizadas en el concreto presentan diferentes mecanismos de funcionamiento, los cuales se encuentran ligados con la denominación de estos. Existen cuatro mecanismos principales, que son:

- Dispersión del cemento en la fase acuosa del concreto o mortero.
- Alteración de la relación normal de hidratación del cemento.
- Reacción con los subproductos del cemento hidratado.
- No reacción ni con el cemento ni con sus subproductos.

Los dos primeros mecanismos de reacción son característicos de los denominados aditivos químicos, los cuales se rigen bajo la norma ASTM C 494. Los dos últimos mecanismos, comúnmente son asociados en las adiciones minerales o puzolánicas vistas en el apartado 2.3. El Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés)

define los aditivos químicos como materiales diferentes al agua, agregados, cemento y fibras de refuerzo que se usan como ingrediente en mezclas cementantes para modificar sus propiedades en estado fresco, fraguado o endurecido y éstos se añaden antes o durante el mezclado (Hasan, 2020).

### **2.6.1. Clasificación de los aditivos para concreto**

Los aditivos químicos, a su vez, se subdividen con base en la función que cumplen dentro de las mezclas cementantes. Los aditivos de mayor uso por su función son los acelerantes, retardantes, inclusores de aire y reductores de agua/plastificantes. Algunos otros clasificados por su función son considerados especiales dado que son específicos para ciertas funciones tales como los repelentes de agua, formadores de gas, adhesivos, inhibidores de corrosión, reductores de contracción, entre otros (Hasan, 2020).

#### **Acelerantes**

Estos aditivos se utilizan en mezclas cementantes donde se requiera disminuir el tiempo de fraguado y endurecimiento, así como donde se busque el desarrollo de resistencia temprana. Son aditivos útiles en construcciones que requieran el desencofrado rápido para su reutilización y para obras en tiempo frío. Dentro de los aditivos acelerantes, el cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) es el químico más comúnmente empleado, sin embargo, su uso se limita a elementos no reforzados por ser un material corrosivo. Algunos otros acelerantes utilizan otros compuestos tales como el cloruro de aluminio, carbonato de sodio, carbonato de potasio, sales férricas, formiato de calcio, nitrato de calcio, tiocianato de sodio e incluso algunas combinaciones de estos (Surahyo, 2019).

#### **Retardantes**

En contraparte de los acelerantes, los aditivos retardantes se emplean para retrasar el tiempo de fraguado y el endurecimiento normal de las mezclas cementantes. Son útiles para el concreto premezclado si éste se debe entregar en sitios lejanos, así como también son útiles en climas cálidos o en volúmenes grandes de concreto o mortero, dado que la alta generación de calor por el clima o la hidratación reducen los tiempos de fraguado y endurecimiento. Algunos beneficios adicionales obtenibles del uso de estos aditivos son la mejora de la trabajabilidad, la reducción de segregación, la reducción de fisuración

térmica, el aumento de resistencia a la compresión y a la tensión, entre otras. Los materiales más comúnmente usados como retardantes son el azúcar, los derivados de carbohidratos, las sales de zinc solubles, los boratos solubles y el ácido tartárico, por mencionar algunos (Surahyo, 2019).

### **Inclusores de aire**

Los inclusores de aire son aditivos utilizados para incrementar la resistencia al congelamiento-deshielo, mediante la introducción de burbujas de aire con diámetros menores que 1 mm en las matrices cementantes endurecidas. Algunos otros beneficios del uso de estos aditivos son la mejora de trabajabilidad, el aumento de cohesión en estado fresco y la reducción de sangrado y segregación. Los materiales comúnmente empleados como inclusores de aire son las resinas naturales de madera, las grasas, los aceites animales, los jabones sulfonados, los detergentes sintéticos, las sales de material proteico, etc., aunque la inclusión de aire se puede lograr únicamente haciendo uso de cementos con esta característica añadida (Surahyo, 2019)

### **Reductores de agua**

La principal función de estos aditivos es lograr el aumento de la trabajabilidad de las mezclas cementantes sin aumentar el contenido de agua. Además, el uso de estos aditivos provoca la reducción de agua, manteniendo la cantidad de cemento constante, por lo que provoca incrementos en la resistencia a la compresión. Estos aditivos reductores de agua se clasifican en aditivos de nivel medio y alto o superplastificantes. Esta clasificación se da en función de las reducciones de agua que se logran con cada uno. Los reductores de nivel medio proporcionan reducciones de entre el 6 y el 12% de agua y los de alto rango provocan reducciones de entre el 12 y el 30%, con lo cual se logran asentamientos que van de 125 a 200 mm. Los materiales más empleados como aditivos reductores de agua son lignosulfonatos, ácidos carboxílicos hidroxilados, melamina sulfonada, sales de zinc, cloruros, fosfatos y naftaleno sulfonado, entre otros (Surahyo, 2019).

## **2.7. Propiedades de los sistemas cementantes en estado fresco**

Las matrices cementantes presentan dos estados principales: estado fresco y estado endurecido. Cada uno con ciertas propiedades que los caracterizan. El estado fresco o plástico de un sistema cementante comienza a partir del contacto del agua con los cementantes y termina hasta el punto de endurecimiento y no retorno al estado plástico. Las propiedades más comunes de los sistemas cementantes en estado fresco son la trabajabilidad, la consistencia, la segregación y el sangrado, por mencionar algunas.

### **2.7.1. Trabajabilidad**

La trabajabilidad de una mezcla con base en cemento portland y cementantes es una característica definida como la facilidad de colocar, compactar y dar acabado a los elementos estructurales. Algunos autores la han descrito como una propiedad compuesta entre dos propiedades principales, como la consistencia y la cohesividad. Por un lado, la consistencia es la facilidad de flujo que presentan las mezclas y la cohesividad la tendencia a no presentar sangrado o segregación (Figura 8)(Bustillo, 2021).



Figura 8.- Concreto trabajable

Fuente: GCP Applied Technologies (2021)

En esta propiedad se involucran varios factores, tales como el transporte, la adición de materiales cementantes o puzolanas, el asentamiento de diseño, el tamaño, forma y la textura de los agregados, el aire incorporado, el contenido de agua y la cantidad de cemento, el ambiente de mezclado y colocación y el uso de aditivos. El correcto

establecimiento de los parámetros y las proporciones de los ingredientes de una mezcla cementante es determinante para obtener una trabajabilidad adecuada (Kosmatka, 2011).

En la actualidad, existen diferentes métodos de ensayo capaces de dar una perspectiva clara sobre la trabajabilidad que presenta una mezcla cementante, entre las que destacan: la prueba de asentamiento mediante el cono de Abrams, la prueba de factor de compactación, la prueba de la mesa de fluidez y la prueba con el medidor *Vebe*, también conocido como consistómetro (Surahyo, 2019).

### **2.7.2. Consistencia**

La consistencia de una mezcla cementante hace referencia a la capacidad de la misma para fluir manteniendo homogeneidad y cohesividad; es decir, evitando la segregación y el sangrado. Existen, en general, tres tipos de consistencia en función de la cantidad de agua presente en la mezcla. Una masa cementante con poca cantidad de agua se considera como una mezcla de consistencia seca, que se caracteriza por ser poco manejable y para la cual se requiere alta aplicación de energía para su colocación y consolidación; es decir, es una mezcla de trabajabilidad baja. En contraparte, el exceso de agua en una mezcla otorga la capacidad de fluir; sin embargo, el exceso de agua lleva a la presencia de fenómenos como la segregación. De lo anterior, una consistencia plástica y adecuada es aquella en la que la cantidad de agua en conjunto con el contenido de cementantes y agregados, así como aditivos, proveen de una masa homogénea, cohesiva y trabajable que no presenta segregación ni sangrado (Kosmatka, 2011).

### **2.7.3. Segregación**

La segregación es la separación de las partículas sólidas de mayor tamaño, principalmente los agregados finos y gruesos, de la pasta agua – cementantes debido al exceso de humedad o a la poca presencia de ésta, así como al exceso de compactación mediante vibrado, a periodos de transporte largos y a caídas de la mezcla desde alturas excesivas. Este fenómeno es detectable a simple vista, dado que presenta un acabado poroso y con forma de panal, que tiene repercusiones en propiedades tales como la resistencia mecánica y algunas otras correspondientes a la durabilidad. Algunas prácticas para la prevención de la segregación se basan en la colocación y consolidación adecuadas con tiempos de vibrado y alturas de caída conservadoras, así como en la

incorporación de aire y el empleo de agregados normados con distribución de tamaños de partícula, formas y texturas adecuadas (Figura 9)(Surahyo, 2019).

#### 2.7.4. Sangrado

El sangrado es la formación de una película delgada de agua en la superficie del concreto o mortero por la sedimentación de las partículas sólidas más pesadas; las cuales, por gravedad, tienden a acomodarse en el fondo del elemento estructural permitiendo la migración del agua a la superficie. Este fenómeno es considerado también como un tipo de segregación, el cual se da principalmente por la excesiva cantidad de agua o cemento de partículas gruesas en la mezcla. Otras causas que provocan el sangrado es la consolidación excesiva mediante vibrado, el uso de materiales no normados y el diseño y proporcionamiento deficiente de las mezclas. Alguno de los efectos negativos del sangrado en las propiedades en estado endurecido son principalmente el desarrollo de resistencia mecánica poco uniforme en los elementos estructurales, así como algunas características enfocadas en durabilidad como la menor resistencia a la abrasión en la superficie, lo que la vuelve menos duradera. Este fenómeno es comúnmente mitigado disminuyendo el contenido de agua y utilizando cementos finos con agregados finos y gruesos normados, así como con la incorporación de aire y la adición de puzolanas o polvos finos. Así mismo, el control de la consolidación y proceso de acabado influyen en la prevención del sangrado (Figura 9)(Bustillo, 2021).



Figura 9.- Segregación y sangrado de sistemas cementantes

Fuente: WachiraPoonsawat (2017)

## **2.8. Propiedades de los sistemas cementantes en estado endurecido**

Comenzada la interacción de los cementantes con el agua, comienzan las reacciones de hidratación que llevan a una matriz cementante de un estado fluido a uno plástico y posteriormente al endurecido. En esta etapa y a la par del endurecimiento, el concreto o mortero desarrolla algunas propiedades en las que la más importante es la resistencia a la compresión. No obstante, también desarrolla un cúmulo de propiedades comúnmente atribuibles a la densificación de la matriz, tales como la porosidad y la permeabilidad, la resistividad y la velocidad de pulso, las cuales aportan beneficios principalmente ante aspectos de la durabilidad.

### **2.8.1. Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión se define como la fuerza axial soportada por unidad de área de un elemento estructural de concreto. Generalmente evaluada y reportada a la edad de 28 días, por ser una edad estándar en el desarrollo de resistencia, en la cual el cemento alcanza el máximo potencial de hidratación; sin embargo, es común que la resistencia se reporte a otras edades, tales como los 7 días, edad en la cual la matriz cementante alcanza alrededor de un 75% de la resistencia a los 28 días, por lo cual se usa como una guía sobre la relación de endurecimiento con el tiempo del concreto. Algunas otras edades a las que se reporta la resistencia son a 56 y a 90 días, consideradas edades avanzadas en las que el desarrollo de resistencia es menor, siendo únicamente de alrededor del 10 y el 15% de la resistencia alcanzada a los 28 días, respectivamente (Kosmatka, 2011).

Esta propiedad es fundamental en el diseño de estructuras y, al igual que otras propiedades físicas o mecánicas, la resistencia a la compresión se encuentra condicionada por varios factores que repercuten en la resistencia final. El factor más destacable es la relación agua – cementantes ( $a/cm$ ). Una relación  $a/cm$  baja provee al concreto de mayor resistencia y viceversa. El grado de progreso de la hidratación, las condiciones ambientales y de curado (humedad y temperatura) y la propia edad del concreto, son algunos de los factores de mayor influencia en el desarrollo de resistencia a la compresión de las matrices cementantes (Bustillo, 2021).

### **2.8.2. Resistividad eléctrica**

La resistividad eléctrica también conocida como resistividad iónica es una propiedad del concreto relacionada con su capacidad para oponerse al paso de la corriente eléctrica; es decir, es lo opuesto a la conductividad eléctrica. La propiedad se encuentra basada en la Ley de Ohm, la cual es una ley básica para comprender los fundamentos principales de los circuitos eléctricos. Cuando un material es sometido a una diferencia de potencial, se establece una corriente que presenta libre flujo de cargas eléctricas, permitiendo que los electrones choquen entre sí y contra los átomos del conductor, provocando que el paso de la corriente eléctrica sea difícil. A lo anterior se le conoce como resistencia eléctrica. De lo anterior, se establece que la naturaleza microestructural influye en la resistencia eléctrica del mismo, por lo que, a mayor cantidad de electrones libres, más fácil es establecer una corriente eléctrica. En el caso del concreto o cualquier matriz cementante, la cantidad de electrones libres es mínima y variable. A esta característica particular se le conoce como resistividad eléctrica (Balestra, Reichert y Savaris, p. 52, citado por Delgado, 2021).

Esta propiedad es principalmente atribuible a la durabilidad de las matrices cementantes, puesto que se encuentra ligada con la porosidad y con la densificación microestructural del concreto o mortero. Así mismo, existen algunos parámetros físicos de los sistemas que afectan la resistividad eléctrica, entre los que se encuentran la relación  $a/cm$ , el grado de saturación y la presencia de contaminantes. La relación  $a/cm$  está relacionada con la porosidad. A mayor relación, mayor cantidad de poros habrá y, por ende, con mayor facilidad pasará la corriente eléctrica a través de la microestructura. Por su parte, el agua que satura el material funciona como transporte para que los iones fluyan a través de la matriz cementante, por lo que afecta directamente el valor de la resistividad; caso contrario ocurre con los contaminantes, los cuales pueden actuar como barreras para evitar el paso de la corriente, con lo que se obtiene mayor resistividad. Otros factores influyentes que se pueden mencionar son los agregados pétreos y sus características, el tipo y calidad del cemento, así como las adiciones minerales y químicas. Factores ligados principalmente al acomodo de las partículas y densificación microestructural, la cual es parte clave para incrementar o disminuir la resistividad

eléctrica de las matrices cementantes (Balestra et al., p. 56 – 59, citado por Delgado, 2021).

### **2.8.3. Velocidad de pulso ultrasónico**

La velocidad de pulso ultrasónico más allá de una propiedad es un fundamento aplicado a diversos materiales, entre ellos el concreto, para la evaluación de propiedades que van en función de la rigidez. En este caso, el pulso ultrasónico hace alusión a ondas de sonido que se envían mediante un transductor emisor a uno receptor, a través de las matrices cementantes. El tiempo que tardan en pasar las ondas en una distancia determinada a través del material se conoce como velocidad de pulso ultrasónico (Schmerr, 2016).

La rigidez y densificación de una matriz cementante se encuentra principalmente en función de las características físicas de los ingredientes utilizados. Los agregados finos y los gruesos, en primera instancia, si cuentan con características físicas normadas, pueden presentar acomodos idóneos que provean a la matriz de menos vacíos, lo cual permitirá el retraso de las ondas de sonido. En el caso de la pasta, relaciones  $a/cm$  bajas propiciarán la menor cantidad de poros y, por ende, tendrán el mismo efecto que en el caso de los agregados. Entre otros factores, el proceso de mezclado, la colocación y consolidación de la mezcla, así como las adiciones minerales y/o químicas, influyen en la densificación de las matrices, sea por la eliminación de los poros o por la formación de productos de reacción, lo cual influye en no permitir el paso de agentes nocivos ni la acumulación de éstos dentro de los sistemas cementantes, lo que puede brindar una mayor durabilidad y desarrollo de propiedades a lo largo del tiempo.

### **2.8.4. Porosidad**

La porosidad de una matriz cementante es el conjunto de huecos capilares y de gel ocupados principalmente por aire y, en algunos casos, por agua. Es decir, es la suma del volumen de vacíos dejados por el acomodo de las partículas sólidas de la pasta y de los agregados. En ocasiones, la porosidad de las matrices cementantes es inducida mediante la incorporación de aire a la mezcla mediante aditivos en función del uso y de las condiciones de exposición del elemento estructural. Un elemento expuesto a congelamiento-deshielo requiere mayor presencia de poros para evitar el deterioro. A su

vez, la porosidad presenta una alta relación con algunas otras propiedades tales como la resistencia a la compresión y la permeabilidad, debido al debilitamiento microestructural que sufre una matriz cementante por la excesiva cantidad de poros, lo cual se traduce en baja resistencia y mayor ingreso de agentes nocivos que deterioran las matrices cementantes.

Esta propiedad está ligada principalmente a la relación a/cm de la matriz y al grado de hidratación que alcanzan el cemento y los cementantes. La porosidad de los agregados, el tamaño, la forma y la textura, así como el tamaño de las partículas de los cementantes son algunos de los factores que influyen también en la porosidad del concreto. Lo anterior sin dejar de lado los procesos de colocación y consolidación, dado que una compactación adecuada elimina gran parte de los poros presentes en la matriz (Surahyo, 2019).

#### **2.8.5. Permeabilidad**

La permeabilidad en el concreto hace referencia a la facilidad de paso del agua o cualquier otro agente como el oxígeno, el dióxido de carbono, los sulfatos y los cloruros, entre otros, a través de los poros interconectados dentro de la matriz, en un tiempo determinado. La existencia de la permeabilidad en una matriz cementante radica en la conexión de la red de poros. Un concreto con alta presencia de poros no siempre es permeable. Para que esto ocurra, los poros deben unirse formando cadenas que permitan el paso de sustancias a través de ellos. El ingreso de sustancia en matrices cementantes comúnmente ocasiona diversas reacciones químicas que afectan directamente aspectos de la durabilidad, tales como agrietamientos, expansiones y corrosión, entre otros (Surahyo, 2019).

De lo anterior, se infiere que los factores que influyen en la porosidad de las matrices cementantes replican su influencia en la permeabilidad; sin embargo, esta propiedad se presenta también en función de la permeabilidad de la pasta, la permeabilidad de los agregados, la calidad de la zona de transición pasta – agregados y la proporción relativa de la pasta y los agregados; siendo de mayor relevancia la permeabilidad de los ingredientes (Kosmatka, 2011).

Cabe destacar que existe una diferencia notable entre la porosidad y la permeabilidad de un material como el concreto. En la Figura 10 se representan ambas propiedades. En ella se pueden apreciar las zonas color gris como las partículas de agregados y cementantes de una matriz cementante y los intersticios blancos como vacíos dentro de la matriz. La Figura 10a representa una zona porosa de baja permeabilidad, principalmente por la falta de conectividad de los poros, lo cual imposibilita el paso de agentes nocivos. En el caso de la Figura 10c, los poros se conectan formando una red de poros continua que facilita el ingreso y el transporte de los agentes nocivos.

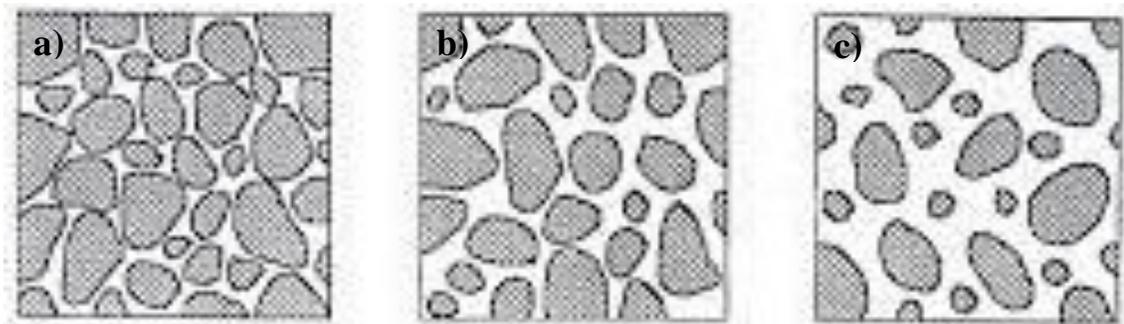


Figura 10.- Representación de la porosidad y permeabilidad del concreto  
Fuente: Portugal, P. (2007)

## 2.9. Durabilidad de los sistemas cementantes

La Asociación del Cemento Portland (PCA por sus siglas en inglés), define la durabilidad como la capacidad del concreto para resistir la acción de la intemperie, los ataques químicos y la abrasión, manteniendo sus propiedades físico – mecánicas y de servicio inalteradas.

Garantizar una buena durabilidad en el concreto o en cualquier matriz cementante es esencial para prevenir riesgos o fallas en cualquier elemento estructural. Un alto grado de durabilidad se puede garantizar, en primera instancia, haciendo uso de materiales adecuados y normados, utilizando el menor contenido de agua y relaciones  $a/cm$  bajas. Factores externos como el mezclado, el transporte, la colocación, la consolidación y el curado juegan también un papel importante en la obtención de un concreto durable (Surahyo, 2019).

El término durabilidad abarca un cúmulo de factores o ataques externos provenientes de los ambientes en los que se sitúa la estructura. Algunos de los más comunes son la

carbonatación, el ataque por sulfatos, el ingreso de iones cloruros, el congelamiento – deshielo, las reacciones álcali – agregado, la abrasión y cualquier fuente que detone el fenómeno de la corrosión. Muchos de estos ataques pueden prevenirse o controlarse mediante diferentes métodos que involucran la adición de puzolanas, de aditivos químicos, de inclusiones de aire y de recubrimientos especiales, entre otros (Hasan, 2020).

### 2.9.1. Carbonatación

Se conoce como carbonatación a un conjunto de reacciones producidas por el ingreso de  $\text{CO}_2$  en las matrices cementantes, las cuales provocan la desalcalinización del concreto (pérdida de pH), provocando la pérdida de la capa pasiva que protege al acero de refuerzo de fenómenos como la corrosión como se muestra en la

Figura 11 (Kosmatka, 2011).

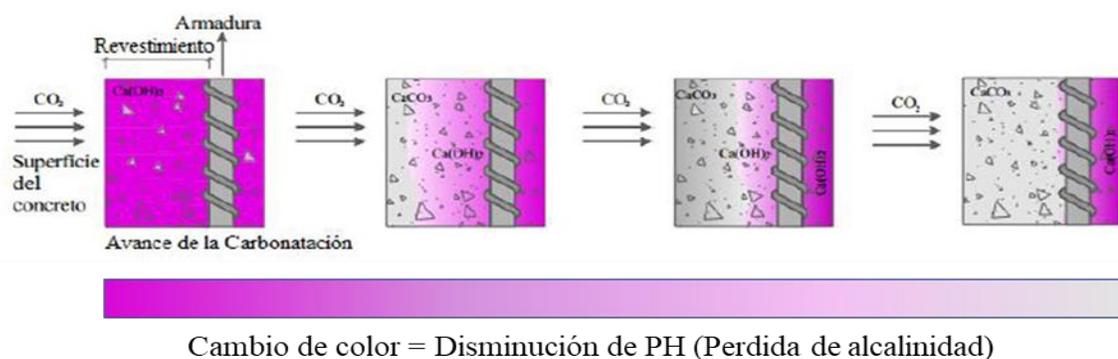


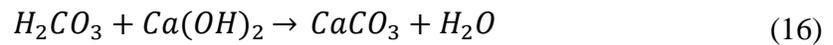
Figura 11.- Representación esquemática del avance de carbonatación

Fuente: Felix, E. F., et al., (2018)

El  $\text{CO}_2$  presente en la atmósfera, en concentraciones que van del 0.036 al 0.07% en ambientes urbanos e industriales (Bucher et al., 2017), ingresa en los elementos estructurales de concreto a través de la red de poros y reacciona con el agua presente en la matriz, formando ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ )(15). El ácido carbónico reacciona con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) formado a partir de las reacciones de hidratación del cemento portland, con lo que se produce carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ )(16). Este carbonato presenta un pH menor que el del  $\text{Ca(OH)}_2$ , por lo que se pierde alcalinidad en

la matriz cementante y la capa pasiva que el concreto provee al acero como protección se pierde, conllevando al deterioro por corrosión (Cole et al., 2019).

### **Mecanismos de reacción de la carbonatación**



Cabe mencionar que la presencia de la carbonatación está condicionada por ciertos factores que pueden provocar el incremento del avance de la carbonatación o la disminución del mismo. Por un lado, la humedad de la matriz cementante y del ambiente pueden conllevar a mayor o menor avance de carbonatación. Una matriz cementante con poca o nula humedad no permite la formación del  $H_2CO_3$ , por lo que tampoco se presenta la desalcalinización del concreto. En contraparte, el exceso de humedad llegado a un punto de saturación de los poros obstaculiza el espacio para permitir el ingreso del  $CO_2$  por lo que no se llevan a cabo los mecanismos de reacción. Por otro lado, la temperatura ambiente puede provocar el incremento o decremento de la humedad de la matriz, guiando a la nula presencia de reacciones que provocan la carbonatación y, por ende, no se presentan efectos sobre las propiedades y la durabilidad del concreto (Surahyo, 2019).

Otros factores para tomar en cuenta son la composición del concreto, la permeabilidad y la duración de la exposición. El tipo de cemento y la adición de puzolanas forman parte de la composición del sistema cementante final. Estos materiales pueden provocar el incremento de la carbonatación en función de las reacciones químicas que se presenten con el  $Ca(OH)_2$  y, así mismo, éstos pueden influir en la porosidad y la permeabilidad de los elementos estructurales, así como también influyen en estas propiedades las prácticas de mezclado, transporte, colocación, consolidación y curado (Kosmatka, 2011).

Por otro lado, si bien, la formación de  $CaCO_3$  provoca el llenado de los poros, la densificación microestructural y el incremento de resistencia, la desalcalinización de las matrices cementantes permite la corrosión del acero de refuerzo, fenómeno que, a su vez, provoca el agrietamiento y el desconchamiento de los elementos estructurales, siendo éstos los principales efectos producto de la carbonatación. Algunos otros efectos

son las contracciones internas. La formación excesiva de nuevos compuestos en la red de poros provoca la existencia de presiones internas que, en algunos casos, llegan a provocar agrietamientos. Sin embargo, estos efectos son poco comunes en el proceso de carbonatación debido al avance lento en condiciones naturales, pues se estima que un elemento estructural llega a carbonatarse 1 mm por año, en promedio, en función de los factores ya mencionados.

Algunas prácticas para prevenir el avance de la carbonatación se relacionan con el incremento de la impermeabilidad. La disminución de la relación  $a/cm$ , la consolidación adecuada y el procedimiento de curado correcto son los factores principales para producir un concreto impermeable. Sin embargo, al igual que con otros agentes agresivos, el uso de protección extra, tales como la aplicación de impermeabilizantes o sistemas de recubrimiento que anulen el ingreso del  $CO_2$  también son útiles para disminuir la carbonatación e incrementar la vida útil de las estructuras (Surahyo, 2019).

### **2.9.2. Ataque de sulfatos**

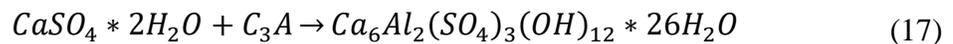
Los sulfatos son compuestos químicos encontrados principalmente en las aguas subterráneas, por la disolución de los minerales presentes en el suelo. El agua de mar por lo general también presenta sulfatos en su composición; sin embargo, éstos se encuentran en concentraciones bajas, dada la predominancia de los cloruros. Los principales sulfatos característicos por provocar daños en las matrices cementantes son el sulfato de calcio, el de sodio, el de magnesio y, en ocasiones, el sulfato de amonio. Este último presente principalmente en suelos donde se practica la agricultura, por la acción de los fertilizantes (Hasan, 2020).

El sulfato de calcio ( $CaSO_4$ ) es un compuesto cristalino de baja solubilidad. La disolución de los sulfatos es primordial para la reactividad dentro de las matrices cementantes. Un compuesto cristalino o poco soluble no presenta reactividad, por lo que el  $CaSO_4$  no representa mayores riesgos dentro de las matrices cementantes. El sulfato de sodio ( $Na_2SO_4$ ) es de los mencionados el que presenta un riesgo potencial por la formación de compuestos expansivos dentro de la matriz cementante; sin embargo, el sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ) es el más agresivo, debido a que forma compuestos con alta capacidad expansiva, aunado a la descomposición de compuestos como el CSH y la

formación de nuevos productos con baja cohesividad, que permiten el decremento de la resistencia mecánica. En el caso del sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) su presencia se limita a zonas donde se practica la agricultura, por lo que el daño a estructuras de concreto se limita. Es por lo anterior que se puede considerar únicamente al Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y al MgSO<sub>4</sub> como los que mayores efectos presentan sobre las matrices cementantes (Bustillo, 2021).

No importando el tipo de sulfato, éstos deterioran los sistemas cementantes con base en los siguientes mecanismos de reacción. El concreto o mortero presenta yeso y celita en su composición como parte de los compuestos del cemento portland. Estos compuestos inicialmente reaccionan produciendo cantidades menores de etringita (17); sin embargo, la presencia de sulfatos extra incrementa la formación de estos compuestos. Los SO<sub>4</sub> entran en contacto con el Ca(OH)<sub>2</sub> y el C<sub>3</sub>A mediante el agua, reaccionando químicamente para formar yeso y etringita (18), productos que con el tiempo se expanden, provocando fisuras y desintegración en las matrices cementantes (Zhou et al., 2016).

#### **Mecanismos de reacción del ataque por sulfatos**

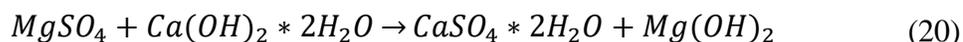


De manera específica, el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> reacciona con el Ca(OH)<sub>2</sub> formado yeso y liberando iones de sodio (Na<sup>+</sup>) e hidróxido (OH<sup>-</sup>), los cuales forman hidróxido de sodio (NaOH), compuesto que en ocasiones funciona como activador de materiales ricos en sílice y alúmina (19). Por su parte, el MgSO<sub>4</sub> presenta un comportamiento de mayor agresividad sobre los sistemas cementantes. Su presencia provoca la descomposición del gel CSH y reacciona con los aluminatos y el Ca(OH)<sub>2</sub>, formando yeso, brucita (Mg(OH)<sub>2</sub>) y gel de silicato de magnesio (MSH), un compuesto poco cohesivo y de baja capacidad aglutinante que provoca la pérdida de adhesión con los agregados y, a su vez, pérdida de resistencia mecánica (20).

#### **Mecanismo de reacción del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**



### **Mecanismo de reacción del $MgSO_4$**



Estos mecanismos de reacción provocan efectos en las matrices cementantes que se resumen en presiones internas por parte de la expansión molecular de compuestos como la etringita, las cuales, a la postre, provocan agrietamientos internos y desconchamiento que permiten el ingreso de otros agentes nocivos a las estructuras, esto sin dejar de mencionar la pérdida de resistencia a la compresión por la acción de la descomposición del gel CSH (Surahyo, 2019).

Por lo anterior, se considera complicado solucionar un problema de ataque por sulfatos en elementos estructurales ya existentes; no obstante, es viable su prevención en función de las concentraciones de los sulfatos del sitio en el que se encontrará el elemento estructural. Algunas formas de prevención son el uso de cementos con bajo contenido de C3A para evitar las reacciones antes mencionadas, entre los que destacan el cemento tipo II y V de la clasificación ASTM. Además, se ha estimado que el empleo de puzolanas o cemento con adiciones puzolánicas tales como el CPP o el CPS de la clasificación NMX son útiles ante ambientes ricos en sulfatos. Algunas otras prácticas para la prevención de este ataque se enfocan en la impermeabilización del elemento, la cual se puede lograr con bajas relaciones  $a/cm$  o con el uso de recubrimientos que imposibiliten el paso de los agentes nocivos a la estructura interna de la matriz cementante (Kosmatka, 2011).

### **2.9.3. Corrosión**

La corrosión se puede definir como la degradación química y física de un material, principalmente metálico, debido a reacciones químicas inducidas por el entorno y los materiales agresivos a los que se expone el elemento. Es el proceso por el cual los átomos metálicos se desprenden del metal para formar compuestos en presencia de agua y gases, comúnmente oxígeno. En otras palabras, es la tendencia natural de la mayoría de los metales a regresar a su estado natural o termodinámicamente estable, es decir, es el proceso de metalurgia a la inversa (Pedferri, 2018).

Existen dos formas comunes en las que se presenta la corrosión: la corrosión uniforme o generalizada que se presenta en toda la superficie del elemento y la corrosión localizada que se presenta sólo en algunas porciones del área expuesta. Ambas formas acordes con dos diferentes tipos de corrosión: la corrosión por alta temperatura y la corrosión acuosa. La primera se da en metales expuestos a gases calientes o en el proceso de moldeo de metales y la segunda en metales expuestos al agua, el suelo o al concreto contaminado con cloruros o carbonatado. Dentro de ambos tipos se implican dos mecanismos de corrosión: el proceso electroquímico y las reacciones químicas, éstas últimas acordes con las leyes cinéticas y las termodinámicas (Vachtsevanos et al., 2020).

En el acero de refuerzo embebido en el concreto, el mecanismo que se sigue es el proceso electroquímico. El concreto es un material altamente alcalino que provoca la formación de una película de óxido pasiva y no corrosiva alrededor del acero para protegerlo de la corrosión. No obstante, el ingreso de agentes corrosivos como cloruros provenientes del agua de mar, descongelantes o aditivos, o el proceso de carbonatación, pueden destruir la capa mediante disolución o disminución del pH, respectivamente, y permitir el fenómeno de la corrosión (Kosmatka, 2011).

Para que se produzca el proceso electroquímico se debe formar una celda eléctrica o de corrosión con todos sus elementos presentes: un ánodo, un cátodo, un electrolito y una conexión eléctrica, en la cual se produzcan las reacciones de corrosión mediante dos procesos: el proceso anódico o liberación de electrones por oxidación del metal y el proceso catódico, el cual se resume como el consumo de electrones o reacción de reducción de oxígeno o iones de hidrogeno.

En el concreto reforzado, la matriz cementante juega el papel de electrolito y el acero de refuerzo son el ánodo y el cátodo. Algunas áreas del acero funcionan como el ánodo, descargando corriente en la celda eléctrica, punto en el que el hierro comienza a disolverse, y las áreas de acero que reciben corriente son los cátodos donde se forman los iones de hidróxido. El hierro y el hidróxido forman hidróxido de hierro, el cual se oxida aún más para formar óxido u otros óxidos de hierro (Figura 12) (Pedefferri, 2018).

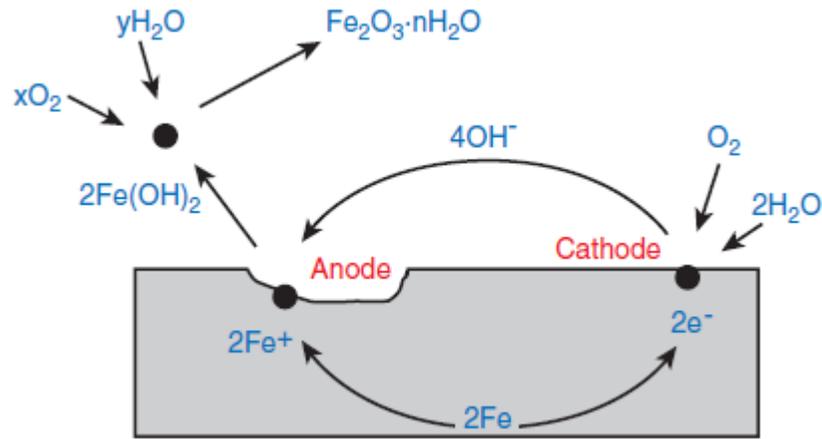


Figura 12.- Proceso electroquímico en el concreto reforzado

Fuente: Kosmatka, S. H., y Wilson, M. L. (2011)

La formación de los compuestos mencionados incrementa el volumen del producto final hasta seis veces más del hierro original, lo que provoca tensiones internas que con el paso del tiempo llevan al agrietamiento y el desconchamiento del concreto, así como a la reducción del acero. Lo anterior en función de la tasa de corrosión. A mayor corrosión, mayor es el daño en las estructuras de concreto reforzado.

Esta tasa de corrosión se ve comúnmente influenciada por algunos factores tales como la humedad, el oxígeno, el pH, la temperatura y los agentes nocivos, los cuales son los detonadores del proceso de corrosión. Aunado a lo anterior, aspectos como la resistividad eléctrica, la permeabilidad y/o la difusividad de la matriz cementante pueden incrementar o ralentizar el paso de agentes nocivos y el transporte de electrones dentro del sistema, lo cual representa un incremento o una disminución de la velocidad de corrosión del acero de refuerzo.

Por lo anterior, algunos métodos de control y prevención del fenómeno de corrosión implican el uso de proporciones y materiales adecuados sin contenido de cloruros, reducción de la permeabilidad, relaciones a/cm debajo de 0.40, curado controlado y prolongado, uso de MCS, cementos con alto contenido de  $\text{C}_3\text{A}$ , recubrimientos de concreto altos sin ser excesivos, uso de aceros con recubrimiento epóxico, aceros resistentes a la corrosión, aditivos inhibidores de corrosión y tratamientos superficiales, por mencionar algunos (Kosmatka, 2011).

Por lo anterior, conocer la actividad corrosiva en el acero embebido en matrices cementantes resulta vital para evaluar la magnitud del daño provocado por dicho proceso. Es por esto por lo que se han establecido técnicas no destructivas que permiten la medición y el estudio de las condiciones del acero de refuerzo mediante estímulos eléctricos. Estos métodos se denominan técnicas electroquímicas. Entre las más conocidas se encuentran las técnicas de potenciales de corrosión o método de media celda y la resistencia a la polarización lineal.

### **2.9.3.1 Potenciales de corrosión**

Ésta es una técnica basada en el control del potencial o del voltaje de un contraelectrodo contra un electrodo de trabajo, para obtener una medición precisa del diferencial del potencial entre cada electrodo, mediante la aplicación de un flujo de corriente controlada emitida por un potenciostato a través de éstos, los cuales se encuentran expuestos en un mismo electrolito; es decir, formando una celda de corrosión. Esta técnica funciona principalmente para el monitoreo del potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) y, en conjunto con otras técnicas, sirve para estimar la velocidad de corriente de corrosión ( $I_{\text{corr}}$ ). Mediante esta técnica se obtienen datos sobre las corrientes catódicas y anódicas, las cuales, presentadas gráficamente, proporcionan un panorama general sobre los procesos electroquímicos que ocurren dentro de la celda y, específicamente, dentro del electrodo de trabajo o material de interés (Vachtsevanos et al., 2020).

### **2.9.3.2 Resistencia a la polarización lineal**

Como se mencionó, la aplicación de potenciales de corrosión, en conjunto con otras técnicas electroquímicas, proporciona información sobre la velocidad de corriente de corrosión. Una de las técnicas más populares para estimar estos valores es la resistencia a la polarización lineal (RPL).

Su empleo se lleva a cabo utilizando una celda de corrosión formada por tres electrodos: uno de trabajo, uno de referencia y un contraelectrodo. Los electrodos de trabajo y referencia siempre embebidos en un electrolito; en este caso, las matrices cementantes.

Esta técnica puede aplicarse de dos maneras, como prueba galvanostática o como potencioestática. En el primer caso, el metal en estudio es polarizado mediante la aplicación de corriente eléctrica para monitorear el efecto en el potencial de corrosión. En el caso de la prueba potencioestática, se debe aplicar un potencial y lo que se monitorea es el cambio en la corriente eléctrica. No obstante, en ambos casos y de manera gráfica, se forma una pendiente entre ambas variables, lo cual se conoce como resistencia a la polarización ( $R_p$ ), con la cual es posible calcular el valor  $I_{corr}$  mediante las ecuaciones de Stern y Geary, propuestas en 1957 (21 y (22)). Estas ecuaciones relacionan una constante de proporcionalidad ( $B$ ) con el valor  $R_p$ , donde  $B$  queda definida por las pendientes de Tafel anódica ( $b_a$ ) y catódica ( $b_c$ ), comúnmente siendo  $B$  igual a 26 mV o 52 mV en función de su condición de corrosión activa o pasiva, respectivamente (Vachtsevanos et al., 2020).

#### **Ecuaciones de Stern y Geary**

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (21)$$

$$B = \frac{(b_a \cdot b_c)}{2.303(b_a + b_c)} \quad (22)$$

### **2.10. Efectos de las puzolanas en los sistemas cementantes**

A partir del contacto de los cementantes con el agua se producen dos estados fundamentales en los sistemas cementantes: el estado fresco y el endurecido. En ambos el desarrollo de propiedades cambia con el tiempo, en función de diversos factores, tales como los proporcionamientos, los parámetros de diseño, las adiciones químicas y las adiciones minerales, siendo estas últimas las que repercuten en cada una de las propiedades de las matrices cementantes, dadas sus características físico – químicas.

#### **2.10.1. Propiedades en estado fresco**

Una matriz cementante en estado fresco se define como una suspensión concentrada de partículas de materiales con diferentes densidades, tamaños y composición química, en una masa de cal y otros compuestos. Las propiedades que se incluyen en el estado fresco son en su mayoría enfocadas en la fluidez y la trabajabilidad, así como en su estabilidad física, es decir, su cohesión y su homogeneidad.

### **2.10.1.1 Efecto del metacaolín**

En estado fresco, los sistemas cementantes con contenidos de metacaolín presentan variabilidad en cuanto a su trabajabilidad principalmente; sin embargo, en términos generales esta tiende a disminuir, al igual que con el uso de otras puzolanas, presentando una consistencia un tanto cremosa y pegajosa, así como mayor viscosidad. No obstante, en comparación con materiales como el humo de sílice, el metacaolín presenta mejores prestaciones y resulta ser menos problemático en estos aspectos.

La morfología de las partículas de metacaolín juegan un rol importante en términos de trabajabilidad. Éstas tienden a ser laminares o en forma de placas, sin embargo, el proceso de calcinación puede provocar la formación de partículas esféricas, las cuales brindan un incremento en la fluidez y en la trabajabilidad de las matrices cementantes (Siddique, 2011; De Belie, 2018).

El uso de metacaolín también provoca la reducción del sangrado y la segregación. Si bien, la morfología de sus partículas provoca fricción dentro de las matrices que conllevan a la disminución de la fluidez y el requerimiento de mayor cantidad de agua, características tales como su área específica y los tamaños de partícula que alcanza provoca la disminución de fenómenos como el sangrado, lo cual lo hace un material útil en sistemas tales como el concreto autocompactable (Madandoust y Mousavi, 2012; Khaleel y Razak, 2014).

Por otro lado, en términos de fraguado, los efectos son variables. Los tiempos de fraguado de mezclas con contenido de metacaolín dependen de si los diseños están enfocados en una consistencia estándar o en una relación a/cm en común. En el primer caso, el metacaolín no provoca un efecto considerable en el tiempo de fraguado; es decir, mantiene el comportamiento de una matriz de cemento portland; no obstante, el enfoque en una relación a/cm provoca la mayor demanda de agua por parte del metacaolín, lo cual, aunado con la amorficidad del material y su alta reactividad temprana, provoca la liberación de calor de manera rápida, conllevando a un menor tiempo de fraguado (Kosmatka, 2011).

### 2.10.1.2 Efecto de la ceniza volante

En cuanto a trabajabilidad, la forma esférica y la superficie vítrea de la mayoría de las partículas de ceniza volante permiten el incremento de la fluidez para una misma relación  $w/c$ , en comparación con una mezcla sin adición; es decir, el uso de CV permite la reducción de agua de las mezclas, manteniendo la fluidez y la trabajabilidad apropiadas. Algunos autores han concluido que el uso de ceniza volante disminuye el requerimiento de agua para una consistencia dada, siempre que se presente un apropiado proporcionamiento y una adecuada sustitución de CP por CV, manteniendo la cohesión y la plasticidad adecuadas con menor cantidad de agua (Jalal et al., 2015; Parada et al., 2017). La reducción de agua, además de deberse a la morfología y a las características físicas de las partículas, se debe también a la baja reactividad química a edades tempranas, puesto que no consume agua rápidamente, como sí lo hace el cemento portland y algunas otras puzolanas de reactividad temprana (De Belie, 2018).

Por otro lado, el uso de cenizas volantes disminuye la segregación y el sangrado de las matrices en estado fresco, dado el efecto lubricante que otorgan a partir de su forma esférica y su superficie vítrea. Además, su lenta reactividad propicia una mayor proporción de sólidos con respecto a los líquidos, lo que provoca una mayor cohesión y homogeneidad, que evitan que se presenten estos fenómenos (Siddique, 2011; De Belie, 2018).

Aunado a lo anterior, parte importante del contenido de aire en una mezcla cementante es mantener la homogeneidad y la cohesión de las mezclas, evitando la segregación y el sangrado. Si bien, la ceniza volante es beneficiosa en esos aspectos, debido al efecto *filler* que presenta en las matrices dado el tamaño de partícula y su baja reactividad, provoca que las concentraciones de aire atrapado en los poros disminuyan, provocando el requerimiento de incorporadores de aire en mayor cantidad, en función del contenido de CV en la matriz. Así mismo, la demanda de incorporadores de aire se ha atribuido a la presencia de partículas de carbón en la CV. Este material actúa como absorbente, disminuyendo el porcentaje del inductor de aire que actúa para producir las burbujas de aire necesarias (Ramezaniapour, 2014).

En cuanto a generación de calor, las reacciones de hidratación de la pasta de cemento son consideradas reacciones exotérmicas por la liberación de calor y el incremento de temperatura en las matrices cementantes. El uso de ceniza volante puede disminuir o incrementar la liberación de calor en función de la clase de ceniza. La ceniza volante clase F es una puzolana de reactividad lenta, debido al bajo contenido de calcio. Al no presentar reactividad en las primeras edades, conduce a un decremento en la liberación de calor por la falta de reacciones puzolánicas, por lo que el incremento en la temperatura es lento y progresivo, lo que la hace funcional en volúmenes masivos de concreto, en los cuales el control de la temperatura para evitar cambios volumétricos y agrietamientos es indispensable. Caso contrario ocurre con la ceniza volante clase C, la cual presenta como característica principal un alto contenido de calcio, en comparación con la clase F; este contenido de calcio provoca que las reacciones se den de manera rápida propiciando el incremento de liberación de calor, lo cual es benéfico en el desarrollo de propiedades en estado endurecido, sin embargo, no cumple las funciones de control de temperatura como sí lo hace la ceniza clase F (Jung et al., 2017; Palla et al., 2017).

Partiendo de lo anterior, el tiempo de fraguado de una matriz cementante está influenciado por las reacciones de hidratación y la liberación de calor; mayor liberación de calor representa menor tiempo de fraguado. El uso de cenizas volantes con bajo contenido de calcio disminuyen las reacciones tempranas, por lo que presenta un efecto retardador de fraguado. En el caso de las cenizas con alto contenido de calcio y bajo contenido de carbón, presentan mayor reactividad que brindan el efecto contrario, siendo en algunos casos tiempos de fraguado menores que los de una matriz con únicamente cemento portland; sin embargo, no todas las cenizas clase C provocan fraguados rápidos (Siddique, 2011).

### **2.10.1.3 Efecto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar**

La ceniza de bagazo de caña de azúcar comúnmente presenta partículas de forma irregular, en algunos casos partículas semiesféricas con una gran cantidad de poros que le brindan esa irregularidad. Lo anterior da como resultado la disminución de la trabajabilidad por la alta absorción de agua que presentan. Aunado a esto, si bien, la

morfología de sus partículas es variable en función del tratamiento que se le dé para su funcionamiento como material puzolánico, en la mayoría de las ocasiones el efecto es similar: aumento en la viscosidad y disminución en la fluidez en diferentes proporciones (Abbas et al., 2019; García et al., 2018).

Lo anterior siendo considerados efectos un tanto negativos; no obstante, fenómenos como la segregación y el sangrado se ven disminuidos dado que sus partículas generan mayor adherencia entre los componentes de las matrices cementantes que permiten mantener una masa homogénea libre de estos fenómenos, por lo cual su empleo se ve justificado (De Belie, 2018).

Por otro lado, en cuanto a generación de calor y tiempos de fraguado, la ceniza de bagazo presenta un comportamiento similar a lo reportado por la ceniza volante. La alta cristalinidad de la CB provoca su efecto *filler* dentro de las matrices cementantes a edades tempranas. La poca generación y liberación de calor, dada la poca reactividad temprana provocan el incremento en el tiempo de fraguado. Lo anterior en función del tipo de ceniza y el tratamiento otorgado, esto debido a que existen cenizas con procesos de calcinación para brindar mayor amorficidad y, por ende, mayor reactividad, lo cual las lleva a presentar tiempos de fraguado similares a las matrices con únicamente cemento portland (Bahurudeen et al., 2015; Cordeiro et al., 2017).

### **2.10.2. Propiedades en estado endurecido**

Debido a la interacción entre los cementantes y el agua, se producen reacciones químicas que liberan calor permitiendo que la matriz cementante en estado fresco comience a endurecer, pasando de estado plástico a rígido. En este estado las matrices cementantes obtienen propiedades enfocadas en la resistencia y en la densificación microestructural.

#### **2.10.2.1 Efecto del metacaolín**

La resistencia a compresión es la propiedad elemental de un elemento estructural de concreto. El uso de puzolanas en ocasiones provoca beneficios en términos de resistencia a compresión. El metacaolín es un material puzolánico que reacciona con la portlandita presente en las matrices cementantes para formar CSH complementario al

producido por el cemento portland. La formación de este compuesto se aloja en la unión entre la pasta cementante y los agregados, región conocida como zona de transición interfacial (ITZ), lo que provoca el refinamiento de la matriz cementante y resulta en obtención de mayor resistencia (Ramezaniapour, 2014).

Esta puzolana basa su efecto sobre la resistencia a compresión en tres factores principales. Primeramente, al ser integrado en una mezcla de cementantes, el tamaño de sus partículas provoca inmediatamente el efecto *filler*; sin embargo, es sólo por un corto periodo de tiempo. Posteriormente, provoca la aceleración de la hidratación, al interactuar con los compuestos del cemento portland, lo que conlleva a acelerar los tiempos de fraguado y obtener un endurecimiento rápido. Finalmente, mediante las reacciones puzolánicas provoca el desarrollo de resistencia mecánica durante los primeros 7 días y hasta los 14, tiempo en el cual es consumido para formar CSH por lo que depende principalmente de la cantidad presente en el sistema cementante (Ramezaniapour, 2014).

Algunos factores que afectan el incremento de resistencia por parte del metacaolín en los sistemas cementantes son la calidad y composición del cemento portland, así como la del propio metacaolín, su tamaño de partícula y área específica, la fineza, temperatura y tiempo de activación y la cantidad de metacaolín de reemplazo, dado que es una puzolana que en niveles altos de reemplazo disminuye la resistencia al no existir gran cantidad de portlandita para formar CSH (Kosmatka, 2011).

Por otro lado, algunas otras resistencias, tales como la tensión y la flexión, no se ven afectadas por el empleo de metacaolín en el sistema cementante. Algunos autores han reportado que estas resistencias se comportan de manera similar a una matriz de solo cemento portland. Se ha comprobado que ambas resistencias se encuentran ligadas con la resistencia a la compresión, incluso se pueden estimar a partir de ésta. El uso de metacaolín no difiere con estas estimaciones, por lo que a partir de la resistencia a compresión de una matriz con adición de metacaolín, es posible estimar la resistencia a tensión y a flexión; es decir, las mejoras que el metacaolín produce en la resistencia a compresión, también se ven reflejadas en el resto de las resistencias (De Belie, 2018).

De igual forma, el aumento de resistencia y la densificación incrementan el módulo de elasticidad (ME), dado que se produce un concreto más rígido. Generalmente existe una tasa de incremento de esta propiedad con el incremento del metacaolín relacionada principalmente con la relación a/cm. A menor relación a/cm, mayor es el módulo de elasticidad. Sin embargo, se ha considerado que no es una tasa de aumento considerable, incluso es menor que la tasa de incremento de resistencia a compresión.

Por otra parte, la densificación de la microestructura, la porosidad y la permeabilidad son propiedades en estado endurecido, conocidas como propiedades de transporte, que dependen de las características físico – químicas del material puzolánico, tales como el tamaño de partícula, la composición química, la mineralogía y la pérdida por ignición, por mencionar algunas. En el caso del metacaolín, debido a su finura y a su alta reactividad puzolánica, presenta un gran potencial para incrementar la densificación de la microestructura y disminuir la porosidad y la permeabilidad. Esto se ha comprobado al observar microestructuras de pastas con metacaolín más uniformes y compactas que las de una pasta con sólo cemento portland. Lo anterior dado por los efectos físicos y químicos de este material. El efecto físico se da a partir del acomodo de las partículas más finas en los huecos presentes en las matrices y el efecto químico se logra con la reacción del metacaolín con la portlandita y la formación de CSH. Lo anterior siendo de mayor o menor beneficio, en función de la cantidad de metacaolín presente en cada matriz (Mo et al., 2018; Zhao y Khoshnazar, 2020)

#### **2.10.2.2 Efecto de la ceniza volante**

A diferencia del metacaolín, en cuanto a desarrollo de resistencia, la ceniza volante presenta efectos distintos considerados como afectaciones a la resistencia a la compresión a edades tempranas. Algunos factores que conllevan a este efecto es la reacción lenta, la cual provoca una menor liberación de calor y, por ende, menor desarrollo de resistencia, sumando a esto que las reacciones consumen la cal existente en la matriz, en lugar de producirla. Específicamente, lo anterior se encuentra en función del tipo de ceniza. La ceniza volante clase F presenta un bajo contenido de calcio que le otorga la reactividad lenta mencionada y el desarrollo de resistencia a edades arriba de 90 días; sin embargo, la ceniza volante clase C presenta contenidos de calcio

considerables que la hacen acreedora de reactividad un tanto temprana, lo que provoca el desarrollo de resistencia a la compresión en menor tiempo, en comparación con la clase F (Kosmatka, 2011; Ramezianpour, 2014).

Algunos otros factores se enfocan en las características físico – químicas de las cenizas tales como la fineza, la composición química y mineralógica, entre otras; el tipo de cemento, los niveles de remplazo, las proporciones de las mezclas, la temperatura ambiente y el proceso de curado son factores de los que depende el desarrollo de resistencia de matrices que contienen ceniza volante.

En el caso de la resistencia a la tensión y a la flexión, el uso de ceniza volante ha presentado beneficios considerables, encontrándose que siendo usada esta puzolana como cementante o agregado, provoca el incremento de estas resistencias, incluso a partir de 28 días, continuando los incrementos con respecto a una matriz de solo cemento portland con el paso del tiempo. Además, para estas propiedades se ha encontrado que el reemplazo de CP por ceniza puede alcanzar niveles de hasta 50%, sin verse perjudicados como pasa con la resistencia a compresión en algunos casos (Siddique, 2011; De Belie, 2018).

En contraparte al desarrollo de resistencia a tensión y flexión, se ha encontrado que la ceniza volante afecta el módulo de elasticidad de las matrices de forma similar a lo que hace en la resistencia a la compresión. El módulo de elasticidad de matrices con ceniza volante se desarrolla de manera lenta a edades tempranas y se incrementa ligeramente en edades tardías. Esto se atribuye principalmente a la baja reactividad puzolánica. A diferencia del metacaolín, la ceniza volante no produce CSH que provoque densificación y rigidez de manera temprana, permitiendo que la matriz cementante presente un módulo de elasticidad bajo; sin embargo, éste no se afecta de manera considerable si se toma en cuenta que las partículas de ceniza se acomodan en la matriz provocando el efecto *filler*, aportando así a la obtención de módulos de elasticidad menos bajos a edades tempranas. Posteriormente, al comenzar las reacciones puzolánicas, el incremento del módulo de elasticidad se ve beneficiado, alcanzando valores similares o mejores que los de un concreto convencional. Asimismo, el nivel de reemplazo de CP por CV juega un rol

importante. En esta propiedad el incremento en el contenido de ceniza incrementa el módulo de elasticidad a edades avanzadas (Siddique, 2011).

Por otro lado, en cuanto a microestructura y propiedades de transporte o densificación, en una matriz con base en cemento portland sin adiciones, el  $\text{Ca(OH)}_2$  formado durante la hidratación se puede lixiviar con el paso del tiempo, provocando que se formen especies de canales que conectan los poros produciendo el ingreso de agua y otros agentes de carácter agresivo y perjudiciales para la matriz. El uso de ceniza volantes o alguna otra puzolana reacciona principalmente con el  $\text{Ca(OH)}_2$  produciendo CSH y CASH adicional al formado por el cemento portland; es decir, consume el  $\text{Ca(OH)}_2$  mitigando la lixiviación y, a su vez, produce compuestos insolubles en agua que llenan los poros y reducen el paso de agentes nocivos; es decir, el uso de ceniza volante da como resultado el refinamiento de los poros y la densificación de la matriz mediante las reacciones puzolánicas (De Belie, 2018)

Por otra parte, los cambios volumétricos dentro de las matrices cementantes pueden darse por varios factores. Las contracciones por secado, los cambios de temperatura y las expansiones producidas por agentes externos son algunos de éstos. De manera general, e ha demostrado que el empleo de ceniza volante decrece los cambios volumétricos, en función de algunas acciones.

En cuanto a contracciones por ciclos de secado, existe variabilidad en función de los reemplazos de cemento portland por ceniza volante; sin embargo, algunos autores han informado que el uso de porcentajes bajos disminuye los agrietamientos debidos a estas contracciones. Por su parte, los cambios de temperatura producidos por la liberación de calor en volúmenes grades de concreto se ven mitigados con el uso de ceniza volante, debido a la lenta reactividad. El comienzo tardío de las reacciones de hidratación logra un efecto de control de liberación de calor que disminuye los cambios volumétricos y mitiga los agrietamientos. Por último, el uso de cenizas volantes, más allá de la densificación que evita el ingreso de agentes nocivos, logra un efecto inhibitor sobre algunos de estos agentes, con lo cual evita que se produzcan expansiones como lo es en el caso del ataque por sulfatos (Ramezani pour, 2014).

### 2.10.2.3 Efecto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar

El comportamiento y efecto que la ceniza de bagazo presenta en las propiedades de los sistemas cementante en estado endurecido es considerado similar al efecto de la ceniza volante y al de otras puzolanas de reactividad lenta. En la resistencia a la compresión su efecto decreta esta propiedad en las primeras edades de hidratación, al no presentar reacciones puzolánicas que formen compuestos adicionales tales como CSH o el CASH por la alta cristalinidad que presenta este material; no obstante, en edades posteriores a los 90 días los componentes de la ceniza de bagazo, especialmente el SiO<sub>2</sub> amorfo, reacciona con los productos de hidratación del cemento, específicamente el Ca(OH)<sub>2</sub> formando compuestos como los ya mencionados, los cuales mejoran el desempeño mecánico de las matrices cementantes (Berenguer et al., 2020; Patil et al., 2021).

Comportamiento similar se logra en cuanto a resistencia a tensión y a flexión, las cuales están relacionadas con la resistencia a la compresión, por lo que, en principio, su desarrollo es lento, siendo incluso menor a lo que se reporta en matrices de cemento portland; sin embargo, el paso del tiempo y las reacciones puzolánicas provocan el incremento de estas propiedades (Setayesh Gar et al., 2017; Afridi, 2019).

Por otro lado, algunos autores han estimado el mejor comportamiento y efecto de la ceniza de bagazo en torno a las propiedades de durabilidad, principalmente por la mejora de las propiedades de transporte y la mitigación del ingreso de agentes nocivos. La ceniza de bagazo de caña presenta partículas de tamaño variado con formas irregulares un tanto angulares y semiesféricas, con las cuales se logra un acomodo y adherencia adecuado dentro de la matriz, dado el efecto *filler* con lo que se obtiene una matriz densa en el nivel de microestructura, en las primeras edades de hidratación. Con el tiempo, las partículas de sílice y aluminio reaccionan formando los compuestos CSH y CASH, los cuales se adhieren primeramente en la zona de transición interfacial y posteriormente rellenan la red de poros existente en la matriz, formando un sistema cementante de baja porosidad y permeabilidad que disminuye el ingreso de agentes nocivos, con lo cual se permite el mejoramiento de la durabilidad (Joshaghani y Moeini, 2017; De Belie, 2018; Torres De Sande et al., 2021).

### **2.10.3. Durabilidad**

La durabilidad de las matrices cementantes está condicionada principalmente por las reacciones químicas que ocurren dentro de ellas y a la microestructura. El uso de puzolanas, en su mayoría, propicia reacciones puzolánicas y el mejoramiento de la microestructura, lo cual afecta positivamente a la durabilidad de los sistemas cementantes.

#### **2.10.3.1 Efecto del metacaolín**

El metacaolín es una puzolana de reacción rápida que consume el  $\text{Ca(OH)}_2$  desde las primeras edades para formar CSH adicional, así como compuestos CAH y CASH. Estos productos puzolánicos provocan la densificación de la microestructura mediante el refinamiento de los poros. Este refinamiento resulta benéfico al producir matrices cementantes compactas, a través de las cuales resulta complicado el ingreso del agua y el transporte de agentes nocivos para las matrices cementantes, mitigando así las afectaciones producidas sobre la durabilidad (Ramezani pour, 2014).

Existen varios procesos físico – químicos que afectan la durabilidad de las matrices cementantes. La carbonatación es un proceso químico que consiste en la desalcalinización del material cementante, lo que provoca la pérdida de la capa pasiva que protege al acero de refuerzo, permitiendo que se presenten algunos otros fenómenos tales como la corrosión. El progreso de la carbonatación dentro de una matriz se condiciona por diferentes parámetros que involucran las condiciones ambientales y la calidad de la matriz cementante. Aspectos como la humedad, la temperatura, la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmosfera, la relación a/cm, el tiempo y el proceso de curado y la permeabilidad son algunos de los factores que afectan el avance de la carbonatación.

El uso de materiales puzolánicos es comúnmente cuestionado sobre su funcionamiento para disminuir el avance de la carbonatación. Comúnmente se cree y se ha demostrado que el uso de algunas puzolanas incrementa estos avances. En el caso del metacaolín, las investigaciones reportan información variada. Algunos autores han reportado que a mayor contenido de metacaolín en la matriz cementante, mayor resulta la profundidad de carbonatación. Sin embargo, algunos autores han reportado comportamientos similares e incluso menores que lo reportado para matrices de sólo cemento portland. Lo anterior es

comúnmente atribuido al consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Por un lado, el consumo rápido de la portlandita mitiga la interacción del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  con ésta para formar  $\text{CaCO}_3$  y desalcalinizar el concreto, provocando menores avances de carbonatación. Sin embargo, el portador de alcalinidad o un pH alto a las matrices cementantes es precisamente el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , por lo que su menor presencia en la matriz disminuye el pH, a pesar de no presentarse las reacciones químicas producidas por la carbonatación. No obstante, las disminuciones de pH por las reacciones puzolánicas no son tan considerables por lo que los comportamientos de carbonatación terminan por ser similares a lo reportado por matrices con cemento portland sin adiciones (Duan et al., 2013).

Así mismo, la resistencia a la penetración de iones cloruro se encuentra en función de dos factores principales: la permeabilidad de la matriz cementante y la capacidad de unión de los iones cloruro con la pasta cementante. El primer factor se encuentra en función del tamaño y la distribución de los poros en la matriz y el segundo factor está condicionado por la formación de gel CSH, dado que, a mayor cantidad de este compuesto, mayor es la capacidad de unión de los iones. El uso del metacaolín en sistemas cementantes reduce la penetración de iones cloro, principalmente por el refinamiento de la microestructura y la disminución de la permeabilidad, con lo que disminuye el ingreso de este agente agresivo. Algunos autores han atribuido estas mejoras también a la reducción de la conductividad eléctrica o, de manera general, a la reducción de todas aquellas propiedades de transporte (Siddique, 2011; Duan et al., 2013).

Otro aspecto de la durabilidad en la que el metacaolín produce efectos es la resistencia a los sulfatos. El ataque por sulfatos se da mediante la interacción de iones sulfato con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y el  $\text{C}_3\text{A}$  para formar yeso y etringita, los cuales guían a la expansión y el agrietamiento de las matrices cementantes. Algunos factores que influyen en este ataque químico son la concentración de sulfato, la temperatura ambiente, el tipo de cemento y su composición, la relación a/cm, la porosidad y la permeabilidad, así como el uso de MCS. El empleo del metacaolín consume  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a edades tempranas, por lo que disminuye la presencia de un compuesto fundamental para la formación de yeso y etringita, principalmente. A su vez, la disminución de cemento portland en las matrices

cementantes conlleva a una disminución en compuestos como el  $C_3A$ , por lo que también disminuyen los productos expansivos que se generan a partir de éste. De manera secundaria, al igual que otras puzolanas, el metacaolín llega a presentar el efecto filler con partículas poco reactivas o con la formación de gel CSH adicional que se acomoda en los poros de la matriz provocando su densificación, con lo que se refina la red de poros y se mitiga el ingreso de los sulfatos o algunos otros agentes (Al-Akhras, 2006; Ramezani-pour, 2014). Lo anterior resulta benéfico en otro aspecto de la durabilidad como las reacciones álcali-agregado, puesto reduce la permeabilidad de las matrices mediante la densificación y el refinamiento de la microestructura (De Belie, 2018).

### **2.10.3.2 Efecto de la ceniza volante**

Los aspectos de durabilidad, en general, se condicionan por diferentes factores y propiedades de las matrices cementantes, siendo el más importante la permeabilidad, puesto que influye directamente en las propiedades de transporte, imposibilitando el paso de agentes nocivos que deterioran elementos estructurales de concreto; y es en esta propiedad principalmente en la que la ceniza volante provoca efectos benéficos en la mayoría de las ocasiones, dados diferentes mecanismos, sean estos físicos o químicos (Kosmatka, 2011).

Uno de los fenómenos de mayor dependencia de la permeabilidad es la carbonatación. El ingreso de  $CO_2$  a las matrices cementantes en conjunto con el grado de saturación o disponibilidad de agua, así como la cantidad de  $Ca(OH)_2$  y las condiciones ambientales propician la formación de  $CaCO_3$ , provocando la desalcalinización de la matriz cementante y el posterior deterioro. No obstante, un alto grado de impermeabilidad no siempre resulta en la disminución de este fenómeno, puesto que el uso de materiales puzolánicos, tales como la ceniza volante, amplían la gama de variables de las que depende la carbonatación. Si bien se ha demostrado que el uso de cenizas volantes mediante efectos físicos como el efecto *filler* y efectos químicos como la formación de CSH adicional provocan un refinamiento en la red de poros, el poco consumo de  $Ca(OH)_2$  a edades tempranas da como resultado avances de carbonatación mayores debido a la disponibilidad de este compuesto para la formación de  $CaCO_3$ . Algunos autores han propuesto alternativas para mejorar el comportamiento ante la carbonatación

de sistemas con CV, los cuales se basan en periodos de curado extendidos hasta 90 días, con lo que se mantiene un grado de saturación alto en las matrices cementantes previo a la reacción de las cenizas volantes y al consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  (Ramezani pour, 2014; De Belie, 2018).

Así mismo, otro fenómeno dependiente de la permeabilidad de las matrices cementantes es el ataque por sulfatos. Los morteros o concretos con base en cemento portland están comúnmente expuestos a soluciones que contienen sulfatos de sodio o de magnesio. Ambos compuestos ingresan en las matrices cementantes mediante los poros, provocando expansiones, agrietamientos, pérdidas de resistencia y desintegración de la pasta cementante. El empleo de cenizas volantes en las matrices incrementa la resistencia ante el ataque de sulfatos. En principio con la disminución de la permeabilidad de las matrices cementantes por el efecto *filler*, con el cual se disminuye el ingreso de los sulfatos y la interacción de éstos con los compuestos hidratados de la pasta cementante. Aunado a esto, en edades avanzadas la ceniza volante es capaz de reaccionar con la portlandita provocando la disminución de este compuesto dentro de la matriz cementante, con lo que se imposibilita la interacción del sulfato para la formación de yeso y posteriormente la formación de etringita. Así mismo, el uso de cenizas volantes y, así como de cualquier otra puzolana, provoca la disminución del aluminato tricálcico presente en el cemento portland, lo que también disminuye la formación del compuesto de etringita, disminuyendo así las expansiones, los cambios volumétricos y la desintegración de las matrices cementantes (Siddique, 2011; Nie et al., 2014).

Por otro lado, el proceso de corrosión que afecta el acero de refuerzo embebido en las matrices cementantes se encuentra en función de diferentes parámetros. La alcalinidad de la pasta cementante ha sido el factor de mayor peso, dado que proporciona protección al refuerzo mediante la formación de una película que envuelve el acero denominada como capa pasiva. El  $\text{Ca(OH)}_2$  y algunos iones de sodio y potasio son los principales brindadores de alcalinidad a las matrices cementantes. El uso de cenizas volantes como sustitución de cemento portland disminuye en principio los compuestos mencionados en proporciones mínimas que tiene efectos significativos en la disminución del pH, lo que provoca la formación de capas pasivas más sensibles a la desintegración por la

formación de  $\text{CaCO}_3$  y por el ingreso de iones cloro. No obstante, se ha encontrado benéfica la ceniza volante ante este fenómeno, dada su contribución sobre la permeabilidad del concreto (Ramezaniapour, 2014).

El congelamiento-deshielo es un fenómeno dado por la cantidad de agua presente en la matriz porosa de los sistemas cementantes. Los cambios de temperatura provocan los cambios de estado del agua y, a su vez, cambios volumétricos dentro de los elementos estructurales. El uso de cenizas volantes provoca alteraciones en la distribución de tamaños de poro mediante las reacciones puzolánicas, disminuyendo la porosidad y, a su vez, la permeabilidad. Lo anterior imposibilita la acumulación de agua dentro de la matriz porosa, disminuyendo los efectos del congelamiento – deshielo. Aunado a esto, se ha demostrado que este material puzolánico juega un rol importante en la formación de burbujas de aire dentro de la pasta cementante; es decir, tiene un efecto de aditivo incluso de aire, el cual, en función del tipo de cemento utilizado puede propiciar la formación de mayor o menor cantidad de burbujas, con lo que se logra disminuir y/o mitigar las expansiones provocadas por este fenómeno (Knutsson, 2010; Ramezaniapour, 2014).

Por otro lado, en cuanto a aspectos de la durabilidad que no necesariamente están en función de la permeabilidad, se pueden mencionar algunos, tales como las reacciones álcali – sílice y la resistencia a la abrasión. La reacción álcali – sílice, también conocida como álcali – agregado, es causada por la interacción entre los iones hidroxilo presentes en la solución de poros del cemento alcalino con la sílice reactiva presente en los agregados. Los iones alcalinos tales como el Sodio y el Potasio del cemento y el agua de mezcla aumentan la concentración de iones hidroxilo en la solución de poros. Estos iones disuelven la sílice amorfa de los agregados, formando así un gel de composición química variable, el cual absorbe el agua del medio ambiente provocando expansiones y generando tensiones hidráulicas dentro de la pasta cementante, las cuales pueden causar agrietamientos. A su vez, el gel de silicato alcalino formado dentro de la matriz cementante interacciona con la portlandita de la misma forma en que se dan las reacciones puzolánicas. Esta reacción provoca la expansión del agregado dentro de la matriz cementante provocando cambios volumétricos y presiones internas que permiten

el desconchado y la pérdida de resistencia de las matrices cementantes. Si bien, este fenómeno está fuertemente ligado con la composición química de los agregados y con el tipo de cemento utilizado, la adición de cenizas volantes o sustitución parcial del cemento portland por esta puzolana reduce la cantidad de álcalis presentes en la matriz e interacciona con la portlandita, inhibiendo o reduciendo las expansiones provocadas por la formación del gel alcalino (Thomas, 2011; Ramezaniapour, 2014).

En el caso de la resistencia a la abrasión, este fenómeno ocurre debido a los roces, raspados o deslizamientos de objetos en la superficie del concreto o del mortero. Existen varios factores que afectan esta resistencia, entre los que se pueden destacar la relación a/cm, los tipos de agregados, el arrastre de aire, la resistencia a la compresión, el acabado y el proceso de curado. En general, se ha encontrado que el empleo de agregados duros y las bajas relaciones a/cm propician una mayor resistencia a la abrasión. En este caso, el uso de cenizas volantes mejora la calidad de la pasta cementante primeramente por sus características físicas y, en segunda instancia, por la mitigación de la lixiviación del  $\text{Ca(OH)}_2$ , dado el consumo de este compuesto. Lo anterior propicia una densificación de la pasta cementante y la mejora de las propiedades adhesivas de la pasta con los agregados. Estos dos factores reducen la tendencia de desprendimiento, tanto de la pasta como del agregado de una masa de mortero o de concreto, debido a las acciones abrasivas ya mencionadas. Sin embargo, con respecto al resto de los factores que afectan la resistencia a la abrasión, el uso de cenizas volantes no representa grandes mejoras ante este fenómeno (Siddique, 2011).

### **2.10.3.3 Efecto de la ceniza de bagazo de caña de azúcar**

En los últimos años se ha potenciado el estudio de la durabilidad de sistemas cementantes con contenido de CB, encontrándose, en la mayoría de los casos, beneficios en estos términos. Lo anterior debido principalmente a la densificación microestructural que la CB provoca dentro de las matrices cementantes, como parte de las reacciones puzolánicas y el efecto de relleno de poros.

Por lo anterior, los principales beneficios de durabilidad con el uso de esta puzolana se centran en aquellos aspectos que involucran propiedades de transporte, tales como la absorción de agua, la velocidad de pulso ultrasónico, la resistividad eléctrica y la

conductividad térmica, las cuales son propiedades que comúnmente se relacionan con la porosidad y permeabilidad de las matrices y proveen mejoras contra ataques tales como la penetración de cloruros, el ataque por sulfatos y otros ataques químicos.

La absorción de agua es la capacidad de un material para absorber los líquidos que se encuentran en contacto con su superficie, lo que brinda un panorama sobre la estructura interna del material (Kolawole et al., 2020). Algunos autores han estudiado el comportamiento de la CB ante la absorción de agua, concluyendo que incorporaciones de entre el 20 y el 25% resultan benéficas, dado que disminuyen la profundidad de penetración de agua con respecto a lo reportado por mezclas de control. Lo anterior se ha relacionado principalmente con la naturaleza puzolánica de la CB; es decir, con la formación de compuestos como el CSH como producto de la interacción de la sílice amorfa presente en la CB con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y a la fineza de las partículas, dado que la CB más fina, si bien ante la absorción de agua, no brinda beneficios mediante el efecto *filler*, sí otorga mayor reactividad al interactuar con los compuestos hidratados del cemento portland (Ganesan et al., 2007; Modani y Vyawahare; 2013; Rajasekar et al., 2018).

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) es una técnica no destructiva que permite el monitoreo de la densidad y la homogeneidad de un material. Valores altos en la velocidad de pulso son indicativos de una alta densidad y viceversa. Si bien, el empleo de puzolanas provoca densificación de las matrices, se ha reportado en la bibliografía un nulo efecto de la CB en términos de VPU, cuando se emplea como material cementante. Caso contrario ocurre cuando se emplea como agregado fino. Lo anterior se ha atribuido a la sensibilidad de la técnica al momento de tomar lecturas y otorgar un resultado. Si bien, se emplean ondas ultrasónicas en las mediciones, las micropartículas de la CB y algunas otras puzolanas no influyen en el paso de las ondas de sonido como sí lo hacen partículas de mayor tamaño como los agregados (Demirboğa et al., 2004; Sua-iam y Makul, 2013).

En contraparte, la resistividad eléctrica es una propiedad en la que la CB juega un rol importante. Esta propiedad hace referencia a la capacidad de un material para resistir la transmisión de iones sujetos a un campo eléctrico. En este caso, se ha comprobado que la formación de CSH adicional tiene un efecto significativo en el incremento de la

resistividad de los sistemas cementantes, debido a la reducción de los tamaños de poros y a la reducción de las conexiones entre ellos; es decir, provoca la presencia de una red de poros discontinua, con lo cual se imposibilita el paso de los iones. Aunado a esto, las características físicas de la CB, tales como los tamaños de partícula y su densidad también provocan mejoras en las características de los poros, lo cual es benéfico en la reducción de la permeabilidad (Bahurudeen et al., 2015; Piedrahita et al., 2016; Joshaghani y Moeini, 2017). Así mismo, la conductividad térmica es otra propiedad de transporte en la cual la CB presenta efectos benéficos mediante los mecanismos de densificación mencionados anteriormente. Algunos autores han encontrado comportamientos similares y mejores que los de matrices cementantes de sólo cemento portland y, en algunos casos, comportamientos equiparables a lo reportado con el uso de otras puzolanas (Katare y Madurwar, 2017; Batool y Bindiganavile, 2018).

Partiendo de lo anterior, el ingreso y el transporte de agentes en matrices cementantes son los principales factores que disminuyen la vida de servicio de las estructuras de concreto. Algunos de los agentes más conocidos son los cloruros, los sulfatos y algunos ácidos.

En el caso de los cloruros, su deterioro se basa en la reducción de la pasivación de los iones  $\text{OH}^-$ , lo que permite el incremento de la tasa de corrosión del acero de refuerzo. Es decir, la disminución de la presencia de corrosión y deterioro del concreto reforzado depende de la pasivación efectiva del acero de refuerzo mediante la alcalinidad de la matriz cementante. En este sentido, el uso de CB se ha encontrado efectivo en porcentajes de sustitución de cemento portland de alrededor de 25%. En términos generales, la CB provoca reducciones en el ingreso y la difusión de iones cloruro como resultado de diferentes características como la reducción de la permeabilidad y las propiedades de transporte. Aunado a esto, los tamaños de partícula, el área específica, los bajos contenidos de carbón y el contenido de álcalis de la CB tienen un impacto positivo en la disminución del transporte de los iones cloruros y en la pasivación del acero de refuerzo (Ganesan et al., 2007; Amin, 2011).

Por otro lado, el deterioro debido a las expansiones causadas por el ataque de sulfatos se ve disminuido en mezclas cementantes con reemplazos de cemento portland por CB en

porcentajes de alrededor del 30%. Las reacciones puzolánicas y la mejora de la impermeabilidad reducen en principio la penetración de éste y otros agentes nocivos. Así mismo, y al igual que con el uso de otros materiales puzolánicos, la reducción de compuestos como el C<sub>3</sub>A mitigan la interacción de los sulfatos y brindan un mejor comportamiento (Bahurudeen et al., 2015). Caso similar se obtiene ante las contracciones por secado, en las cuales el efecto *filler* y las reacciones puzolánicas disminuyen el deterioro por agrietamientos (Chi, 2012; Bahurudeen et al., 2015).

De forma similar, el uso de CB disminuye el ingreso de algunos ácidos, tales como el ácido clorhídrico, el ácido acético y cloruro de amonio. Estos agentes principalmente descomponen compuestos tales como el CSH, propiciando pérdidas en la resistencia a la compresión. Las matrices cementantes con contenidos de CB han presentado mejoras ante estos agentes incluso mejor que lo reportado por algunas otras puzolanas, principalmente obteniendo pérdidas menores en cuanto a resistencia a la compresión (Pereira et al., 2015).

## **2.11. Efecto de las combinaciones de puzolanas en sistemas cementantes**

El empleo de puzolanas en sistemas cementantes tiene efectos benéficos cuando se utiliza como sustituto parcial del cemento portland. No obstante, su uso se ve limitado dadas sus características físico – químicas, las cuales provocan afectaciones en algunas propiedades de los sistemas cementantes. Con base en esto, algunos investigadores han propuesto la combinación de puzolanas como una alternativa en la que una mitiga las deficiencias de la otra mediante lo que se conoce como efecto sinérgico (Doug et al., 2018).

### **2.11.1. Propiedades físico – mecánicas**

Como se ha visto, las propiedades físico – mecánicas se determinan con base en el estado fresco o endurecido de cada sistema cementante. Por un lado, en estado fresco la mayoría de las puzolanas que se emplean presentan beneficios en cuanto a la disminución de la segregación y del sangrado, manteniendo la homogeneidad y cohesividad de las mezclas; sin embargo, algunas puzolanas con características tales como partículas fibrosas, placas o angulares y con áreas superficiales mayores que lo presentado por el cemento portland, provocan disminución en la fluidez y trabajabilidad

del material, lo que se traduce en una mayor demanda de agua, principalmente. Si bien, lo anterior es solucionable con el uso de aditivos superplastificantes o reductores de agua, su uso no es del todo benéfico, puesto que en ocasiones estos aditivos no presentan la compatibilidad con todos los ingredientes de los sistemas cementantes, sumando a esto que su uso produce mezclas con características poco útiles en la construcción, tales como la pegajosidad, llegando incluso a presentarse problemas de segregación y sangrado, si no se utiliza correctamente.

Por lo anterior, el empleo de combinaciones de puzolanas se ha propuesto como alternativa para mejorar las propiedades en estado fresco. Esto debido principalmente a las diferentes morfologías de las partículas. Puzolanas tales como el metacaolín y el humo de sílice presentan alta demanda de agua, lo que promueve la disminución de la fluidez y trabajabilidad de las mezclas. En contraparte, las cenizas volantes y las escorias presentan partículas esféricas en su mayoría, las cuales evitan la fricción mejorando la fluidez y disminuyendo los requerimientos de agua. La combinación de estos tipos de puzolanas se ha encontrado benéfico para las propiedades en estado fresco, puesto que se presenta un efecto positivo en el que se obtienen mezclas homogéneas sin segregación y sangrado y con demandas de agua estándar sin requerimientos de aditivos (Bentz y Ferraris, 2010; Doug et al., 2018).

Aunado a lo anterior, la hidratación del cemento portland produce reacciones exotérmicas que liberan una gran cantidad de calor cuando se trabaja con grandes volúmenes. Algunas puzolanas de reactividad rápida promueven la mayor generación de calor, lo que a la postre promueve la formación de grietas y daños estructurales debido a los cambios volumétricos que se generan. Para mitigar el problema, algunos investigadores han propuesto el uso de puzolanas de reactividad tardía, con las cuales la liberación de calor disminuye y se previenen los daños estructurales posteriores. Tal es el caso del metacaolín y el humo de sílice, en combinación con ceniza volante. Esta última es una puzolana con un proceso de hidratación lento que promueve la disminución del calor de hidratación en volúmenes masivos de concreto. Algunas otras puzolanas con estas características son residuos tales como la ceniza de bagazo de caña o la ceniza de cascara de arroz (Doug et al., 2018).

Por otro lado, los beneficios en cuanto a propiedades físico – mecánicas en estado endurecido se basan en los diferentes tiempos de reacción de las puzolanas. Las puzolanas de reactividad rápida consumen el  $\text{Ca(OH)}_2$  presente por la hidratación del cemento portland formando gel CSH y/o CASH a edades de siete días en su mayoría, con lo que se obtiene un desarrollo de densificación y resistencia rápida que en edades posteriores deja de promoverse. En algunos casos, la resistencia obtenida inicialmente es superior a lo que podría alcanzar el cemento portland a la edad estándar de 28 días, por lo que el requerimiento de desarrollo de resistencia posterior no es requerido. No obstante, en algunos casos, la densificación y la resistencia alcanzada de manera temprana se ve superada a los 28 días por mezclas de sólo cemento portland, por lo que es requerido el uso de puzolanas de reactividad lenta, que promuevan el desarrollo de resistencia por mayores periodos de tiempo (Kosmatka, 2011).

Algunos investigadores han demostrado que el uso de puzolanas reactivas a edades tempranas y tardías en combinación, provocan el desarrollo de resistencia y la mejora de propiedades físicas en estado endurecido, siempre que se cumplan algunos parámetros tales como las relaciones a/cm adecuadas, los porcentajes de sustitución óptimos y los procesos de curado correctos. El uso de relaciones a/cm bajas siempre resulta en mejores propiedades de los sistemas cementantes. Con el uso de puzolanas, las relaciones a/cm pueden ser variables en función de las puzolanas empleadas y los requerimientos necesarios. En el caso de los porcentajes de sustitución, la optimización de éstos es un aspecto importante para considerar. La presencia de  $\text{Ca(OH)}_2$  es lo que promueve las reacciones puzolánicas; sin embargo, el consumo temprano de éste por acción de puzolanas como el humo de sílice o el metacaolín pueden provocar que las puzolanas de reactividad lenta no lleguen a reaccionar debido a la falta de este compuesto, por lo que el efecto sinérgico no se estaría dando de manera adecuada. Sumando a esto que, en algunos casos los procesos de curado por periodos prolongados son útiles para promover las reacciones de puzolanas a edades avanzadas (Celik et al., 2014; Kannan y Ganesan, 2014; Niknezhad y Kamali, 2015).

### 2.11.2. Durabilidad

En términos de durabilidad, los beneficios encontrados en sistemas cementantes ternarios se centran en la mejora de las propiedades de transporte, con lo que se mitiga o disminuye el deterioro debido al ingreso de agentes nocivos. Así mismo, se han encontrado algunas otras mejoras basadas en las reacciones de hidratación y en el consumo o producción de diferentes productos de reacción (Doug et al., 2018).

Primeramente, los materiales puzolánicos presentan sílice y aluminio mayoritariamente en su composición. Algunos presentando mayor cantidad de sílice reactiva que promueve la formación del gel CSH por encima del gel CAH, dada la poca cantidad de aluminio en su composición. En contraparte, otras puzolanas llegan a presentar mayor cantidad de aluminio, formando así mayor cantidad de CAH. El uso de estas puzolanas en combinación produce el gel CASH en grandes cantidades, refinando los poros microestructurales, mejorando así la red de poros mediante el llenado de los mismos, con lo cual se evita el ingreso y alojamiento de los agentes nocivos.

Con base en lo anterior, los ataques químicos que provocan el deterioro y la pérdida de durabilidad de las estructuras de concreto se ven disminuidos. Algunos de estos ataques son principalmente soluciones de sulfatos y de cloruros. Imposibilitar el ingreso de estos en las matrices cementantes provoca la disminución del deterioro; sin embargo, existen otros factores que influyen en dicha disminución. En el caso de los sulfatos, la combinación de puzolanas con diferentes tiempos de reacción provoca la sustitución de mayor cantidad de cemento portland, con lo cual se disminuye la cantidad de  $C_3A$  presente en la matriz, evitando la formación de yeso y etringita. En el caso de los cloruros, el uso de puzolanas promueve la alcalinidad de las mezclas por la presencia de álcalis y/o por la presencia de  $Ca(OH)_2$  que no se consume de manera rápida. Estas causas propician la mejora de la durabilidad en estos términos (De Belie, 2018).

En adición, otros aspectos de la durabilidad que se ven significativamente mejorados son las expansiones por las reacciones álcali – agregado, el deterioro por congelamiento – deshielo y los agrietamientos por cambios volumétricos debido a cambios de temperatura y contracciones por secado. Las reacciones álcali – agregado se ven mejoradas en principio por el fenómeno de empaquetamiento que se produce con la

producción de CSH y CASH por periodos de tiempo prolongados, así como por la disminución del contenido de álcalis en función de las puzolanas que se empleen. En el caso del congelamiento – deshielo, algunas puzolanas tales como la ceniza volante promueven la formación de burbujas internas haciendo la función de un aditivo inclusor de aire. Esta puzolana, en combinación con otras que no promueven esta formación, provoca menores presiones internas por los cambios de estado del agua presente en la estructura interna de las matrices cementantes. Así mismo, como se mencionó con anterioridad, la ceniza volante y algunas otras puzolanas de reactividad lenta, disminuyen la generación de calor por los procesos de hidratación del cemento portland y las puzolanas de reactividad rápida en concretos masivos, lo que conlleva a tener menores cambios volumétricos y, por ende, menor cantidad de agrietamientos internos que propicien el ingreso de agentes nocivos o la pérdida de las propiedades estructurales de los elementos de concreto (Ramezaniapour, 2014; Doug et al., 2018).

## **CAPÍTULO 3. Antecedentes**

En los últimos años se ha potencializado la combinación de materiales puzolánicos en sistemas cementantes para la obtención de mejores propiedades. Doug, R., et al., (2018) establecieron que la combinación de puzolanas que reaccionan rápidamente, como el humo de sílice, con un MCS que reacciona lentamente como las cenizas volantes o escoria, puede propiciar beneficios tanto para las propiedades a edades tempranas como para edades avanzadas y para la durabilidad del concreto, dados los efectos sinérgicos potenciales en los que una puzolana compensa la debilidad de otra.

### **3.1. Comportamiento de sistemas cementantes con MK ante CO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub>**

En los últimos años, la tendencia de búsqueda de materiales puzolánicos se ha inclinado hacia los materiales provenientes de la calcinación de arcillas y calizas como el metacaolín, esto como estrategia viable para la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a causa de la producción del CP (Zunino, F., y Scrivener, K., 2020). Este material, al igual que otras puzolanas, ha sido evaluado en términos de influencia física y resistencia mecánica (Sfikas et al., 2014, Badogiannis et al., 2015, Mirmoghtadaei et al., 2015, y Cheng et al., 2016) y, recientemente, en parámetros de durabilidad.

Ante el ataque de CO<sub>2</sub>, las evaluaciones con MK comenzaron pocos años después de las primeras investigaciones sobre propiedades mecánicas. En 2009, Mejía, Rodríguez, C., Rodríguez, E., Torres, y Delvasto, evaluaron el comportamiento de concreto con un 10% de CP sustituido por cuatro metacaolines con diferente tratamiento térmico. Las probetas se carbonataron en condiciones de 2.25% de concentración de CO<sub>2</sub>, 30°C de temperatura (T) y 70% de humedad relativa (HR) después del curado a 28, 90, 180 y 240 días. A los 28 días de curado con 3 y 6.5 semanas de exposición a CO<sub>2</sub>, los concretos con MK presentaron mayor profundidad de carbonatación; sin embargo, a 240 días las profundidades disminuyeron siendo similares e incluso menores que las que presentaba el concreto convencional, por lo que los procesos y tiempos de curado resultaron ser los contribuidores de resistencia a la carbonatación. Así mismo, la carbonatación presentada por los diferentes metacaolines promovió el desarrollo de resistencia a la compresión comparable con el sistema de referencia.

Años después, en 2015, Barbhuiya, Chow y Memon, estudiaron concretos con MK como reemplazo de CP en 5, 10 y 15% con relaciones a/c de 0.5 y 0.6. La carbonatación acelerada se evaluó en bloques de concreto de 250 x 250 x 100 mm expuestos en condiciones de  $5\pm 0.1\%$  de  $\text{CO}_2$ ,  $20\pm 1^\circ\text{C}$  y  $65\pm 1\%$  de HR durante tres semanas. Los resultados indicaron que los reemplazos hasta 10% de CP por MK mantienen profundidades de carbonatación similares a las del concreto convencional, con relación a/c de 0.5, debido principalmente al efecto benéfico que brinda el refinamiento de los poros. No obstante, reemplazos mayores conllevaron al incremento del avance de la carbonatación, lo cual se atribuyó al decremento de la portlandita debido a las reacciones puzolánicas del MK.

En 2016, Tafraoui, Escadeillas y Vidal, evaluaron concretos de ultra alto desempeño (HSC) con reemplazo del 25% de CP por MK, para compararlo con el comportamiento del concreto con humo de Sílice (HS). Las condiciones de exposición de carbonatación fueron 5%  $\text{CO}_2$  y HR de 65%. Los resultados indicaron que es factible emplear HS o MK para no afectar la resistencia a la carbonatación de un concreto HSC, dado que ambas puzolanas presentan comportamiento similar y comparable con el concreto de referencia.

Bucher, Diederich, Escadeillas, y Cyr (2017), emplearon sustituciones de 15, 20 y 25% de MK en probetas prismáticas curadas a 28 y 365 días. Las condiciones de carbonatación acelerada y natural fueron  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $\text{HR} = 55\%$ ,  $\text{CO}_2 = 4 \pm 0.5\%$  y  $T = 8 - 18^\circ\text{C}$ ,  $\text{HR} = 75\%$ , respectivamente. La exposición a carbonatación fue de 56, 63 y 70 días para CA y de 1 a 2 años para CN. Los resultados indicaron el aumento de carbonatación con el incremento del MK en concretos con 28 días de curado; por el contrario, del curado a 365 días, con el cual las mezclas con MK fueron más resistentes ante la carbonatación. Aunado a lo anterior, es de mencionar que los concretos se evaluaron con diferentes tipos de cemento, uno de los cuales contenía 15% de reemplazo por CV. En dicho concreto la profundidad de carbonatación tendió a ser similar al concreto convencional. Lo anterior se atribuyó al consumo de portlandita de manera rápida que presenta el metacaolín, lo que propicia la desalcalinización de la matriz

cementante; sin embargo, al combinarse este material con otra puzolana, se presentan formaciones que refinan la red de poros, imposibilitando el ingreso del  $\text{CO}_2$ .

Ante el ataque de  $\text{SO}_4$ , una investigación con el empleo de MK la realizó Al-Akhras (2006). Él evaluó concretos con sustituciones de CP por MK de 5, 10 y 15% con relaciones a/c de 0.5 y 0.6. La exposición a los sulfatos se realizó mediante la inmersión de probetas después del curado a 3, 7 y 28 días, en una solución con 5% de sulfato de Sodio, en un ambiente con temperatura  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ . La resistencia a sulfatos se evaluó mediante cambios de longitud y pérdida de compresión. Los resultados indicaron que el MK es efectivo para incrementar la resistencia ante el ataque de sulfatos, dado que la disminución de CP disminuye el  $\text{C}_3\text{A}$  hidratado de las mezclas, lo cual reduce la formación de etringita. Así mismo, el consumo del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  imposibilita la formación de yeso y la posterior formación de compuestos expansivos. Y, aunado a lo anterior, el MK provoca la formación de CSH secundario, el cual presenta un efecto de llenado de poros que genera una red discontinua que disminuye el transporte de los iones sulfatos que causan el deterioro.

Torres-Castellanos, Torres-Agredo y Mejía (2013), evaluaron concreto con contenido de 20% de MK y relación a/cm de 0.5. El concreto se curó a 28 días en agua, posteriormente se llevó a la solución de sulfato de sodio al 5% con pH de solución entre 6 y 8. En este caso, se evaluó la resistencia a la compresión y a la expansión. Los resultados mostraron que en pérdidas de compresión no existieron cambios significativos en ninguna mezcla y en expansión el MK resultó ser mejor. Este mejor comportamiento se debió al refinamiento de los poros de concreto por la reducción de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , a causa de las reacciones puzolánica del MK.

En 2016, Kavitha, Shanthi, Arulraj y Sivakumar, sustituyeron un 5, 10 y 15% de CP por MK en concretos expuestos a una solución de sulfato de magnesio con concentración del 5%. En este trabajo se determinó que la mezcla con 10% fue la que menor pérdida de masa reportó, con valores por debajo del 1% después de las 12 semanas. Por el contrario del concreto convencional, que estuvo por encima del 4%. De igual forma, se evaluó la pérdida de resistencia del concreto, obteniéndose que con 10% de sustitución se pierde hasta 20%, mientras que con 0% se pierde arriba del 30%. Resultados similares

reportaron Gill y Siddique (2018), los cuales evaluaron concreto con los mismos porcentajes y con 10% de ceniza de cáscara de arroz como constante. Las probetas ensayadas fueron expuestas en 5% de solución de ácido sulfúrico. Con esto se concluyó que, si bien el MK mejora la resistencia a los sulfatos por sí solo, el uso de éste en combinación con otro material puzolánico podría ser benéfico para el concreto. Lo anterior se atribuyó a que, de manera general, las expansiones y cambios de masa dentro de las matrices cementantes se relaciona con la formación de etringita, la cual depende puramente de la relación  $Al_2O_3/SO_4$  y sus reacciones, es decir, la disminución de uno de estos compuestos impide la formación de mayor cantidad de etringita, lo cual se logra a partir de la sustitución de CP por puzolanas con bajos contenidos de alúmina.

### **3.2. Comportamiento de sistemas cementantes con CV y CB ante $CO_2$ y $SO_4$**

Entre las puzolanas más populares que se han estudiado para ser sustitutos parciales del CP se encuentran la CV y la CB, estudiadas desde los años 50's y 90's, respectivamente (Gill y Siddique, 2018; Baltazar-Zamora et al., 2019). De ambos materiales se ha evaluado principalmente la influencia física y mecánica dentro de matrices cementantes en busca de porcentajes de sustitución adecuados en función de las características de las puzolanas y, en los últimos años, se ha indagado en la influencia que presentan en la durabilidad del concreto (Santiago-Hurtado et al., 2016, Juárez-Alvarado et al., 2017, Jung et al., 2017, Baltazar-Zamora et al., 2019, Pereira et al., 2018, Jagadesh et al., 2018, Rajasekar et al., 2018 y Singh et al., 2019). Ejemplos de estas evaluaciones son las que se presentan a continuación.

En cuanto a exposición a  $CO_2$ , Wang, Lu, Li, C., Yuan y Li, Q., en el 2017, evaluaron concretos con 30% de CV. La carbonatación fue evaluada a 7 y 14 días después de someter los especímenes a estrés y temperatura. Los resultados mostraron que la CV aumenta la tasa de carbonatación con respecto del concreto convencional, dado que la reacción puzolánica de la CV provoca el consumo de las sustancias alcalinas presentes en las matrices cementantes y, los compuestos alcalinos de la CV son mucho menores que lo que se encuentra en el CP. Lo anterior principalmente en función de la cantidad de CV empleada, por lo que se recomendó emplear porcentajes menores.

En el 2019, Singh, L., Ali, Tyagi, Sharma, Singh, R., y Hou, evaluaron concreto con 30, 40 y 50% de CV, en probetas prismáticas. Las condiciones en la cámara de carbonatación fueron 20°C, 65% HR y 2% CO<sub>2</sub>. Las mediciones se hicieron a 28, 90 y 180 días, encontrándose que, a mayor contenido de CV, mayor es la profundidad de carbonatación; sin embargo, en el trabajo se comparan estas profundidades con mezclas ternarias que incluyen HS al 6%, con lo que se obtiene hasta el 35% menos de profundidad, por la formación de más productos de hidratación, siendo principalmente el gel CSH, con el cual se mejora de la microestructura y se disminuye la porosidad.

En 2013, Jiménez Quero, en su proyecto doctoral, discutió el efecto de la CB (10 y 20% en concretos con CV (20%) expuestos a carbonatación. La cámara de carbonatación presentó condiciones de  $T = 24.7 \pm 1.4^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR} = 62.6 \pm 7.3\%$  y  $3.17 \pm 0.7\%$  de CO<sub>2</sub>. Las profundidades se midieron a 3 y 6 meses después de curado, obteniéndose que la mezcla con 20% de CV presentó profundidades de carbonatación similares al concreto de referencia, mientras que las mezclas con 10 y 20% de CB fueron 6 y 8 mm mayores al control, respectivamente. Si bien, la CV y la CB provocan disminuciones de alcalinidad debido a las reacciones puzolánicas, el efecto *filler* resultó benéfico para alcanzar avances de carbonatación similares a la mezcla de referencia.

Por otra parte, en cuanto a exposición a SO<sub>4</sub>, Zuquan, Wei, Yunsheng, Jinyang, y Jianzhong (2007), sustituyeron CP por CV en un 20 y un 30% en concretos con relaciones a/c de 0.25 y 0.35. Los resultados indicaron mejoras ante los sulfatos en los concretos adicionados con CV empleando esas relaciones a/cm bajas. Sumer (2012), comparó cenizas volantes clase C y F en concretos con 10, 15, 17, 20 y 34% de sustitución de CP por CV. El ataque de sulfatos se evaluó mediante pruebas de expansión y pérdida de peso en concretos expuestos al 15% de solución de sulfato de Magnesio. Los resultados de los ensayos mostraron que la ceniza clase C es mejor que la F; sin embargo, ambas presentan incremento en pruebas mecánicas, así como decrementos en expansión y pérdidas de peso, en comparación con el concreto convencional. Singh, L., Ali, Tyagi, Sharma, Singh, R., y Hou (2019), emplearon porcentajes mayores de CV por CP (30, 40 y 50%). Los especímenes empleados fueron curados durante 7 días y se colocaron en una solución de sulfato de Magnesio, a 5% en

temperatura ambiente. Estos especímenes se probaron a 28, 90 y 180 días para determinar la concentración de iones de sulfato en la matriz de concreto. Los resultados mostraron que la incorporación de CV mejoró la resistencia a los sulfatos, comparada con el concreto convencional, aunque las mayores mejoras se presentaron en combinaciones ternarias con nanopartículas o HS. Lo anterior se atribuyó principalmente a las formaciones puzolánicas que se presentaron por las combinaciones ternarias, así como por la disminución del  $\text{Ca(OH)}_2$  y el  $\text{C}_3\text{A}$  necesarios para la formación de compuestos expansivos.

El empleo de CBCA en concretos expuestos a sulfatos fue evaluado en 2018 por Le, Sheen y Lam, quienes utilizaron CBCA calcinada a  $600^\circ\text{C}$ , durante una hora. La exposición a sulfatos se realizó durante 28 días. Los resultados indicaron que el concreto normal obtuvo pérdidas de peso de 2.52%, mientras que las mezclas con CBCA fueron de 2.06, 2 y 1.83% para 10, 20 y 30% de sustitución, respectivamente; por lo que se concluyó que el incremento de CBCA incrementa la resistencia a los sulfatos. Las razones se atribuyen al consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  y a la disminución del  $\text{C}_3\text{A}$  por sustitución del CP, lo que resulta en la disminución del contenido de yeso y etringita, respectivamente.

Además, Vishnumaya y Rekha (2014), ensayaron especímenes con 30% de CV con adiciones de CBCA en 5, 10, 15, 20, 25 y 30%. La CBCA fue utilizada tal cual se recolectó, ya que no recibió ningún tratamiento más que el cribado. Estos autores evaluaron la resistencia a compresión en cubos de 100 mm después de 56 y 90 días de exposición a sulfato de magnesio en concentración de 5%. Concluyeron que el implemento de estas puzolanas mejora la resistencia a sulfatos dadas las variaciones de compresión obtenidas después de la exposición al agente agresivo. Lo cual se da por las reacciones del sulfato con los compuestos de calcio y alúmina presentes en las matrices, las cuales, a diferencia de la mezcla de referencia y en función del porcentaje de sustitución, causan menos cantidad de rupturas internas que decrecen la resistencia mecánica, por lo que se presenta un mejor comportamiento.

### **3.3. Comportamiento de sistemas cementantes con combinaciones de puzolanas ante CO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub>**

En su mayoría, los sistemas cementantes presentados emplean combinaciones denominadas binarias por hacer uso de una sola puzolana en combinación con el CP, sin embargo, algunos autores han sugerido el empleo de dos o más puzolanas dentro de matrices cementantes, como alternativa para mitigar las deficiencias que una de estas pueda tener, mediante el efecto sinérgico de ambas, principalmente tomando en cuenta las diferencias en los tiempos de reacción de cada MCS (Doug et al., 2018). En este caso, se busca hacer uso de MCS ampliamente estudiados en sistemas cementantes binarios, sin embargo, poco estudiados en combinaciones ternarias entre ellos. Lo anterior tomando en cuenta aquellos materiales que representan tendencias potenciales de uso y los materiales que aún suponen un alto potencial de uso por su existencia. Algunos estudios empleando combinaciones MK con CV y CB son los siguientes.

Kim, Lee, y Moon, (2007) y Cheng, Shui, Sun, Yu, Zhang, y Ding (2017), evaluaron la combinación de CV y MK. Los primeros investigadores evaluaron concretos con 20% de CV mezclado con MK en 5, 10, 15 y 20% con relación a/c de 0.25. Las condiciones de carbonatación acelerada fueron de 5% CO<sub>2</sub>, 60% HR y 30°C. Los ensayos se realizaron a 14, 28 y 56 días pudiéndose observar que las profundidades aumentaron con el incremento del MK debido al alto consumo de Ca(OH)<sub>2</sub>, por lo que se recomendó emplear sustituciones bajas de este material en combinaciones ternarias. Por su parte, Cheng et al., midieron la profundidad de carbonatación en mezclas con 15% CV y 5% MK y la combinación de estos porcentajes. Las mediciones se hicieron a 3, 7, 14 y 28 días de exposición en carbonatación acelerada con condiciones de T = 20 ± 3°C, HR = 65 ± 5% y CO<sub>2</sub> = 20 ± 2%. Los resultados mostraron que el incremento de CV aumenta la profundidad de carbonatación; sin embargo, cuando es mezclada con otros materiales como Escoria o Metacaolín existe un mejor comportamiento.

Por otro lado, en el 2014, Bini y Varghese, evaluaron cubos de concretos curados en agua durante 7 días e inmersos en sulfato de magnesio en concentración de 20g/lit, en el que se dejaron 56 y 90 días. Las mezclas contenían 5% de MK e incrementos de CBCA en 5, 10, 15 y 20% como reemplazo del CP. Con estas combinaciones, los resultados

indicaron que ante el ataque de sulfatos la resistencia a compresión se ve mejorada con hasta 10% de CBCA en comparación con la mezcla control. De igual manera, Sherwin-Mathachan (2018), evaluó el ataque de sulfatos con los mismos porcentajes de sustitución, empleando dos CBCA, una calcinada a 850°C y otra sin calcinar. El concreto se curó durante 7 días en agua. Posteriormente, se llevó a la solución de sulfato de magnesio concentrado 20g/lit durante 28 y 56 días y se evaluó la resistencia a la compresión. Los resultados indicaron que la combinación de puzolanas mejora la resistencia a sulfatos, siendo mejor que la mezcla de control. Lo anterior se atribuyó a que si bien, el  $MgSO_4$  provoca la descomposición del gel CSH, la mayor formación de este compuesto da pie a una menor cantidad de rupturas internas y, por ende, se presenta menor reducción en la resistencia a la compresión.

Se debe hacer notar que existe un vacío de conocimiento e información considerable en cuanto a sistemas cementantes de MK en combinación con CV o CB, por lo que su evaluación en este proyecto supondrá un aporte en dichos aspectos sobre el uso de estos materiales combinados.

## **CAPÍTULO 4. Método experimental**

Con base en los objetivos del proyecto, el método experimental se divide en cuatro etapas fundamentales. La etapa I corresponde a la descripción y caracterización de la materia prima empleada en la elaboración de los sistemas cementantes en estudio, la optimización a partir de evaluaciones de fluidez y resistencia mecánica a compresión de dichos sistemas, así como la elaboración de los sistemas cementantes optimizados que se valoraron en el proyecto; la etapa II engloba el estudio de las propiedades físicas atribuibles a la durabilidad de los sistemas estudiados y, a su vez, la resistencia a la compresión de éstos. A la par, la etapa III engloba la evaluación de durabilidad mediante la exposición de los sistemas cementantes a agentes nocivos, tales como el CO<sub>2</sub> y los SO<sub>4</sub>; y por último, la etapa IV comprende los análisis microestructurales para el entendimiento de los mecanismos de reacción presentes en las matrices cementantes a esta escala y su efecto a escala macro.

### **4.1. Etapa I. Diseño, optimización y elaboración de mezclas**

En esta etapa se elaboraron las matrices cementantes a partir de la optimización de éstas mediante evaluaciones de fluidez y resistencia a la compresión, buscando obtener un material trabajable y mecánicamente aceptable para el desarrollo del proyecto. Como punto de partida se obtuvo la materia prima necesaria para la elaboración de las matrices cementantes. Como parte de los cementantes (Figura 13), se utilizó una ceniza de bagazo de caña de azúcar (CB) recolectada del Ingenio Azucarero Mahuixtlán S. A. de C. V. ubicado en la Congregación Mahuixtlán en Coatepec, Ver., una ceniza volante (CV), considerada tipo F de acuerdo con la norma ASTM C 618, la cual se obtuvo de la central carboeléctrica ubicada en Nava, Coahuila, un metacaolín (MK) obtenido a partir de la calcinación de caolín a 550°C y un cemento portland ordinario, con clase resistente 40 y de resistencia rápida a tres días (CPO 40R). En el caso del agregado, se empleó un agregado fino de origen calizo, con módulo de finura (MF) de 2.97. Y, por último, se utilizó un aditivo superplastificante comercial de policarboxilato, con base en lo establecido en la norma ASTM C 494, para garantizar la trabajabilidad de los sistemas elaborados.



Figura 13.- Cemento portland y puzolanas de estudio

Fuente: Elaboración propia

#### **4.1.1. Caracterización de materiales**

##### **4.1.1.1 Cemento y puzolanas**

Buscando cumplir las especificaciones establecidas en las normas ASTM C 150 y C 618 para cemento y puzolanas, respectivamente, se procedió a la caracterización mediante la aplicación de técnicas microestructurales y macroestructurales, las cuales proporcionaron información física, química y mecánica sobre los materiales cementantes empleados, tales como composición química, morfología, tamaños de partículas, densidad y actividad puzolánica.

En el caso del CPO 40R o tipo III, bajo la designación de la norma ASTM C 150, se deben cumplir valores mínimos y máximos principalmente en cuanto a la composición química. Entre estos el Óxido de Magnesio ( $MgO$ ), el Trióxido de Aluminio ( $Al_2O_3$ ) y el Óxido de Hierro ( $Fe_2O_3$ ) deben ser menores que el 6%, así como el Trióxido de Azufre ( $SO_3$ ), el cual debe ser menor que el 3.5% de la composición química total del material. Además, para los óxidos principales, tales como el Óxido de Calcio ( $CaO$ ) y el Óxido de Sílice ( $SiO_2$ ) no se establecen porcentajes mínimos; sin embargo, es recomendable que sean mayores que el 60% y el 20%, respectivamente.

En cuanto a las puzolanas, las especificaciones de la norma ASTM C 618 establecen parámetros sobre la composición química de estos materiales, así como sobre su reactividad. En el caso de la composición química, se establece que la suma de óxidos principales tales como el  $SiO_2$ , el  $Al_2O_3$  y el  $Fe_2O_3$  no debe ser menor que el 70% de la

composición química total, esto para el caso de cenizas volantes clase F y puzolanas naturales clase N o mayor que 50%, para cenizas volantes clase C. Además, se debe establecer un mínimo de reactividad al interaccionar este tipo de materiales con el cemento portland, el cual es conocido como Índice de Actividad Puzolánica y no debe ser menor que el 75% a edades de 7 y 28 días, para ninguna de las 3 clases antes mencionadas.

### **Procesamiento de Puzolanas**

De acuerdo con los objetivos del proyecto, el proceso de adecuación de las puzolanas empleadas involucró tratamiento de retiro de materia orgánica, molienda y calcinación. La CB, al ser considerada un desecho, requirió un proceso de cribado a través de la malla No. 16 (1.19 mm) para retirar el exceso de materia orgánica (Figura 14a), posteriormente, el material obtenido pasó por un proceso de molienda por lotes de 5 kg, durante 40 minutos, en un molino de bolas. El material obtenido finalmente se homogeneizó y se almacenó en sacos. La CV, por su parte, presentaba visualmente partículas de tamaño mayor a lo deseado, así como partículas de coloración oscura atribuibles a la presencia de carbón (Figura 14b), por lo que se optó por el cribado mediante la malla No. 100 (0.149 mm) para el retiro de estas partículas, buscando una mayor fineza y reactividad de este material. En el caso del MK, el proceso de activación del caolín se realizó únicamente mediante la calcinación de lotes de 4 kg a 550°C, en un horno industrial, durante 4 horas sin ningún tipo de molienda. El tiempo de calcinación y la temperatura se estimaron como óptimas en proyectos de investigación previos.

### **Obtención de muestras**

La obtención de muestras se realizó de manera similar para los cuatro cementantes utilizados, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C 311 para materiales almacenados en sacos, donde la muestra de cada cementante inicialmente fue de 2 kg. Posteriormente, cada muestra se cuarteó siguiendo el procedimiento de cuarteo para agregados, a una escala menor, como se muestra en la Figura 15, llegando al tamaño de muestra requerida para cada una de las técnicas de caracterización.

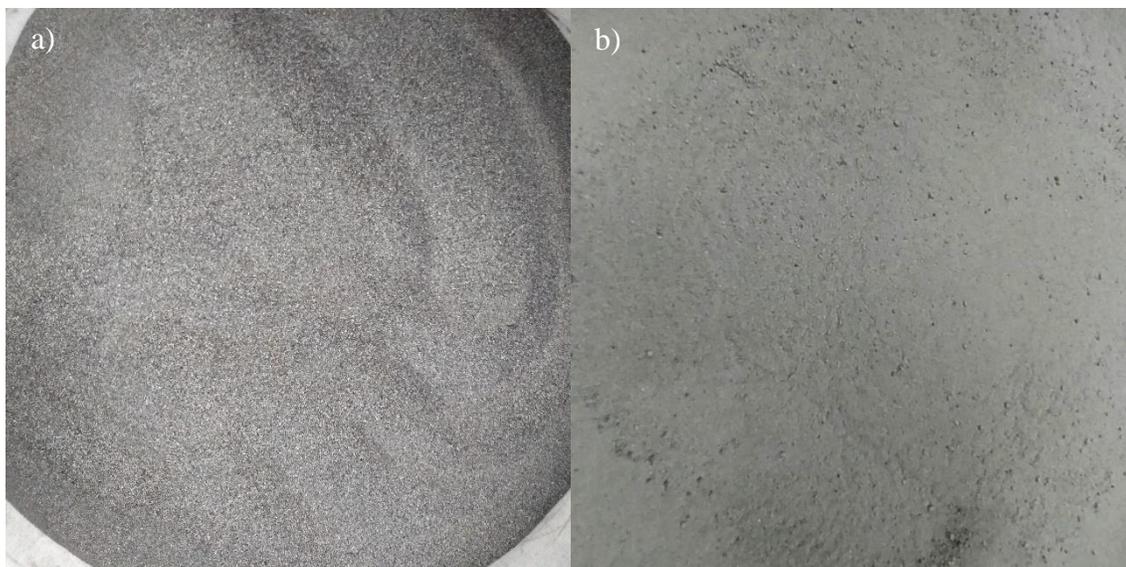


Figura 14.- Ceniza de bagazo de caña (a) y ceniza volante sin tratamiento (b)

Fuente: Elaboración propia



Figura 15.- Cuarteo de cementantes

Fuente: Elaboración propia

### **Fluorescencia de Rayos X**

La composición química del cemento y las puzolanas se obtuvo mediante el empleo del equipo de Fluorescencia de Rayos X (FRX) PANalytical EPSILON 3XL, para el cual se preparó una pastilla con 10 g de muestra en combinación con 1 g de cera sometida a presión constante de 10 toneladas, durante un minuto, en una prensa Atlas. En la pastilla los rayos X incidieron provocando la excitación de la muestra y arrojando la

composición elemental de la misma, expresada en óxidos, en cantidades de porcentajes para los elementos mayoritarios y en partes por millón (ppm) para los minoritarios.

### **Distribución de Tamaño de Partícula**

El tamaño de partículas de los cementantes se obtuvo mediante el equipo de Distribución de Tamaños de Partículas MICROTRAC 3000, el cual se basa en la difracción láser. Este equipo mide ángulos de dispersión entre 0 y 172° de incidencia con las muestras en polvo, logrando un rango de tamaños de entre 0.289 y 1408  $\mu\text{m}$ .

### **Difracción de Rayos X**

La composición mineralógica de los cementantes se obtuvo mediante la Difracción de Rayos X (DRX), con el uso del equipo PANalytical Empyrean, el cual cuenta con radiación  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda_{\text{RX}} = 1.5418 \text{ \AA}$ ). Para esta técnica se emplearon 2 g de muestra en polvo de cada cementante, las cuales se colocaron en el portamuestras de acrílico previamente purgado y colocado en el difractómetro. El análisis se realizó dentro del intervalo de 5 a 70° del ángulo  $2\theta$ , con lo cual se obtuvieron difractogramas para cada material, los cuales fueron analizados con el software X'pert High Score Plus, para determinar los minerales presentes en cada cementante.

### **Microscopía Electrónica de Barrido**

La morfología y la corroboración del tamaño de partículas de cada cementante se obtuvo mediante el uso del Microscopio Electrónico de Barrido Jeol JSM-6510 LV, con condiciones de 15 kV como voltaje de aceleración, ampliaciones de 500, 1000, 1500 y 2000x y barra de escala de 10  $\mu\text{m}$ . Para esto se utilizaron muestras en polvo de alrededor de 2 g, que presentaran conductividad, por lo cual fue necesario realizar un recubrimiento de oro – paladio previo a la colocación de la muestra en el microscopio.

### **Determinación de la Densidad**

En primera instancia, la densidad del CP y las puzolanas se determinó haciendo uso del matraz *Le Chatelier*, como indica la norma ASTM C 188. El matraz fue llenado hasta la marca de los 0 ml, con un líquido libre de agua, para evitar la hidratación y posterior reacción de los cementantes; en este caso siendo keroseno mantenido a una temperatura

de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  mediante el sumergido del matraz en agua. Posteriormente se procedió a introducir la cantidad necesaria de cementante mediante un embudo de cuello largo para evitar la adherencia de éstos en las paredes del matraz; en este caso siendo  $64 \text{ g} \pm 0.05 \text{ g}$  para el CP y  $50 \text{ g} \pm 0.05 \text{ g}$  para el resto de las puzolanas, esto con la finalidad de que la graduación del matraz convencional resultara adecuada para la toma de lecturas. A continuación, se procedió a eliminar las burbujas de aire atrapadas dentro del matraz, mediante la inclinación y rotación de éste en una superficie plana. Una vez eliminado el aire, se llevó el matraz al baño de agua para seguir manteniendo la temperatura de  $23^{\circ}\text{C}$  y una vez estable se registró la lectura indicada en la serie superior del matraz. El cálculo de la densidad se realizó dividiendo la cantidad de material entre el volumen desplazado dentro del matraz. El procedimiento se realizó tres veces por cementante, para obtener un promedio confiable.

Por otra parte, los resultados se corroboraron mediante el uso de un multiplicómetro Quantachrome modelo MVP – D160E automático, para el cálculo de densidades de sólidos, el cual se basa en el principio de Arquímedes de desplazamiento de líquidos y la ley de Boyle de expansión de gases para determinar el volumen real de un sólido con mayor exactitud, dado que el empleo de gases como helio o nitrógeno, al presentar tamaños por debajo de los 0.2 nm en sus partículas, pueden ingresar en prácticamente todos los poros presentes en el material analizado, permitiendo la medición de densidades con mayor precisión.

### **Índice de Actividad Puzolánica**

El empleo de materiales puzolánicos del tipo cenizas volantes y puzolanas naturales, de acuerdo con la norma ASTM C 311, requiere el cumplimiento de diversas propiedades, entre ellas la reactividad al interaccionar con el CP, propiedad mejor conocida como índice de actividad puzolánica. El método marcado por esta normativa relaciona la actividad puzolánica con la densidad y reducción/aumento de la cantidad de agua para mantener una fluidez constante, lo que propicia que existan variaciones en las relaciones agua – material cementante y que no exista una evaluación correcta del índice de actividad puzolánica. Por lo anterior, el procedimiento de la sección 26 de la norma ASTM C 311 se modificó como lo indicaron Bentz et al., en 2011, los cuales

propusieron realizar la sustitución de puzolanas en partes de volumen en lugar de masa, manteniendo constantes las cantidades de agua y arena, buscando conseguir la poca o nula alteración de la fluidez y evitando con esto las variaciones de relación agua – material cementante, para obtener una verdadera evaluación de la actividad puzolánica.

El método consistió en la elaboración de cubos de mortero con relación arena – cementante 2.75:1 y relación agua-cementante de 0.485. En primera instancia, elaborando una mezcla de control con 100% CP como material cementante y el resto de las mezclas con 20% de sustitución en volumen de CP por cada puzolana. El proceso de mezclado se llevó a cabo mediante el procedimiento indicado en la norma ASTM C 305, empleando las cantidades de material indicadas en la norma ASTM C 109 para cada mezcla, siendo éstas de 500 g de material cementante, 1375 g de arena estándar graduada y 242 ml de agua, para elaborar 6 cubos para las edades de 7 y 28 días (3 por edad), los cuales después de su elaboración pasaron por un proceso de curado en inmersión en agua saturada con 3% de cal, hasta el día del ensayo de resistencia a compresión. Finalmente, el cálculo de índice de actividad puzolánica se obtuvo dividiendo la resistencia promedio obtenida de cada mezcla con sustitución de puzolanas, entre la resistencia promedio obtenida de la mezcla de control y multiplicando el valor por 100 para representarlo como porcentaje.

#### **4.1.1.2 Agregados**

Con base en la propuesta planteada en el proyecto, se elaboraron mezclas de mortero haciendo uso únicamente de agregado fino de origen calizo, el cual fue caracterizado de acuerdo con la norma ASTM C 33, la cual establece las especificaciones que deben cumplir los agregados para concreto, entre las que se incluyen la distribución granulométrica, los pesos volumétricos (seco suelto y seco compacto), el contenido de humedad, densidad y absorción, propiedades útiles principalmente para el diseño de mezcla.

Previo a la realización de las pruebas, se llevó a cabo el muestreo del agregado fino, como lo indica la norma ASTM D 75 para material almacenado en pilas. El muestreo consistió en la toma de tres muestras, que se componían de tres partes del material almacenado, un tercio de la parte superior, un tercio de la parte intermedia y un tercio de

la parte inferior. Esto con la finalidad de no dejar partículas que posiblemente se pudieran segregar, obteniendo muestras con mayor homogeneidad y representatividad del lote total. Posteriormente, cada muestra tomada se almacenó en sacos hasta el momento de realizar la reducción de muestras mediante el cuarteo, como se indica en la norma ASTM C 702. El cuarteo consistió en la colocación de cada muestra en una superficie plana previamente limpiada, para evitar la contaminación de la muestra. Dicha pila de material se cambió de lugar tres veces con ayuda de una pala. En la tercera vez, se procedió a depositar el material en forma de cono sobre la superficie plana, posteriormente se hizo presión en la parte superior de la pila para obtener una cara superior plana y proceder a dividir la muestra en cuatro partes iguales como se muestra en la Figura 16. Posteriormente se descartaron dos de las partes cuidando que se encontraran en diagonal y se repitió el procedimiento hasta reducir las muestras al tamaño deseado para cada prueba.



Figura 16.- Cuarteo del agregado fino

Fuente: Elaboración propia

### **Análisis granulométrico**

El análisis granulométrico se llevó a cabo mediante lo establecido en la norma ASTM C 136 para agregado fino. Mediante el cuarteo se obtuvieron tres muestras representativas de 1.2 kg de material, aproximadamente, siendo este peso posterior al secado a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta masa constante. Los tamices utilizados se acomodaron

en orden descendente de abertura de acuerdo con el número de tamiz (4, 8, 16, 30, 50 y 100) y añadiendo a éstos una tapa y una base para evitar la pérdida de material (Figura 17). El proceso de tamizado se llevó a cabo de manera mecánica durante lapsos de 5 minutos. Posteriormente, se procedió a tomar los pesos retenidos en cada tamiz y se representaron como porcentajes retenidos y retenidos acumulados, con los cuales se obtuvieron los porcentajes de material que pasaba cada tamiz para el posterior graficado de la curva granulométrica. Aunado al análisis granulométrico, se procedió a realizar el cálculo del módulo de finura del agregado fino mediante la suma de los porcentajes retenidos acumulados en cada tamiz y dividiendo el valor entre 100.



Figura 17.- Tamices para granulometría del agregado fino  
Fuente: Elaboración propia

### **Pesos volumétricos**

La determinación de los pesos volumétricos seco suelto (PVSS) y seco compacto (PVSC) del agregado fino se llevó a cabo mediante la norma ASTM C 29. Las tres muestras obtenidas mediante el cuarteo para estas pruebas fueron de alrededor de 40 kg posterior al secado, siendo esta cantidad el doble de la necesaria para llenar el recipiente de peso y volumen conocido tal como lo indica la norma mencionada. Para el caso del

PVSS, el recipiente de medición se llenó en tres capas dejando, caer el material con un cucharón, a una altura de 5 cm con respecto al nivel del fondo del recipiente y posteriormente con respecto al nivel del material. Al llenar el recipiente medidor, se procedió a nivelar el agregado fino con una regla de aluminio para evitar la acumulación de material en la parte superior que excediera las dimensiones del recipiente (Figura 18). Posteriormente, se determinó el peso del material dentro del recipiente y se dividió entre el volumen que abarcó para obtener el peso volumétrico. Por otro lado, el proceso de llenado para el PVSC se realizó mediante la compactación manual con una varilla, haciendo 25 compactaciones por cada una de las tres capas de llenado, cuidando en la primer capa no golpear el fondo del recipiente y en el resto de las capas no exceder el límite de la capa anterior por más de 2 cm. El resto del procedimiento en cuanto a nivelado, pesado y cálculos para determinar el PVSC, se realizó de la misma manera que en el caso del PVSS.



Figura 18.- Determinación de PVSS y PVSC

Fuente: Elaboración propia

### **Contenido de humedad**

El contenido de humedad del agregado fino se determinó previo a cada mezclado para evitar la alteración de la relación agua – cementante de los sistemas en estudio. Para esto se siguió el procedimiento indicado en la norma ASTM C 566, el cual consistió en tomar muestras de aproximadamente 1 kg de agregado fino, las cuales se introdujeron en un

horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas; es decir, el procedimiento se realizaba un día antes de cada mezclado (Figura 19). El contenido de humedad se obtuvo mediante la división de la diferencia del peso inicial y el peso seco entre el peso seco, esto multiplicado por 100 para expresarlo en porcentaje y utilizarlo para realizar correcciones por humedad en los diseños de mezcla.



Figura 19.- Determinación del contenido de humedad en el agregado fino

Fuente: Elaboración propia

### **Densidad y absorción**

La densidad y la absorción del agregado fino se realizó mediante el método gravimétrico establecido en la norma ASTM C 128, para el cual se utilizó un picnómetro. Para esta prueba, se utilizaron tres muestras, las cuales requirieron de preparación previa. Esta preparación consistió en la saturación del material mediante la inmersión en agua durante 24 horas, esto con el fin de llenar todos los poros del agregado. Posteriormente, se procedió al secado superficial para obtener un material saturado superficialmente seco (sss), en este caso siguiendo el procedimiento de secado al aire y corroborando la condición sss mediante el uso de un mini cono troncocónico en el cual la arena saturada era colocada en tres capas, las cuales se compactaban mediante 25 apisonamientos (Figura 20). Una vez lleno el molde, se procedía a retirarlo evitando mover el material, permitiendo que éste se desbordara manteniendo un pequeño pico en el centro. En caso de no desbordarse o desbordarse por completo, la condición sss no se alcanzaba y el procedimiento se repetía.

Una vez alcanzada la condición sss y previamente obtenidos los pesos del picnómetro seco y el picnómetro con agua hasta la marca de calibración, se procedió con el método gravimétrico, el cual consistió en llenar el picnómetro con 500 g del agregado sss para posteriormente llenarlo con agua hasta el 90% de capacidad. Posteriormente éste se agitó levemente de manera manual para eliminar las burbujas de aire atrapadas. Una vez eliminadas, se sumergió parcialmente en agua a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , hasta obtener dicha temperatura constante, para posteriormente registrar el peso del picnómetro, el material y el agua. A continuación, se retiró el agregado y se secó hasta lograr una masa constante a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  por 1 hora y se determinó el peso. Finalmente, se procedió a hacer los cálculos para determinar la densidad, mediante la división de la masa del agregado sss entre la suma de la masa del picnómetro con agua hasta la marca de calibración, más el agregado sss, menos el peso del picnómetro, con el agregado sss y agua hasta el 90%, y la absorción mediante la división de la diferencia del peso sss menos el peso seco entre el peso seco.



Figura 20.- Equipo para densidad y absorción del agregado fino

Fuente: Elaboración propia

#### **4.1.2. Diseño y elaboración de mezclas preliminares**

Para el empleo de materiales puzolánicos como metacaolín, ceniza volante o ceniza de bagazo de caña de azúcar, como sustituto parcial del cemento portland, diversos autores han propuesto porcentajes óptimos de sustitución que se han replicado en diferentes

investigaciones. Estos porcentajes son comúnmente propuestos principalmente con base en el desempeño mecánico de las matrices cementantes; sin embargo, las optimizaciones de porcentajes de sustitución de CP por puzolanas pueden ser variables, en función del origen, composición química o tratamiento que reciba el material. Dicho esto, y con la finalidad de obtener porcentajes adecuados de sustitución, se elaboraron mezclas preliminares con sustituciones parciales de CP por cada una de las puzolanas (sin combinaciones entre ellas) en porcentajes de 5, 10, 15 y 20%, de las cuales se evaluó el comportamiento de resistencia a compresión.

El diseño de estas mezclas se llevó a cabo a partir del proporcionamiento para morteros señalado en la norma ASTM C 109, el cual establece relaciones arena – cementante de 2.75:1 y agua – cementante de 0.485, mismas que fueron empleadas en este proyecto realizando las sustituciones de CP en volumen de material cementante y haciendo uso de arena sílica estándar. Lo anterior, con la finalidad de plantear un proporcionamiento reproducible mediante el uso de la normativa mencionada. Cabe mencionar que la elaboración de mezclas se llevó a cabo mediante el procedimiento y las especificaciones que marca la norma ASTM C 305 para el mezclado de morteros.

#### **4.1.2.1 Evaluación de la resistencia a la compresión**

Consecutivamente al mezclado de las matrices cementantes preliminares, se procedió al proceso de curado de los especímenes de mortero para su posterior prueba de resistencia a las edades de 7, 14 y 28 días. Este proceso de curado se realizó mediante la inmersión total en agua saturada con cal al 3%, al igual que en la evaluación de índice de actividad puzolánica. El ensayo de resistencia a la compresión se realizó en cubos de mortero de 50 mm por lado, empleando triplicados de estos para cada edad de ensayo, así como respetando la variabilidad permisible entre las resistencias obtenidas de cada cubo, tal como lo establece la norma ASTM C 109 (Figura 21). Posterior a la obtención de resistencias promedio para cada edad de ensayo y cada porcentaje evaluado, se determinó el porcentaje óptimo de sustitución de cada puzolana, considerando principalmente las mayores resistencias obtenidas, el comportamiento a lo largo de los 28 días y el comportamiento de cada porcentaje con respecto al resto.

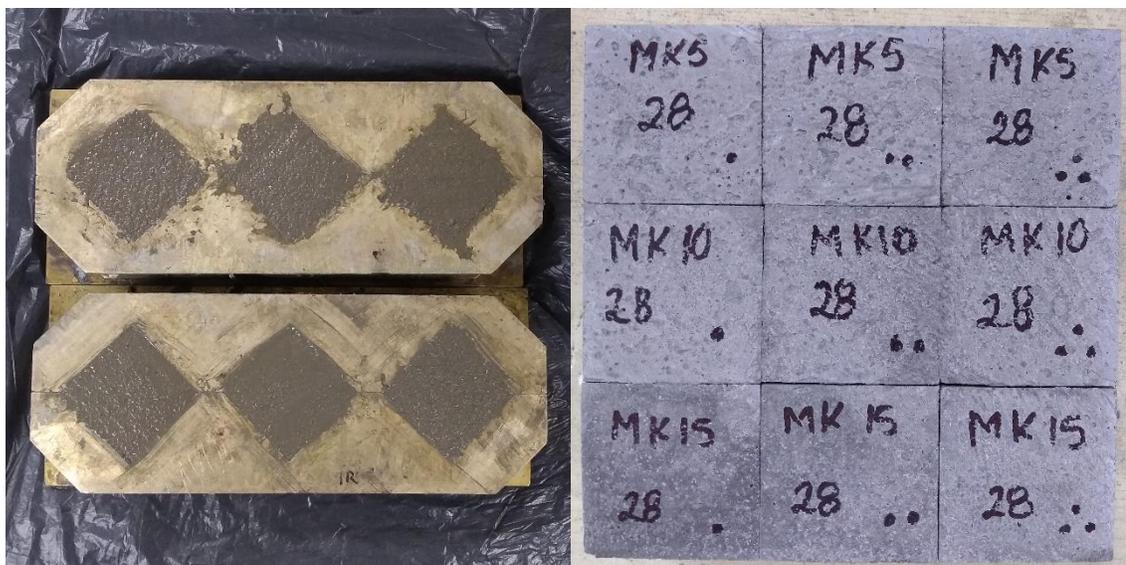


Figura 21.- Especímenes para resistencia a compresión ASTM C 109

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2.2 Evaluación de la fluidez

A partir de la elección del porcentaje óptimo de sustitución para cada puzolana, se establecieron las combinaciones pertinentes necesarias para el alcance de los objetivos del proyecto, como se muestra en la Tabla 4. Con base en ellas se estudió el comportamiento de los sistemas cementantes en cuanto a fluidez y trabajabilidad, así como la influencia sobre estas propiedades del agregado fino de origen calizo, previo a la elaboración de las mezclas finales. Para esto se elaboraron morteros con las relaciones y formas de sustitución de CP por puzolanas indicadas en el apartado 4.1.2.

Tabla 4.- Porcentajes de sustitución de CP por MCS

|            |           | <b>Nomenclatura</b> |           |           |           |           |
|------------|-----------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>MCS</b> | <b>MC</b> | <b>M1</b>           | <b>M2</b> | <b>M3</b> | <b>M4</b> | <b>M5</b> |
| <b>CP</b>  | 100       | 80                  | 80        | 80        | 80        | 80        |
| <b>MK</b>  | -         | 20                  | -         | -         | 10        | 10        |
| <b>CV</b>  | -         | -                   | 20        | -         | 10        | -         |
| <b>CB</b>  | -         | -                   | -         | 20        | -         | 10        |

Cabe destacarse que, para un mejor entendimiento de las gráficas presentadas en el apartado de resultados, las nomenclaturas se tomaran como se muestra:

|    |   |           |
|----|---|-----------|
| MC | → | 100CP     |
| M1 | → | 20MK      |
| M2 | → | 20CV      |
| M3 | → | 20CB      |
| M4 | → | 10MK-10CV |
| M5 | → | 10MK-10CB |

Donde las letras indican el material presente en la matriz (CP – Cemento portland, MK – Metacaolín, CV – Ceniza volante y CB – Ceniza de bagazo) y el número la cantidad de material dentro de la matriz cementante.

La evaluación de fluidez se realizó mediante el procedimiento de la norma ASTM C 1437 y haciendo uso de una mesa de fluidez manual estándar de 250 mm de diámetro y un cono de bronce de 100 mm de base inferior y 70 mm de base superior como lo indica la norma ASTM C 230. Una vez elaborada la mezcla de mortero a evaluar, se llenó el cono de bronce en dos capas, compactando cada capa con 20 apisonamientos. Posteriormente se enrazó el cono con una regla, asegurando la uniformidad de la cara superior del mortero y manteniendo limpio el resto de la mesa. Un minuto después del enrase, el cono se levantó y la mesa se dejó caer 25 veces en 15 segundos (Figura 22). Posteriormente, se midieron cuatro diámetros de la masa de mortero final, los cuales se promediaron. Finalmente, la fluidez de cada mortero se obtuvo mediante la división de la diferencia de la base final e inicial de la mezcla, entre la base inicial, es decir, la base del cono de bronce, esto multiplicado por 100 para ser expresado como porcentaje.



Figura 22.- Prueba de fluidez en matriz de referencia (MC) ASTM 1437

Fuente: Elaboración propia

Considerando la fluidez obtenida por cada mortero, se optó por adicionar un aditivo superplastificante (SP), con la finalidad de obtener la fluidez óptima que marca la norma ASTM C 109 de  $110 \pm 5\%$  sin necesidad de incrementar la cantidad de agua. Para esto, se optimizó la cantidad de aditivo para cada mezcla en función de curvas de fluidez obtenidas mediante la evaluación de distintas cantidades de adición de aditivo SP. Cabe mencionar que, aunque las cantidades de aditivo que se agregaron a los sistemas cementantes eran bajas, éstas se consideraron como parte del agua de mezcla con el fin de evitar la alteración de la relación agua – cementantes. Además, dicho porcentaje de fluidez se consideró puesto que se encuentra estandarizado en la norma mencionada y conlleva a la formación de morteros de consistencia adecuada para la colocación y moldeo de los especímenes empleados en el proyecto.

#### **4.1.3. Diseño y elaboración de mezclas optimizadas**

Una vez optimizados los porcentajes de sustitución de CP por puzolanas, así como las combinaciones entre ellas, y habiendo evaluado la fluidez y optimizado la cantidad de aditivo para cada mezcla, se establecieron los diseños finales de mezcla, tomando como base las relaciones arena – cementante y agua – cementante de 2.75:1 y 0.485, respectivamente, de acuerdo con el diseño para morteros propuesto por la norma ASTM C 109. Cabe resaltar que las sustituciones de CP por puzolanas se realizaron en función del volumen total de cementante, esto con el fin de concordar con el procedimiento seguido en la evaluación de índice de actividad puzolánica.

Por otro lado, es importante mencionar que la adición de aditivo a las mezclas, al igual que en las mezclas preliminares, se realizó tomando en cuenta la cantidad de aditivo como parte del agua de mezcla, para evitar la alteración de la relación agua – cementante. Para esto fue necesario determinar la densidad del aditivo, de acuerdo con el método establecido en la sección 18 de la norma ASTM C 494. Dicho procedimiento consistió en colocar una muestra del aditivo SP en una probeta graduada de 250 ml, en la cual se introdujo un densímetro. Consecutivamente, la probeta con el aditivo y el densímetro se llevó a baño maría para alcanzar una temperatura estable de  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ . Alcanzada dicha temperatura, se procedió a tomar la lectura en el densímetro. Este procedimiento se realizó en tres ocasiones, para corroborar el resultado obtenido.

Posterior al diseño de cada mezcla, se procedió a la elaboración de las mismas con base a lo establecido en la norma ASTM C 305 para el mezclado de morteros. No obstante, dicha normativa abarca el mezclado de proporciones mínimas de mezcla en mezcladoras de 4.73 litros de capacidad, por lo que en este caso se optó por adecuar el procedimiento con base en la norma ASTM C 94 para elaborar cantidades de mezcla mayores en una mezcladora Hobart de 20 litros de capacidad (Figura 23a).



Figura 23.- Proceso de mezclado de los sistemas cementantes

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento adaptado en primera instancia consistió en realizar un premezclado del CP y las puzolanas hasta obtener un cementante homogéneo (Figura 23b). De igual

forma, en el caso del aditivo, éste se adicionó y se mezcló previamente con el agua de mezcla (Figura 23c). Una vez homogenizadas ambas partes, se procedió con el mezclado. Primeramente, se adicionó parte del agua de mezcla en el tazón de la mezcladora junto con el cementante y se mezcló durante 30 segundos, a velocidad baja ( $140 \pm 5$  rev/min). Posteriormente se añadió lentamente el agregado fino durante un periodo de 30 segundos con la mezcladora detenida dadas sus condiciones de uso. A su vez, se añadió el resto de agua de mezcla. Una vez adicionado el agregado fino y el agua, se cambió la velocidad de mezclado a media ( $285 \pm 10$  rev/min) y se mezcló durante 1 minuto. Posteriormente se detuvo el mezclado durante 1 minuto y 30 segundos. Y, finalmente, pasado el tiempo se procedió al mezclado nuevamente, a velocidad media, durante 2 minutos y 30 segundos (6 minutos de mezclado total) hasta alcanzar una apariencia homogénea en la mezcla (Figura 23d).

#### **4.2. Etapa II. Evaluación de propiedades físicas y resistencia a compresión**

En esta etapa se abarcó el estudio de la evolución de las propiedades físicas atribuibles a la durabilidad y la resistencia a la compresión de los sistemas cementantes en estudio. Dentro de las propiedades físicas se evaluaron la resistividad eléctrica, la velocidad de pulso ultrasónico y la permeabilidad, dado que son propiedades comúnmente relacionadas con la densificación de las matrices cementantes. Esto se realizó considerando tres ambientes de exposición. El primero, considerado ambiente de control o de curado estándar, consistió en la inmersión de los especímenes a evaluar en agua saturada con cal al 3%. El segundo considerado ambiente de sulfatos consistió en la inmersión de los especímenes en una solución de sulfato de magnesio al 5% en agua compuesta por 90% agua normal y 10% agua destilada. Y el tercero, considerado ambiente de carbonatación, consistió en un ambiente simulado en una cámara de carbonatación con  $65 \pm 5\%$  de humedad relativa (HR),  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura (T) y concentración de  $\text{CO}_2$  de  $8 \pm 0.5\%$ . La exposición y evaluación de las propiedades mencionadas se realizó en un periodo de 180 días, con mediciones semanales en el caso de las propiedades físicas y evaluaciones periódicas en el caso de la resistencia a compresión.

#### 4.2.1. Resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó mediante el método de prueba marcado en la norma ASTM C 109. Para esto se elaboraron tres cubos de 50 mm de lado para cada edad de ensayo, las cuales fueron 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días para los especímenes en curado normal y 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días para los especímenes expuestos a los ambientes agresivos, posterior a los 28 días de curado estándar (18 especímenes por ambiente, 54 por sistema cementante). Éstos eran moldeados mediante el llenado de moldes en dos capas, realizando 32 apisonamientos en cada caso. Al cumplimiento de cada edad de ensayo, los cubos fueron retirados de la exposición o curado en el que se encontraban para ser medidos en sus tres lados con un vernier, considerando la cara sometida a la carga de compresión, así como pesados en una balanza con precisión de 0.1 g. Posterior a esto, cada espécimen era llevado a una prensa hidráulica de uso manual (Figura 24), en la cual se sometían a una fuerza de compresión controlada que se aplicaba a  $90 \pm 5$  kg/s, hasta el fallo de la probeta. El valor de carga final soportada era registrado y dividido entre el área de la cara superior del cubo a la hora del ensayo para obtener el esfuerzo o resistencia a compresión. El procedimiento se repetía con el resto de los cubos de cada triplicado.



Figura 24.- Prensa hidráulica y cubo post-ensayo

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para obtener a la resistencia a compresión promedio de cada sistema cementante, a cada edad, se corroboraba que no existieran variaciones mayores que el 8.7% de las resistencias de cada cubo, con respecto al promedio. En caso de encontrarse tal variación, se descartaba el cubo con la resistencia más alejada del promedio y se corroboraba que los dos cubos restantes cumplieran una variación máxima de resistencia con respecto al promedio de 7.6%.

#### **4.2.2. Resistividad eléctrica**

La determinación de la resistividad eléctrica de los sistemas cementantes se realizó mediante el método de cuatro puntos, utilizando el dispositivo Resipod de la marca Proceq, basado en el principio de la sonda de Wenner, el cual consiste en aplicar una corriente a través de los iones presentes en el líquido de los poros a dos sondas exteriores y medir la diferencia de potencial entre las sondas interiores, para posteriormente medir la resistividad en función de la distancia entre las sondas o puntos del dispositivo, en este caso, utilizando uno con distancia de 38 mm entre ellas, por lo que fue necesario elaborar especímenes que cumplieran un mínimo de 120 mm de ancho y 100 mm de altura, por lo que se optó por elaborar especímenes cilíndricos de 150 mm de diámetro por 100 mm de altura. Estas probetas se obtuvieron a partir de la elaboración de cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, los cuales fueron cortados para obtener las rodajas centrales con los 100 mm de altura ya mencionados (3 por ambiente de exposición, 9 por sistema cementante), esto para evitar la toma de rodajas exteriores con posible sedimentación o segregación de material. Lo anterior buscando ser empleados en el resto de las pruebas no destructivas, cumpliendo los requerimientos necesarios. Cabe mencionar que estas rodajas fueron recubiertas en su perímetro con pintura epóxica para incitar al deterioro en la parte central, dado que era la zona en la que se realizaría la medición. La elaboración de dichos cilindros se llevó a cabo mediante el procedimiento de llenado marcado en la norma ASTM C 192 la cual indica el llenado en tres capas compactadas cada una con 25 apisonamientos evitando golpear el fondo del molde en la primer capa y evitando atravesar en más de dos centímetros las capas anteriores a la segunda y a la tercera. Dichos especímenes se llevaron al curado estándar y a la exposición a los ambientes agresivos post-curado

durante 180 días, lapso en el que se dio seguimiento semanal a cada uno, lo cual se realizó para todas las pruebas no destructivas.

El proceso de medición consistió en colocar los cuatro puntos del dispositivo previamente humedecidos sobre la superficie de los especímenes cilíndricos, la cual era también humedecida en el caso de las muestras que estaban en exposición a CO<sub>2</sub>; en el ambiente de control y de sulfatos. Este proceso no era requerido, dado que en ambos ambientes los especímenes se encontraban en inmersión, por lo que presentaban la humedad requerida para la medición. Una vez colocado el dispositivo en la superficie de los especímenes, se procedía a presionar firmemente en posición vertical hacia abajo, para que las cuatro sondas estuvieran en total contacto con las probetas; posteriormente se tomaba la lectura del dispositivo, una vez que ésta se encontrara estable por al menos 10 segundos. Cabe mencionar que para cada probeta se tomaban cuatro lecturas en la cara superior de la muestra, formando los ejes de un octágono como se muestra en la Figura 25.

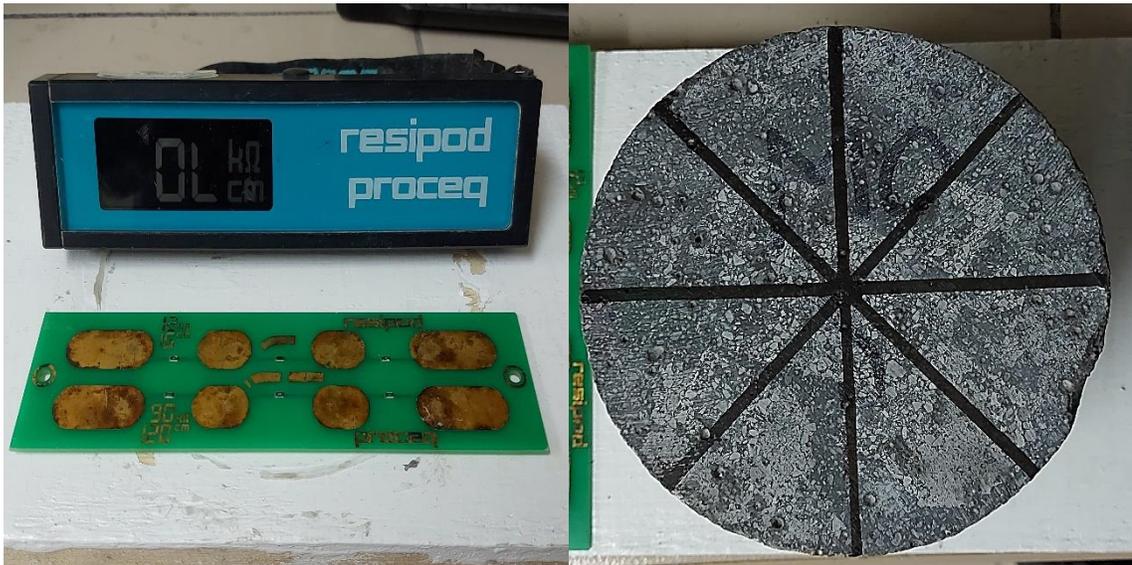


Figura 25.- Equipo de resistividad eléctrica y zonas de medición

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.3. Velocidad de pulso ultrasónico

La prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU) fue llevada a cabo mediante el seguimiento del método de prueba establecido en la norma ASTM C 597. Para esto fue necesario elaborar especímenes que cumplieran el requerimiento mínimo de 65 mm de

longitud, por lo que se pudieron emplear las probetas cilíndricas descritas en el apartado anterior.

Las mediciones se llevaron a cabo mediante el medidor de pulso ultrasónico Proceq Pundit Lab (Figura 26), el cual consiste en un dispositivo con un transductor electro – acústico que envía ondas de pulso longitudinales a través de un cuerpo o material, las cuales son captadas por un transductor receptor a una distancia  $L$ , el cual las convierte en energía eléctrica procesada mediante un dispositivo que se encarga de medir el tiempo de transmisión  $T$  que tarda en llegar la onda de pulso desde el transductor emisor hasta el receptor. Lo anterior bajo algunos parámetros de medición estándar que, en este caso, se establecieron en una frecuencia de resonancia de 54 kHz, duración del pulso automática y tensión de excitación de 125 V para todas las mediciones.



Figura 26.- Medidor de pulso ultrasónico Pundit Lab

Fuente: Elaboración propia

Una vez conectados los transductores al dispositivo de medición, éste se calibraba mediante el uso de una barra cilíndrica de referencia con tiempo de transmisión  $T$  conocido de 25.4  $\mu$ s. Para esto los transductores eran cubiertos con una capa de gel, con el fin de mejorar la conductividad de las ondas de pulso. Posterior a la calibración, se procedía con la medición colocando los transductores previamente cubiertos en el centro de cada cilindro de manera horizontal, para lograr una transmisión directa entre ellos. Consecutivamente, se enviaban las ondas de pulso mediante el dispositivo, el cual, al ser automatizado, obtenía el dato  $T$  una vez estabilizada la señal. Finalmente, se obtenía la

velocidad de pulso mediante la división de la distancia entre los transductores en metros, entre el tiempo de transmisión en segundos.

#### 4.2.4. Permeabilidad al aire

Para la medición de permeabilidad al aire, al igual que el resto de pruebas no destructivas, se utilizaron las probetas cilíndricas ya mencionadas en el apartado 4.2.2, esto para cumplir el mínimo de 120 mm de diámetro requerido por el equipo de medición, el cual fue un permeabilímetro al aire Torrent de la marca Proceq (Figura 27), mismo que consiste en una celda de doble cámara de vacío de  $100 \pm 5$  mm de diámetro, la cual se conecta a un regulador de presión, que a su vez está conectado a un dispositivo de control en el cual se calculan y registran principalmente los valores  $kT$  y  $L$  conocidos también como coeficiente de permeabilidad al aire ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2$ ) y profundidad de penetración del vacío (mm).



Figura 27.- Permeabilímetro al aire Torrent

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento de esta prueba consistió en colocar la celda de vacío en la cara superior de la probeta, registrando el valor de la presión atmosférica (Pa) marcada por el dispositivo al momento de la prueba. Esto con la previa calibración y ajuste del equipo, el cual consistía en la puesta en marcha del vacío durante 10 minutos. Posteriormente, el controlador se ponía en marcha y se cerraba la válvula roja del equipo, para comenzar el vacío en la probeta. Pasados 30 segundos se cerraba la válvula azul y se abría a los 5 segundos para regular la presión en el dispositivo; nuevamente pasados 25 segundos, en un tiempo  $t$  de 60 segundos, se cerraba la válvula azul y se mantenía así por el resto del ensayo, el cual tenía una duración final de 720 segundos. Pasado ese tiempo, se

registraba el coeficiente de permeabilidad y la profundidad de penetración del vacío y se concluía la prueba mediante el cierre de las válvulas para retirar la celda de la probeta.

### **4.3. Etapa III. Evaluación de la durabilidad**

En esta etapa se abarca el estudio del comportamiento de los sistemas cementantes ante los cambios físicos y químicos producidos por los agentes nocivos propuestos como lo son el CO<sub>2</sub> y el MgSO<sub>4</sub>, lo cual se puede interpretar como el estudio de la durabilidad de los sistemas cementantes ante la carbonatación y el ataque de sulfatos, incluyendo también el comportamiento del acero de refuerzo embebido en las matrices cementantes ante el fenómeno de corrosión. Cada fenómeno fue evaluado durante un periodo establecido de 180 días, con mediciones periódicas durante ese lapso posterior a un curado estándar de 28 días en agua saturada, para desarrollar las propiedades óptimas de cada sistema.

#### **4.3.1. Carbonatación**

##### **4.3.1.1 Avance de la carbonatación acelerada**

El ensayo de carbonatación de los sistemas cementantes en condición acelerada se llevó a cabo en probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm, las cuales se elaboraron a partir del proceso de mezclado descrito en el apartado 4.1.3. Posterior al mezclado, las barras se dejaron fraguar durante 24 horas en condiciones de laboratorio, para después llevarlas al curado en inmersión en agua saturada con cal durante 28 días, periodo estándar para obtener las propiedades óptimas de una matriz con base en cemento. Posterior al curado, las probetas fueron adecuadas a las condiciones de carbonatación mediante la exposición en una cámara ambiental a  $40 \pm 2^\circ\text{C}$  durante 24 horas y, consecutivamente, se recubrieron con pintura epóxica en sus caras más pequeñas, con el fin de inducir la carbonatación por los laterales de cada barra (Figura 28a). Terminado el proceso de adecuación, las probetas se colocaron en una cámara de carbonatación genérica, la cual se mantuvo con una humedad relativa (HR) de  $65 \pm 5\%$ , una temperatura (T) de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$  y una concentración de CO<sub>2</sub> de  $8 \pm 0.5\%$ , durante toda la experimentación, mediante un controlador Honeywell modelo UDC-2500 (Figura 28b).

Las mediciones se realizaron en edades semanales hasta los 90 días de exposición para cada sistema cementante. Posterior a esa fecha se realizaron a 120, 150 y 180 días de exposición, mediante la aplicación de una solución de fenolftaleína al 1% en etanol al 96%, es decir, 1 g de fenolftaleína por cada 100 ml de alcohol etílico al 96%. Cabe mencionar que de dicha solución se corroboró el funcionamiento como indicador de pH a partir de su disolución en una solución de Buffer con pH de 7 y otro con pH de 12, obteniéndose una solución incolora y una de color rosa intenso, respectivamente.



Figura 28.- Recubrimiento epóxico en barras de carbonatación y cámara de exposición

Fuente: Elaboración propia

El proceso de medición consistió en el retiro de las probetas de la cámara de carbonatación. Estas probetas fueron cortadas transversalmente para obtener pequeñas muestras de 40 x 40 x 15 mm, las cuales fueron limpiadas utilizando un cepillo de cerdas plásticas, para retirar las partículas que pudieran intervenir en la medición. Cabe mencionar que después de cada corte, el resto de las probetas eran llevadas nuevamente a la cámara de carbonatación, posterior al aplicado del recubrimiento en las caras seccionadas. Consecutivamente se aplicó la solución de fenolftaleína mediante un atomizador y se dejó actuar durante dos minutos, para obtener la marca incolora en la zona carbonatada con pH menor que 8 y el color rosa intenso en la zona no carbonatada,

con un pH mayor que 12. Una vez identificados los cambios de color, se procedió con la medición haciendo uso de un Vernier y tomando cuatro puntos de cada lado de la muestra (16 en total), como se muestra en la Figura 29. Las cuatro lecturas de cada lado se promediaron entre sí para obtener el avance de carbonatación de cada cara y después se promediaron los datos de las cuatro caras para obtener el avance de carbonatación a cada edad.

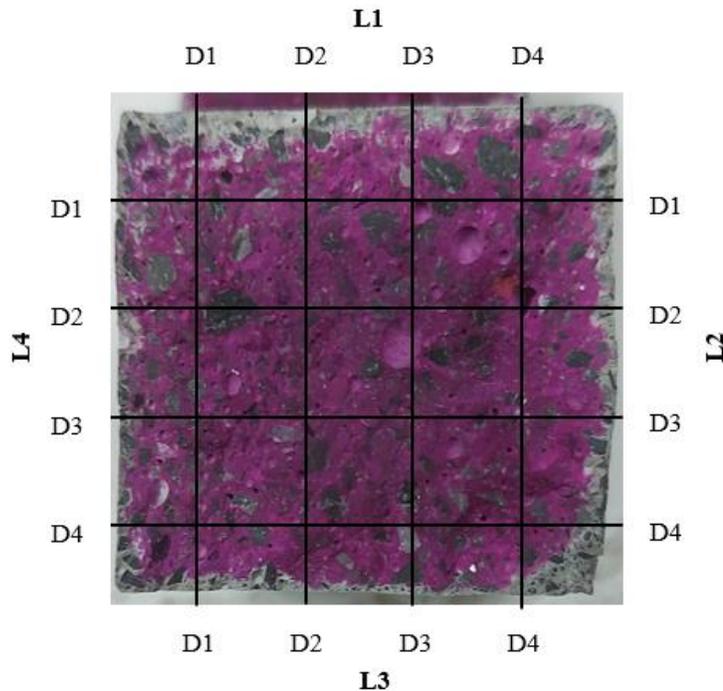


Figura 29.- Mediciones de avance de carbonatación (Matriz de referencia a 49 días de exposición)

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.1.2 Avance de la carbonatación natural

Al igual que en la condición acelerada, la carbonatación natural se midió en barras de 40 x 40 x 160 mm, las cuales pasaron por el mismo proceso de fraguado, curado y adecuación que las antes mencionadas. Pasado este proceso, las muestras se llevaron a la exposición en condiciones naturales, en la azotea del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, zona con alta concentración de CO<sub>2</sub>, debido a que es un ambiente urbano con alta carga vehicular, así como por encontrarse cerca de las zonas industriales del Estado.

Para este ambiente de exposición, al ser más tardado el avance de la carbonatación, se realizaron las mediciones a 28, 56, 90, 120, 150 y 180 días, realizando cortes transversales en cada barra y midiendo en cuatro puntos de cada cara de la muestra seccionada, como se mencionó en el apartado anterior.

Es importante mencionar que, para cada edad de ensayo, tanto en el ambiente acelerado como en el ambiente natural, se elaboraron barras en triplicado, tomando en cuenta también la cantidad de edades y cortes obtenibles por cada barra. En total, para la condición acelerada se elaboraron 6 barras por sistema cementante, pudiéndose obtener 10 cortes de cada una de ellas y para la exposición natural se elaboraron 6 barras tomando en cuenta el avance tardado y el seguimiento que se les puede dar después a los 180 días mencionados.

### **4.3.2. Ataque de sulfatos**

#### **4.3.2.1 Variación de masa**

Los sulfatos, además de provocar expansiones dentro de las matrices cementantes, llegan a provocar cambios en la masa de los elementos con base en cemento, por lo cual, el comportamiento ante estos cambios de masa en los sistemas cementantes se evaluó utilizando cubos de 25 mm por lado, los cuales fueron curados de la misma forma que las probetas utilizadas para el comportamiento ante la expansión. La exposición de estos cubos se llevó a cabo en la solución a 5% de  $MgSO_4$  utilizando 70.25 ml de solución para cada cubo, obteniendo ese valor con base en la relación del volumen de una barra con los 800 ml de solución necesaria (Figura 30a).

Las mediciones para este comportamiento se realizaron a 7, 14, 21, 28, 56, 90, 105, 120, 150 y 180 días, tomando la lectura a la edad 0 previo a la exposición. El proceso realizado cada día de medición consistió en el retiro de las muestras de la solución de sulfatos y el posterior secado, hasta lograr una masa constante durante,  $3 \pm 0.5$  horas, a una temperatura de  $40 \pm 2^\circ C$ , hasta obtener una masa constante en cada cubo, los cuales eran pesados en una balanza analítica con precisión a 0.0001 g, de la cual se tomaba lectura hasta que el valor se estabilizara durante al menos 10 segundos (Figura 30b). Finalmente, se obtenía el porcentaje de variación dividiendo la lectura tomada a cada edad de medición, menos la lectura sin exposición, entre la lectura sin exposición.

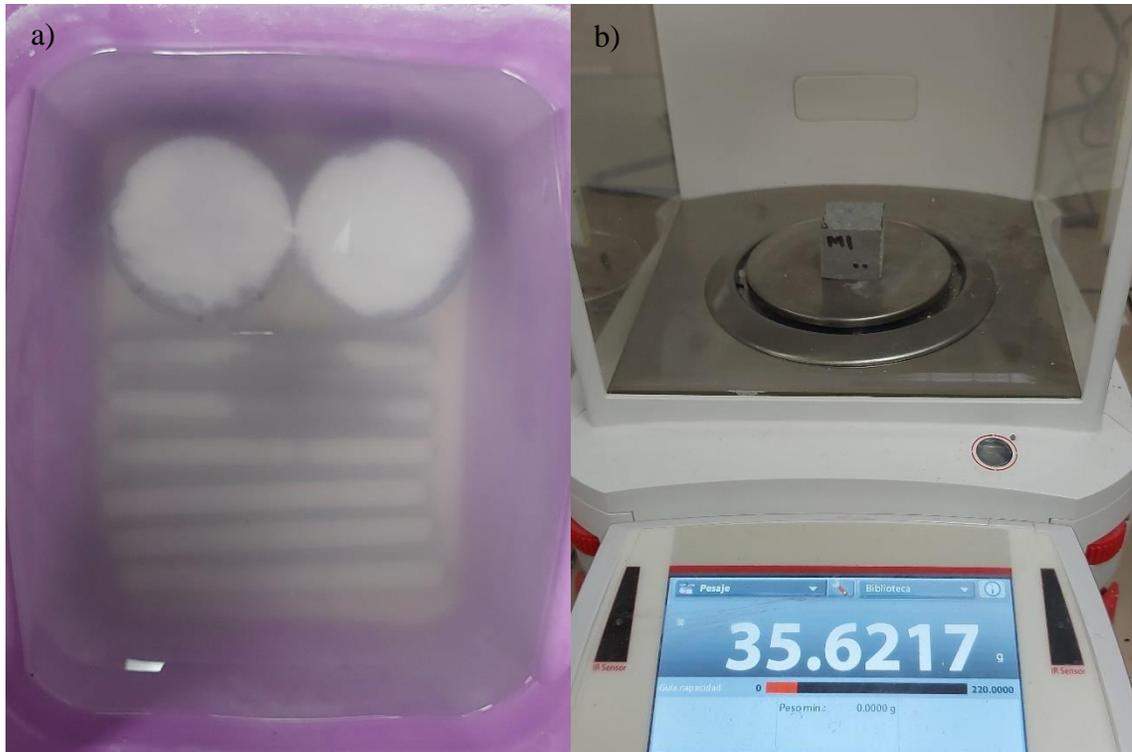


Figura 30.- Solución de  $MgSO_4$  y medición de masa

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.2.2 Variación de longitud

El comportamiento ante los cambios de longitud provocados por la expansión que producen los sulfatos en los sistemas cementantes se evaluó de acuerdo con el método de prueba establecido en la norma ASTM C 1012. Para esto se emplearon barras de mortero de 25 x 25 x 285 mm (tres por sistema cementante), las cuales fueron curadas de forma estándar durante 28 días en agua saturada con cal. Pasado el periodo de curado, se registró el tamaño nominal de cada barra (285 mm aproximadamente) y se tomaron las lecturas sin exposición en el equipo de medición, con un micrómetro calibrado (Figura 31). Posteriormente comenzó el periodo de exposición en una solución de sulfato de Magnesio ( $MgSO_4$ ) al 5% de concentración, es decir, 50 g de sulfato por cada 1000 ml de agua compuesta de 90% agua normal y 10% agua destilada, la cual fue cambiada cada dos meses para prevenir la pérdida de concentración de sulfato por acción de la evaporación o remoción de material. Cada barra fue inmersa en 800 ml de solución, esto debido al volumen de material que representan. Durante la inmersión, las mediciones de cambios de longitud se realizaron a 7, 14, 21, 28, 56, 90, 105, 120, 150 y 180 días de

exposición. Finalmente, el cálculo del porcentaje de expansión se obtuvo dividiendo las lecturas registradas por el micrómetro sin exposición menos las lecturas registradas a cada edad, entre la longitud nominal de cada barra., esto por cien para representarlo como porcentaje.



Figura 31.- micrómetro de medición y barras expuestas a sulfatos

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.3. Corrosión de acero de refuerzo

El estudio de la corrosión del acero de refuerzo embebido en los sistemas cementantes se llevó a cabo mediante la realización de las pruebas electroquímicas de potenciales de corrosión (PC) y resistencia a la polarización lineal (RPL), con base en la normas ASTM C 876 y G 59, respectivamente. Estas pruebas se aplicaron en probetas de 20 x 50 x 80 mm, con dos varillas de acero convencional de 80 mm, cubiertas 20 mm con cinta aislante para incitar el deterioro en la zona central embebida, así como una barra de

grafito, como se muestra en la Figura 32 (acotaciones en milímetros). Dichas probetas se expusieron y monitorearon durante 180 días en tres ambientes de deterioro, los cuales fueron un ambiente de carbonatación acelerada con las condiciones descritas en el apartado 4.3.1.1, un ambiente de deterioro natural mediante la exposición descrita en el apartado 4.3.1.2 y un ambiente controlado de laboratorio, a una temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  y humedad relativa de  $60 \pm 10\%$ .

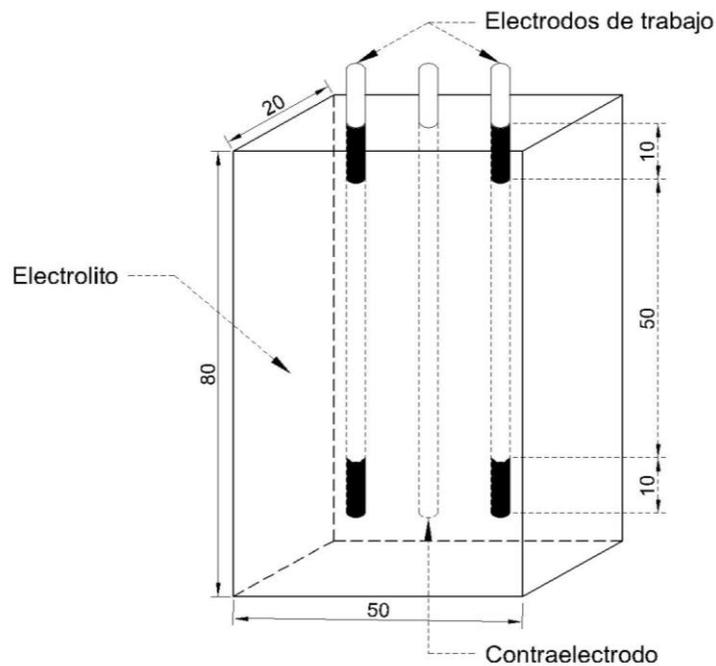


Figura 32.- Diseño de probetas para pruebas electroquímicas

Fuente: Elaboración propia

Ambas pruebas electroquímicas se realizaron mediante el uso de un potenciostato Gamry Interface 1000 (Figura 33a) el cual basa su funcionamiento en la creación de celdas utilizando un electrodo de referencia de cloruro de Potasio (KCl), seis cables conectores de celda, un electrolito (matriz cementante), un contraelectrodo (barra de grafito) y un electrodo de trabajo (acero en estudio). La formación de la celda o el circuito se logra mediante la conexión de los cables conectores que van del potenciostato a cada uno de los elementos mencionados, como se indica en la Tabla 5 (Figura 33b).

Cabe mencionar que el equipo fue calibrado de acuerdo con el manual de uso a través de una celda resistiva externa incluida en el equipo, la cual funciona para calibrar tanto el electrodo de referencia como el potenciostato.

Tabla 5.- Conexiones de cables de celda del potenciostato Gamry

| <b>Designación (Color)</b>             | <b>Conexión normal</b>  |
|--|-------------------------|
| Electrodo de trabajo (Verde)           | Electrodo de trabajo    |
| Electrodo sensorial de trabajo (Azul)  | Electrodo de trabajo    |
| Electrodo contador (Rojo)              | Contraelectrodo         |
| Electrodo sensorial contador (Naranja) | Contraelectrodo         |
| Referencia (Blanco)                    | Electrodo de referencia |
| Tierra flotante (Negro)                | Conectado a tierra      |

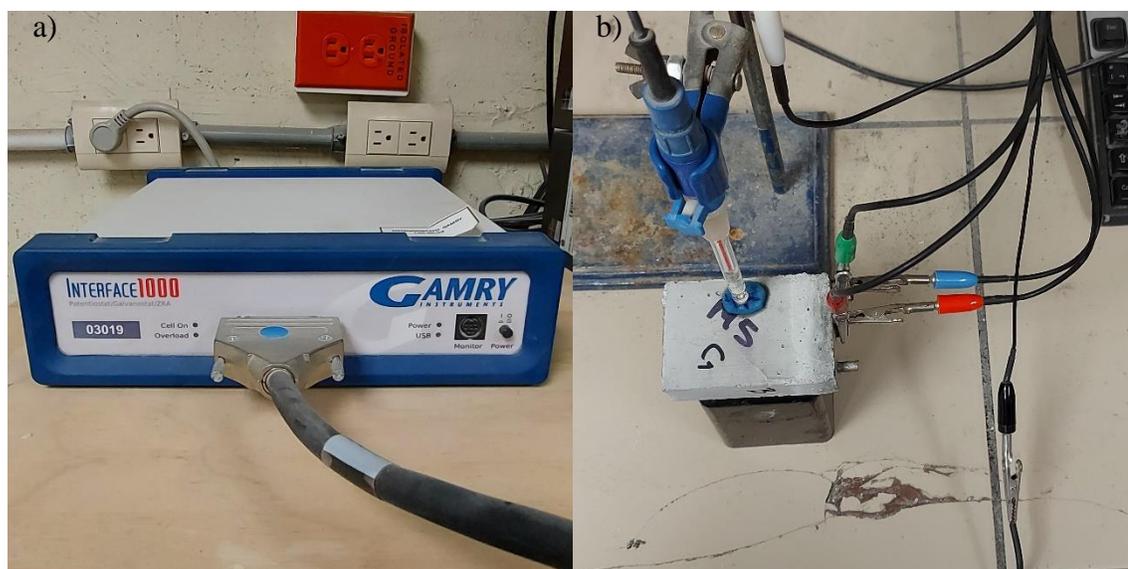


Figura 33.- Equipo y medición de pruebas electroquímicas

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.3.1 Potenciales de corrosión

Tomando como referencia la norma ASTM C 876, se evaluaron los potenciales de corrosión del acero embebido en los diferentes sistemas cementantes. El procedimiento consistió en realizar las conexiones del equipo Gamry a cada probeta mediante los cables conectores de celda, como se indicó anteriormente y, además, colocando el electrodo de referencia sobre el electrodo de trabajo, haciendo contacto con el electrolito mediante una membrana o unión eléctrica previamente humedecida, como se muestra en la Figura 33. Habiendo conectado el equipo, se procedió a establecer los parámetros de prueba, los cuales consistieron en realizar el potencial durante 200 segundos, tomando

lecturas a cada 5 segundos, tomando en cuenta una variación máxima de 2 mV entre todos los puntos obtenidos mediante la aplicación de voltaje o barrido de 10 mV/min o 0.1667 mV/s, como lo establece la norma G 59. Lo anterior aplicado en un área de 9.475 cm<sup>2</sup> de acero expuesto a deterioro por cada varilla. Una vez registrados los datos, se procedió a analizarlos para obtener un voltaje promedio del potencial de corrosión de cada varilla, los cuales se contrastaron con lo obtenido en la prueba de Rpl.

#### **4.3.3.2 Resistencia a la polarización lineal**

Esta prueba se realizó bajo el método de prueba establecido en la norma ASTM G 59. Para esto se realizaron las conexiones del equipo Gamry a cada probeta, como se indicó en el apartado 4.3.3 y se colocó el electrodo de referencia sobre el electrolito, como se indicó en el apartado anterior. Posteriormente se procedió a aplicar un potencial de circuito abierto (OPC) similar al potencial de corrosión aplicado previamente, para estabilizar el voltaje del circuito. Este potencial se realizó durante 300 segundos tomando lecturas cada 5 segundos y manteniendo la estabilidad de  $\pm 2$  mV entre las lecturas. Al igual que el potencial de corrosión antes descrito, se realizó la aplicación del barrido con 10 mV/min en la misma área de acero expuesta a deterioro de 9.475 cm<sup>2</sup>. Ya estabilizado el voltaje, se procedió con la prueba Rpl, tomando lecturas a cada 5 segundos dentro de un intervalo de  $\pm 20$  mV ( $\pm 30$  mV máximo permisible por norma), con una velocidad de escaneo de 0.1667 mV/se y valores  $b_a$  y  $b_c$  (pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente) establecidos en 0.12 V/dec, de acuerdo con la norma mencionada. Una vez realizado el barrido y obtenido el gráfico, éste se analizó para obtener los valores de  $E_{\text{corr}}$  y  $R_p$ . Posteriormente se calculó  $I_{\text{corr}}$ , con base en la ecuación 2 de la norma G 59, la cual relaciona el valor  $B = 26$  mV/dec (coeficiente de Stern – Geary obtenido de la ecuación 3 de la misma norma) con la Rpl presentada por el electrodo de trabajo.

#### **4.4. Etapa IV. Análisis microestructural de los sistemas en estudio**

Dentro de esta última etapa se procedió a la caracterización y análisis microestructural de los sistemas cementantes para observar y conocer la formación de compuestos dentro de cada uno de ellos, así como la posible densificación de la microestructura a partir de

las reacciones producidas por los cementantes y el agua (curado estándar) y los cementantes con los agentes nocivos.

Para tal efecto se elaboraron barras de 25 x 25 x 285 mm, las cuales fueron seccionadas para obtener muestras que se analizaron a diferentes edades de curado estándar y exposición a CO<sub>2</sub> y MgSO<sub>4</sub>. En el caso del curado estándar, las edades consideradas fueron 7, 14, 28, 56, 90 y 180 días, esto con el fin de estudiar la evolución de formación de compuestos. En el caso de la exposición a los agentes nocivos, se consideraron las mismas edades después de los 28 días de curado estándar.

Durante cada seccionamiento, fue requerido detener el fraguado o reacciones de hidratación dentro de las matrices cementantes. Lo anterior se realizó mediante la inmersión de las muestras en isopropanol o alcohol isopropílico (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O) durante 48 ± 2 horas, para producir el congelamiento de las reacciones. Consecutivamente, se llevaron a un horno industrial a una temperatura de 45 ± 2°C durante 72 ± 2 horas para retirar el exceso de alcohol. Posterior a la detención de las reacciones, las muestras fueron pulverizadas utilizando un molino Herzog para ser analizadas como polvos en las técnicas de DRX y FTIR. No obstante, previo a la molienda, fue requerido tomar una muestra laminar de 10 x 10 mm, aproximadamente, para ser analizada con un microscopio electrónico de barrido o SEM, por sus siglas en inglés.

#### **4.4.1. Difracción de Rayos X**

Buscando conocer las fases minerales que se formaron dentro de los sistemas cementantes con o sin exposición, se procedió a caracterizar la microestructura mediante la técnica de DRX. Para este fin, los polvos obtenidos de cada muestra se llevaron a un difractómetro de Rayos X PANalytical Empyrean. En la técnica se emplearon 2 g de cada muestra, las cuales se colocaron en el portamuestras de acrílico previamente purgado y colocado en el difractómetro. El análisis se realizó dentro del intervalo de 5 a 25° del ángulo 2θ, con lo cual se obtuvieron difractogramas para cada una, los cuales fueron analizados con el software X'pert High Score Plus.

#### **4.4.2. Microscopía electrónica de barrido**

Con el fin de observar la forma y los efectos internos producidos por las reacciones dentro de los sistemas cementantes, se procedió a caracterizar cada uno mediante el uso de un Microscopio Electrónico de Barrido Jeol JSM-6510 LV con condiciones de 10 a 20 kV como voltaje de aceleración y ampliaciones de 100, 1000 y 2000x, en función de los compuestos a observar. Para esto se utilizaron las muestras laminares de 10 x 10 mm, las cuales fueron recubiertas con una capa de oro – paladio para otorgar la propiedad de conductividad requerida para el análisis, previo a la colocación de las muestras en el portamuestras del microscopio.

## **CAPÍTULO 5. Resultados y Discusiones**

### **5.1. Etapa I. Diseño, optimización y elaboración de mezclas**

#### **5.1.1. Caracterización de cementante y puzolanas**

##### **5.1.1.1 Composición química**

De acuerdo con las normas ASTM C 150 y ASTM C 618 para cemento y materiales puzolánicos, respectivamente, éstos deben cumplir requerimientos mínimos de composición química, así como máximos de algunos compuestos, para evitar afectaciones físicas, mecánicas y de durabilidad posteriores. La Tabla 6 muestra los compuestos químicos de cada material.

En el caso del CP, se especifica un contenido mínimo de  $\text{SiO}_2$  del 20% y un máximo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$  de 6%, cada uno y 3% máximo de  $\text{SO}_3$ . En cuanto al  $\text{CaO}$  no aplica un porcentaje específico, pero lo ideal es que esté presente en al menos un 60%. De la tabla, se puede deducir que se cumplen todos los porcentajes máximos y mínimo para este tipo de cemento, siendo el  $\text{CaO}$  el componente de mayor representatividad, puesto que se trata de un cemento portland ordinario, producido a partir de Clinker sin adiciones minerales. Aunado lo anterior, cabe resaltar la presencia mínima de álcalis dentro de la composición del cemento.

Por otro lado, la norma ASTM C 618 establece que un material puede considerarse puzolánico si la suma de sus tres óxidos principales es mayor que el 70%, si se presenta un máximo de 6% de  $\text{SO}_3$  y si se presenta un contenido de  $\text{CaO}$  menor que el 10%.

En la Tabla 6 se observa que el MK basa su composición en  $\text{SiO}_2$  con un alto contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , de alrededor del 20% y algunos compuestos minoritarios entre los que destaca el  $\text{TiO}_2$ , con un 3%. La CV presenta un contenido similar de  $\text{SiO}_2$ , en comparación con el MK e incrementan algunos compuestos tales como el  $\text{CaO}$  y el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , lo cual da pie a la disminución de la cantidad de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . En el caso del  $\text{CaO}$ , de acuerdo con la ASTM C 618, el contenido menor que el 10% de calcio se debe a que se produce a partir de carbón bituminoso con pequeñas cantidades de cal, lo que le brinda la clasificación F. También es importante destacar la presencia de algunos álcalis, tales como el  $\text{K}_2\text{O}$  y el  $\text{MgO}$ , los cuales se encuentran como compuestos menores en pequeñas cantidades. Por

último, la CB basa su composición en SiO<sub>2</sub>, con arriba del 80%, incluso más de lo presente en el resto de las puzolanas. El resto de los compuestos principales se encuentra en porcentajes reducidos, siendo incluso mayores algunos álcalis como el K<sub>2</sub>O y el Na<sub>2</sub>O.

Tabla 6.- Composición química del CP y los MCS

| Compuesto  | CP            | MK            | CV            | CB            |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 1.378         | 20.196        | 8.528         | 3.104         |
| CaO  | 67.939        | 0.790         | 3.380         | 1.870         |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 3.638         | 0.717         | 7.566         | 1.924         |
| K <sub>2</sub> O   | 1.545         | 0.111         | 1.683         | 4.335         |
| MgO  | 0.286         | -             | 568.6 ppm     | 1.143         |
| MnO  | 849.8 ppm     | -             | -             | 768.8 ppm     |
| Na <sub>2</sub> O  | -             | -             | -             | 3.474         |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | -             | 0.629         | 0.552         | 1.334         |
| SiO <sub>2</sub>   | 20.996        | 74.232        | 75.637        | 82.327        |
| SO <sub>3</sub>  | 2.931         | -             | 0.866         | 148.2 ppm     |
| TiO <sub>2</sub>   | 0.821         | 3.119         | 1.473         | 0.289         |
| <b>SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>1</sup></b> | <b>93.951</b> | <b>95.145</b> | <b>91.731</b> | <b>87.355</b> |

<sup>1</sup> La suma de óxidos principales del CP incluye el óxido de calcio (CaO).

De lo anterior, se destaca el cumplimiento de lo establecido en las normas mencionadas, con sumas de óxidos principales de arriba del 90% para el MK y la CV y del 87% para la CB. En el caso del CP, la suma de sus óxidos principales incluye el CaO, con lo cual se obtuvo un 94% de la composición total, de acuerdo con el tipo de cemento. En el caso del SO<sub>3</sub>, todas las puzolanas presentan contenido por debajo del 1%, siendo mejores que lo reportado por el CP.

### 5.1.1.2 Composición mineralógica

Las fases minerales o composición mineralógica de los cementantes y las puzolanas son comúnmente parámetros atribuibles a las reacciones dentro de las matrices cementantes y a la formación de productos de hidratación favorecedores de la resistencia y la durabilidad del concreto. En la Figura 34 se muestran los difractogramas del CP y los MCS.

Principalmente se pueden observar fases minerales de calcio y sílice como la calcita y el cuarzo en el CP, principales formadores de silicato de calcio hidratado (CSH). Además, se pueden observar compuestos como el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en sus fases minerales de corindón y hematita, respectivamente. Estos minerales, en menor proporción, son poco reconocidos como aportadores de resistencia en compuestos cementantes; sin embargo, favorecen el control del calor de hidratación y la velocidad de fraguado. Las fases minerales anteriores son, en algunos casos, representadas como Alita, Belita, Celita y Ferrita, por la formación de silicatos y aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio, dados los compuestos químicos presentes en el CP; sin embargo, todas convergen en fases minerales correspondientes a la presencia de  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  como los compuestos principales del cemento portland.

En el caso del MK, se trata de un material que presenta una gran cantidad de partículas amorfas, principalmente de Sílice y Aluminio, entre los ángulos  $2\theta$  de  $15 - 40^\circ$ , característica comúnmente encontrada en metacaolines, la cual varía en función del proceso de calcinación. Además, en este material se presenta una fase semicristalina en la que las posiciones de los picos atribuibles a la cristalinidad representan fases de cuarzo, mullita y anatasa, los dos primeros siendo los minerales mayoritarios por la cantidad de Sílice y Aluminio y el último presente por el contenido de  $\text{TiO}_2$ .

En el caso de la CV, se puede observar que las principales fases de esta puzolana son el cuarzo y la mullita correspondientes a compuestos de silicatos y aluminosilicatos, respectivamente. Además, se observan algunos picos correspondientes a la fase mineral hematita, esto por la cantidad de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que se encuentra en el material. Es importante mencionar que la CV analizada presenta una curva entre los ángulos  $2\theta$  de  $15 - 35^\circ$ , lo cual, al igual que en el metacaolín, representa la presencia de partículas amorfas que pueden favorecer las reacciones puzolánicas con el CP. Una curva similar se presenta en el difractograma de la CB entre los ángulos  $2\theta$  de  $15 - 40^\circ$ , aunque resulta menos apreciable, dada la gran cantidad de fases cristalinas que se encuentran en este material. Entre las fases cristalina de la CB, la cristobalita, la cianita, la maghemita y una variación de la mullita, conocida como mullita triple celda por la composición química que presenta, así como la presencia de óxido de potasio, siendo la cristobalita el

componente de mayor presencia por el alto contenido de sílice presente en la puzolana. El resto de los minerales corresponden a la formación de aluminosilicatos y a la presencia del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

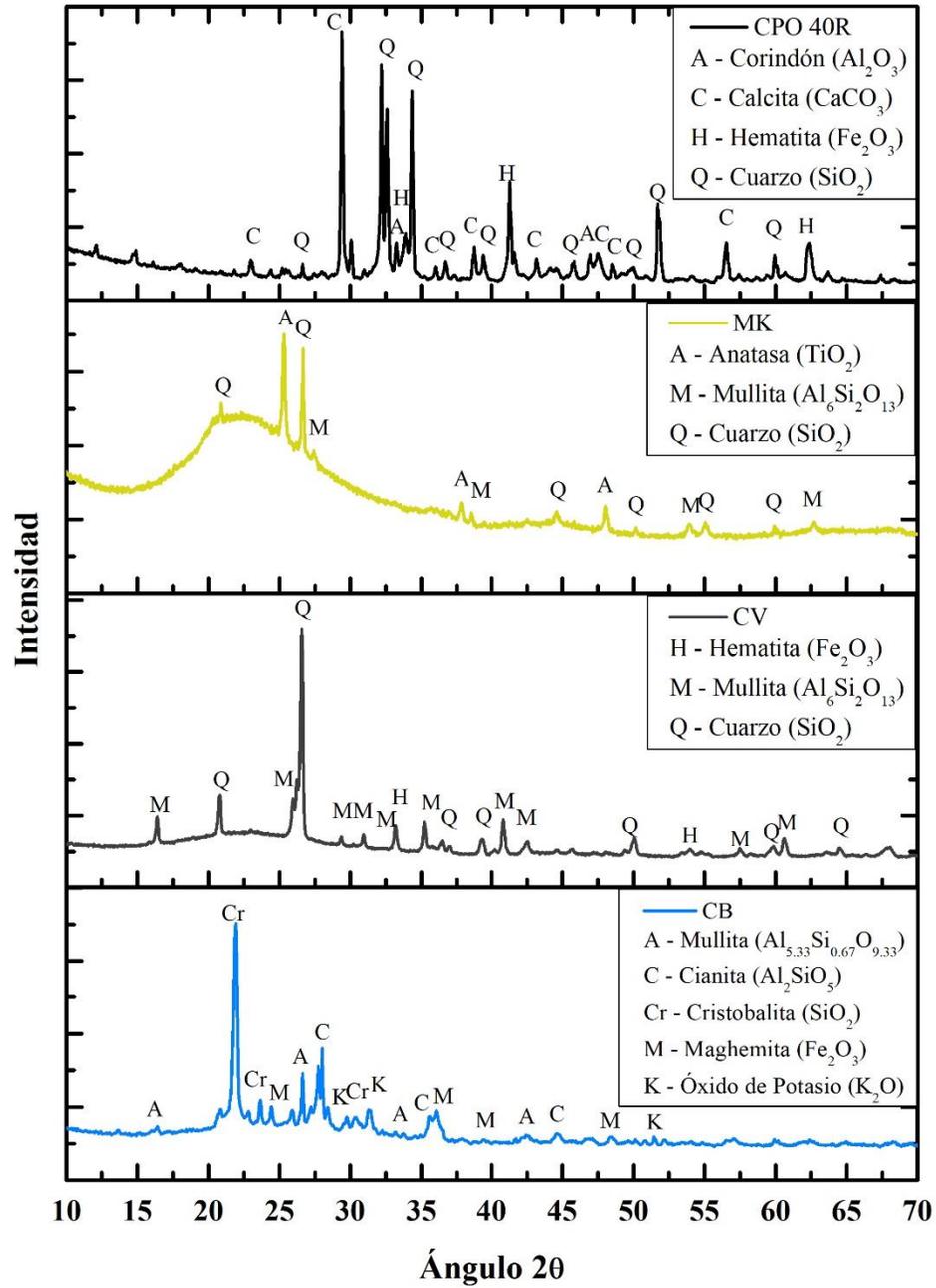


Figura 34.- Fases minerales del CP y los MCS

### 5.1.1.3 Distribución de tamaños de partícula

En la Figura 35 se aprecian las curvas granulométricas del CP y las puzolanas. Se puede observar que el material con la mayor fineza es el MK con un diámetro medio de partícula (D50) de 6.28  $\mu\text{m}$ , lo anterior principalmente atribuible al proceso de calcinación del caolín, en el cual los tamaños iniciales del caolín que rondan las 3  $\mu\text{m}$  se aglomeran dada la plasticidad obtenida durante el proceso, provocando la formación de partículas de mayor tamaño con una mejor distribución (Inocente et al., 2021).

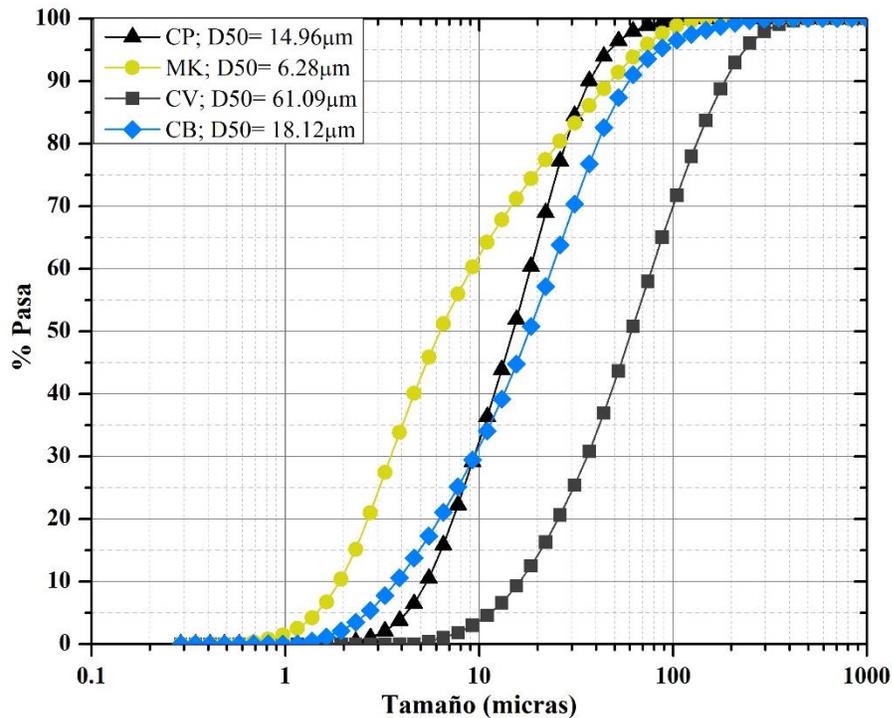


Figura 35.- Curvas granulométricas del CP y los MCS

Por su parte, la CV presenta un diámetro medio de 61.09  $\mu\text{m}$ , totalmente contrario a lo obtenido por el MK. Esto se debe principalmente al tratamiento brindado a la CV, la cual se empleó con tras un único cribado a través de la malla No. 100 con abertura de 149  $\mu\text{m}$ . Con base en esto, se podría tener mayor reactividad del MK con respecto a la CV, con lo que se tendrían mejores propiedades; sin embargo, este mismo material también podría presentar problemas de segregación.

En cuanto al CP, éste presenta un tamaño medio de partícula de 14.96  $\mu\text{m}$ , muy similar al tamaño medio de la CB con 18.12  $\mu\text{m}$ . En el caso de la CB, el tamaño de partícula obtenido se debe al proceso de molienda brindado, en el cual las aglomeraciones y

partículas de mayor tamaño fueron disgregadas durante los tiempos marcados en el apartado 4.1.1.1, aunque el CP tiene mayor cantidad en volumen de partículas más finas, como se aprecia en la Figura 36.

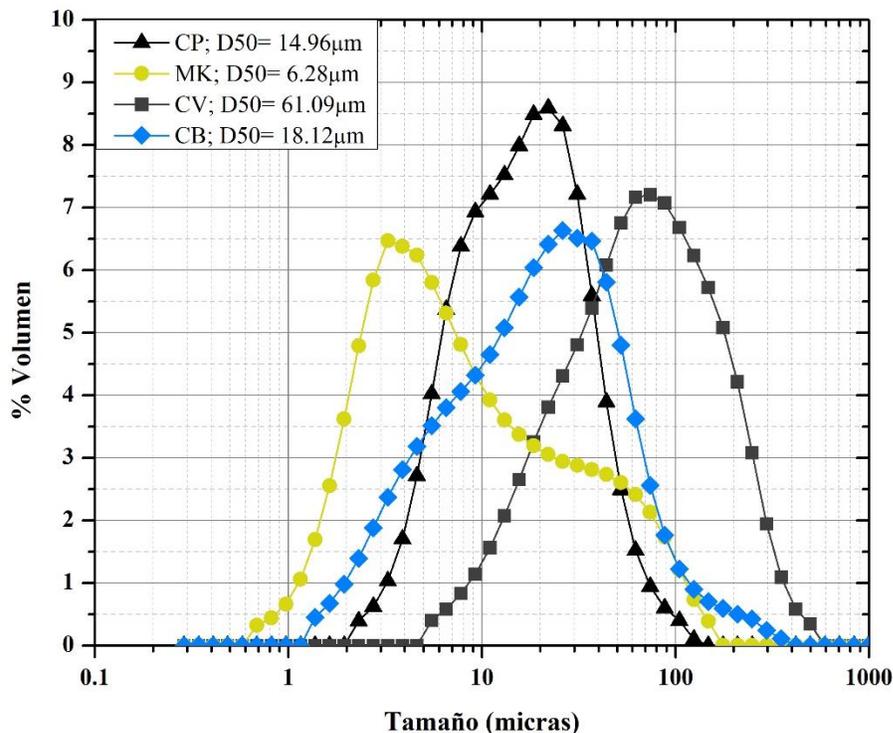


Figura 36.- Distribución de las partículas del CP y los MCS

En la Figura 36 se puede apreciar una distribución uniforme en el caso del CP, la CV y la CB, siendo el CP el material con mayor volumen de partículas finas, en comparación con la CB. No obstante, el MK presenta una distribución considerada polidispersa, dadas las dos concentraciones de partículas marcadas entre 1 y 10 μm y entre 10 y 100, presentando mayor cantidad de partículas finas. Lo anterior es atribuible a las aglomeraciones que se presentan en el material, dada su naturaleza plástica y pegajosa postcalcación (Inocente et al., 2021).

#### 5.1.1.4 Morfología de las partículas

La morfología de las partículas se muestra en la Figura 37. En ella se aprecian cuatro morfologías distintas. En el caso del CP (Figura 37a), la forma de las partículas tiende a ser angular y un tanto rugosa, similar a las partículas de agregado grueso angular a microescala, lo cual le brinda características particulares en las que los sistemas

cementantes presentan mayor cohesividad y adhesión. El MK (Figura 37b) presenta partículas laminares o en forma de placas, lo cual puede afectar principalmente las propiedades en estado fresco de los sistemas cementantes, debido a la fricción que se puede generar entre ellas. En el caso de la CV (Figura 37c), ésta presenta formas completamente esféricas atribuibles al proceso de formación del residuo en las plantas carboeléctricas, debido al rodamiento dentro de los tubos de emisiones de residuos. Esta particular forma resulta benéfica en los sistemas cementantes, principalmente en propiedades en estado fresco, dado que posibilita la reducción de la demanda de agua y mejora la cohesividad y la homogeneidad de las mezclas, logrando una reducción y/o mitigación de fenómenos como la segregación y el sangrado. Propiedades similares se logran con la CB (Figura 37d), la cual, en este caso presentó formas semiesféricas un tanto desquebrajadas, lo cual se puede atribuir a una morfología inicial redondeada que se alteró mediante el proceso de molienda, lo que permitió darle esa morfología esférica – angular, la cual puede resultar benéfica en aspectos de homogeneidad, cohesividad y empaquetamiento de los sistemas cementantes.

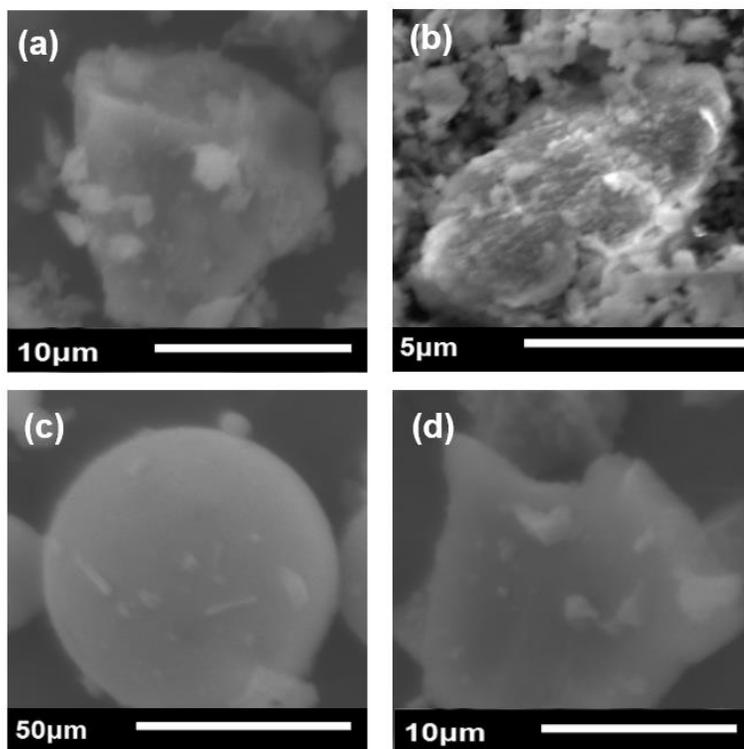


Figura 37.- Morfología de las partículas

a) CP b) MK c) CV d) CB

### 5.1.1.5 Determinación de la densidad

La determinación de la densidad se realizó con un multiplicómetro (MP) y con el matraz Le Chatelier (LC), como indica la norma ASTM C 188. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7. Con la finalidad de corroborar los resultados, se obtuvieron dos densidades con el multiplicómetro y tres con el matraz. De los resultados mostrados en la tabla se descartaron los valores alejados de la media de las 5 posibles densidades por más de 0.03 unidades. Los valores descartados se muestran en color rojo.

Tabla 7.- Densidades del CP y los MCS

| Método   | CP   | MK   | CV   | CB   |
|----------|------|------|------|------|
| MP-1     | 3.04 | 2.54 | 2.02 | 2.49 |
| MP-2     | 3.08 | 2.53 | 2.05 | 2.48 |
| LC-1     | 3.09 | 2.51 | 2.00 | 2.47 |
| LC-2     | 3.08 | 2.55 | 2.02 | 2.50 |
| LC-3     | 3.12 | 2.57 | 1.95 | 2.49 |
| Promedio | 3.08 | 2.54 | 2.02 | 2.49 |

En el caso del CP se obtuvo una densidad promedio de  $3.08 \text{ g/cm}^3$ . Típicamente, se asume que las partículas del CP tienen una densidad de alrededor de  $3.15 \text{ g/cm}^3$ , sin embargo, este valor no es del todo exacto pues depende de todo el proceso de manufactura del cemento. En función de esto, algunos autores han establecido un rango de densidad que puede ir de  $2.90$  a  $3.16 \text{ g/cm}^3$  (Bustillo, 2021; Sutar et al., 2021), por lo que en este caso el CP utilizado cumple con esta característica. En cuanto a las densidades de los MCS, la CV mostró la densidad más baja, atribuible principalmente a los restos de partículas de carbono presentes en el material, no dejando de cumplir con el rango de densidad de las cenizas volantes que oscila entre  $1.30$  y  $2.80 \text{ g/cm}^3$  (DeBelie, 2018). Por su parte, el MK presentó una densidad promedio de  $2.54 \text{ g/cm}^3$ , la cual entra en el rango de  $2.49$  a  $2.65 \text{ g/cm}^3$  correspondiente al tipo de caolín y al proceso de calcinación establecido por algunos estudios (San Nicolas et al., 2014; Teklay et al., 2015; Samson et al., 2017). Por su parte la CB presentó una densidad de  $2.49 \text{ g/cm}^3$  principalmente atribuida a la disminución de óxidos como el  $\text{SiO}_2$  y al incremento menor del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , esto comprobado mediante muestras que contenían mayor cantidad de  $\text{SiO}_2$ , menor cantidad de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y, a su vez, una menor densidad.

### 5.1.1.6 Índice de Actividad Puzolánica

En la Tabla 8 se muestra la actividad puzolánica de los MCS utilizados a las edades de 7 y 28 días, con porcentajes de sustitución en volumen del 20% para todos los casos. Cabe resaltar que se hicieron las sustituciones en volumen y no en peso, como establece la norma ASTM C 311, para no alterar la relación agua – material cementante. Cabe mencionar que, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C 618, para que un material se considere puzolánico, se deben obtener índices de actividad puzolánica mínimos del 75% a 7 y a 28 días.

Tabla 8.- Índices de actividad puzolánica

| MCS | Resistencia (MPa) |         | IAP (%) |         |
|-----|-------------------|---------|---------|---------|
|     | 7 días            | 28 días | 7 días  | 28 días |
| CP  | 36.57             | 43.14   | 100     | 100     |
| MK  | 45.90             | 52.13   | 125     | 121     |
| CV  | 28.74             | 35.66   | 79      | 83      |
| CB  | 31.06             | 36.28   | 85      | 84      |

Considerando las resistencias obtenidas por los morteros de CP como el 100% de la actividad puzolánica a las edades correspondientes, el MK presentó los mejores índices de puzolanidad, siendo de 125% a edades tempranas; aunque a edades mayores, en este caso a 28 días, presentó una disminución de reactividad (121%) puesto que su mayor potencial de actividad puzolánica se da principalmente a edades tempranas, desarrollando así menor resistencia conforme avanza el tiempo. Lo anterior, en concordancia con lo reportado por Abdelli, et al., en el 2017, es atribuido a los altos contenidos de sílice amorfa que en conjunto con el  $Al_2O_3$  y la portlandita formada por el CP, provocan la formación de productos de hidratación como CSH y CASH; en las primeras edades de hidratación. Posteriormente, el consumo y disminución del contenido de portlandita imposibilita las reacciones de la sílice y alúmina presente en el MK, provocando un menor desarrollo de resistencia.

Seguido del MK, la CV es la que presenta menor reactividad a edades tempranas (79%), puesto que, como se ha establecido por diferentes autores en la bibliografía, las reacciones de los compuestos de este material se dan a edades mayores que 14 días, por

lo que a 28 días se presenta un incremento en el IAP con respecto al CP, siendo este índice de 83% (Santiago-Hurtado et al., 2016, y Baltazar-Zamora et al., 2019).

Por su parte, la CB presenta un comportamiento de actividad puzolánica lineal, puesto que en ambas edades se obtienen índices muy similares de 85 y 84% para 7 y 28 días, respectivamente. Esto se atribuye a la reactividad tardía de los compuestos de esta puzolana, la cual se ha reportado que se da a edades avanzadas, principalmente mayores que 90 días (Pereira et al., 2018, Jagadesh et al., 2018). Cabe destacar que este material presentó disminuciones menores de resistencia a la compresión, en comparación con la CV, esto se atribuye a la diferencia en los tamaños de partícula de cada puzolana. Aunque la CB no presenta reactividad en las edades evaluadas, su distribución granulométrica, similar a la del CP y menor que la de la CV, provoca que exista el efecto *filler* tal como concluyeron Patil et al., en el 2021, esto debido a un mayor relleno de los poros presentes en la matriz cementante, lo cual potencializa la densificación de dicha matriz, a pesar de no existir mayor generación de productos de hidratación a esas edades.

### **5.1.2. Caracterización de los agregados**

Buscando cumplir las especificaciones de la norma ASTM C 33, se realizaron los ensayos de granulometría, densidad, absorción y peso volumétrico, tanto en seco como en compacto, del agregado fino.

#### **5.1.2.1 Análisis granulométrico del agregado fino**

La Figura 38 presenta la granulometría del agregado, la cual cumplió los límites establecidos por la normativa en todos los tamaños de la distribución, obteniéndose un módulo de finura de 2.97, debido principalmente al alto contenido de finos presentes en la composición, los cuales no alteraron la curva granulométrica y pueden representar un factor de empaquetamiento mayor en los sistemas cementantes.

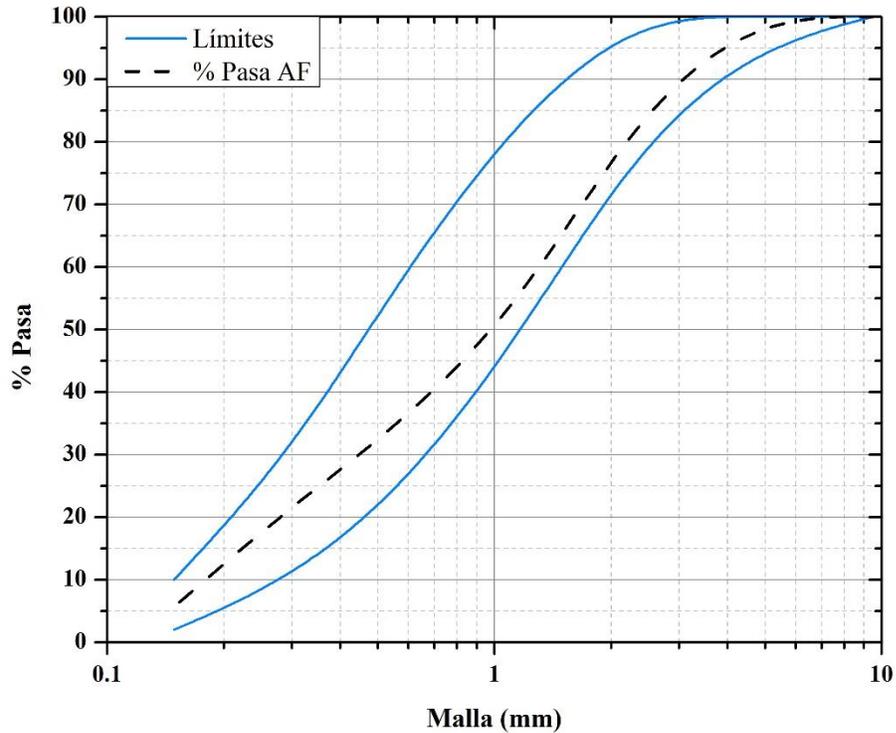


Figura 38.- Curva granulométrica del agregado fino

### 5.1.2.2 Características físicas

Los resultados obtenidos de las características físicas del agregado fino se resumen en la Tabla 9. Primeramente, dada la distribución granulométrica y la cantidad de finos presentes en el agregado, se obtuvo un material de densidad un poco más alta, en comparación con otros agregados similares con densidades que rondan los  $2600 \text{ kg/m}^3$ , lo cual le da la propiedad de ser un material con alto grado de empaquetamiento, con lo cual se puede beneficiar el desarrollo de propiedades físico – mecánicas de los sistemas cementantes.

Tabla 9.- Características físicas del agregado fino

| <b>Agregado Fino</b>                         |         |
|--|---------|
| <b>Densidad (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b> | 2732.24 |
| <b>PVSS (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>     | 1724.81 |
| <b>PVSC (<math>\text{kg/m}^3</math>)</b>     | 1984.60 |
| <b>Absorción (%)</b>                         | 2.15    |
| <b>MF</b>                                    | 2.97    |

En concordancia con la densidad del material, los pesos volumétricos tendieron a ser similares con cierto incremento en el volumen compactado. Lo anterior, acorde a los

métodos de prueba ASTM C 29 y C 128, se atribuye a la presencia de material fino que por sí solo logra acomodarse dentro de un volumen sin grandes requerimientos de energía para su consolidación. Por otro lado, En cuanto a absorción, este tipo de agregado tiende a no absorber tanta agua, por lo que el porcentaje de absorción resultó ser relativamente bajo.

### **5.1.3. Diseño y elaboración de mezclas preliminares**

El diseño y elaboración de la mezcla se llevó a cabo a partir de la optimización de diferentes sistemas cementantes basados en el desarrollo de resistencia a 28 días de curado con diferentes porcentajes de sustitución de CP por cada uno de los MCS, así como con la evaluación de un aditivo superplastificante, el cual se adicionó buscando alcanzar una fluidez adecuada en los sistemas cementantes, tal como lo marca la norma ASTM C 109.

#### **5.1.3.1 Evaluación de la resistencia a la compresión**

La evaluación de resistencia a la compresión se realizó con cada una de las puzolanas, en sustitución del cemento portland en 5, 10, 15 y 20%, tomando estos valores a partir de lo establecido en la bibliografía (Santiago-Hurtado et al., 2016; Baltazar-Zamora et al., 2019; Singh et al., 2019) y siguiendo los diseños de mezcla establecidos en la norma ASTM C 109.

La Figura 39 muestra la evaluación de las mezclas de MK y el desarrollo de resistencia obtenido hasta los 28 días de curado. En ésta se muestra una reactividad similar a lo obtenido por únicamente el CP a edades tempranas de 7 días, la cual mejora en edades posteriores. Es de hacerse notar que a mayor porcentaje de MK la reactividad inicial incrementa y la resistencia a edades de 28 días se desarrolla de manera lenta. Lo anterior acorde con la alta reactividad de esta puzolana a edades tempranas. No obstante, para los fines de este trabajo, el desarrollo de resistencia temprana del MK podría propiciar mejoras en las matrices cementantes que involucren la adición de otras puzolanas, por lo que se considerará una sustitución del 20% de CP inicialmente.

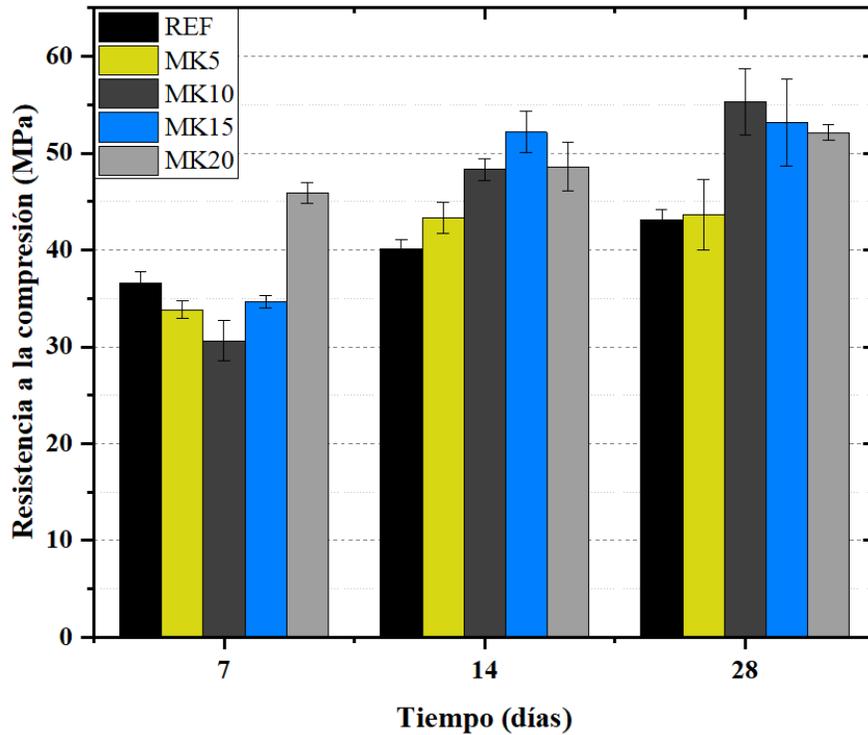


Figura 39.- Evaluación de porcentajes de MK

Por otro lado, la Figura 40 muestra los resultados obtenidos por las mezclas de CV. En ella se aprecia que los porcentajes de sustitución de entre el 5 y el 20% presentan comportamientos similares en las primeras edades de curado en las que la resistencia de referencia se ve disminuida en todas las edades. Sin embargo, se presenta un ligero incremento a 28 días, lo que podría ser indicativo del desarrollo de resistencia tardía.

Caso similar al anterior se presenta con las mezclas de CB en la Figura 41, en la cual se observa un considerable decremento de resistencia en todas las edades; sin embargo, a mayor porcentaje de sustitución, el decremento es menor; es decir, mayor adición de CB propicia la mejora de resistencia, aunque debe hacerse notar que tanto la CV como la CB, no presentan mejores resistencias en ninguna edad que lo reportado por la mezcla de control, como sí sucede con la sustitución de CP por MK. Lo anterior es atribuible al efecto *filler*, generado a partir del empaquetamiento de las partículas poco reactivas, tanto de la CV como de la CB (Patil et al., 2021). No obstante, se esperaría que la reactividad tardía de estos residuos propicie el efecto sinérgico en combinación con el MK, lo que provoque el desarrollo de mejores propiedades considerando las diferentes edades de reactividad que cada uno posee.

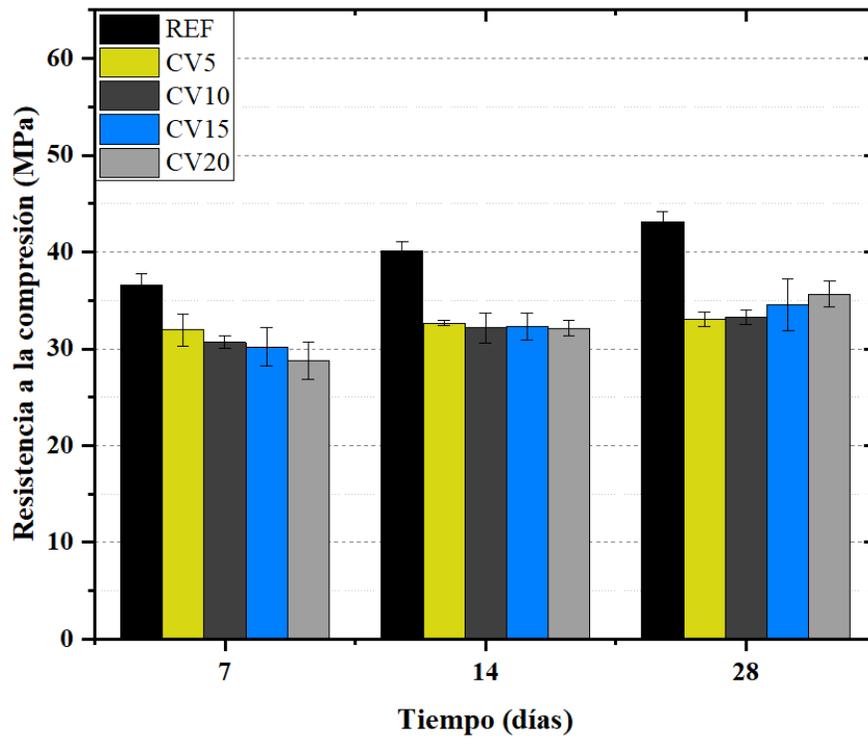


Figura 40.- Evaluación de porcentajes de CV

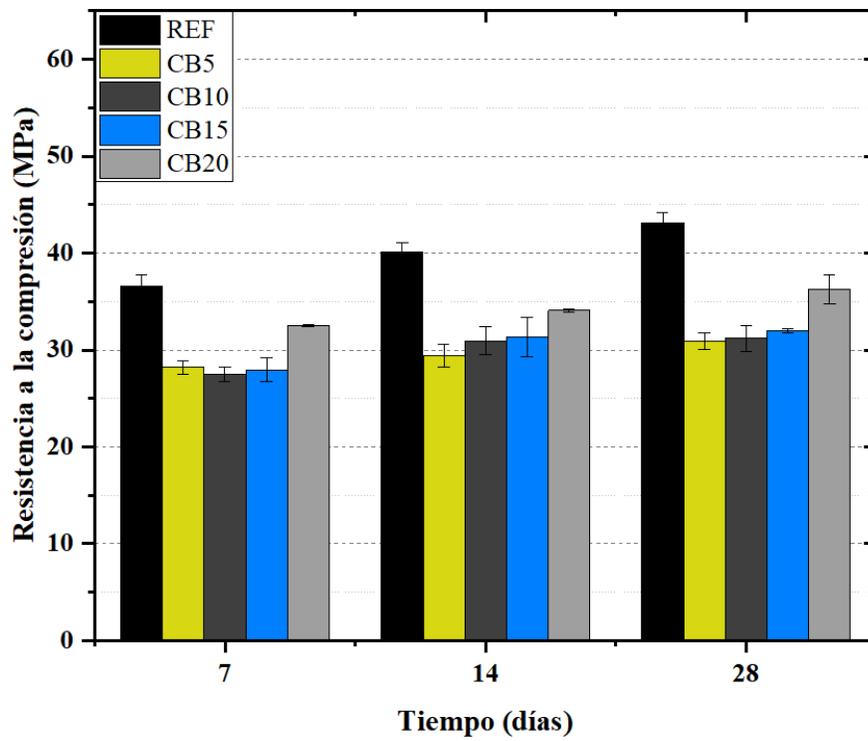


Figura 41.- Evaluación de porcentajes de CB

Por lo anterior, se optó por emplear el 20% de sustitución de CP para todas las mezclas y se evaluarán combinaciones de 10% MK con 10% CV y CB, considerando que las dos últimas puzolanas no representan diferencias considerables, entre los porcentajes bajos y los porcentajes altos de sustitución.

### **5.1.3.2 Evaluación de la fluidez**

A partir de los sistemas cementantes establecidos en la Tabla 4 y dado que las características del agregado fino y las puzolanas que se emplearon provocaron la disminución de la fluidez de los sistemas cementantes, se procedió a evaluar la adición de la fluidez de la mezcla de referencia MC, obteniéndose la curva presentada en la Figura 42.

En primera instancia, la fluidez de la mezcla MC sin aditivo resultó en un 65% fuera del intervalo de  $110 \pm 5\%$ . La adición del aditivo SP se realizó mediante prueba y error, estimándose una cantidad de 1.66 gramos por kilogramo de cemento (g/kg-C) para una fluidez óptima de 110%, de acuerdo con la norma ASTM C 109. Posteriormente, el resto de las mezclas se evaluó inicialmente con esta cantidad de aditivo, obteniéndose incrementos en la fluidez de las mezclas con CV y CB, y decrementos en las mezclas que contenían MK, esto atribuible a las características físicas de cada puzolana. De acuerdo con Sfikas et al., (2014), el MK es un polvo que en contacto con el agua propicia la formación de una pasta espesa y viscosa, por lo que la fluidez disminuye hasta un 73%, en este caso, debido principalmente a la fricción generada por la morfología de las partículas tal como se muestra en el apartado 5.1.1.4, lo cual limita la fluidez del material. Caso contrario con la CV, la cual, debido a la forma esférica de sus partículas provoca una menor absorción de agua y, a su vez, una mayor fluidez (Yang et al., 2018; Jiang et al., 2020). En el caso de la CB, se sabe que sus partículas presentan alta porosidad y, a su vez, alta absorción de agua (Jiménez-Quero et al., 2013), sin embargo, el tamaño y la forma de las partículas juegan un papel importante, dado que, al ser de menor tamaño y con formas semiesféricas, no se presenta una mayor absorción de agua y se disminuye la fricción, por lo que la fluidez incrementa; sin embargo, se queda por debajo de lo presentado por la CV.

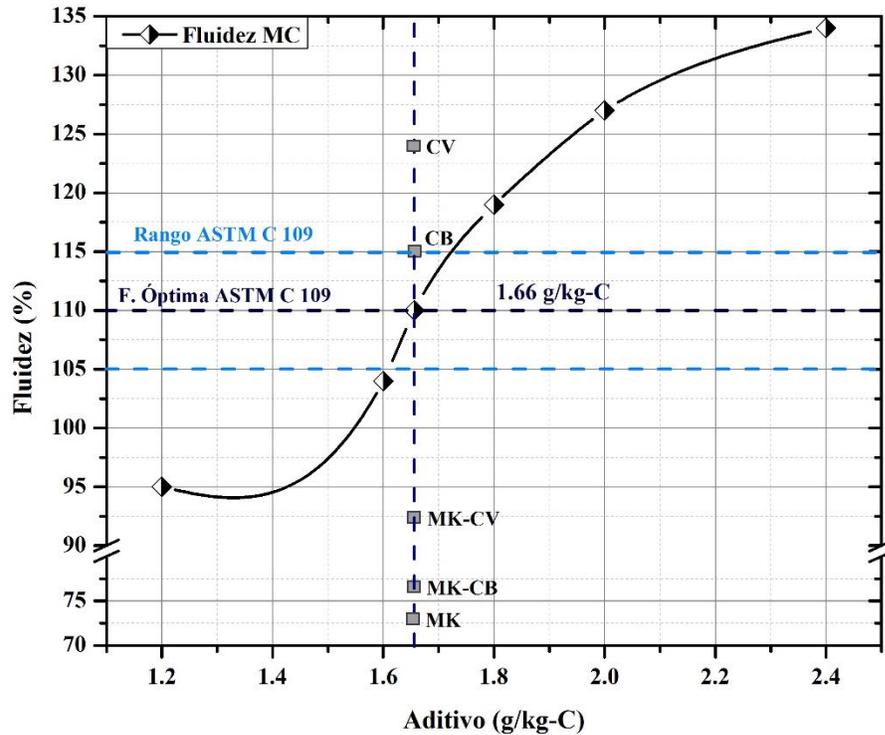


Figura 42.- Curva de fluidez de la matriz de control (MC)

En el caso de las combinaciones MK-CV y MK-CB, la puzolana que predomina en comportamiento es el MK, puesto que en ambos casos la fluidez disminuyó; sin embargo, la adición de CV y CB, provocan que la disminución de fluidez sea menor. A partir de estos datos, se incrementó o disminuyó la cantidad de aditivo para obtener la fluidez óptima de cada mezcla. Las cantidades necesarias, se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10.- Cantidades de aditivo óptimo por sistema cementante

| Mezcla | Fluidez (%) | Aditivo (g/kg-C) | Fluidez Óptima (% ±5) | Aditivo Óptimo (g/kg-C) |
|--------|-------------|------------------|-----------------------|-------------------------|
| MC     | 110         | 1.66             | 110                   | 1.66                    |
| M1     | 73          | 1.66             | 110                   | 2.92                    |
| M2     | 127         | 1.66             | 110                   | 1.32                    |
| M3     | 120         | 1.66             | 110                   | 1.52                    |
| M4     | 103         | 1.66             | 110                   | 1.92                    |
| M5     | 98          | 1.66             | 110                   | 2.16                    |

En dicha tabla se puede apreciar el porcentaje de fluidez obtenido por cada sistema cementante con la cantidad de aditivo óptimo para la mezcla MC y, acorde con la Figura

42, la subsecuente disminución o incremento de la cantidad de aditivo para cada sistema, en los cuales, de manera general, se presentan disminuciones en los sistemas de CV y CB y se presentan incrementos en todos los sistemas con contenido de MK.

#### 5.1.4. Diseño y elaboración de mezclas optimizadas

Dados los resultados en la evaluación de los porcentajes óptimos de puzolana y aditivo superplastificante, y con base en la dosificación para mezclas de mortero de la norma ASTM C 109, se procedió a dosificar los sistemas cementantes que se elaboraron para los fines de este trabajo. Para diseñar estas mezclas se tomaron en cuenta las relaciones agua – cementante y arena – cementante que marca la norma ya mencionada, las cuales son 0.484 y 2.75, respectivamente. La dosificación final se presenta en la Tabla 11, tomando en cuenta el material requerido para elaborar 1 m<sup>3</sup> de mezcla, realizando la sustitución de CP por MCS en volumen absoluto y considerando el aditivo como parte del agua de mezcla, la cual, para una mezcla sin aditivo, resultó en 322.67 kg por cada m<sup>3</sup>.

Tabla 11.- Cantidades de mezcla para 1 m<sup>3</sup> de mortero

| Material            | MC      | M1      | M2      | M3      | M4      | M5      |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Cemento (kg)</b> | 666.67  | 533.33  | 533.33  | 533.33  | 533.33  | 533.33  |
| <b>Agua (kg)</b>    | 321.57  | 320.72  | 321.79  | 321.66  | 321.39  | 321.23  |
| <b>Arena (kg)</b>   | 1833.33 | 1833.33 | 1833.33 | 1833.33 | 1833.33 | 1833.33 |
| <b>Aditivo (kg)</b> | 1.10    | 1.95    | 0.88    | 1.01    | 1.28    | 1.44    |
| <b>MK (kg)</b>      | -       | 109.96  | -       | -       | 54.98   | 54.98   |
| <b>CV (kg)</b>      | -       | -       | 87.45   | -       | 43.72   | -       |
| <b>CB (kg)</b>      | -       | -       | -       | 107.79  | -       | 53.90   |

Nota. La nomenclatura de las matrices se desglosa en la tabla 4 (Ver apartado 4.1.2.2).

## 5.2. Etapa II. Evaluación de propiedades físicas y resistencia a compresión

### 5.2.1. Resistencia a la compresión

En la Figura 43 se muestran los resultados del desarrollo de resistencia a la compresión cuando las matrices se encontraban en curado estándar. En ella se pueden apreciar los siguientes comportamientos. La matriz MC a 7 días de edad desarrolla 46.6 MPa, lo que representa el 87.8% de la resistencia a 28 días, la cual resultó ser de 53.1 MPa. Posteriormente, esta matriz presentó un incremento de resistencia hasta 58.0 MPa a 56 días con una posterior estabilización con incremento menor hasta 62.1 MPa a 210 (180

días para muestras expuestas a CO<sub>2</sub> y MgSO<sub>4</sub>). Por su parte, M1 alcanzó 64.5 MPa a 7 días de curado, es decir, 138.4% de resistencia con respecto a la matriz MC a esa edad. Posteriormente, presentó un incremento hasta 71.8 MPa a 28 días de curado, así como una estabilización posterior, sin incrementos considerables, alcanzando 75.5 MPa a 210 días, es decir, 121% de resistencia con respecto a la resistencia MC final.

Por otro lado, en el caso de M2 y M3, ambas matrices presentaron un comportamiento similar, siendo M3 superior a M2 en todas las edades, con diferencias de entre 3 y 11 % entre ellas. A 7 días M2 y M3 desarrollaron 33.7 y 37.5 MPa, respectivamente. De 7 a 56 días presentaron una tendencia ascendente hasta 52.5 y 54.0 MPa, la cual, posteriormente decreció de 56 a 120 días; sin embargo, siguió incrementando la resistencia hasta 57.3 y 59.8 MPa. A los 210 días de curado, M3 logró alcanzar la resistencia de la matriz MC con 61.7 MPa y M2 permaneció por debajo, alcanzando únicamente 58.8 MPa de resistencia. Cabe destacar que la tendencia aparente a partir de esta edad por parte de M2 y M3 es a incrementar en comparación con MC y M1, lo que podría llevarlas a superar MC en edades posteriores.

Por su parte, M4 y M5 reportaron comportamiento similar siendo M5 mejor que M4 con superioridad de entre 3 y 7% en todas las edades. Ambas matrices presentaron desarrollo de resistencia temprana, superando a la matriz MC a 7 días con 50.5 y 52.1 MPa, respectivamente, alcanzando 59.0 y 60.4 MPa a los 28 días de curado. Consecutivamente, a los 56 días se siguió incrementando la resistencia hasta 64.5 y 66.5 MPa y posteriormente se presentó una tendencia de incremento similar a las de M2 y M3, con la cual llegaron a 69.1 y 71.9 MPa, quedando por debajo de M1 8.5 y 4.7%, respectivamente, pero con la posibilidad de igualarla en edades posteriores.

Según la descripción realizada anteriormente, los comportamientos vistos se atribuyen, a grandes rasgos, a los efectos físicos y químicos de cada material puzolánico. En el caso del MK, el efecto físico se atribuye a la capacidad de llenado y al efecto de relleno ocurrido de manera instantánea por el acomodo de sus finas partículas, al ser mezclado con el resto de los ingredientes de las matrices cementantes, y el efecto químico se atribuye a la relación de cantidad de SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> presente en esta puzolana y a las reacciones puzolánicas aceleradas debido a la amorficidad tal como se mostró en los

apartados 5.1.1.1 y 5.1.1.6, respectivamente, lo que explica las altas resistencias obtenidas de manera temprana en la matriz M1.

Por un lado, el alto grado de amorficidad del MK lo convierte en un material altamente reactivo, que busca su estabilización o cristalización mediante la interacción y reacción con otros compuestos tales como la portlandita en las primeras edades de hidratación. Se deduce de lo anterior que si bien la sílice amorfa es uno de los compuestos principales que propicia la formación de gel CSH, la presencia de alúmina en el metacaolín conlleva a la formación de aluminatos de calcio hidratados (CAH) que ayudan en la formación del gel CASH, compuesto que imparte mayor resistencia a las matrices cementantes, lo que, sumado al resto de efectos, conlleva a la formación de microestructuras de mayor densidad y con mejor grado de empaquetamiento, de ahí que se obtenga una matriz cementante más resistente (En el apartado 5.4.2 se muestran las micrografías en las que se identificaron estos compuestos mediante barridos EDS). Algunos investigadores comparten y corroboran el comportamiento reportado por parte del MK (Chand et al., 2021; Homayoonmehr et al., 2021; Yaba et al., 2021).

Por otro lado, se sabe que la resistencia a edades tempranas por parte del CP se debe principalmente a la hidratación del silicato tricálcico, mismo que también influye en el desarrollo de resistencia a edades tardías, lo cual está determinado principalmente por el silicato dicálcico, donde compuestos como el aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico tienen un impacto insignificante. Partiendo de esta premisa, la disminución del contenido de CP en las matrices cementantes, disminuye la cantidad de silicatos cálcicos portadores de resistencia temprana y tardía, lo que conlleva a una disminución de esta resistencia en los primeros días de hidratación (Mironyuk et al., 2021).

Aunado a lo anterior, a diferencia del MK, el reemplazo de CP por puzolanas poco reactivas en edades tempranas tales como la CV y la CB no permitió la formación de geles en estas edades. No obstante, el alto contenido de sílice presente en ambas puzolanas reaccionó con la portlandita de la matriz para formar gel CSH secundario, desarrollando mayor resistencia, principalmente pasados los 56 días de curado. Sumando a esto que, en el caso de la CB se propició un doble efecto, en el cual se involucra el tamaño de la partícula al igual que el MK. La CB, al presentar mayor finura en

comparación con la CV (ver las Figura 35 y Figura 36), propició un mayor empaquetamiento en los sistemas cementantes que produjeron matrices menos porosas y, por ende, con mayor resistencia. Sin embargo, las mejoras de la CB sobre la CV se ven limitadas, puesto que presentan un menor grado de amorficidad (ver Figura 34), lo que propicia un desarrollo de resistencia muy similar por parte de ambas puzolanas (Nguyen et al., 2019; Praveenkumar et al., 2020; Hwang y Moreno, 2021; Klathae et al., 2021).

Siguiendo los efectos de cada material puzolánico de manera aislada, el comportamiento de las matrices M4 y M5 se atribuye a lo siguiente. Primeramente, el desarrollo de resistencia temprana más alta que lo reportado por la matriz MC se atribuye principalmente a los efectos propiciados por el MK, siendo en una escala menor a lo obtenido en la matriz M1, dada la cantidad de sílice y alúmina reactivas para el consumo del  $\text{Ca(OH)}_2$  y la posterior formación del gel CASH. Esto, puesto que la cantidad de MK disminuyó del 20 al 10% de la matriz M1 a las matrices M4 y M5.

La consiguiente tendencia de incremento se atribuye al efecto puzolánico y al efecto de relleno de la CV y la CB. Por un lado, el MK consume la portlandita existente en la matriz, dada la hidratación del CP; sin embargo, al existir menor cantidad de MK, se presenta menor disminución del  $\text{Ca(OH)}_2$ , propiciando que la sílice de la CV y la CB tengan la oportunidad de reaccionar, de ahí que se presente una mejor tendencia de incremento, en comparación con la matriz M1 en las últimas edades de curado, que si bien, no alcanzan lo reportado por dicha matriz, el efecto sinérgico encontrado puede propiciar el mayor desarrollo de resistencia a edades posteriores. Por otro lado, el efecto de relleno jugó un papel importante en el comportamiento de M4 y M5. Al igual que en las matrices M2 y M3, la CB propició el desarrollo de mayor resistencia, en comparación con la CV, debido a su mayor fineza, dado que se consiguió el mejor acomodo del material, propiciando un llenado óptimo que densificó la matriz con partículas no reactivas, de ahí que se presentaran valores más altos respecto a lo obtenido por la CV.

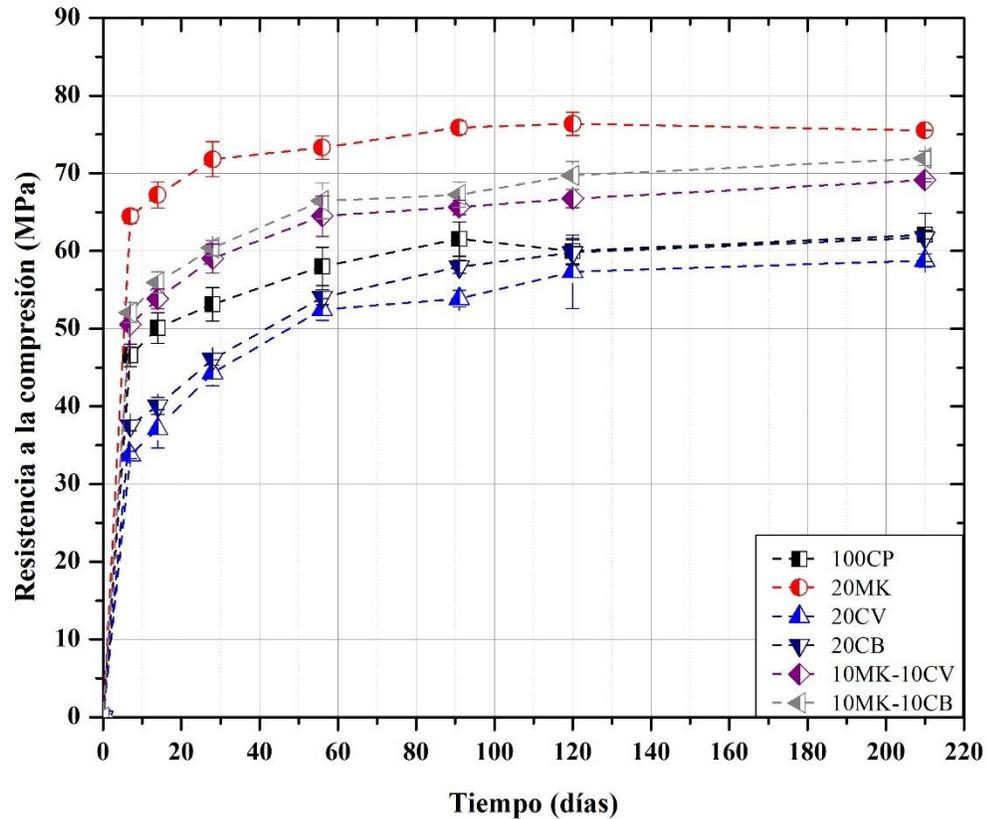


Figura 43.- Resistencia a la compresión de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 210 días

A partir del desarrollo de resistencia durante 28 días en curado estándar, en la Figura 44 se observa que los sistemas cementantes presentaron incrementos de resistencia cuando fueron expuestos a carbonatación. La matriz MC presentó una tendencia ascendente durante los primeros 28 días de exposición, alcanzando una resistencia de 62.1 MPa, es decir, 7% más resistencia en comparación con su similar a esa edad sin exposición. Posteriormente, la tendencia al incremento se estabilizó hasta los 180 días de exposición, edad en la cual alcanzó 68.3 MPa, 10% más resistencia que la matriz sin exposición. Por su parte, M1 presentó poca tendencia de incremento de resistencia, sin embargo, los valores fueron mayores que el curado estándar, alcanzando un tope de 80.6 MPa, a los 56 días de exposición, valor que se mantuvo hasta el final del periodo de evaluación.

En el caso de M2 y M3, presentaron comportamientos similares, siendo M2 la que mayores valores presentó a partir de los 14 días de exposición y hasta los 120 días, con diferencias respecto a M3 de entre el 3 y el 6%. Posteriormente, las resistencias se igualaron a los 180 días de exposición con valores de 67.4 y 68.3 MPa, respectivamente,

con las cuales se colocaron a la par de lo reportado por la matriz MC y con tendencia a un posible incremento en edades futuras. Por su parte, M4 y M5 también presentaron tendencias similares, en las cuales se encontraron resistencias que incrementaban con el paso del tiempo, llegando de 61.3 y 61.1 MPa a 78.4 y 78.0 MPa, respectivamente, con lo cual alcanzaron la resistencia lograda por M1 en carbonatación. De lo anterior, cabe destacar que los incrementos de resistencias finales con respecto a sus similares sin exposición fueron de 10, 5, 15, 11, 14 y 8% para MC, M1, M2, M3, M4 y M5, respectivamente.

Lo anterior se puede explicar mediante lo siguiente. En un ambiente rico en  $\text{CO}_2$ , se pueden propiciar las reacciones vistas en el apartado 2.9.1, las cuales de manera concisa se basan en la formación de  $\text{H}_2\text{CO}_3$  en presencia de agua, el cual posteriormente reacciona con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para formar  $\text{CaCO}_3$  un compuesto sólido y resistente que se aloja principalmente en los poros y en la ZTI, lo que produce una mayor densificación microestructural (ver micrografías de la Figura 79), consiguiendo que se obtengan matrices con mayor compactación y mayor fuerza de unión entre la pasta y los agregados, brindándole mayor dureza y resistencia a las muestras carbonatadas (Li et al., 2021).

Ahora bien, el incremento en las resistencias está ligado con la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  formado dentro de las muestras, el cual varió en función de las matrices cementantes, donde algunas presentaron mayor avance de carbonatación (ver apartado 5.3.1), de ahí que se presenten mayores incrementos de resistencia en algunas muestras. En el caso de las matrices MC y M1, su tendencia a incrementar la resistencia en un ambiente de carbonatación se ve limitada, puesto que resultaron ser matrices con poco avance de carbonatación, lo que propició que únicamente se alojara carbonato en las caras de las muestras y no en el núcleo de éstas, como ocurrió en el resto de las matrices, las cuales dada la mayor formación de  $\text{CaCO}_3$ , presentaron mayores incrementos de resistencia y tendencias positivas para edades avanzadas. En el caso de M2 y M3, igualando lo reportado por la matriz de referencia y en el caso de M4 y M5, igualando lo obtenido por la matriz M1.

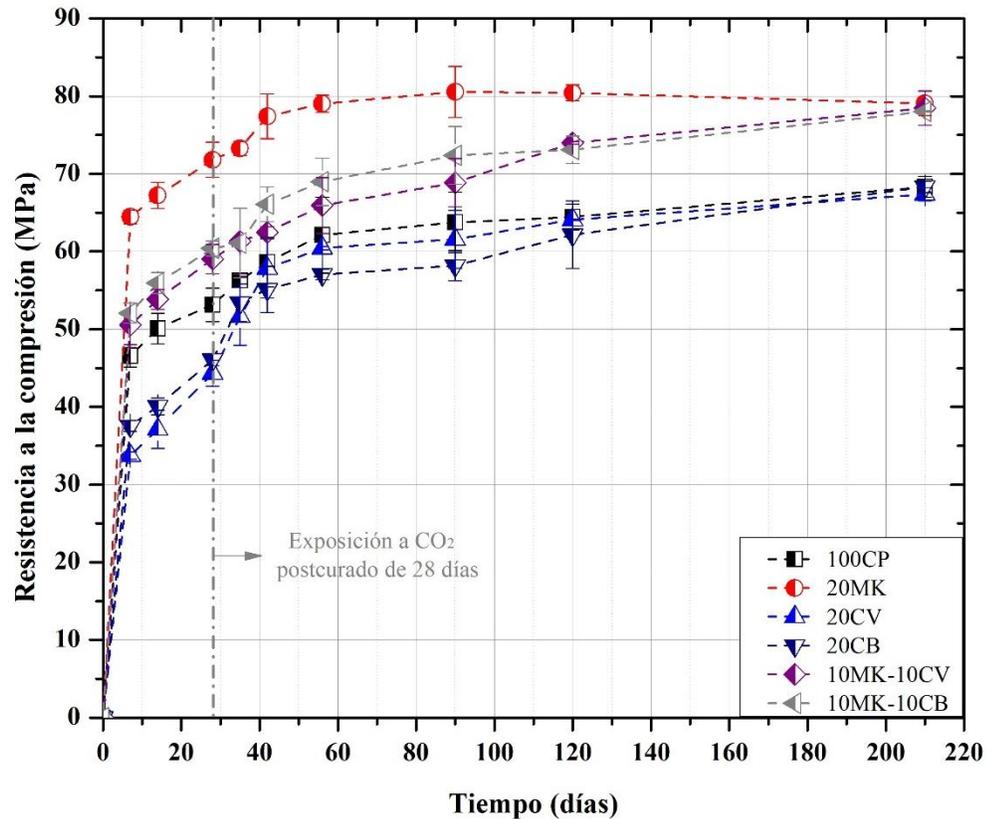


Figura 44.- Resistencia a la compresión de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de  $\text{CO}_2$  al 8% durante 180 días postcurado estándar

En el caso del desarrollo de resistencia a la compresión en exposición a  $\text{MgSO}_4$ , los resultados se muestran en la Figura 45. En ella se aprecian comportamientos contrarios a lo reportado en el curado estándar y en exposición a carbonatación, con decrementos de resistencia en la mayoría de las matrices. En primera instancia, MC y M1 presentan comportamientos similares con incrementos de resistencia hasta los 90 días de exposición, con un posterior decremento abrupto que lleva la resistencia a valores de 52.4 y 48.9 MPa para MC y 66.2 y 60.07 MPa para M1 a 120 y 180 días de exposición, respectivamente, lo que supone decrementos con respecto a sus similares en curado estándar de 13% y 20% para 120 y 180 días, en ambas matrices.

Por su parte, M2 y M3 comenzaron el comportamiento de las curvas de resistencia en exposición de manera similar, no obstante, a partir de 28 días, M2 comenzó un ligero descenso contrario a M3, matriz que comenzó a incrementar su resistencia hasta alcanzar lo obtenido por M1 al final de la exposición con 58.9 MPa, siendo esta resistencia similar a lo obtenido por la misma matriz sin exposición. Cabe destacar que, en estos

casos, los decrementos de resistencia fueron de 6 a 20% para M2 de 28 hasta los 180 días y de 3 a 13% para M3 con variaciones dada la tendencia al incremento, por lo cual, a 180 días de exposición, únicamente se encontró una disminución del 5% con respecto de M3 en curado estándar.

En el caso de M4 y M5, también se presentaron comportamientos similares hasta los 14 días de exposición, siguiendo la misma línea de incremento entre un 3 y 5% respecto de sus similares sin exposición. Posteriormente, a partir de los 28 días, M4 presentó un decremento en la tendencia de la resistencia que la llevó de 61.2 a 54.3 MPa. En el caso de M5, si bien presentó una ligera tendencia a decrecer la resistencia, ésta únicamente baja de 63.5 a 60.1 MPa. Lo anterior, en comparación con las muestras M4 y M5 en curado estándar, representa decrementos de 5 a 20% para M4 de 28 a 180 días de exposición y de 2 a 16 para M5 en el mismo grado de exposición.

Como se pudo observar de la Figura 45, las matrices cementantes expuestas a  $MgSO_4$  presentan dos comportamientos notorios que se sintetizan en un nivel de resistencia ascendente y otro descendente. La principal razón de este fenómeno resulta ser la formación de compuestos expansivos, los cuales, en las primeras edades de formación, más allá de un deterioro, se conforman como parte de los sistemas y, al igual que el  $CaCO_3$  formado a partir de la carbonatación, provocan el refinamiento de los poros, produciendo matrices más densas con mayor resistencia a la compresión.

No obstante, pasado el tiempo de exposición, las resistencias comienzan a decaer, lo cual se atribuye principalmente a la descomposición del gel CSH y a la formación de productos que no tienen capacidad de unión, tales como el yeso, la etringita y la brucita, así como el gel MSH (silicato de magnesio hidratado), el cual carece de cualidades adhesivas y de resistencia. Lo anterior condujo principalmente al debilitamiento de la pasta cementante, conllevando a una disminución de la resistencia a la compresión en todas las matrices, siendo las más afectadas la MC y la M1 (Mostofinejad et al., 2020; Kotwal et al., 2021). Esto se atribuye de tal manera, dado que los resultados obtenidos en cuanto a variación de masa (Figura 57) y expansión (Figura 58), así como las micrografías tomadas (Figura 81), demuestran la poca formación de agrietamientos por parte de las presiones internas.

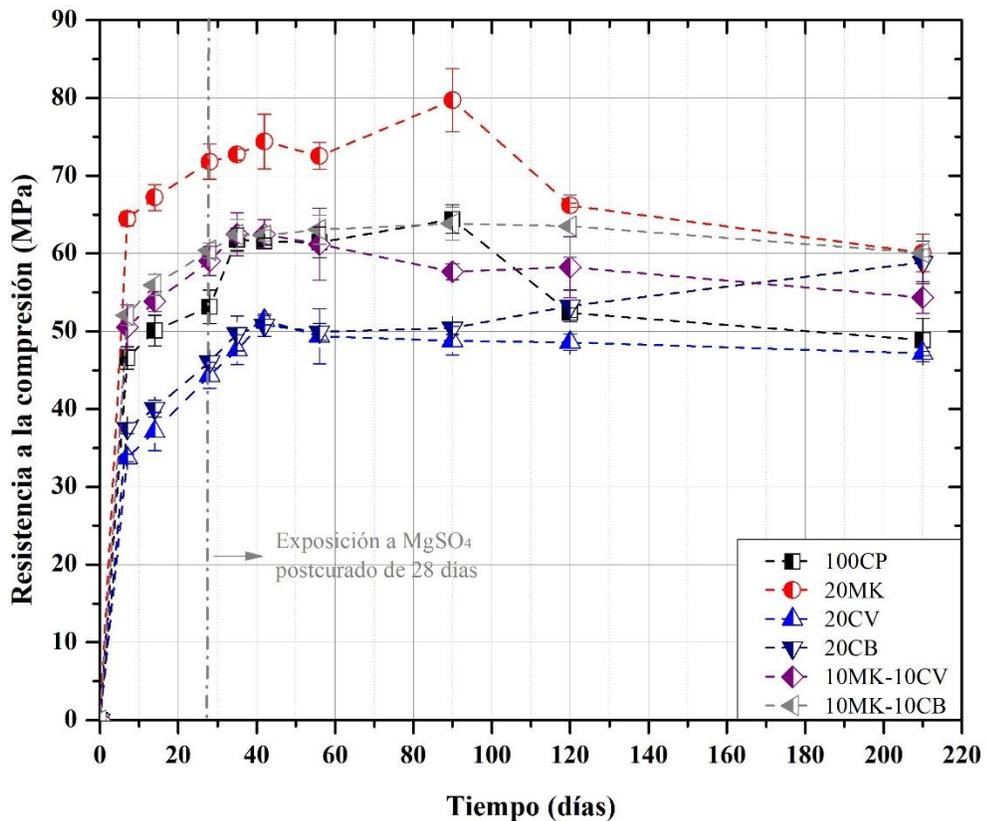


Figura 45.- Resistencia a la compresión de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar. Aunado a lo anterior, el comportamiento de decaimiento abrupto por parte de MC y M1 con respecto al resto de matrices se puede atribuir principalmente a dos factores. Uno de ellos es el factor de empaquetamiento logrado a partir de las partículas no reactivas de la CV y la CB, las cuales aportan mayor densificación e imposibilitan el paso del agente agresivo a través de la matriz cementante, incluso en edades avanzadas. El otro es el consumo de  $Ca(OH)_2$ . Si bien el MK presenta un consumo considerable de portlandita desde las primeras edades de hidratación (ver apartado 5.1.1.6), al reaccionar toda la sílice y alúmina disponible, el resto de portlandita producida se queda presente en la matriz cementante, lo que permite la interacción del  $MgSO_4$  para producir yeso, el cual, a su vez, reacciona con el  $C_3A$  para formar etringita y otros compuestos (Pinto et al., 2020). Sin embargo, en el caso de las matrices con CV y CB, en especial M4 y M5, el consumo de  $Ca(OH)_2$  se extiende por mayores periodos de tiempo, mitigando las reacciones del sulfato. Ahora bien, en el caso específico de la CB, como se vio antes, presenta tamaños de partícula cuatro veces más finos que la CV (ver Figura 35), lo que

puede mitigar en mayor medida el ingreso del agente nocivo a estas matrices dado el relleno de los poros, a lo cual se le suman las reacciones tardías y su efecto sobre el consumo de portlandita, con lo cual se ve relativamente mejorada la resistencia hasta 180 días de exposición.

### 5.2.2. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una prueba no destructiva que permite la estimación de la porosidad de las matrices cementantes y su posible riesgo de ingreso de agentes nocivos. La Tabla 12 resume el tipo de porosidad de acuerdo con la norma NMX – C – 514 – ONNCCE – 2016 en función de los valores de resistividad eléctrica. Los rangos establecidos también son observables en las gráficas para un mejor entendimiento de la información.

Tabla 12 Tipo de porosidad del concreto en función de los valores de resistividad eléctrica

| <b>Resistividad Eléctrica (kΩ-cm)</b> | <b>Tipo de porosidad</b> |
|---------------------------------------|--------------------------|
| > 100 – 200                           | Extremadamente baja      |
| 50 a 100                              | Baja                     |
| 10 a 50                               | De consideración         |
| < 10                                  | Excesiva                 |

\*Adaptada de: La norma NMX – C 514 – ONNCCE – 2016

La Figura 46 muestra los resultados de resistividad eléctrica de los sistemas cementantes en curado estándar en inmersión en agua con cal al 3%. En ella se observa un incremento significativo en todas las mezclas con adiciones puzolánicas. La matriz MC con 100% CP presenta valores de resistividad bajos de entre 2 y 7.3 kΩ-cm desde las edades iniciales hasta las finales. Valores similares reportaron Arenas-Piedrahita et al., en 2016, para sistemas cementantes sin adiciones. La matriz M1 con 20% de MK presenta el mejor comportamiento con resistividades de entre 59.4 y 84.83 kΩ-cm al igual que lo reportado por Ferreira et al., en el 2015. En este caso, presentando incrementos de 27 veces más con respecto de la matriz MC en las primeras edades y de 11 veces más en edades avanzadas, es decir, presenta un incremento de RE inicial alto que con el tiempo disminuyó. En el caso de las matrices M2 y M3 con 20% CV y CB, respectivamente, se encontró un desarrollo de resistividad incierto en las primeras edades, teniendo menor resistividad a 7 días e incrementando lentamente a partir de los

28 y hasta los 56 días, con respecto de la matriz de referencia. A partir de 90 días se observa una mayor tendencia al incremento, siendo la CB la que presenta mejor RE que la CV, donde la CB incrementó la resistividad alrededor del doble de la MC y la CV la mejoró alrededor de 1.33 veces. Comportamiento similar reportaron Kara De Maeijer et al., (2020) y Kurda et al., (2018), respectivamente. Por su parte, las matrices M4 y M5 presentaron comportamiento similar entre sí con desarrollo de resistividad alta en las primeras edades, estabilizando su incremento a partir de los 28 días de curado, edad a partir de la cual presentan una tendencia de incremento, similar a lo reportado por las matrices M2 y M3.

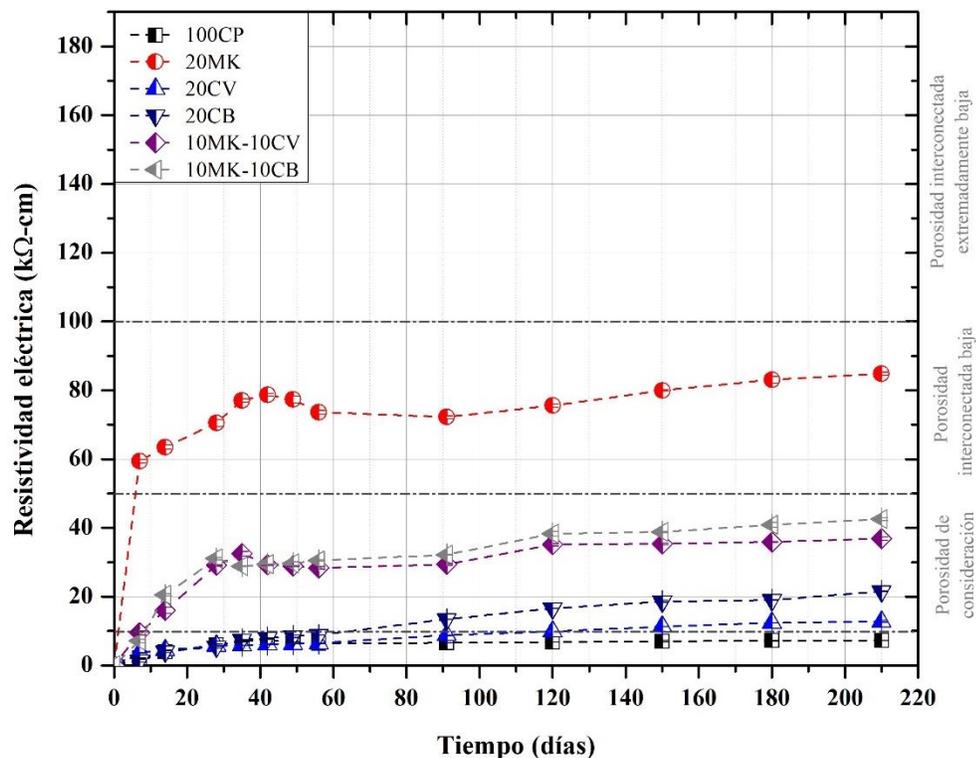


Figura 46.- Resistividad eléctrica de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 210 días

La resistividad eléctrica se considera una medida indirecta, tanto de la porosidad como de la difusividad, dentro de una matriz cementante. En general, el uso de MCS provocan un incremento en los valores de resistividad eléctrica en función del reemplazo del CP, dado que presentan una mayor resistencia al flujo de iones a través de los sistemas cementantes, principalmente por la formación de productos de hidratación durante las reacciones puzolánicas (Álvarez et al., 2017). Por lo anterior, el comportamiento de las

matrices cementantes se atribuye a diferentes efectos, logrados a partir de las características de cada puzolana.

En primera instancia, el comportamiento de M1 se atribuye al efecto de la reacción puzolánica acelerada por parte del MK, en la cual los compuestos de sílice y alúmina de este material reacciona con el  $\text{Ca(OH)}_2$  formado a partir de la hidratación del CP, produciendo geles CSH y CASH que provocan cambios microestructurales en la porosidad de la matriz a partir del refinamiento de los poros (ver Figura 78). Algunos autores han llamado a este fenómeno nucleación heterogénea por la formación de compuestos sólidos que permiten la mejora de propiedades en las matrices cementantes (Ghoddousi y Adelzade, 2017; Hu y He, 2020). Posteriormente, el MK transformado en geles se pierde en las primeras edades, provocando la disminución de la tendencia al incremento que se observa a partir de los 28 días de curado.

Por su parte, el comportamiento inicial de la CV y la CB se debe principalmente a las reacciones puzolánicas tardías de estos materiales, las cuales provocan una tendencia al incremento a partir de los 28 días, que se relaciona con el refinamiento de la estructura de poros (Figura 77), el cual aumenta la tortuosidad o discontinuidad de la red de poros, lo que provoca un incremento en la trayectoria de los iones a través de las matrices cementantes, propiciando el incremento de la RE (Rodríguez et al., 2015; Kara De Maeijer et al., 2020; Kaur et al., 2020).

Aunado a lo anterior, debe hacerse notar que la RE de M3 resultó mayor que la de M2. Se sabe que la corriente eléctrica que fluye a través de las pastas cementantes hidratadas se debe a un proceso electrolítico, como resultado del flujo de iones tales como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{OH}^-$ , entre otros (Duran-Herrera et al., 2019). Con el uso de algunas puzolanas como reemplazo del CP como la CV y el MK, la concentraciones de iones alcalinos generalmente disminuye, lo que conlleva a una conductividad baja y, por ende, a una resistividad mayor. Caso contrario ocurre con la CB, la cual presenta álcalis tales como el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{K}^+$  en concentraciones considerables (Tabla 6), con lo cual la RE tendería a disminuir con respecto a la CV; sin embargo, otro punto a considerar es el tamaño de la partícula de las puzolanas (Figura 35). En este caso, la finura de las cenizas juega un papel importante en el desarrollo de resistividad. Una mayor fineza da como

resultado una mayor resistividad eléctrica, debido a que se potencializan las reacciones puzolánicas, además de incrementar el efecto *filler*, con lo cual se aumenta la tortuosidad de la red capilar mediante la disminución de los tamaños de los poros, disminuyendo consecuentemente la movilidad iónica en las soluciones electrolíticas (Kurda et al., 2018; Jiménez-Quero et al., 2019; Kara De Maeijer et al., 2020).

A partir de lo anterior, el comportamiento de las matrices M4 y M5 y el efecto de la CV y la CB en combinación con el MK se pueden atribuir a diferentes aspectos. Los incrementos por parte de la CV y la CB se deben a las reacciones puzolánicas con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para formar CSH adicional, con lo cual se disminuye la interconectividad de los poros, permitiendo una mayor densificación que previene la difusión iónica en la solución de poros (Arenas-Piedrahita et al., 2016; Joshaghani y Moeini, 2017; Jiménez-Quero et al., 2019). No obstante, el efecto acelerado del MK, presenta un consumo mayor de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que no permite la potencialización de las reacciones por parte de la CV y la CB, lo que provoca una tendencia baja al incremento en las mezclas M4 y M5, sin embargo, mantiene valores de RE elevados. Lo anterior, debido a la contribución de las partículas de CV y CB que no reaccionan químicamente, pero que mediante el efecto *filler* reducen la porosidad de las matrices y la interconectividad de los poros tal como se muestra en las Figura 74 y Figura 75.

Tomando como base lo anterior, la Figura 47 y la Figura 48 muestran los resultados obtenidos de RE ante ambientes agresivos de  $\text{CO}_2$  y  $\text{MgSO}_4$  durante el monitoreo de 180 días posterior a un curado estándar previo de 28 días, respectivamente. En el caso de la resistividad eléctrica en carbonatación, todas las matrices presentaron incrementos que oscilan entre 1.8 y 4.25 veces lo reportado en las matrices sin exposición para las edades finales, siendo la matriz MC la del mayor incremento en proporción. Por su parte, la matriz M1 presentó un incremento del doble respecto a la matriz M1 sin exposición; las matrices M2 y M3 reportaron incrementos de 2.8 y 3.1 veces su contraparte sin carbonatación, respectivamente; y las matrices M4 y M5 presentaron los menores incrementos en RE en carbonatación con valores por debajo de 2 veces su referencia. Cabe destacar que los comportamientos encontrados son similares a la RE en curado estándar; tendencias similares reportaron Yang et al., en 2021 con diferentes sistemas

cementantes. Lo anterior en concordancia con lo reportado en el avance de la carbonatación en condición acelerada (Figura 55), donde se observa un incremento de carbonatación bajo para las matrices MC y M1, seguidas de M4 y M5 con profundidades de carbonatación similares, por lo que los incrementos de RE muestran comportamiento similar, finalizando con M2 y M3, las cuales presentan los mayores avances de carbonatación y, por ende, los mayores incrementos de RE con respecto al resto de matrices.

Lo anterior es atribuible a dos factores principales. En las primeras edades de exposición comienza la tendencia al incremento de la resistividad ante carbonatación, la cual se mantiene hasta las edades finales. Esto como resultado de la formación de  $\text{CaCO}_3$ , el cual se precipita ocupando mayor volumen de lo ocupado por el compuesto a partir del cual se forma, el  $\text{Ca(OH)}_2$ , debido a su mayor densidad (Yang y Wang, 2021). Lo anterior contribuye a la disminución de la porosidad de las matrices cementantes en las zonas carbonatadas. El incremento del avance de la carbonatación propicia la formación de poros más finos, causando microestructuras tortuosas y discontinuas en las que la RE se ve aumentada (ver Figura 79) (Gawel et al., 2021).

Así mismo, el segundo factor a considerar fueron las condiciones de evaluación. La difusión de iones a través de las matrices cementantes se encuentra condicionada al medio de transporte, siendo éste principalmente la humedad relativa interna de las muestras. En el caso de las muestras en curado, la humedad se consideraba saturada, puesto que el proceso de curado era en inmersión. En contraparte, la exposición a carbonatación se realizó con HR de  $60 \pm 5\%$ , por lo que dicha disminución de humedad incrementó las resistividades, principalmente de las matrices MC y M1, en las cuales el aporte de RE por parte de la carbonatación es menor. Algunos autores han estimado que en función de la diferencia de humedades en las evaluaciones de resistividad eléctrica, ésta puede aumentar entre 2 y 6 veces (Azarsa y Gupta, 2017; Yang y Wang, 2021)

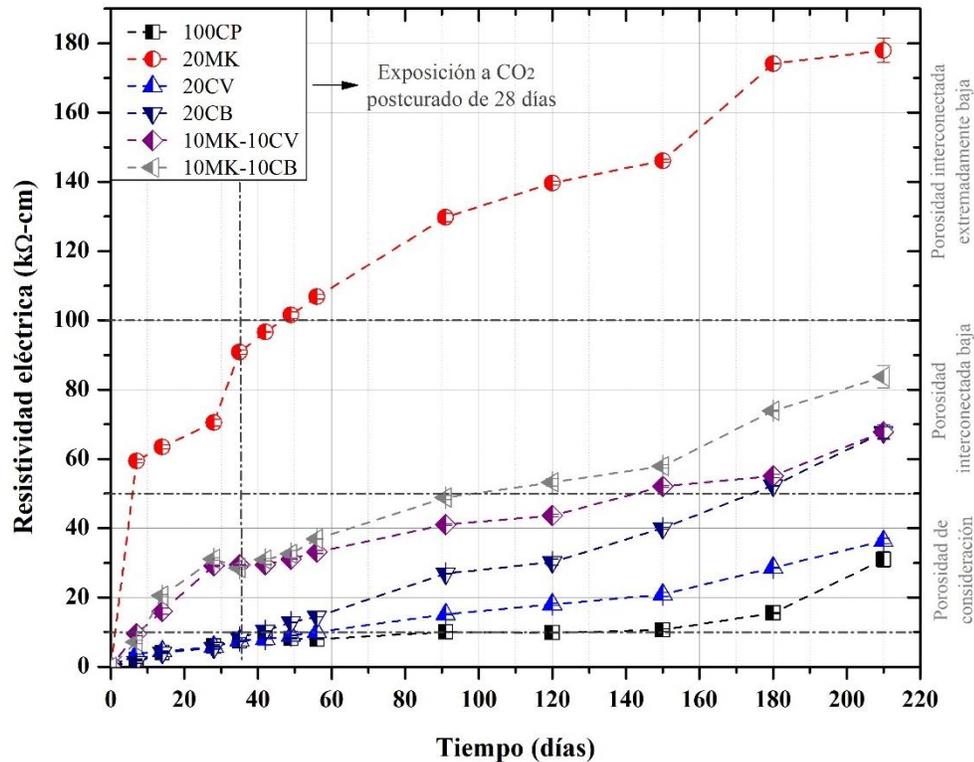


Figura 47.- Resistividad eléctrica de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO<sub>2</sub> al 8% durante 180 días postcurado estándar

Por otro lado, en el caso de la exposición a MgSO<sub>4</sub> (Figura 48), se encontraron incrementos mínimos en las resistividades de la mayoría de las matrices, los cuales oscilaron entre el 1 y el 5% respecto de los resultados sin exposición, con tendencias a la disminución en las últimas edades, principalmente en las matrices MC, M1, M2 y M4. En el caso de las matrices con contenidos de CB (M3 y M5), existieron incrementos de 13% para las primeras edades de exposición y 9% para las últimas edades, es decir, presentan tendencia a disminuir el porcentaje de incremento sin disminuir la RE de las matrices sin exposición. Lo anterior acorde con lo reportado en la Figura 58, donde MC presenta la mayor expansión y, a su vez, la mayor tendencia a disminuir la RE. En contraparte, M1 presenta la menor expansión, por lo que tendió a reportar valores más altos de RE, con tendencia final a disminuir. En el caso del resto de las matrices, las expansiones causadas por el MgO<sub>4</sub> se agruparon, lo que propició un comportamiento similar en las evaluaciones de resistividad.

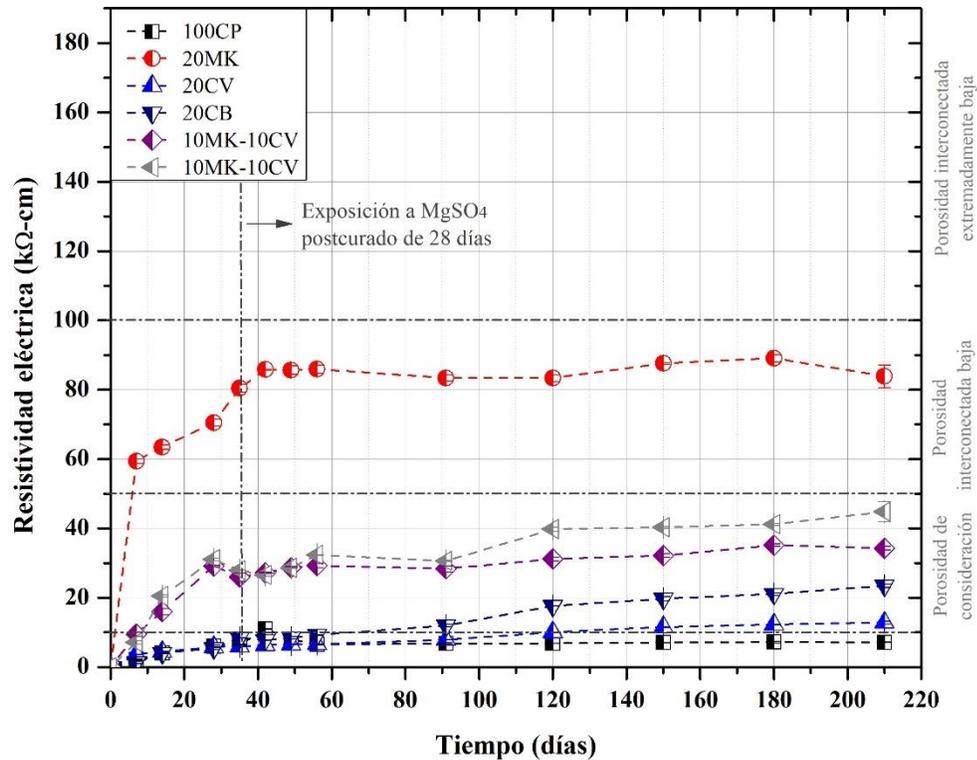


Figura 48.- Resistividad eléctrica de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar

Los comportamientos anteriores son atribuibles a que el ataque por sulfatos provoca la formación de compuestos tales como la etringita. Este compuesto resulta expansivo y dañino en función de las cantidades formadas. En general, la resistividad eléctrica es función de la porosidad y la permeabilidad. Cuando la formación de etringita se mantiene en cantidades mínimas, la resistividad eléctrica tiende a subir, dado el refinamiento inicial de los poros. Cuando el sulfato alcanza formaciones de etringita que llevan al deterioro, la resistividad comienza a decaer por la formación de agrietamientos internos. No obstante, el deterioro es función del tiempo. Si no se alcanzan expansiones que provoquen deterioro grave a través del tiempo, la resistividad tenderá a presentar un ligero incremento con respecto a las referencias y posteriores decremento mínimos (Gopalakrishnan y Jeyalakshmi, 2020).

### 5.2.3. Velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico es una prueba que permite la estimación de la calidad de densificación de las matrices cementantes, lo cual es conocido como condición general de la matriz. Lo anterior en función de la velocidad estimada mediante la prueba

y bajo lo establecido en la Tabla 13. Estos rangos de valores se establecieron en las gráficas para una mayor comprensión del rango en el que se encuentran las matrices estudiadas.

Tabla 13 Clasificación del concreto de acuerdo con su velocidad de pulso

| <b>Condición General</b> | <b>Velocidad de Pulso (m/s)</b> |
|--------------------------|---------------------------------|
| Excelente                | $> 4575$                        |
| Bueno                    | $3660 < V < 4575$               |
| Cuestionable             | $3050 < V < 3660$               |
| Pobre                    | $2125 < V < 3050$               |
| Muy pobre                | $< 2125$                        |

\*Adaptada de: Feldman R. F., “CBD-187. Non-Destructive Testing of Concrete”, en National Research Council Canada, [www.nrc-cnrc.gc.ca](http://www.nrc-cnrc.gc.ca).

En la Figura 49 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) en condiciones de curado estándar. En esta figura se puede observar que se presentaron variaciones con intervalos pequeños de dispersión. No obstante, se aprecian algunas tendencias significativas. Primeramente, a los 7 días de curado, las matrices con MK y residuos presentaron una ligera mejora con respecto de la matriz de referencia, al igual que M1, la cual presentó el mayor desarrollo de velocidad de pulso inicial, rondando los 4800 m/s; velocidad que posteriormente se mantuvo a edades avanzadas. Por su parte, M2 y M3 se mantuvieron por debajo de la referencia, manteniendo un comportamiento similar en las edades iniciales con cierta tendencia al incremento, la cual posteriormente disminuyó, alcanzando únicamente valores de 4700 y 4800 m/s en las últimas edades, respectivamente. En el caso de la matriz M1, no se presentó tendencia al incremento, es decir, mantuvo los valores iniciales de VPU en edades avanzadas. Cabe destacar que durante los primeros 28 días, las velocidades de todas las matrices rondaron entre 4300 y 4600 m/s, valores que concuerdan con lo reportado por otros autores para sistemas cementantes con adiciones puzolánicas (Mardani-Aghabaglou et al., 2014; Le et al., 2018; Katura y Madurwar, 2021). Por otra parte, MC y M5 presentaron un comportamiento similar hasta la edad más avanzada de curado con valores elevados que rondaron los 5000 m/s. Así mismo, M4 presentó una tendencia similar a las anteriores; sin embargo, reportó valores menores que alcanzaron únicamente los 4800 m/s en edades avanzadas. Cabe mencionar que, salvo las primeras edades, los sistemas cementantes mostraron velocidades de pulso mayores que 4500 m/s

acorde con matrices densas con alta resistencia y calidad (Mardani-Aghabaglou et al., 2014).

De lo anterior, la velocidad de pulso ultrasónico es atribuible a diferentes factores, tales como las proporciones de las mezclas, las características de los ingredientes, la estructura de poros y las características de la zona de transición interfacial (ZTI) (Mardani-Aghabaglou et al., 2014; Zunino y Scrivener, 2021). Algunos otros factores involucran las condiciones de medición y los dispositivos, los cuales, en función de la sensibilidad de las lecturas, pueden provocar mayor o menor cantidad de variaciones y dispersión, lo cual explica el comportamiento presentado de manera general por las matrices cementantes (Arenas-Piedrahita et al., 2016).

Partiendo de lo mencionado, se consideraron las siguientes atribuciones al comportamiento de cada matriz cementante. En primera instancia, el MK es un material con acción puzolánica rápida debido a la alta generación de calor a partir de los procesos de hidratación, lo cual, sumado a sus características físicas tales como la finura de sus partículas, propicia el refinamiento de los poros internos en la ZTI y en la matriz, lo que causa el incremento de la velocidad de paso de las ondas de ultrasonido a través de las muestras en las primeras edades de curado, incluso llegando a alcanzar valores elevados en las primeras horas de fraguado y endurecimiento como reportan algunos autores (Zunino y Scrivener, 2021). Posteriormente, la generación de calor se ve disminuida por lo que el comportamiento en los valores de matrices como la M1 tiende a ser lineal sin incrementos notables.

Por otra parte, estudios previos han demostrado que la CV y la CB presentan un efecto físico – químico en la mejora de los valores de VPU que involucra el efecto de relleno por parte de las partículas no reactivas y el refinamiento microestructural por la formación de compuestos tales como el gel CSH (Mardani-Aghabaglou et al., 2014; Le et al., 2018). Lo anterior debido a que inicialmente el volumen de los poros tiende a disminuir por la formación de CSH generado durante la hidratación del CP, la cual se potencializa a edades avanzadas, por las reacciones tardías de la CV y la CB y, posteriormente, el efecto de relleno de estas puzolanas propicia un llenado adicional de los micro y macro poros existentes en la matriz, causando el incremento de la VPU. Sin

embargo, en este estudio, los valores de VPU para las matrices M2 y M3 tendieron a disminuir con respecto al resto de las mezclas. Este comportamiento se encuentra acorde con otros autores (Rao et al., 2016; Kara De Maeijer et al., 2020), el cual se justifica por dos factores principales: la finura de las partículas y la densidad de los materiales.

Por un lado, al igual que el MK, la mayor finura de las partículas de CB, propician un mejor comportamiento, en comparación con lo reportado por la CV, la cual presenta los tamaños de partícula mayores con respecto del resto de los cementantes (Figura 35), esto debido a la mayor capacidad de llenado de los poros, lo que propicia que se genere una matriz más densa que permite el paso de las ondas ultrasónicas sin tanta tortuosidad. Aunado a lo anterior, si bien la CV y la CB presentan reactividad en edades avanzadas, su efecto se ve limitado dado que los incrementos con respecto del CP resultan poco significativos. Lo anterior se atribuye a la baja densidad de estas puzolanas, en comparación con la densidad del CP (Tabla 7), dado que la sustitución de estos materiales decrece la densidad de las matrices finales que, como se mencionó antes, es una característica considerada como uno de los principales factores para obtener velocidades de pulso ultrasónico elevadas (Arenas-Piedrahita et al., 2016; Kara de Maeijer et al., 2020).

Partiendo de lo mencionado, se puede considerar que los efectos potenciales de la CV y la CB en las matrices M4 y M5, respectivamente, se ven limitadas a sus características físicas, involucrando de menor manera sus aportaciones reactivas. En el caso de M4, el mayor tamaño de partícula de la CV y su menor densidad, no propician el desarrollo de microestructuras más densas y menos discontinuas que posibiliten el paso de las ondas ultrasónicas, las cuales, como se mencionó anteriormente, resultan muy sensibles al pasar por las matrices. Caso contrario en la matriz M5. En ella, los finos tamaños de partícula de la CB, en combinación con los del MK, conllevaron a un incremento en el llenado de los poros que permitió la formación de una matriz menos tortuosa y discontinua para el paso de las ondas de los transductores, lo que posibilitó incrementar la velocidad de pulso hasta valores similares a lo reportado por la matriz de referencia.

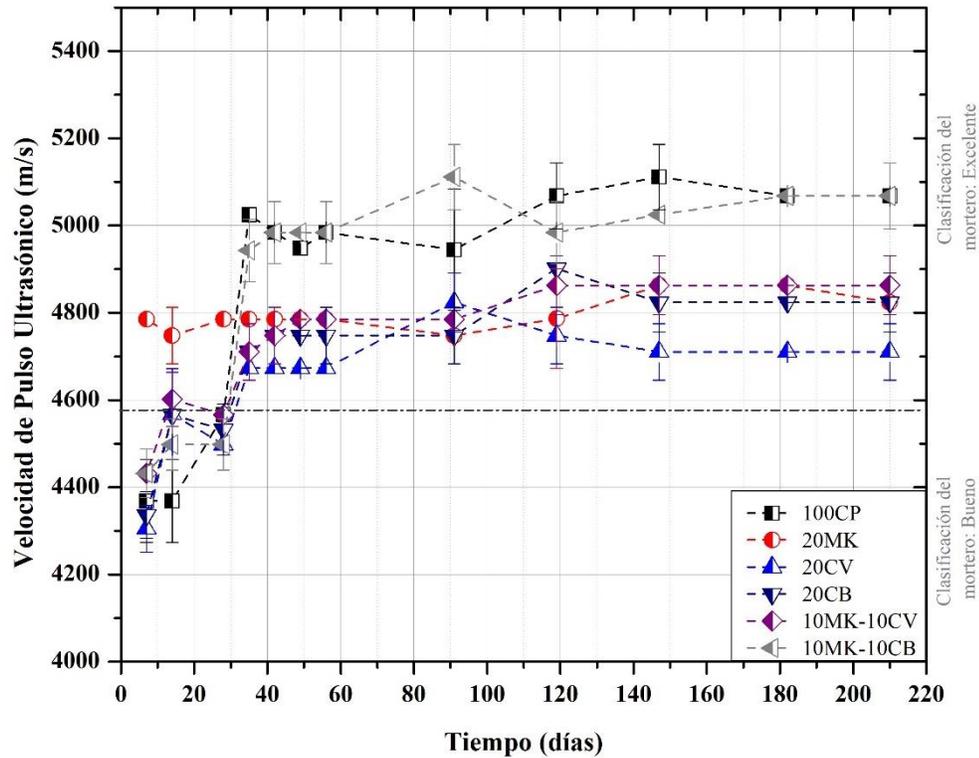


Figura 49.- Velocidad de pulso ultrasónico de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 210 días

Al igual que el comportamiento de la velocidad de pulso de las matrices cementantes en curado estándar, las muestras expuestas al deterioro posterior al curado de 28 días presentaron datos variados con alto grado de dispersión. Sin embargo, se logran observar algunas tendencias significativas.

En el caso de las muestras expuestas a CO<sub>2</sub>, la Figura 50 muestra el comportamiento de los sistemas cementantes en este ambiente. En ella se aprecia un comportamiento final dentro de un intervalo de valores de 4700 a 4850 m/s, con algunas tendencias significativas a destacar. En primer lugar, posterior a la exposición, se aprecian incrementos graduales hasta los 70 días, tiempo a partir del cual comienzan a descender los valores de VPU, siendo los de mayor disminución las matrices MC y M5, las cuales igualan los valores presentados por el resto de las matrices. En el caso de las matrices M2 y M3, su comportamiento final es similar; sin embargo, en el primer lapso de exposición (70 días), la VPU presenta mayor incremento en M2. Por su parte, M1 replica el comportamiento de las muestras evaluadas sin exposición a deterioro y M4 imita dicho comportamiento desde las primeras edades de exposición. No obstante, a

pesar de la variabilidad en los comportamientos, se debe destacar la tendencia final en la que las velocidades resultan ser similares para todas las matrices.

La exposición a carbonatación limita la hidratación de las matrices cementantes, por lo que la densificación se centra en el relleno de poros mediante la formación de  $\text{CaCO}_3$ , lo cual, en primera instancia incrementa la velocidad de pulso. Sin embargo, en el caso de MC y M1, éstas son matrices que presentan menor avance de carbonatación en comparación con el resto como se muestra en el apartado 5.3.1. Al presentarse este comportamiento, existe poco refinamiento de poros y las velocidades de pulso tienden a estabilizarse, por lo que no se presentan incrementos notables. Caso contrario ocurre con M2, la cual presenta un avance de carbonatación rápido en las primeras edades de exposición, potencializando el incremento de la velocidad de pulso. Pasado cierto tiempo esta velocidad decrece y se estabiliza de forma similar a las matrices MC y M1. Lo anterior puede deberse a la siguiente causa: si bien, la formación de  $\text{CaCO}_3$  refina los poros, este compuesto tiende a ser un material sólido que dispersa el paso de las ondas ultrasónicas, provocando el decremento de las velocidades de pulso. Caso similar ocurre con la matriz M3, salvo que presenta un comportamiento lineal sin sobresaltos, aunque con velocidades menores a lo reportado por las muestras sin exposición. Lo anterior puesto que la humedad se considera un factor limitante para la reacción puzolánica de la CB, lo que provoca que el  $\text{CaCO}_3$  sea el responsable de los valores de velocidad obtenidos. El mismo comportamiento lineal presenta M4, matriz en la que, como ya se vio, la CV mitiga el incremento de la velocidad de pulso, aunado a los efectos de la formación de compuestos por parte de la carbonatación. En el caso de la matriz M5, inicialmente el avance de la carbonatación es relativamente bajo, lo que propicia que el comportamiento sea similar a la matriz sin exposición, sin embargo, con el tiempo el avance de carbonatación se amplía, lo que propicia el decremento de las velocidades por la obstrucción de las cantidades de  $\text{CaCO}_3$ .

Lo anterior, ha sido corroborado por algunos autores tales como Yang et al., en 2021, los cuales destacan en algunos casos el incremento de la velocidad de pulso por acción de la carbonatación, sin dejar de lado la disminución de estos valores dada la formación de compuestos sólidos que llegan a afectar el paso de las ondas sónicas entre los transductores.

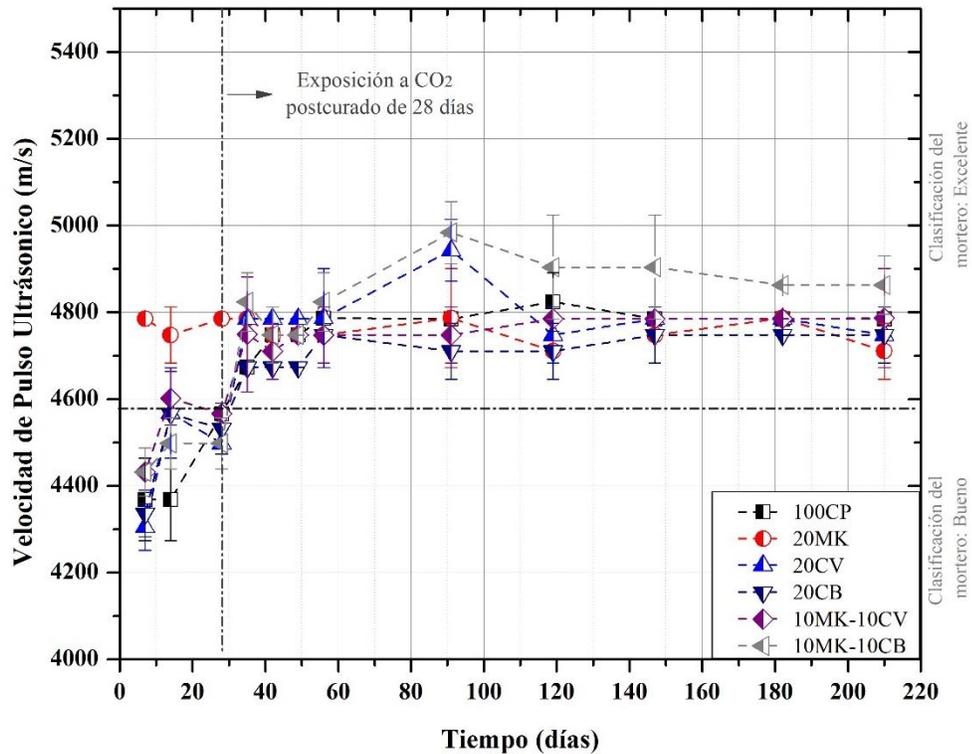


Figura 50.- Velocidad de pulso ultrasónico de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO<sub>2</sub> al 8% durante 180 días postcurado estándar

Por otro lado, las muestras expuestas a sulfatos presentaron tendencias contrarias al deterioro por carbonatación, las cuales, si bien, se mantuvieron dentro de un intervalo de 4800 a 5000 m/s, reportaron cierto incremento significativo (Figura 51). En el caso de la matriz MC, la VPU se mantuvo como la menor con respecto al resto. La matriz M1 mantuvo su tendencia lineal con un ligero incremento con el avance del tiempo. La matriz M2 presentó un comportamiento similar a la matriz M3, siendo esta última la que mayor VPU reportó. Y, en el caso de M4 y M5, los comportamientos resultaron similares, presentando altibajos atribuibles a la variabilidad de los datos.

Los comportamientos anteriores se encuentran atribuidos a las siguientes causas: la velocidad de pulso es una propiedad atribuible a la densificación. El deterioro por sulfatos, al igual que la carbonatación, comienza con un proceso de densificación que se incrementa con el tiempo. En este caso, y en concordancia con la discusión de la resistividad eléctrica, las matrices cementantes presentan formaciones de etringita por la acción del MgSO<sub>4</sub> que de manera similar al CaCO<sub>3</sub> y a los productos de hidratación del CP y las puzolanas, se alojan en la red de poros de las matrices, formando un sistema

continuo que disminuye la distancia de la trayectoria de las ondas de sonido, con lo cual se incrementa la VPU. Es por esto por lo que se observan ligeros incrementos de velocidad en las edades finales. Finalizado el proceso de llenado de poros por parte del ataque de sulfatos, las expansiones tienden a erosionar las matrices; sin embargo, dados los tiempos de exposición y las características de las matrices, los agrietamientos y el deterioro no se presentan de manera considerable para afectar las mediciones; sin embargo, esto no significa que no exista el deterioro en las muestras, por lo que se deben considerar las evaluaciones de otras propiedades físicas de las matrices. Lo anterior se ha establecido por algunos autores como dos etapas de desarrollo de velocidad de las ondas de ultrasonido ante el ataque de sulfatos. La primer etapa de desarrollo correspondiente al refinamiento de poros por la formación de compuestos expansivos y la segunda etapa de disminución rápida, donde debido al deterioro se presentan disminuciones en las velocidades (Wang et al., 2020).

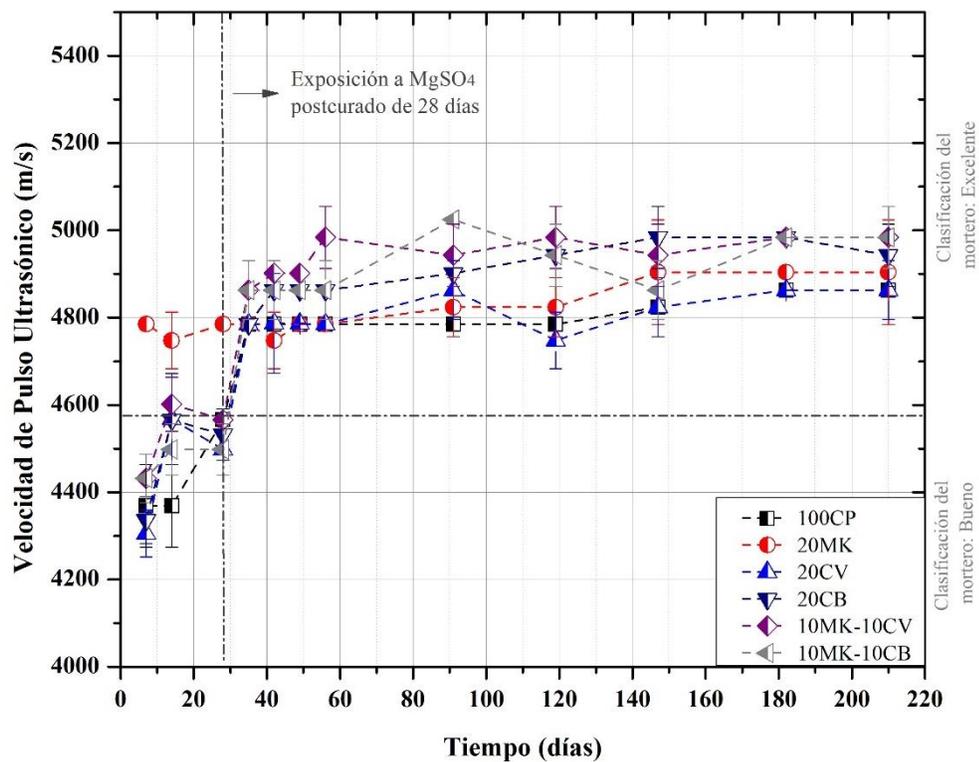


Figura 51.- Velocidad de pulso ultrasónico de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar

#### 5.2.4. Permeabilidad al aire

La Figura 52 muestra los resultados obtenidos de la prueba de permeabilidad al aire de las matrices cementantes en curado estándar. De manera general, se observan comportamientos descendentes en todas las matrices, destacando que todos los sistemas con adición de puzolanas presentaron mejores coeficientes de permeabilidad que la matriz de referencia.

Partiendo de MC, ésta fue la matriz con los mayores coeficientes iniciales con  $0.025 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  a los 7 días de curado,  $0.020$  a los 14 y  $0.017$  a los 28. Seguido de MC se encuentran M2 y M3 con coeficientes a 7 días de  $0.019$  y  $0.020 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , respectivamente, disminuyendo a  $0.017$  y  $0.016$  a 14 días y a  $0.015$  ambas matrices a 28 días de curado. Posteriormente, las siguen M1, M4 y M5 con los mismos comportamientos entre ellas, reportando los menores coeficientes de permeabilidad iniciales partiendo de  $0.015$ ,  $0.016$  y  $0.017 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  a los 7 días de curado, respectivamente, con decrementos hasta  $0.013 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  para todas las matrices a 14 días y  $0.012$ ,  $0.011$  y  $0.010$  a 28 días.

De la figura se puede discutir que en términos generales es el mismo comportamiento para todas las matrices con inicio en coeficientes altos que descienden abruptamente hasta el rango de entre 42 y 56 días de curado. Posteriormente se presenta un periodo de estabilización o descenso menos agresivo que mantiene los valores hasta la última edad de evaluación. Cabe mencionar que en el primer periodo se observan tendencias claras de cada matriz; sin embargo, en el período de estabilización existió mayor variabilidad de datos que no permiten observar un comportamiento claro para cada sistema cementante, Lo anterior posiblemente es atribuible a la precisión del equipo y a la sensibilidad de las mediciones. No obstante, cabe destacar que, para los 180 días de curado, los coeficientes se ven reducidos por todas las matrices hasta un intervalo de  $0.003 \pm 0.002 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ .

Lo anterior se atribuye a las siguientes causas: en primer lugar, el MK es una puzolana con contenidos de sílice y alúmina altamente reactiva (Figura 34), que en las primeras edades de hidratación produce geles CSH y CAH que en suma contribuyen a la formación del gel CASH, un compuesto que mediante el llenado de los poros logra

conformar una microestructura más uniforme y compacta que la de la matriz de referencia (Figura 75). Sumando a esto, el efecto que logran desde los primeros momentos de mezclado las partículas finas de esta puzolana, las cuales se alojan en los vacíos existentes dentro de la pasta cementante, así como en la ZTI, propiciando que se potencialice la densificación de la microestructura (Ramezaniapour, 2014). De ahí que la matriz M1 presente la menor permeabilidad en las primeras edades de curado. Posteriormente, las partículas reactivas del MK tienden a consumirse al reaccionar con la portlandita, lo que propicia que no se produzca mayor cantidad de gel CASH, con lo cual el comportamiento se ve igualado e incluso superado por algunas matrices con otras características (DeBelie, 2018). No obstante, los coeficientes tienden a ser muy similares en edades avanzadas de curado.

Por otro lado, en el caso de la CV y la CB en las matrices M2 y M3, respectivamente, algunos autores han estimado que, en las primeras edades de hidratación, los coeficientes de permeabilidad se ven ligeramente incrementados con respecto de sus matrices de referencia (Bahurudeen et al., 2016). Lo anterior con fundamento en la reactividad tardía de estas puzolanas y la poca formación de productos que densifiquen las microestructuras. Sin embargo, la permeabilidad de las matrices cementantes se encuentra sujeta a diferentes parámetros, entre los que destacan la morfología y los tamaños de partículas (Bahurudeen et al., 2016; DeBelie, 2018). Si bien, estas puzolanas no interaccionan con la portlandita en las primeras edades de hidratación, sus partículas sin reaccionar presentan la función de relleno alojándose en la red capilar de cada matriz potenciando la impermeabilidad, es por esto por lo que desde las primeras edades se aprecia una ligera reducción de la permeabilidad con respecto de la matriz de referencia. Aunado a esto, con el paso del tiempo de curado, estas puzolanas reaccionan con el  $\text{Ca(OH)}_2$  produciendo esencialmente CSH por las altas cantidades de sílice (Tabla 6), con lo cual se sigue mejorando la microestructura como se muestra en la Figura 77, la cual se mantiene con valores muy similares al del resto de matrices para las últimas edades de curado.

Dado lo anterior, se logra estimar el comportamiento de las matrices M4 y M5, las cuales, en primera instancia y por la acción puzolánica rápida del MK presentan

coeficientes de permeabilidad cercanos a la matriz M1, los cuales se ven mejorados posteriormente por la compaginación MK – CV y MK – CB, principalmente por los tamaños de partícula (Figura 35), en donde, al ser de mayor fineza los de la CB, se presenta mejor comportamiento de la M5 con respecto a la matriz M4, siendo M5 la matriz con menor permeabilidad de todas. Se suma a esto la capacidad reactiva de las puzolanas en edades tardías, las cuales compensan la ausencia de mayor contenido de MK que consuma mayor cantidad de portlandita para formar gel CASH que densifique la microestructura. En este caso, formándose mayor cantidad de gel CSH secundario dadas las relaciones sílice – alúmina que se presentan en estas matrices, donde la cantidad de  $Al_2O_3$  se ve reducida por la reducción del MK y el  $SiO_2$  se ve incrementado por la incorporación de la CV y la CB, esto acorde con las composiciones químicas presentadas en la Tabla 6.

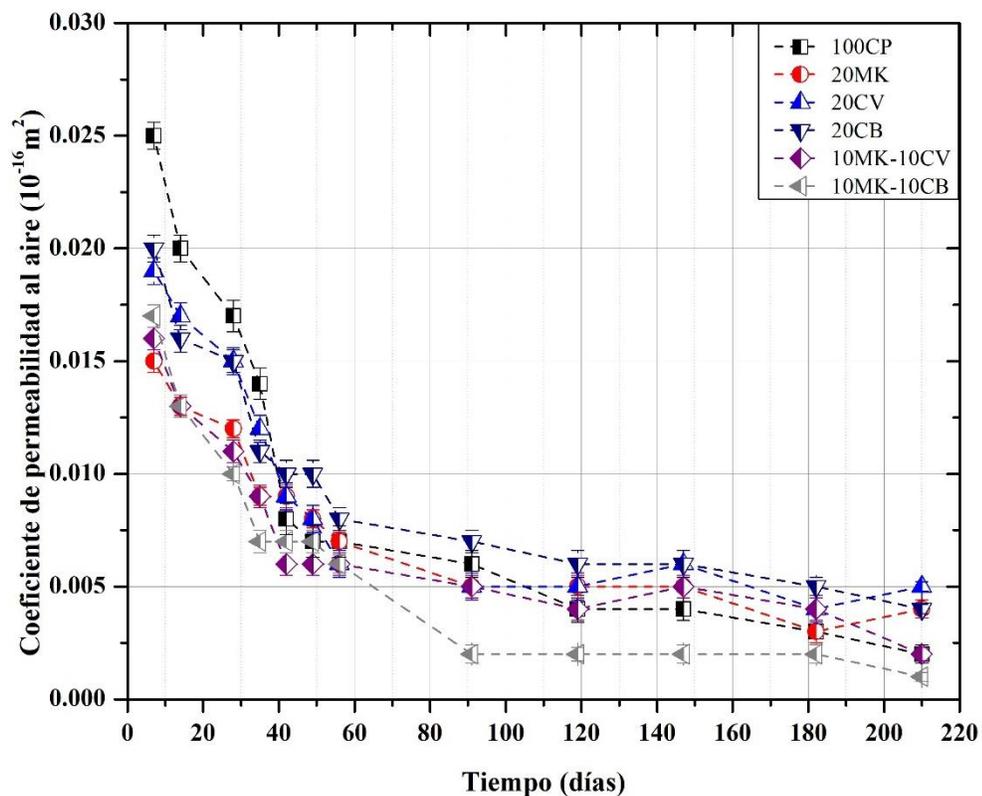


Figura 52.- Coeficiente de permeabilidad al aire de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 210 días

Por otro lado, en la Figura 53 se muestran los resultados de los coeficientes de permeabilidad de las matrices cementantes expuestas a  $CO_2$ . En ella se pueden observar

tendencias de incremento desde las primeras edades de exposición posterior al curado previo de 28 días, periodo en el que, como se vio en la figura anterior, los coeficientes tienden a disminuir.

Las tendencias observadas se dividen en tres zonas. La primera comprende a las matrices M2 y M3, con incrementos de coeficientes similares, correspondientes a los mayores avances de carbonatación que se verán en el apartado 5.3.1. Estas matrices alcanzaron coeficientes de  $0.135$  y  $0.130 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , respectivamente, al cumplir los 180 días de exposición, siendo éstos los valores mayores encontrados durante todas las evaluaciones de permeabilidad. La segunda zona la comprenden tres matrices, la referencia MC, la de metacaolín M1 y la de metacaolín – ceniza volante M4. Las tres presentan tendencia al incremento similar, siendo M1 la que mayor coeficiente presenta con  $0.09 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  al final del tiempo de exposición; mientras que MC y M4 presentan coeficientes de  $0.063$  y  $0.069$ , respectivamente. Y la tercera zona abarca únicamente la matriz M5, con el menor incremento de coeficientes de permeabilidad, siendo el mayor valor de  $0.053 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ .

Dado lo anterior, los incrementos en la permeabilidad se encontraron como función del avance de la carbonatación. Algunos investigadores han demostrado que la formación de  $\text{CaCO}_3$  dentro de una matriz cementante colabora con el llenado de la red capilar, lo que teóricamente propiciaría la reducción de la permeabilidad, dado que las vías de transporte para los agentes nocivos quedarían obstruidas por el carbonato formado (Valdez et al., 2008; Sakai, 2019). No obstante, la formación de este compuesto, si bien, comienza con un llenado de los poros y una mejora en la microestructura, tiende a ser un material volumétricamente mayor que otros compuestos, tales como el  $\text{Ca(OH)}_2$ , lo que propicia que, al alojarse en los poros, éstos incrementen su tamaño, lo que logra la interconexión necesaria para el incremento de la permeabilidad. Lo anterior fue evaluado y analizado por Justnes et al., en el 2021. De ahí que los coeficientes se vean incrementados con el avance en el tiempo de exposición.

Lo anterior tiene sentido, puesto que las matrices con mayor avance de carbonatación presentan los mayores incrementos en la permeabilidad, salvo las matrices M4 y M5, lo cual se puede atribuir a la poca reacción de la CV y la CB en dichas matrices, dado que

el  $\text{H}_2\text{CO}_3$  es el compuesto dominante en el consumo del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Lo anterior, podría conllevar a un incremento en la permeabilidad por la formación de mayor cantidad de  $\text{CaCO}_3$ ; sin embargo, esto queda mitigado por la presencia de una mayor cantidad de partículas finas sin reaccionar por parte de las puzolanas como las que se muestran en la Figura 75, las cuales se alojan entre los intersticios de los poros más grandes, disminuyendo la interconectividad y, a su vez, la permeabilidad. Es por esto por lo que M5 presenta menores coeficientes de permeabilidad, puesto que la CB presenta menores tamaños de partículas con respecto a la CV (Figura 36). Así mismo, cabe mencionar que el efecto dado no se potencializa en M2 y M3, puesto que los avances de carbonatación son mayores, lo que representa un dominio del  $\text{CaCO}_3$  en la formación de poros de mayor tamaño, minimizando el efecto *filler* (ver apartado 5.3.1).

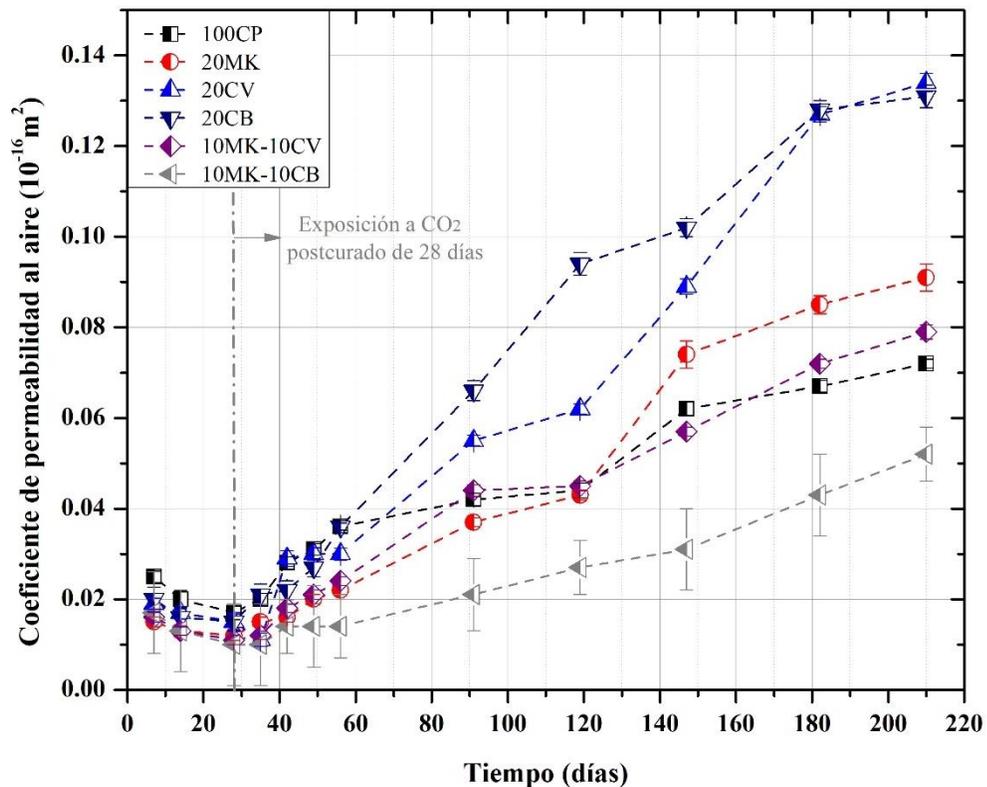


Figura 53.- Coeficiente de permeabilidad al aire de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de  $\text{CO}_2$  al 8% durante 180 días postcurado estándar

Por otra parte, en la Figura 54 se muestran los comportamientos de permeabilidad presentados por las matrices cementantes expuestas a  $\text{MgSO}_4$ , posterior al periodo de 28 días de curado estándar. En esta figura se aprecian dos comportamientos principales, una

zona de descenso de coeficientes comprendida desde los 28 días de edad (0 días de exposición) hasta los 56 días (28 de exposición), para todas las matrices excepto M1, la cual lleva este período de descenso hasta los 90 días. Posteriormente se presenta un período de ascenso continuo para todas las matrices hasta los 180 días de exposición al agente nocivo.

Por lo anterior, se pueden destacar ciertos comportamientos. Primeramente, a diferencia de lo encontrado en la exposición a CO<sub>2</sub>, los coeficientes de permeabilidad no se incrementan en grandes proporciones al final del tiempo de exposición ante MgSO<sub>4</sub>. En el caso de las matrices M2 y M3, éstas presentan los mayores incrementos con la tendencia de incremento más agresiva, al igual que ante el CO<sub>2</sub>, con coeficientes de 0.044 y 0.049 x 10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup>, respectivamente. Éstas seguidas por las matrices MC y M4 con tendencias similares que alcanzan los 0.027 y 0.029 x 10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup>, respectivamente. Por último, en la parte inferior de la figura se encuentran M1 y M5, con los menores incrementos de permeabilidad y las tendencias más lineales, siendo M1 la matriz con el coeficiente final menor, con únicamente 0.012 x 10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup>, a diferencia de M5 que reportó 0.018 x 10<sup>-16</sup> m<sup>2</sup>, los cuales son valores similares a los coeficiente obtenidos al inicio de sus curados sin exposición.

En primera instancia, el periodo de reducción de los coeficientes de permeabilidad posterior al tiempo de exposición se atribuye a dos factores: a la continuación de los procesos de hidratación de las pastas cementantes y a las formaciones de etringita menores como las que se muestran en el apartado 5.4.1.3. Ambos efectos propician el llenado de la red capilar disminuyendo la permeabilidad. Por un lado, las reacciones de hidratación por la formación de gel CSH primario y secundario, así como por la formación de gel CASH que se observa en las micrografías del apartado 5.4.2 y, por otro lado, si bien, la etringita, representa un compuesto expansivo que provoca agrietamientos, al ser en cantidades menores para las edades iniciales de exposición, su contribución se centra en el llenado de poros como se discutió en los apartados anteriores.

No obstante, aunque se ha corroborado la poca formación de productos expansivos, conllevando a la poca formación de grietas, con el paso del tiempo estas grietas menores

propician el incremento de los coeficientes de permeabilidad dada la sensibilidad del equipo, sumando a lo anterior que la formación de MSH por la descalcificación del compuesto CSH provoca la pérdida de cohesión entre los ingredientes de las matrices, conllevando a una mayor presencia de vacíos que convierten a las matrices cementantes en permeables. Lo anterior acorde a lo reportado en las micrografías de la Figura 81.

Aunado a lo anterior, es importante mencionar que los incrementos en los coeficientes de permeabilidad quedan influenciados por otros aspectos tales como las zonas de alojamiento de los productos expansivos. Si bien, todas las matrices se exponen de manera similar, las penetraciones y formaciones internas pueden influir de diferente manera, en función de la porosidad de la matriz. Matrices más porosas como las de CV y CB pueden propiciar una mayor cantidad de conectividades internas que incrementen la permeabilidad, por el contrario del resto (Pinto et al., 2020). Es por esto por lo que no se presenta correlación exacta con los datos obtenidos en las variaciones de masa y de longitud para todas las matrices.

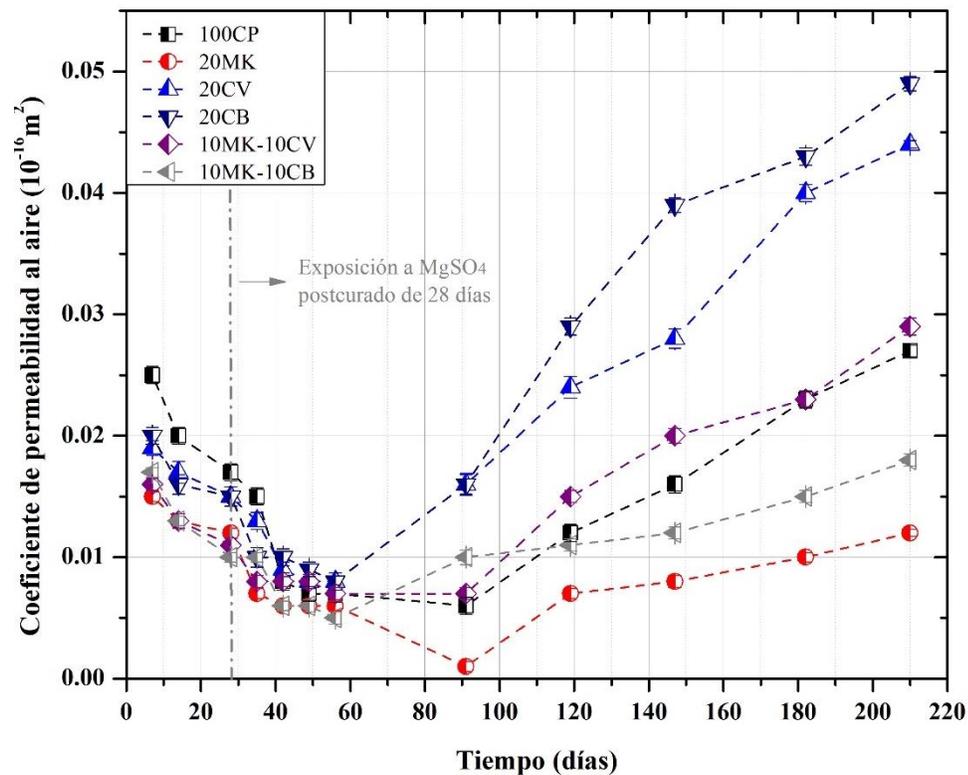


Figura 54.- Coeficiente de permeabilidad al aire de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar

Por último, es importante mencionar que, de acuerdo con los parámetros establecidos por el equipo utilizado para las mediciones, los coeficiente  $kT$  se encontraron en mayor parte en el intervalo de  $0.01 < kT < 0.1$ , lo que es indicativo de una buena impermeabilidad. En el caso de los valores por debajo de  $0.01 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , la impermeabilidad resultó muy buena debido al refinamiento y densificación microestructural por la formación de compuestos de hidratación. En contraparte, los valores arriba de  $0.1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ , como las matrices expuestas a carbonatación, fueron caracterizados como impermeabilidad normal, la cual puede verse afectada con mayores periodos de exposición. Lo anterior con base en los rangos de coeficientes de permeabilidad establecidos en el manual de usuario del permeabilímetro Torrent empleado para estas mediciones.

### **5.3. Etapa III. Evaluación de durabilidad**

#### **5.3.1. Avance de carbonatación**

##### **5.3.1.1 Carbonatación acelerada**

Los resultados de las profundidades alcanzadas por la carbonatación en condiciones aceleradas dentro de las matrices cementantes se muestran en la Figura 55. En ella se pueden observar tres grupos con comportamiento similar dentro de las seis matrices. El primero, es de las matrices MC y M1, las cuales presentaron los menores avances de carbonatación, alcanzando únicamente 4 mm de profundidad en ambas matrices, a lo largo de los 180 días de exposición. El segundo grupo con comportamiento similar es de las matrices M2 y M3, las cuales obtuvieron los mayores avances de carbonatación, incrementando hasta 13 mm en el caso de la CV y hasta 10 mm en el caso de la CB, lo que representó un incremento de 3.25 y 2.5 veces la profundidad de carbonatación de la matriz de referencia (MC), respectivamente. Y el último comportamiento equivalente es del grupo de las matrices M4 y M5, las cuales reportaron comportamiento similar entre sí y con la matriz de referencia (MC); esta última hasta los 120 días de exposición, destacando las mayores profundidades por parte de M4 y M5 desde los primeros días de deterioro, mismas que se hacen notorias a partir de los 84 días. Pasados los 120 días, existió un incremento significativo de ambas matrices en el que se alcanzaron

profundidades de 6 y 6.4 mm, respectivamente, las cuales representaron incrementos de 1.5 veces los avances de carbonatación de la matriz MC.

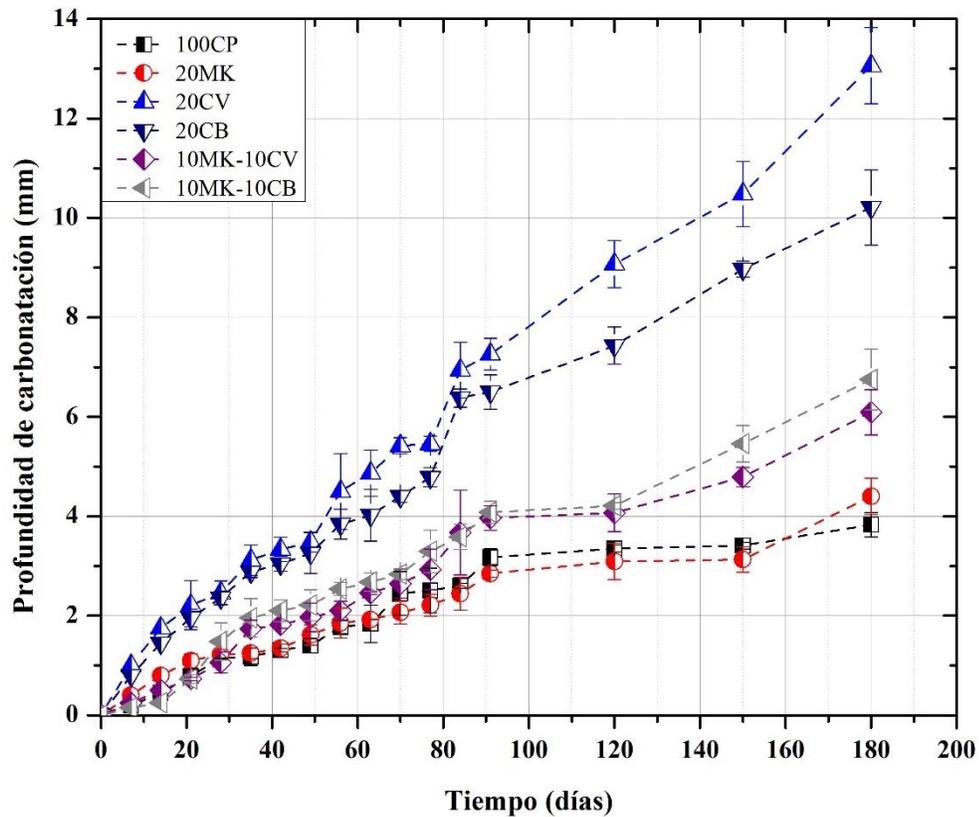


Figura 55.- Avance de carbonatación de las matrices en condición acelerada con una concentración de CO<sub>2</sub> del 8%

Si bien, el uso de puzolanas puede reducir los poros capilares de las matrices cementantes e impedir el paso de agentes como el CO<sub>2</sub> por la formación de CSH secundario debido a las reacciones puzolánicas y por sus características físicas tales como la fineza, la mayoría de las investigaciones con el uso de puzolanas reportan incrementos en los avances de la carbonatación. Lo anterior se ha atribuido a los factores que se mencionan a continuación.

Comenzando por el MK, se sabe que el principal compuesto necesario para que se presente la carbonatación es la portlandita. La sustitución de CP por cualquier material puzolánico disminuye la cantidad de portlandita que se forma en las matrices por acción de la hidratación debido a la menor presencia de compuestos cálcicos. Aunado a esto, el MK consume Ca(OH)<sub>2</sub> en los primeros días de curado estándar, es decir, al comienzo de la exposición, el contenido de portlandita es menor, lo que en esencia imposibilita las

reacciones del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  para la formación de  $\text{CaCO}_3$  (Bucher et al., 2017). Lo anterior, teóricamente debería proporcionar menores avances de carbonatación, sin embargo, existen otros factores tales como la disminución del pH. Si bien el MK no forma  $\text{CaCO}_3$  que disminuya la alcalinidad de la matriz, sí consume  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , el cual es el compuesto principal alcalino dentro de una matriz cementante, lo que provoca pasar de un pH de 12.6 a menos de 11, con la simple sustitución, permitiendo una desalcalinización más rápida con menor ingreso de  $\text{CO}_2$  (Homayoonmehr et al., 2021).

Lo anterior explica el comportamiento de la matriz M1 y su tendencia similar a la matriz MC. Sin embargo, no puede dejar de mencionarse que en investigaciones recientes los comportamientos del uso de MK son variables. No obstante, el uso de esta puzolana a un 20% de sustitución, se ha encontrado como un óptimo porcentaje por algunos autores, ya que dicho porcentaje de sustitución mantiene profundidades de carbonatación similares a sus referencias, debido a los mecanismos mencionados (Bucher et al., 2017; Mikhailenko et al., 2018).

Por otro lado, el uso de CV y CB desde las primeras edades incrementó la cinética de carbonatación en al menos 2.5 veces el avance en la matriz de referencia. Lo anterior concuerda con alguno autores que han reportado al menos el doble de profundidades con respecto a sus referencias (Justnes et al., 2020; Wang et al., 2021).

En estos casos, el aumento en la tasa de carbonatación está influenciado por diferentes factores, entre ellos, como ya se vio, se presenta el consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y la presencia de compuestos convertibles en  $\text{CaCO}_3$ ; sin embargo, no son los únicos factores que influyen. En el caso de estas puzolanas poco reactivas en edades tempranas, los sistemas cementantes mantienen altas cantidades de portlandita, permitiendo la formación de carbonato de calcio, por lo que existen mayores profundidades en las primeras edades de exposición. Dichas profundidades se intensifican posteriormente debido al incremento de la porosidad más gruesa provocada por la propia carbonatación, como se vio en el apartado 5.2.4. Justnes et al., (2020), atribuyen dichos cambios volumétricos de los poros, además de la propia carbonatación, a algunos otros factores como la cantidad de aluminatos presentes en las puzolanas, los cuales pueden formar productos expansivos que intensifiquen el engrosamiento de los poros, conduciendo a una mayor difusividad.

En suma, si bien, los mismos mecanismos aplican para ambas puzolanas dadas las similitudes de comportamiento que presentan, no se debe dejar de mencionar que, en el caso de la CB, ésta presentó menores profundidades en comparación con CV, lo que se puede atribuir a un mayor refinamiento de la red capilar por acción de las partículas más finas que presenta la CB y su acomodo óptimo en la red de poros, en comparación con lo logrado por la CV (Jittin et al., 2021; Quedou et al., 2021).

De lo anterior, el efecto sinérgico propiciado por la combinación del MK con la CV y la CB ante la carbonatación se puede discutir como sigue. En primera instancia el MK actúa mediante el consumo del  $\text{Ca(OH)}_2$  en las primeras edades, propiciando una tendencia similar a las matrices MC y M1; sin embargo, al existir menor cantidad de sílice y alúmina activa a estas edades (Tabla 6), las profundidades tienden a ser ligeramente mayores. El 10% de MK presente en M4 y M5 al reaccionar con el  $\text{Ca(OH)}_2$ , llega al punto de no encontrarse en su faceta original dentro de las matrices cementantes, lo que da pie a que no se consuma toda la portlandita de la matriz, dando paso al efecto de las cenizas, las cuales para este punto de exposición comienzan con el consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$ , a la vez que el ácido carbónico busca convertirlo en  $\text{CaCO}_3$ . En este caso en particular, se puede establecer un ligero dominio por parte del ácido, el cual propicia la formación de carbonato, aunado al avance de las primeras edades, con lo cual se comienzan a presentar poros de mayor tamaño que permiten mayor difusión del  $\text{CO}_2$  y, por ende, existe mayor avance de carbonatación, lo que podría explicar los incrementos un tanto abruptos a partir de los 120 días y hasta la edad final de exposición.

### **5.3.1.2 Carbonatación natural**

En la Figura 56 se muestran los avances de carbonatación obtenidos a partir de la exposición a  $\text{CO}_2$  en condiciones naturales. En ella se puede observar que todas las muestras siguen un patrón de incremento que va de  $1.25 \pm 0.5$  mm en los primeros 28 días de exposición, hasta  $3 \pm 0.5$  mm a los 180 días de exposición. De lo anterior, no se presentaron tendencia similares a lo obtenido en la carbonatación acelerada. En este caso, todas las matrices presentaron los mismos comportamientos durante todo el periodo de exposición. Estos datos y comportamientos concuerdan con lo reportado por

Campos et al., en el 2016, bajo la exposición al mismo ambiente natural durante el mismo tiempo de exposición.

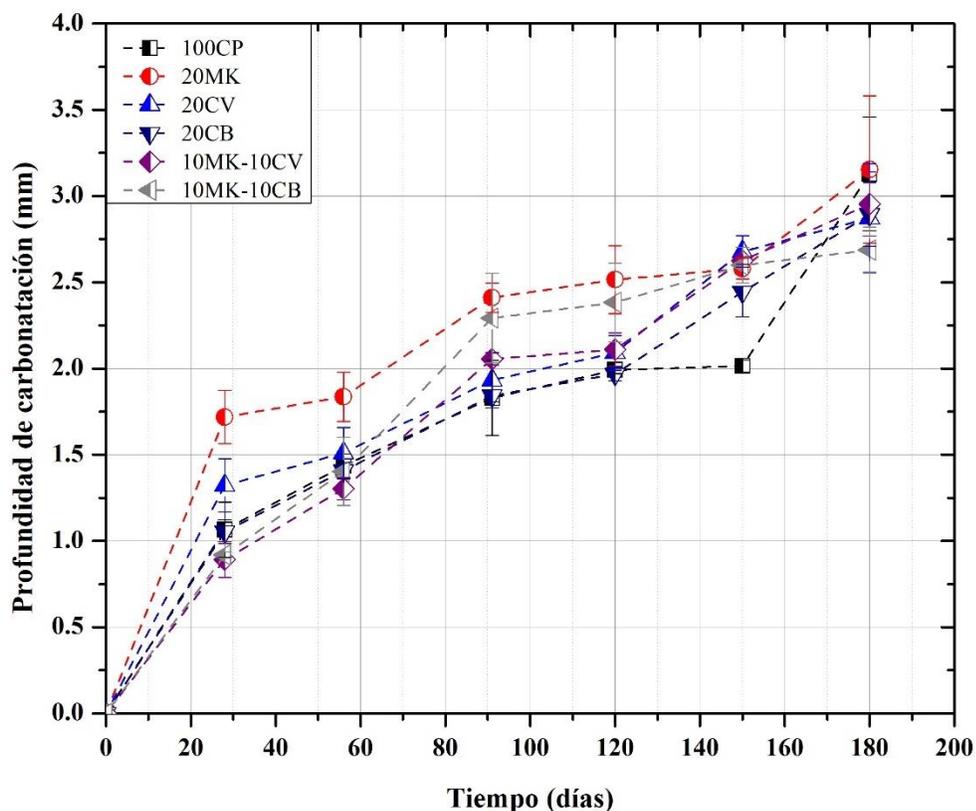


Figura 56.- Avance de carbonatación de las matrices expuestas en un ambiente urbano – industrial con alta concentración de CO<sub>2</sub>

Lo anterior se puede atribuir a diferentes factores entre los que se pueden destacar los diferentes tiempos en el consumo del hidróxido de calcio, las disminuciones de pH por parte de las puzolanas y las bajas concentraciones de CO<sub>2</sub> con respecto a las utilizadas en la carbonatación acelerada.

En primera instancia, la matriz MC lleva un avance de carbonatación similar a lo reportado en la bibliografía bajo condiciones de exposición naturales. Por otro lado, como ya se ha visto, el uso de puzolanas provoca la disminución del Ca(OH)<sub>2</sub> mediante la interacción con la sílice y la alúmina presentes en cada una de ellas, así como por la disminución de la cantidad de CP en las matrices, lo que provoca una disminución en la formación de este compuesto y, a su vez, del CaCO<sub>3</sub>, tal como se representa en las intensidades de los picos de los difractogramas discutidos en el apartado 5.4.1.2. Ahora bien, este fenómeno, a diferencia del comportamiento en la carbonatación acelerada,

presenta un mejor comportamiento, puesto que el ingreso y las reacciones de carbonatación ocasionadas por el CO<sub>2</sub> tienden a ser más lentas debido a las bajas concentraciones, en comparación con el ambiente acelerado. De lo anterior, si bien, se podría considerar un mejor rendimiento por parte de las matrices con puzolanas con respecto de la matriz de control, se debe recordar que el empleo de puzolanas disminuye significativamente el pH de las muestras (Homayoonmehr et al., 2021), lo que conlleva a no presentar avances de carbonatación menores que la referencia, sin embargo, sí entran en un intervalo en el que se puede considerar que son avances similares, dada la poca variabilidad de los datos.

### **5.3.2. Ataque de sulfatos**

#### **5.3.2.1 Variación de masa**

En la Figura 57 se presentan los datos de variaciones de masa de las matrices cementantes expuestas a MgSO<sub>4</sub>. En primera instancia se observan incrementos de masa relativamente bajos. Diversos estudios han presentado mayores porcentajes de variación entre 0.1 y 0.7% para las mismas edades de exposición (Pinto et al., 2020; Mostofinejad et al., 2020). Además, la mayoría de los estudios reportan pérdidas de masa por acción de los sulfatos debido al agrietamiento y desconchamiento que provocan. No obstante, algunos autores han reportado que las variaciones de masa se dividen en tres etapas posteriores a la exposición: 1) Incremento rápido, 2) Incremento controlado y 3) Decremento (Cheng et al., 2021). De lo anterior, las matrices elaboradas únicamente presentaron las dos primeras etapas de incrementos de masa.

Dados los mínimos valores de variación presentados, se puede concluir que las matrices se comportan igual para el tiempo de exposición establecido; sin embargo, se pueden destacar algunas tendencias. Las matrices MC y M1 presentan prácticamente los mismos valores en todas las edades, es decir, el mismo comportamiento, con las menores variaciones de masa respecto a lo reportado por el resto de las matrices. M2 y M3, al igual que en la carbonatación, presentan las mayores variaciones de masa con comportamientos similares, siendo M2 la que mayor aumento de masa reporta en todas las edades, aunque a los 180 días, la matriz M3 alcanza aún más los valores de la matriz M2. Y, en el caso de M4 y M5, éstas reportan incrementos de masa iniciales bajos,

siendo un tanto mejor que la matriz de referencia; sin embargo, pasados los 60 días de exposición, existen incrementos de masa que no se observan en la matriz MC, no obstante, su tendencia se estabiliza, comportándose de manera similar al resto de matrices.

Cabe destacar que, como se mencionó anteriormente, no se presentaron decrementos en el peso de ninguna matriz. De acuerdo con las etapas de variación de masa establecida por Cheng et al., en 2021, los decrementos ante el ataque de  $MgSO_4$  tienden a aparecer entre los 200 y 250 días de exposición, en función de algunas variables, tales como la relación  $a/cm$ , los tipos de puzolanas, la calidad de los materiales y los procesos de fabricación, por mencionar algunas. Lo anterior explica la nula aparición de decrementos y la sola aparición de las dos primeras etapas de variación de masa.

Los comportamientos anteriores se pueden atribuir a diferentes factores. En primera instancia, cabe destacar que, de acuerdo con lo encontrado en los difractogramas que se detallan en el apartado 5.4.1.3, todas las matrices presentaron incrementos en los picos de etringita principalmente, siendo éstos considerablemente bajos para el tiempo de exposición. Estas formaciones principalmente contribuyen en el llenado de los poros internos de los sistemas cementantes, lo cual influye en el incremento de la masa de cada matriz por la formación de un material más denso (Pinto et al., 2020). Así mismo, algunos picos de CSH se vieron reducidos, principalmente por la formación de MSH o brucita, no obstante, este compuesto no presentó picos en los difractogramas a ninguna edad, debido a su baja cristalinidad por lo que su presencia se corroboró en las micrografías del apartado 5.4.2.

Aunado a lo anterior, se puede considerar que el proceso de incremento en la masa de las matrices cementantes se puede distribuir en las etapas ya mencionadas. En la primera etapa los incrementos se pueden dar por dos razones: la hidratación posterior del cemento y las puzolanas, es decir, la formación de  $Ca(OH)_2$  y CSH primario y secundario, y la generación de productos de reacción generados por los sulfatos, tales como el yeso, la etringita, la brucita y la taumacita, entre otros (Abdel-Gawwad et al., 2018). En la segunda etapa se completa la hidratación del cemento y el aumento de masa se atribuye a la continuación del ataque de sulfato. No obstante, con el empleo de

puzolanas de reactividad tardía, los incrementos de masa en la segunda etapa quedan influenciados por la formación de CSH secundario (Pinto et al., 2020).

Teniendo como premisa lo mencionado, se pueden explicar los comportamientos de cada matriz cementante como sigue. En el caso de M1, la acción puzolánica del MK consume  $\text{Ca(OH)}_2$  desde las primeras edades del periodo de curado, es decir, al inicio del tiempo de exposición, las concentraciones de portlandita en la matriz son bajas con respecto al resto de matrices. Esto conlleva a menores formaciones de yeso y etringita, por lo cual se presentan las menores variaciones de masa (ver apartado 5.4.1). Por otro lado, la interacción de la portlandita con la sílice reactiva del MK promueven la formación de CSH secundario en mayores cantidades. Este compuesto presenta vulnerabilidad al  $\text{MgSO}_4$ , el cual, al interactuar con él, lo descalcifica, produciendo MSH, un compuesto poco cohesivo que provoca agrietamientos y desconchamiento, por lo cual, las variaciones de masa tenderían a disminuir, sin embargo, el aumento de masa sigue siendo razonable ya que el CSH producido es secundario y adicional al producido por el silicato tricálcico como parte de la hidratación del CP. En las micrografías de la Figura 81 se muestran las formaciones de MSH, las cuales concuerdan con las encontradas por Abdel-Gawwad et al., en el 2018.

Por otro lado, la CV y la CB en las matrices M2 y M3, respectivamente, no consumen portlandita en las primeras edades de la hidratación como en el caso del MK (Figura 66). Esto provoca que se presente mayor formación de etringita, por la presencia del  $\text{Ca(OH)}_2$  en las primeras edades, por lo cual se incrementa la masa de las matrices. Ahora bien, esta mayor formación de etringita tendería a provocar pérdidas de masa a partir de los agrietamientos, sin embargo, el espacio poroso dentro de las matrices influye. Al no verse promovida la densificación en las primeras edades por la formación de CSH secundario, los compuestos expansivos tienen espacio para alojarse, permitiéndose que exista una mayor cantidad sin mayor deterioro (ver apartado 5.4.2).

Por otra parte, la suma de los efectos anteriores predice el comportamiento de las matrices M4 y M5. Primeramente, el consumo rápido de  $\text{Ca(OH)}_2$  por parte del MK en las primeras edades previene las formaciones a gran escala de compuestos expansivos. Posteriormente, el consumo se detiene, permitiendo que se forme etringita por lo que se

aprecia el incremento de masa, en comparación con MC y M1. Consecutivamente, la CV y la CB interactúan con la portlandita, interviniendo y disminuyendo las reacciones del  $MgSO_4$  para la formación de los compuestos expansivos. Es por lo que recuperan valores similares a MC y M1.

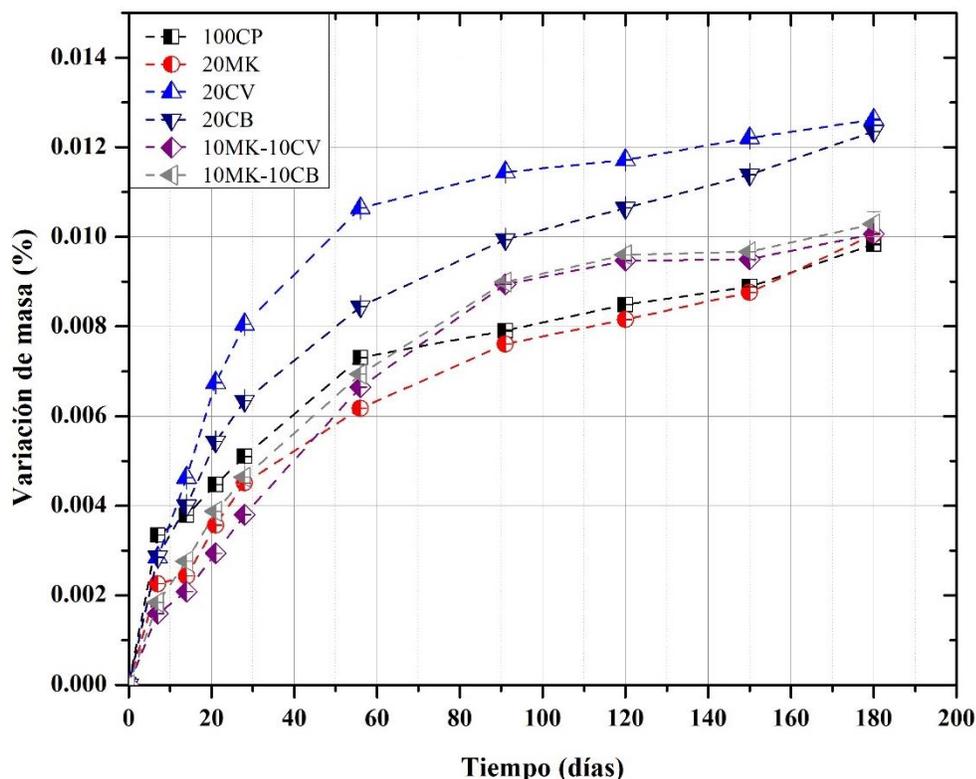


Figura 57.- Variación de masa de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar

### 5.3.2.2 Variación de longitud

Algunos autores han establecido que existe cierta correlación entre los valores de variación de masa con las variaciones de longitud. Sin embargo, en este caso existe poca de esta correlación (Pinto et al., 2020). Dado que las matrices que presentaron menor variación de masa no concuerdan con las que presentaron menores expansiones, en casi todos los casos, como se observa en la Figura 58.

Cabe destacar que, a diferencia de lo reportado por algunos investigadores, durante los 180 días de exposición no se reportaron expansiones significativas (Mostofinejad et al., 2020). Estas permanecieron entre 0.01 y 0.03%, lo cual, en términos relativos, podría considerarse como un mismo comportamiento. No obstante, al igual que en las

variaciones de masa, se aprecian ciertas tendencias. Si bien los comportamientos de expansión son muy similares entre sí, se presentan tres zonas de expansión. La primera zona corresponde a las menores expansiones, en la cual únicamente se sitúa la matriz M1 con expansiones provocadas por sulfatos menores que el 0.0075%, al finalizar el tiempo de exposición. La segunda zona corresponde a las expansiones medias en las que se agrupan las cuatro matrices con contenido de CV y CB (M2, M3, M4 y M5) con valores muy similares de expansión final que entran en un intervalo de  $0.016 \pm 0.0025\%$ . Y, por último, la tercera zona la ocupa únicamente la matriz de referencia MC, con el mayor porcentaje de expansión, con 0.0275% al final de los 180 días de exposición.

Como ya se vio, las reducciones de  $\text{Ca(OH)}_2$  por la actividad puzolánica pueden propiciar mejor resistencia al sulfato. A mayor sílice reactiva, mejor será la resistencia. De ahí que M1 presente mejor comportamiento. Si bien, el MK no presenta mayor cantidad de  $\text{SiO}_2$  que la CV y la CB (Tabla 6), sí presenta mayor amorficidad (Figura 34), lo que la hace más reactiva. Además, otro aspecto importante del MK es la acción de relleno debido al tamaño de sus partículas más finas en comparación con el tamaño de partícula del CP y el resto de las puzolanas (Figura 35), lo cual densifica aún más la estructura de poros de la matriz M1 mejorando la resistencia al ataque de  $\text{MgSO}_4$ , por lo que presenta menores expansiones.

En el caso del CP, el consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  se presenta en menor medida únicamente por la reacción de sus silicatos cálcicos, puesto que no contiene puzolanas ricas en sílice que reaccionen con este compuesto, lo que propicia mayor formación de etringita, guiando a un mayor porcentaje de expansión. Lo anterior, si bien, no se refleja en los resultados de variación de masa, es importante recordar que los valores obtenidos en ese apartado son muy bajos, por lo cual, se podría considerar que es un mismo comportamiento y los porcentajes de expansión pueden resultar más representativos de la resistencia al sulfato de magnesio.

Ahora bien, siguiendo el mismo tenor, en el caso de las matrices con contenidos de CV y CB, si bien, presentan mayor formación de etringita que el resto de las matrices, estas pueden presentar una mayor cantidad de vacíos no interconectados, permitiendo el alojamiento de estas cantidades de compuestos expansivos, manteniendo las presiones

internas relativamente bajas, por lo que las expansiones de las muestras no resultan mayores que lo reportado por la matriz de referencia. Lo anterior acorde con lo reportado en las evaluaciones de permeabilidad.

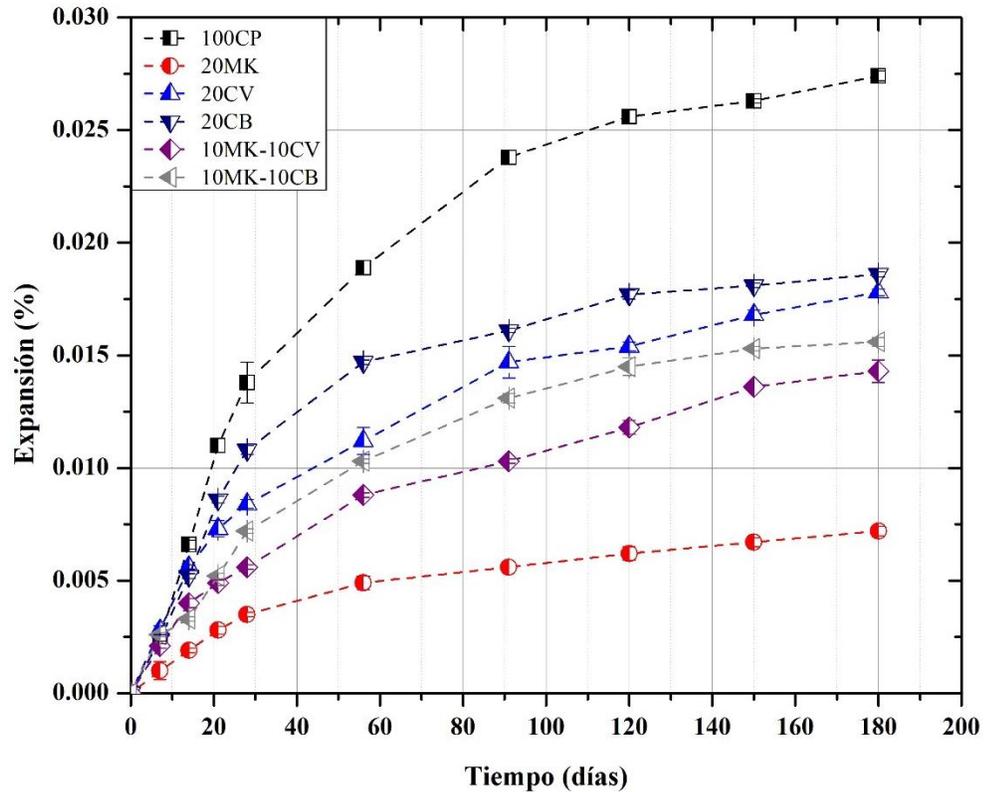


Figura 58.- Variación de longitud (expansión) de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 180 días postcurado estándar

### 5.3.3. Corrosión de acero de refuerzo

#### 5.3.3.1 Potenciales de corrosión

Los resultados de potenciales de corrosión para ambiente controlado, carbonatación acelerada y ambiente natural se muestran en las Figura 59, Figura 60 y Figura 61, respectivamente. Estos se monitorearon periódicamente durante 210 días de exposición, posterior al curado previo de 28 días.

Para la interpretación de los resultados se emplearon las condiciones de corrosión establecidas en la norma ASTM C 876 (Tabla 14), en la cual se exponen las condiciones de corrosión en función de los diferentes tipos de electrodos utilizados, siendo en este

caso Plata/cloruro de plata/4M KCl el tipo de electrodo utilizado en todas las mediciones (datos en milivolts (mV)).

Tomando como base la Tabla 14, en la Figura 59 se presentan los potenciales de corrosión obtenidos para todas las matrices cementantes en ambiente controlado de laboratorio, los cuales sugieren que el riesgo de corrosión del acero embebido en todas las probetas es moderado o intermedio. Siendo todos los comportamientos muy similares a partir de los 70 días con potenciales entre -150 y -100 mV, destacando las matrices M2 y M3, dado que se encuentran en los límites entre el riesgo de corrosión bajo y el riesgo de corrosión moderado.

Tabla 14.- Condiciones de corrosión para diferentes tipos de electrodos

| <b>Cobre/sulfato de cobre</b> | <b>Plata/cloruro de plata/4M KCl</b> | <b>Electrodo estándar de hidrógeno</b> | <b>Calomel</b> | <b>Condición de corrosión</b>      |
|-------------------------------|--------------------------------------|--|----------------|------------------------------------|
| >-200                         | >-106                                | >+116                                  | >-126          | Bajo (10% de riesgo de corrosión)  |
| -200 a -300                   | -106 a -256                          | +116 a -34                             | -126 a 276     | Intermedio riesgo de corrosión     |
| <-350                         | <-256                                | <-34                                   | <-276          | Alto (>90% de riesgo de corrosión) |
| <-500                         | <-406                                | <-184                                  | <-426          | Corrosión severa                   |

\*Fuente: ASTM C 876

Aunado a lo anterior, cabe destacar que en el período previo se presentan comportamientos diferentes de las matrices MC y M1 con respecto al resto, donde éstas presentan potenciales entre -200 y -150 mV que con el paso del tiempo descienden hasta alcanzar la estabilización dentro del rango de -150 y -100 mV. Caso contrario ocurre con el resto de las matrices, ya que éstas presentan potenciales entre -100 y -75 mV en las primeras edades, correspondiente a un riesgo de corrosión bajo, los cuales posteriormente incrementan para estabilizarse en el mismo intervalo que MC y M1.

Los comportamientos destacados se atribuyen a diferentes factores. En el caso de la matriz de referencia, los potenciales de corrosión relativamente altos en edades iniciales se atribuyen a los procesos de hidratación, endurecimiento y formación de productos. En las primeras edades de hidratación la matriz MC comienza a formar productos que brindan pasividad al sistema cementante, tales como el  $\text{Ca(OH)}_2$ . Una vez formado, se pasiva el acero de refuerzo y los potenciales comienzan a disminuir, en este caso a partir

de los 28 días de hidratación. Por su parte, el comportamiento similar del MK en la matriz M1 es atribuible a dos factores. En primera instancia, la hidratación del CP forma  $\text{Ca(OH)}_2$  el cual es consumido por la sílice y la alúmina reactiva del MK, lo que propicia disminuciones de pH en la solución de poros, lo que se traduce en una pérdida de alcalinidad significativa, por lo que los potenciales se incrementan. No obstante, en segunda instancia, este consumo de portlandita provoca la formación de gel CASH con el cual el MK contribuye benéficamente en las propiedades de transporte, principalmente mediante el refinamiento de la red capilar, es por esto por lo que se presenta una estabilización en el riesgo de corrosión, manteniendo los valores en un riesgo moderado bajo (Güneyusi et al., 2013).

Por otro lado, en el caso de la CV y la CB en las matrices M2 y M3, respectivamente, su comportamiento inicial se basa en factores físicos y químicos. Inicialmente sus partículas poco reactivas funcionan como una barrera que reduce la estructura de poros de las matrices cementantes, provocando la disminución de los potenciales de corrosión, aunado a esto que su poca reactividad provoca una menor desalcalinización en comparación con el MK, por lo que los valores  $E_{\text{corr}}$  se mantienen bajos, incluso en la estabilización posterior a 70 días, en la cual, los consumos de  $\text{Ca(OH)}_2$  comienzan a darse de forma paulatina para la formación del gel CSH, con lo cual se refinan los poros capilares de mejor manera en comparación con el efecto físico, inhibiendo así el efecto propiciado por la disminución del pH debido a la reducción de la portlandita (Tsouli et al., 2018; Yang, 2020).

De lo anterior, el efecto obtenido por las matrices M4 y M5 se deduce como un primer efecto físico de relleno otorgado por las puzolanas de reactividad lenta, el posterior consumo rápido de  $\text{Ca(OH)}_2$  por acción del MK, lo cual provoca un incremento significativo en los potenciales de corrosión, y una posterior estabilización por la formación de geles secundarios CSH y CASH dado el refinamiento de los poros. De lo anterior, es de destacar que la adición de puzolanas como la CV y la CB, presentan un efecto benéfico significativo sobre la matriz M1 con sólo MK como material puzolánico.

Por otra parte, cabe mencionar que, si bien, cada matriz cementante presentó un comportamiento particular en las primeras edades de hidratación, en edades avanzadas

los comportamientos tendieron a ser similares y con poca tendencia a incrementar y pasar a un alto riesgo de corrosión. Lo anterior, debido al ambiente de exposición en el cual, factores como la humedad o la presencia de agentes agresivos se ven reducidas debido al control de las condiciones del ambiente; por lo cual, se requerirían monitoreos a muy largo plazo, para comenzar a observar incremento de potenciales y posible riesgo de corrosión en el acero embebido en las matrices.

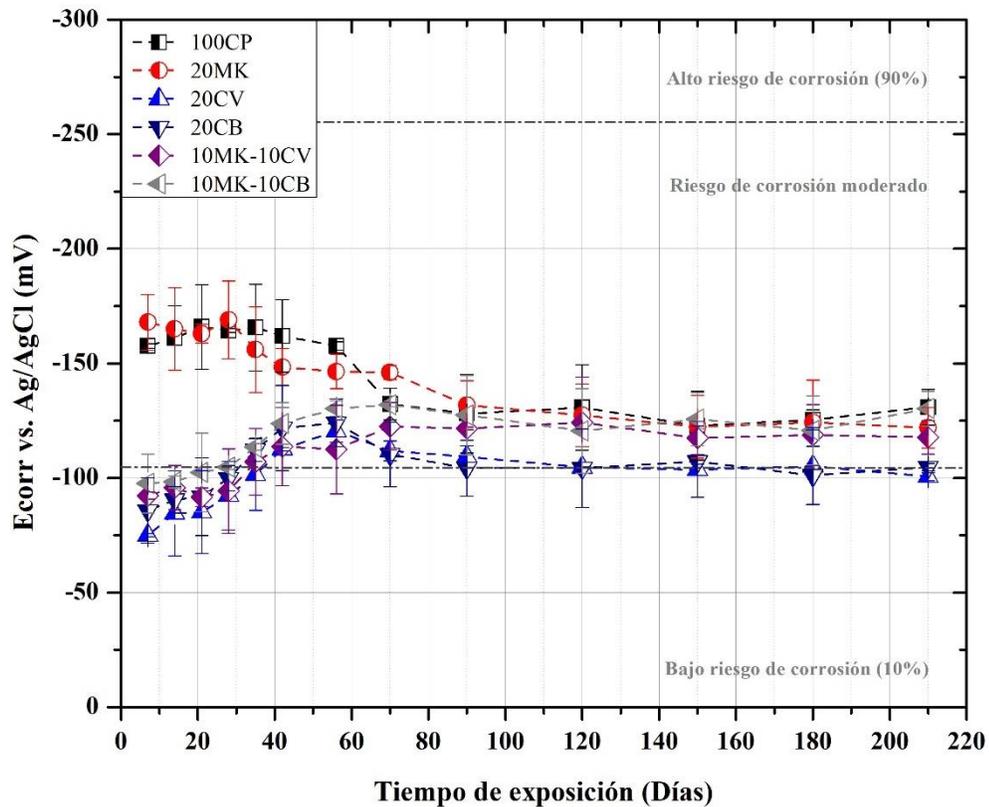


Figura 59.- Potenciales de corrosión de las matrices en condiciones de laboratorio con humedad y temperatura controladas durante 210 días

Por otro lado, en la Figura 60 se presentan los resultados obtenidos del monitoreo de potenciales de corrosión cuando las probetas fueron sometidas al deterioro por carbonatación. En esta figura, a diferencia de lo obtenido en el ambiente controlado, se identificaron tres zonas con comportamientos diferentes propiciadas por la carbonatación inducida. La primer zona posterior a los 28 días de curado previo, corresponde a la iniciación del avance de la carbonatación en la cual se observan reducciones considerables en los valores  $E_{corr}$ , llegando a estar dentro del intervalo de -100 a 0 mV correspondiente a un riesgo bajo de corrosión. Posteriormente se presenta la

zona dos, la cual se estima como la zona de transición, en la que existe una minúscula estabilización de los potenciales, dado que se pasa prácticamente de manera directa a la zona tres, la cual se considera de propagación de corrosión, puesto que existe un incremento considerable en los potenciales de corrosión para todas las matrices, llegando a estar cerca de los -200 mV las matrices M2 y M3, cerca de -150 mV las matrices M4 y M5, y entre -100 y -50 mV las matrices MC y M1, siendo estas últimas las únicas que permanecen en riesgo bajo de corrosión, sin embargo, todas presentan tendencias notables de incremento.

En primera instancia, la presencia de  $\text{CO}_2$  y su interacción con la humedad presente en las matrices cementantes provoca la formación de  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , un ácido que interactúa con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , convirtiéndolo en  $\text{CaCO}_3$ , un compuesto que se aloja en los poros más superficiales de las matrices cementantes en las primeras edades de exposición, logrando un refinamiento en la red capilar mayor a lo logrado por las puzolanas. Lo anterior, en concordancia con los resultados reportados en el apartado 5.2.2 de resistividad eléctrica, propicia un decremento en la conductividad de las matrices; es decir, éstas presentan mayor resistividad, lo que conlleva a la disminución parcial de los potenciales de corrosión, como se observa en las primeras edades de exposición, llegando a presentar un estado completamente pasivo o de bajo riesgo de corrosión.

Posteriormente, conforme el avance del frente de carbonatación, las matrices pasan por una zona de transición que las lleva a la zona tres con tendencia al incremento de los potenciales. Lo anterior es atribuible a la despasivación del acero de refuerzo por el alcance del  $\text{CaCO}_3$  (Cole et al., 2019). Si bien, en las primeras edades de carbonatación, el  $\text{CaCO}_3$  provoca un refinamiento de la red capilar que propicia la disminución de los potenciales de corrosión, conforme pasa el tiempo, este compuesto se vuelve abundante en las matrices carbonatadas. Esto provoca la disminución del pH de las matrices por el consumo del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , el cual es un compuesto alcalino, a diferencia del  $\text{CaCO}_3$ . Esta desalcalinización provoca que la capa pasiva que la matriz cementante le provee al acero se desintegre, propiciando mayor riesgo de corrosión. Es por esto por lo que se presentan incrementos considerables y una visible tendencia a superar el límite de riesgo de corrosión; moderado en algunas matrices, específicamente las que presentan mayor

avance de carbonatación, acorde con lo obtenido en las mediciones de profundidad de carbonatación presentadas en el apartado 5.3.1.

Por su parte, en la Figura 61 se muestran los resultados obtenidos del monitoreo de potenciales de corrosión en probetas expuestas al ambiente natural de San Nicolás de los Garza, en el estado de Nuevo León. En ella se puede observar una variabilidad importante de datos, lo anterior posiblemente por las condiciones ambientales durante el tiempo de exposición, de las cuales el factor humedad resulta el más importante, puesto que propicia el mayor transporte de carga a través de las matrices en cada día de medición. No obstante, se logran apreciar tres comportamientos principales en cada matriz cementante con algunas variantes.

Posterior al curado y al inicio de la exposición, se aprecian incrementos en los valores de  $E_{\text{corr}}$ , siendo más pronunciados los de las matrices M3 y M5, ligeramente menores los de las matrices M2 y M3, y un tanto estabilizados los de las matrices MC y M1. Posteriormente se presenta un periodo de estabilización de los potenciales en el que los valores se mantienen en un mismo intervalo de entre -200 y -100 mV; es decir, en un riesgo de corrosión moderado desde los 60 días de edad hasta los 120, salvo la matriz MC, la cual presenta un decremento abrupto en los valores en dicho período, con tendencia a pasar a potenciales con bajo riesgo de corrosión. Pasados los 120 días, se presentan tendencias al incremento de los potenciales por parte de las matrices MC y M1, las cuales se mantienen durante el tiempo restante de exposición, siendo en M1 el incremento menos pronunciado. Por el contrario, el resto de las matrices decrecen sus valores  $E_{\text{corr}}$ , alcanzando un bajo riesgo de corrosión las matrices M2 y M4. En el caso de M3 y M5, si bien, se presenta esa tendencia de decremento, los valores se mantienen en el intervalo de riesgo moderado, con posible tendencia a disminuir en edades posteriores.

El comportamiento de la matriz de referencia está influenciado por factores físico – químicos propios de la matriz, como los procesos de hidratación y por factores ambientales propios del lugar de exposición. En principio, las reacciones de hidratación del CP forman principalmente  $\text{Ca(OH)}_2$ , el cual provee de alcalinidad a la matriz cementante y protege al acero de refuerzo de la corrosión, por lo cual se presenta un

comportamiento estable–descendiente del potencial de corrosión dentro de la mitad del tiempo de exposición. No obstante, las condiciones ambientales juegan un papel importante, dado que éstas son variables, los potenciales pueden modificarse de un momento a otro (Baltazar-Zamora et al., 2020). Dicho esto, debido a la presencia de mayor humedad y oxígeno proveniente de la atmósfera, aunado a las altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, los procesos corrosivos tienden a incrementarse, propiciando que se incremente el potencial de esta matriz, aunque es de considerarse que, a pesar de la tendencia de incremento, se sigue observando un riesgo de corrosión moderado.

En el caso de la matriz M1 con 20% de MK, se observa un ligero incremento del potencial de corrosión, siendo más estable que el resto de las matrices. Esto se puede atribuir a que, al igual que en el ambiente controlado, inicialmente el MK disminuye el pH de la matriz mediante el consumo del Ca(OH)<sub>2</sub>, lo cual propicia que se presente ese ligero incremento (Homayoonmehr et al., 2021). Posteriormente, al igual que en la matriz MC las condiciones ambientales provocan un proceso corrosivo más agresivo, por lo cual no se presentan mejores valores de  $E_{\text{corr}}$  para esta matriz en edades posteriores; sin embargo, se debe considerar que, a diferencia de la matriz de referencia, el incremento en los valores de  $E_{\text{corr}}$  para M1 son más estables, lo cual se puede atribuir esencialmente a la actividad puzolánica del MK, dado que mediante ésta se generan productos tales como el gel CASH como se reportó en los apartados 5.4.1 y 5.4.2, con el cual se produce un refinamiento de la estructura de poros que disminuye el ingreso de agentes nocivos y agentes químicos necesarios para el proceso corrosivo, con lo que se obtiene un fenómeno de corrosión menos agresivo que en el proceso de carbonatación acelerada. No obstante, se debe considerar que los valores  $E_{\text{corr}}$  para M1 son mayores, en comparación con los obtenidos en el ambiente acelerado. Esto, al igual que en la matriz M1, puede deberse a la humedad presente en las muestras expuestas al ambiente natural al momento de las mediciones.

En el caso de la CV y la CB, los comportamientos apreciados tienden a ser inicialmente incrementos de potenciales que se estabilizan y proceden a disminuir en edades mayores que 100 días. Lo anterior se puede atribuir a que inicialmente estas puzolanas poco reactivas únicamente colaboran en la densificación de las matrices mediante el efecto

físico de relleno de poros con las partículas sin reaccionar encontradas en el apartado 5.4.2, lo cual en un entorno agresivo tiende a permitir que se propicie el fenómeno de la corrosión. Lo anterior no difiere con lo discutido en los potenciales en carbonatación acelerada, puesto que ahí, la disminución de los valores  $E_{\text{corr}}$  se encuentra asociada a la formación superficial de carbonato de calcio más que a la densificación por la acción puzolánica. Posteriormente, en las edades de reactividad de estas cenizas, la formación de gel CSH secundario propicia el llenado de los poros capilares, densificando así las matrices cementantes y disminuyendo el riesgo de corrosión. Lo anterior, a diferencia de la exposición a carbonatación acelerada, cobra sentido, puesto que en un ambiente natural las concentraciones de  $\text{CO}_2$ , si bien, son altas, no logran carbonatar las matrices en gran medida, por lo que a edades avanzadas hay presencia de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  con el cual, tanto la CV como la CB, pueden reaccionar, formando así el gel CSH para promover la densificación de las matrices, es decir, las puzolanas poco reactivas en un ambiente natural tienen mayor oportunidad de reacción en comparación con un ambiente acelerado que consume el principal activador de los materiales puzolánicos como lo hace la carbonatación (Cole et al., 2019). De lo anterior, cabe mencionar que, si bien el comportamiento resulta similar para las matrices M2 y M3, la CV propicia una mejor resistencia a la corrosión dado que mantiene los potenciales de corrosión en el nivel de bajo riesgo.

De lo anterior, el efecto combinado del MK con los residuos CV y CB, se atribuye a lo siguiente. En primera instancia, el MK provoca una ligera desalcalinización de la matriz cementante, provocando incrementos minúsculos en los valores  $E_{\text{corr}}$ , lo cual, sumado a la poca reactividad y densificación de las puzolanas CV y CB, da como resultado un incremento considerable en los potenciales, tanto de la matriz M4 como de M5, siendo M4 la de potenciales menores, en comparación, debido al mejor comportamiento de la CV. Consecutivamente, pasado el proceso de estabilización, comienza el proceso de descenso de los valores  $E_{\text{corr}}$  para ambas matrices, lo cual se atribuye a la acción puzolánica de los residuos con la poca cantidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que deja la actividad puzolánica del MK, lo cual, en términos generales, propiciaría un menor decremento en comparación con M2 y M3 donde la actividad de las cenizas resulta mayor, no obstante, al interactuar la alúmina del MK con la sílice reactiva de la CV y la CB se genera mayor

formación de gel CASH aunado al gel CSH secundario de la CV y la CB, con lo cual se potencializa el refinamiento de la red capilar y se obtienen mejores potenciales de corrosión, estando, en el caso de M4, en un riesgo bajo de corrosión y, en el caso de M5, en un riesgo moderado con tendencia a disminuir. Por esto, se puede destacar que el efecto obtenido de la combinación de MK con los residuos CV y CB resulta en un mejor comportamiento ante la corrosión en un ambiente natural.

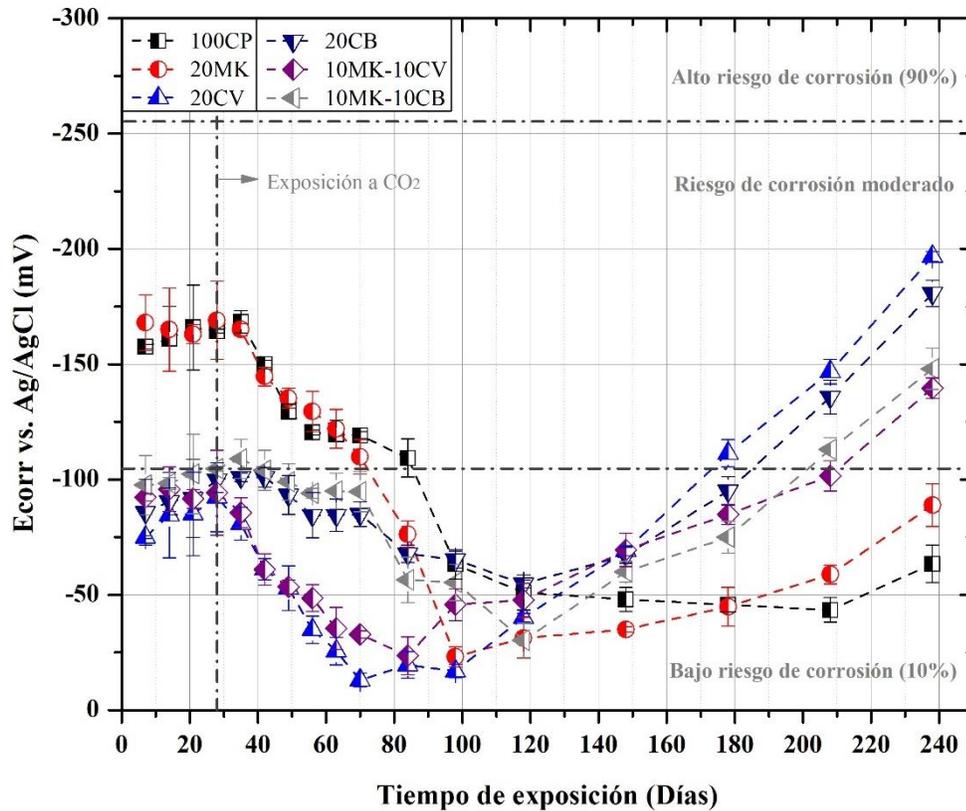


Figura 60.- Potenciales de corrosión de las matrices expuestas en un proceso de carbonatación acelerada con una concentración de CO<sub>2</sub> del 8% durante 240 días

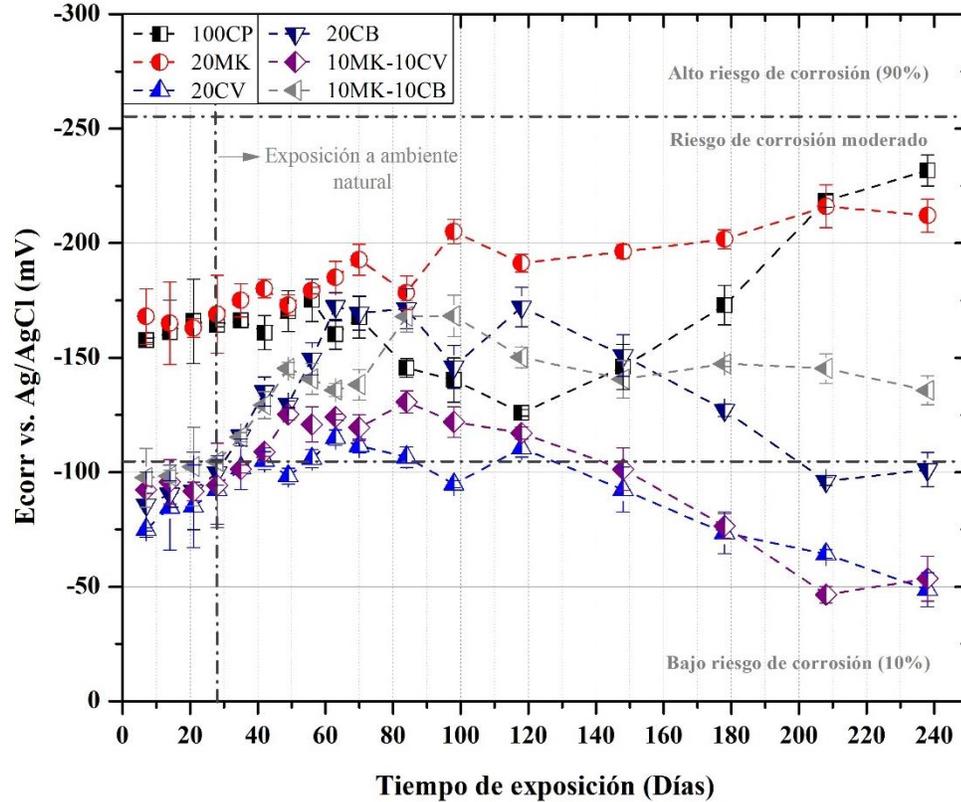


Figura 61.- Potenciales de corrosión de las matrices expuestas en un ambiente urbano – industrial con alta concentración de CO<sub>2</sub> durante 240 días

### 5.3.3.2 Resistencia a la polarización lineal

En las Figura 62, Figura 63 y Figura 64 se presentan las densidades de corriente de corrosión correspondientes al ambiente controlado, acelerado y natural, respectivamente, las cuales se obtuvieron del monitoreo periódico de las probetas expuestas a los diferentes ambientes durante 210 días exposición con, 28 días de curado previo con la técnica de resistencia a la polarización lineal (RPL). Las densidades, también conocidas como velocidades de corriente de corrosión, fueron discutidas con base en los criterios de evaluación que se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15.- Condiciones de densidad de corrosión

| Condición                 | Densidad de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) |
|---------------------------|---|
| Corrosión pasiva          | < 0.1   |
| Corrosión baja o moderada | 0.1 a 0.5   |
| Corrosión moderada a alta | 0.5 a 1.0   |
| Corrosión alta            | >1.0  |

\*Fuente: Jiménez-Quero, 2013

En la Figura 62 se observa que todas las matrices cementantes presentan una condición pasiva de corrosión. Todas presentando un mismo comportamiento con valores  $I_{corr}$  bajos similares, los cuales parten de un intervalo de  $0.0065 \pm 0.001 \mu A/cm^2$  en las primeras edades, descendiendo posteriormente hasta valores de  $0.002 \pm 0.001 \mu A/cm^2$  a 90 días, para una posterior estabilización hasta las edades finales.

Los datos de densidad de corrosión concuerdan directamente con lo reportado en los potenciales de corrosión discutidos en la sección anterior, dado que, los potenciales de corrosión más negativos presentan mayores densidades de corrosión. No obstante, las matrices M2, M3, M4 y M5, presentaron un comportamiento contrario, puesto que valores menores de  $E_{corr}$  presentaron valores de  $I_{corr}$  similares a lo reportado por las matrices MC y M1, lo cual se puede atribuir a las densidades de corrosión relativamente bajas que se obtuvieron, donde las diferencias de valores son considerablemente despreciables.

De lo mencionado cabe destacar el grado de pasivación de las matrices cementantes. El cual, en términos generales, se debe tanto a la formación de  $Ca(OH)_2$  por parte del CP como a la adición de las puzolanas, principalmente CV y CB, dado que, en el caso del MK, éste provoca inicialmente una despasivación minúscula por el consumo de los compuestos alcalinos para la formación de CASH, lo cual, al no verse influenciado por algunos otros factores, tales como las condiciones ambientales, provoca una menor afectación a la pasividad de las matrices, por lo cual se presentan comportamientos similares en el resto de las matrices, aun cuando esta matriz presenta la mayor densidad de corrosión en las últimas edades (Güneyisi et al., 2013; Zhang, 2020).

Adicional a lo mencionado, algunos autores han estimado que materiales puzolánicos ricos en  $SiO_2$ , tales como la CV y la CB, al interaccionar con el  $Ca(OH)_2$ , más allá de desalcalinizar las matrices cementantes, provocan la formación de sales hidratadas mixtas con fórmulas complejas que incluyen los compuestos propios del CP como el  $C_3A$  y el  $C_4AF$ . Estas sales, por lo general, suelen alojarse en la superficie del acero añadiendo una protección extra a lo que aporta la capa pasiva del cemento hidratado, lo que provoca la disminución, tanto del riesgo de corrosión como de la densidad de corrosión (Tsouli et al., 2018).

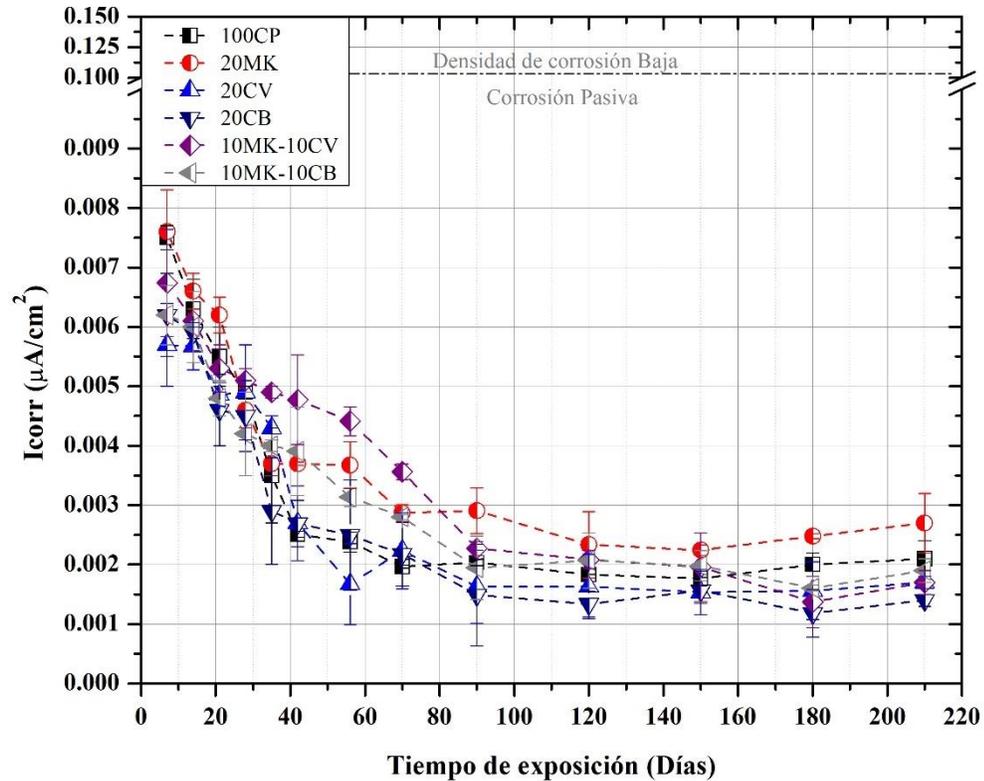


Figura 62.- Densidad de corrosión de las matrices en condiciones de laboratorio con humedad y temperatura controladas durante 210 días

Por otra parte, en la Figura 63 se presentan los valores  $I_{corr}$  obtenidos del monitoreo de las probetas expuestas a carbonatación acelerada. Estos datos, al igual que las probetas en ambiente controlado, presentaron correlación directa con los datos de  $E_{corr}$ , donde, con el incremento de los potenciales de corrosión hacia valores más negativos, se tuvo un incremento en la densidad de corrosión. No obstante, se debe recalcar que, si bien, la carbonatación provocó incrementos en los valores  $I_{corr}$ , éstos se mantuvieron dentro de la condición de corrosión pasiva.

En la figura se pueden destacar dos zonas posteriores al periodo de curado estándar: una zona de corrosión pasiva estable y otra de incremento de velocidad de corrosión, siendo esta segunda zona variable en función de la matriz cementante, dado que cada una presenta diferente edad de inicio de incremento, salvo la matriz de referencia, la cual no presenta incremento de velocidad en ninguna edad.

En el caso de la matriz M1, la zona pasiva estable termina a partir de los 150 días, edad a partir de la cual se aprecian incremento en los valores  $I_{corr}$ , siendo éstos poco

pronunciados, en comparación con el resto de las matrices, llegando únicamente a  $0.014 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . En el caso de los sistemas M2 y M3, contrario a MC y M1, éstos presentan los mayores valores de velocidad de corrosión, comenzando los incrementos a partir de 100 y 120 días; respectivamente, y alcanzando densidades de corrosión de 0.05 y  $0.045 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  cada uno. Así mismo, las matrices M4 y M5 presentan incrementos pronunciados a partir de 120 días, sin embargo, con valores menores ( $0.032$  y  $0.037 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , respectivamente), ambas matrices con comportamientos muy similares.

Los comportamientos anteriores se atribuyen directamente a la despasivación del acero de refuerzo por el alcance de la carbonatación. Como se ha mencionado, la conversión del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en  $\text{CaCO}_3$  por acción del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  provoca la desalcalinización de las matrices cementantes, proceso que deteriora la capa pasiva que protege al acero de refuerzo (Cole et al., 2019). En el caso de las matrices M2 y M3, se ha demostrado que el avance de la carbonatación se da en periodos menores de tiempo con respecto al resto de matrices, es por esto por lo que la despasivación del acero comienza en edades menores que el resto (ver apartado 5.3.1). Ahora bien, como se mencionó anteriormente, los materiales puzolánicos ricos en  $\text{SiO}_2$  como la CV y la CB forman una capa de sales hidratadas, junto con los aluminatos de calcio del CP, la cual supone una mayor protección para el acero de refuerzo (Tsouli et al., 2018). No obstante, los procesos de hidratación y reacción de estas puzolanas se dan principalmente en edades avanzadas, por lo cual, el avance de la carbonatación resulta dominante sobre la formación de estas sales, posibilitando así que se dé el incremento de las densidades de corrosión.

Además, cabe destacar que la matriz de referencia es la única que no presenta incrementos considerables en los valores de  $I_{\text{corr}}$ , lo que supondría que la despasivación del acero no se ha presentado debido al poco avance de la carbonatación en esa matriz.

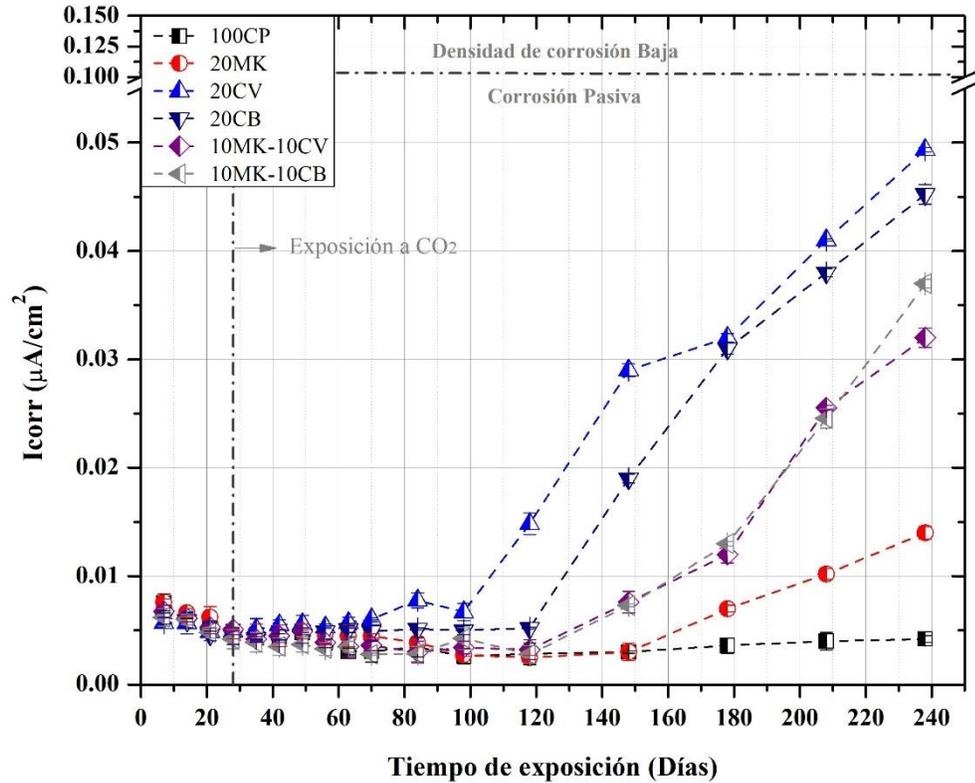


Figura 63.- Densidad de corrosión de las matrices expuestas en un proceso de carbonatación acelerada con una concentración de CO<sub>2</sub> del 8% durante 240 días

En la Figura 64 se presentan los resultados de la densidad de corrosión de cada matriz expuesta a ambiente natural. Los datos revelan un incremento en la velocidad de corrosión para algunas matrices, mostrando cierta concordancia con lo obtenido en los potenciales de corrosión para el mismo ambiente de exposición. En primera instancia, en la figura se aprecia un comportamiento similar a lo reportado en la exposición a carbonatación acelerada con decrementos de velocidad las primeras edades e incrementos en edades avanzadas, sin embargo, las velocidades de corrosión resultan menores en el ambiente natural.

Comenzando por las matrices MC y M1, éstas se comportan de manera similar, incrementando sus valores  $I_{corr}$  a partir de los 90 días y alcanzando alrededor de 0.012 y 0.011  $\mu A/cm^2$ , respectivamente. Por el contrario, las matrices M2 y M3 presentan nulo incremento de densidades de corrosión. Éstas se mantienen en valores bajos entre 0.001 y 0.002  $\mu A/cm^2$ , siendo comportamientos similares a los reportados en el ambiente controlado. Por su parte, las matrices M4 y M5 reportan incrementos menos abruptos

que las matrices MC y M1, alcanzando un  $I_{\text{corr}}$  de  $0.007 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ambas matrices en edades finales.

De lo anterior, se observa un efecto benéfico significativo ante la densidad de corrosión con el empleo de CV y CB, sobre lo que se obtiene con MK. En el caso de MC y M1, al igual que en los potenciales de corrosión su resistencia ante la corrosión se ve ligeramente limitada, con respecto al resto de las matrices. Por un lado, la matriz de referencia presenta decrementos de  $I_{\text{corr}}$  atribuibles a la formación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por las reacciones de hidratación, con lo que se alcanza la pasivación del acero de refuerzo, la cual se ve afectada principalmente por las condiciones de exposición, dado que agentes tales como la humedad propician que se presenten los procesos corrosivos, con lo cual se degrada la capa pasiva del acero y se incrementa la velocidad de corrosión. Por otro lado, el MK, como se ha visto, propicia la desalcalinización de la matriz M1, debido a sus actividad puzolánica, provocando una menor capacidad anticorrosiva, lo cual se ve ligeramente compensado mediante la formación de compuestos de hidratación que actúan como barrera dentro de la matriz, minimizando el ingreso de agentes corrosivos.

En contraparte, la CV y la CB al ser puzolanas de reactividad lenta, propician la pasivación de las matrices cementantes M2 y M3 en las primeras edades, por la hidratación del CP. Posteriormente, en edades avanzadas, al comenzar su actividad puzolánica, como se ha mencionado, forman compuestos que disminuyen las propiedades de transporte de las matrices y, a su vez, desarrollan, mediante la interacción con los aluminatos de calcio, sales hidratadas que brindan protección extra al acero, con lo cual se obtienen menores velocidades de corrosión ante las condiciones ambientales naturales.

Lo anterior se sintetiza en el comportamiento de las matrices M4 y M5, las cuales presentan incrementos de velocidad menores que las matrices MC y M1. Esto debido a la formación de compuestos CSH y CASH, así como por la formación de las sales hidratadas, las cuales se ven disminuidas debido a la menor cantidad de  $\text{SiO}_2$  por la disminución de la cantidad de CV y CB. Así mismo, los incrementos se ven influenciados por la desalcalinización menor que provoca el contenido de MK en esas matrices. No obstante, los valores  $I_{\text{corr}}$  no presentan mayores incrementos, por lo cual se

mantienen dentro del nivel de corrosión pasiva con tendencia a incrementar y a superar la velocidad de corrosión baja a largo plazo.

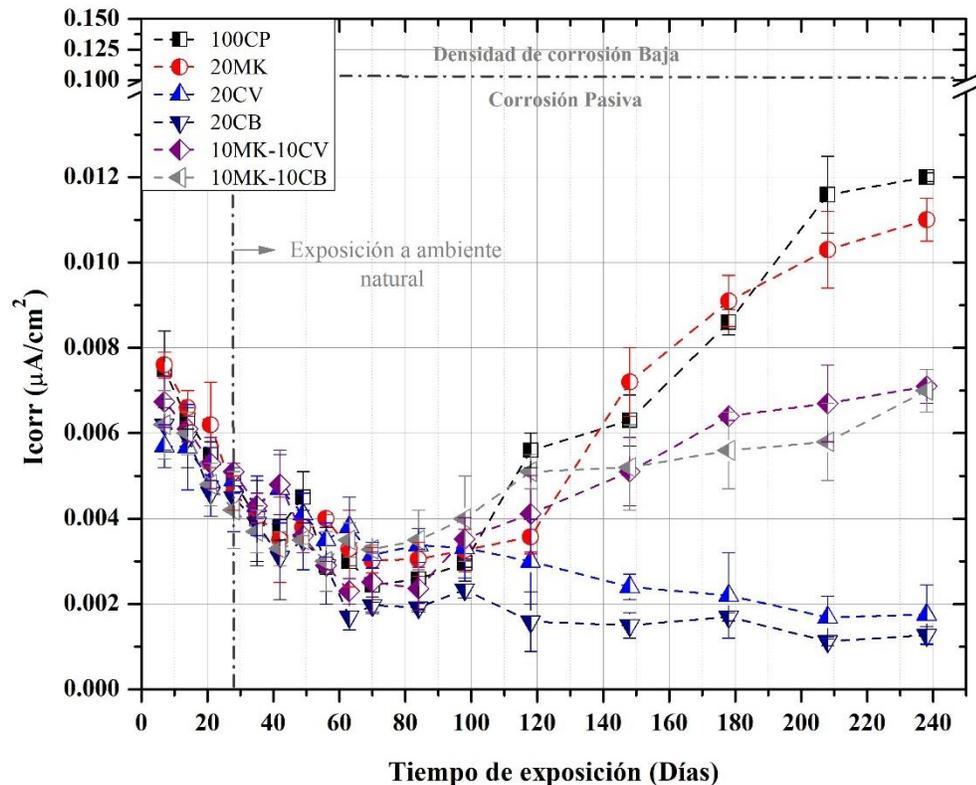


Figura 64.- Densidad de corrosión de las matrices expuestas en un ambiente urbano – industrial con alta concentración de CO<sub>2</sub> durante 240 días

De lo anterior se debe destacar que los procesos corrosivos inducidos de forma acelerada influyen directamente en la capacidad de reacción de algunos materiales puzolánicos, tales como la CV y la CB, debido a su lenta reactividad. Sin embargo, las evaluaciones en condiciones naturales pueden brindar mejor conocimiento sobre su comportamiento, así como sobre los beneficios que pueden brindar en matrices cementantes base CP.

#### 5.4. Etapa IV. Análisis microestructural de los sistemas en estudio

##### 5.4.1. Difracción de Rayos X

###### 5.4.1.1 Curado estándar

Las Figuras 66, Figura 66 y Figura 67 muestran las fases encontradas en las matrices cementantes con curado estándar a 28, 90 y 180 días, respectivamente. Los compuestos encontrados en todas las matrices con diferentes intensidades se resumen en calcita (C),

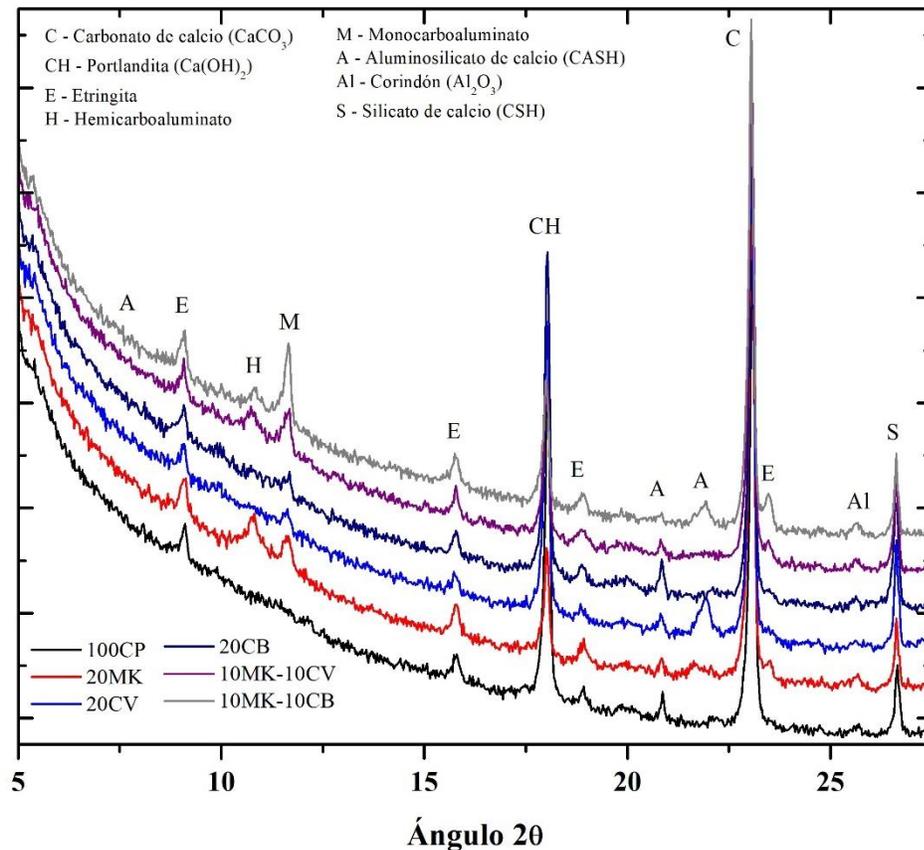
etringita (E), portlandita (P), CSH (S) y algunos carboaluminatos. Compuestos similares reportaron Wei y Gencturk., en el 2019 y Zhao et al., en el 2021 para espectros dentro del rango de  $5^{\circ}$  a  $30^{\circ}$   $2\theta$ , los cuales también consideran la formación de CASH pobremente cristalizado, mismo que se encontró de igual forma en los difractogramas discutidos.

A los 28 días se pueden observar diferencias para todas las matrices en el pico de portlandita ubicado a los  $18^{\circ}$  del ángulo  $2\theta$ . En el caso de la matriz M1, se observa un decremento de portlandita considerable con respecto al resto de matrices. Lo anterior se puede atribuir a la alta actividad puzolánica que caracteriza al MK en las primeras edades como se mencionó en el apartado 5.1.1.6. En comparación, las matrices M2 y M3 presentan poca o nula actividad puzolánica a esta edad, lo cual se puede corroborar dado que las intensidades de los picos de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se ven poco disminuidas, en comparación con la matriz de referencia. No obstante, al combinarse con MK; en las matrices M4 y M5, sí se presenta consumo de este compuesto por la acción puzolánica rápida del MK, sin embargo, es de destacarse que la presencia de esta puzolana en menor porcentaje propicia un menor consumo de portlandita a esta edad.

Cabe destacar, además, la presencia de picos correspondientes a la calcita y al compuesto CSH ubicados a los  $23^{\circ}$  y  $27^{\circ}$  del ángulo  $2\theta$ . Lo anterior se atribuye principalmente a las reacciones de hidratación del CP y las puzolanas. Además, a esta edad la etringita y los carboaluminatos (H y M) se forman en cantidades relativamente menores, por lo que los picos ubicados en  $9^{\circ}$  y  $16^{\circ}$   $2\theta$ , en el caso de la etringita y en  $11^{\circ}$  y  $12^{\circ}$   $2\theta$  en el caso del hemicarboaluminato y el monocarboaluminato, respectivamente, presentan poca intensidad en todas las matrices, siendo en M2 y en M3 donde se puede considerar prácticamente nula su presencia. Lo anterior debido a la disminución del contenido de alúmina por parte de ambas puzolanas, con diferencia de la aportación de este compuesto por parte del metacaolín como se mostró en la Tabla 6 .

Sumando a lo anterior, se logran apreciar algunos picos teóricamente correspondientes a la formación de aluminosilicato de calcio hidratado mejor conocido gel CASH en las ubicaciones de  $8^{\circ}$ ,  $21^{\circ}$  y  $22^{\circ}$  del ángulo  $2\theta$ , el cual se forma a partir de la interacción de la portlandita generada a partir de la hidratación del cemento portland con la sílice y

alúmina reactivas de las puzolanas, en este caso presentándose con baja intensidad debido a la pobre cristianización de este compuesto en las matrices cementantes puesto que al ser considerado un gel, su morfología tiende de forma importante a ser mayormente amorfa (Wei y Gencturk, 2019).



1Figura 65.- Difractogramas de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 28 días

A los 90 días existe poca variabilidad en los compuestos encontrados, no obstante, se puede destacar la disminución significativa de la intensidad del pico de portlandita por parte de las matrices M2 y M3, lo que se puede atribuir a la lenta reactividad de estas puzolanas. En el caso de M1, el pico de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es el que sufre una mayor disminución, lo que da la pauta a la poca cantidad que el MK deja de este compuesto en las matrices para el posterior consumo de la CV y la CB. Lo anterior se aprecia en las matrices M4 y M5, donde el pico de portlandita se ve poco disminuido a esta edad, es decir, no se presenta un consumo notable por acción de la CV y la CB. Cabe destacar que los picos de etringita y carboaluminatos se encuentran relativamente más perceptibles, lo que

indica la formación de éstos por la hidratación del CP y la alúmina presente en el MK dado que en las matrices que presentan esta puzolana, se encontró un mayor incremento en la intensidad.

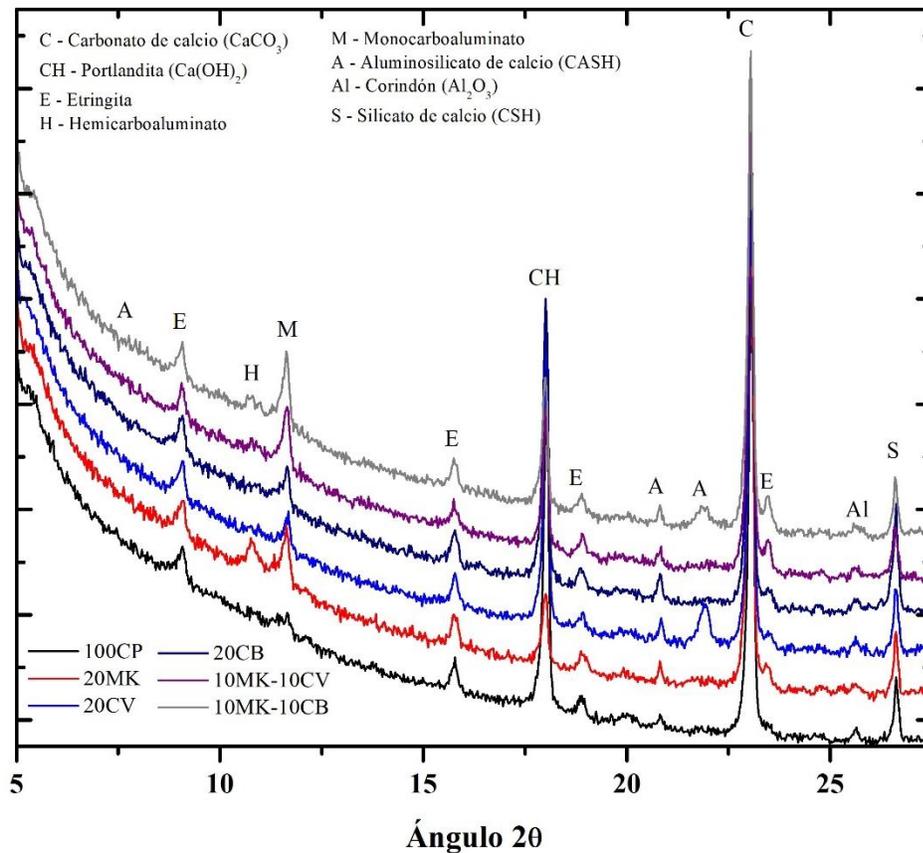


Figura 66.- Difractogramas de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 90 días

A 180 días de curado estándar se presenta poca diferenciación en la intensidad de los picos, con respecto a la encontrado a 90 días. Lo anterior puede atribuirse a la poca interacción química presente en las matrices, salvo en M2 y M3, las cuales sí presentan disminuciones en el pico ubicado en  $18^\circ 2\theta$ . Esto atribuible a la interacción de la CV y la CB con la portlandita para la formación de compuestos de hidratación secundarios (Hwang y Moreno, 2021; Klathae et al., 2021). Sin embargo, la presencia de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a estas edades sigue siendo alta en estas matrices con respecto a las que presentan MK en su composición, lo que supondría una mayor interacción de los agentes agresivos y el deterioro rápido de dichas matrices.

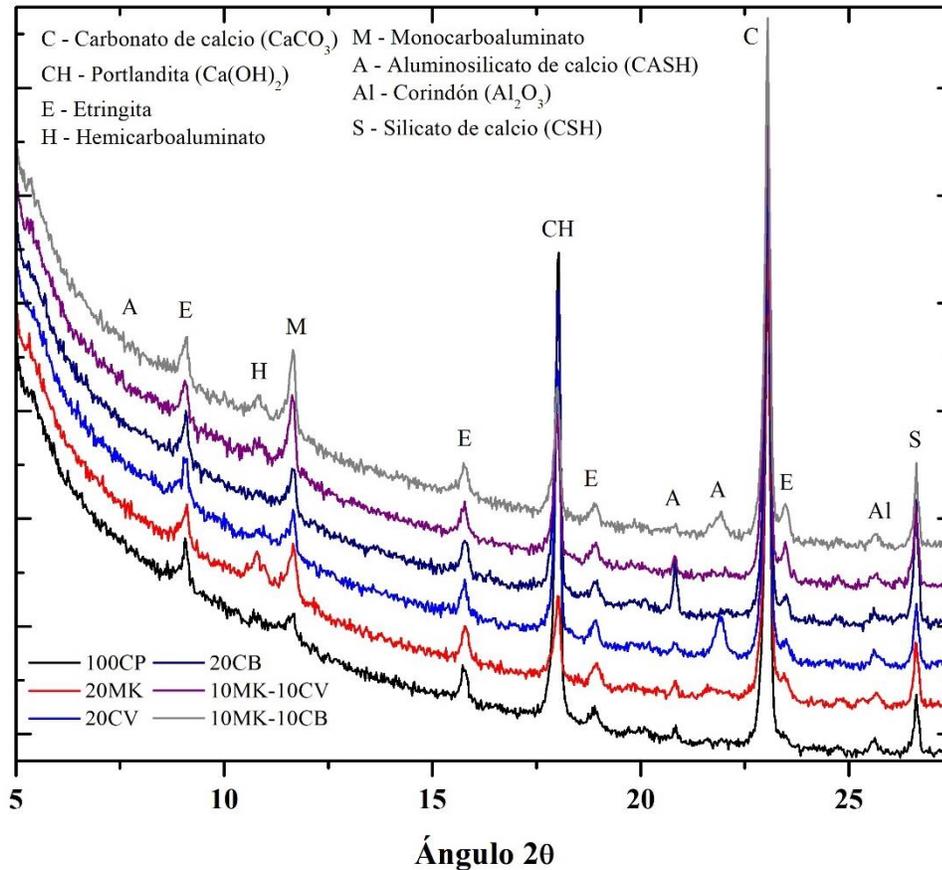


Figura 67.- Difractogramas de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 180 días

#### 5.4.1.2 Exposición a carbonatación

Las Figura 68, Figura 69 y Figura 70 muestran las fases encontradas en las matrices cementantes posterior a la exposición a  $\text{CO}_2$  para la formación de carbonatación. Dichas fases son en esencia las mismas reportadas en el curado estándar, con algunas diferencias considerables.

A los 28 días de exposición posterior al curado previo de 28 días, se pueden notar disminuciones considerables de portlandita en el ángulo de  $18^\circ 2\theta$ , donde M2 y M3 presentan las mayores disminuciones, en proporción con respecto al resto de las matrices, lo que puede significar un mayor avance de la carbonatación durante las primeras edades de exposición (ver apartado 5.3.1). En el caso de MC y M1, para esta edad presentan poca o nula disminución de los picos de portlandita, con respecto a lo reportado a 28 días de curado, lo que puede considerarse como poco avance de

carbonatación. En el caso de M4 y M5, la presencia de CV y CB, propician disminuciones en los picos de portlandita; sin embargo, no son tan sustanciales como en el caso de las matrices M2 y M3, puesto que el contenido de estas puzolanas se ve disminuido por la presencia del MK.

Por lo anterior, el avance de la carbonatación a estas edades se puede corroborar por el incremento significativo del pico de calcita ubicado en el ángulo de  $23^\circ 2\theta$ , donde se presentó un aumento principalmente para M2 y M3, lo que corresponde directamente con la disminución abrupta del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de estas matrices para la consiguiente formación de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) (Cole et al., 2019).

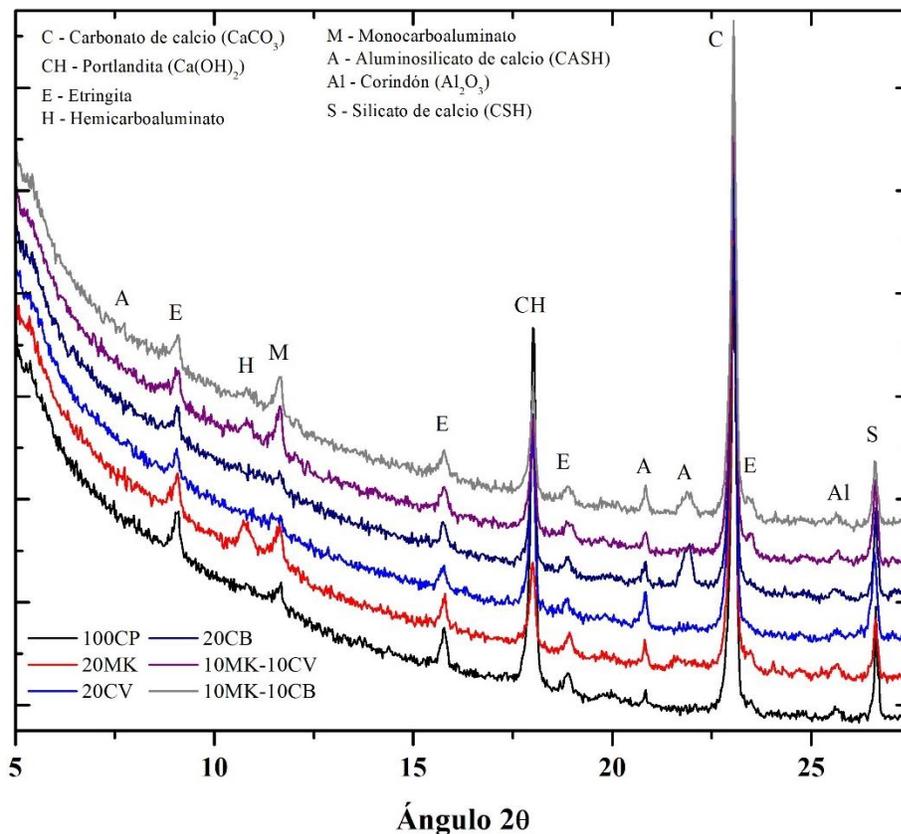


Figura 68.- Difractogramas de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de  $\text{CO}_2$  al 8% durante 28 días

A los 90 días de exposición, el pico de portlandita presenta mayores disminuciones para las matrices M1, M2 y M3. En el caso de M1, el consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por parte del MK propicia la menor presencia de este compuesto para la posterior interacción con el  $\text{H}_2\text{CO}_3$  para la formación de  $\text{CaCO}_3$ , por lo que su presencia menor en esta edad de

exposición no necesariamente corresponde a un mayor avance de carbonatación, con respecto a M2 y M3 (ver Figura 55), matrices en las cuales la cantidad de portlandita previo a la exposición era relativamente alta como se mostró en la Figura 66 y, en este caso, para los 90 días de exposición se ve claramente reducida en el pico de intensidad representado. Caso contrario ocurre con la matriz MC, la cual, en proporción presenta una reducción en el pico de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  similar a lo presentado por la matriz M1, sin embargo, al presentar mayor cantidad de portlandita post – curado, el pico sigue siendo perceptible. Aunado a lo anterior, se debe destacar el incremento mayor en el pico de calcita para las matrices M2 y M3.

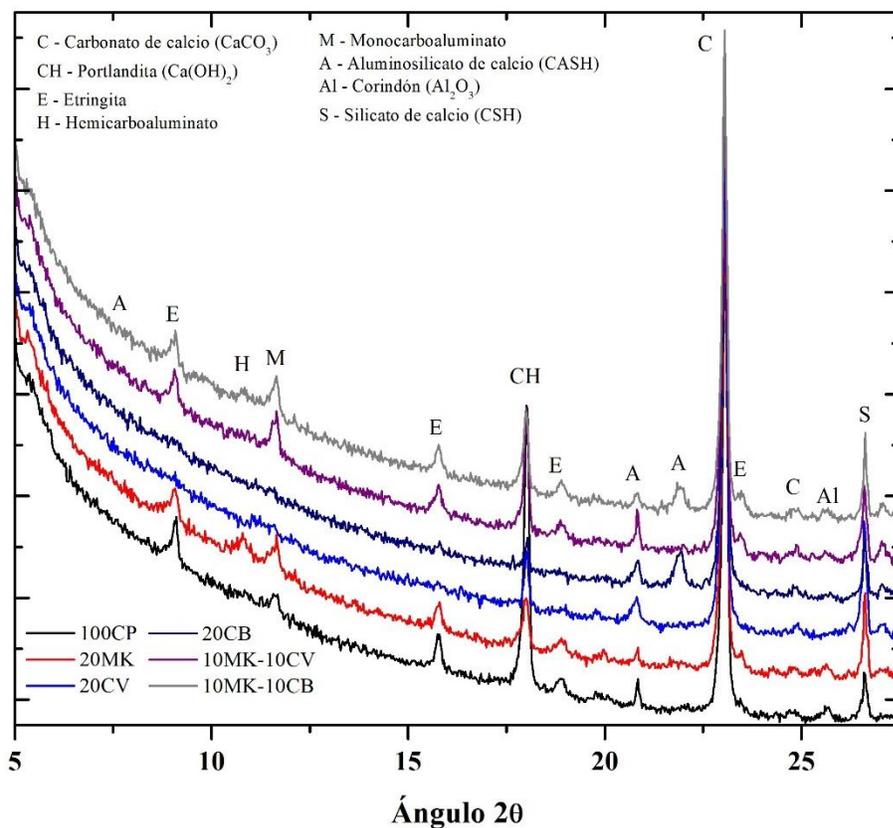


Figura 69.- Difractogramas de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de  $\text{CO}_2$  al 8% durante 90 días

Así mismo, es de mencionarse que el compuesto CSH se ve poco incrementado con respecto a lo reportado en el curado estándar. Tal es el caso del picos encontrado en el ángulo de  $27^\circ 2\theta$ . Esto se puede atribuir principalmente a la menor relación de humedad relativa en las matrices para propiciar la hidratación de las matrices cementantes debido a las condiciones de exposición ambiental como se especificó en el Capítulo 4. Si bien,

en la exposición a carbonatación se presenta una condición de humedad moderada, no representa las mismas facilidades de interacción con las partículas reactivas del CP y las puzolanas, por lo que la formación de CSH se vio ligeramente interrumpida (Mikhailenko et al., 2018).

Posteriormente, a los 180 días de exposición, los picos de portlandita se ven reducidos en su totalidad para las matrices M2 y M3 y los picos de calcita se ven incrementados, lo que supone un avance de carbonatación considerable como se muestra en el apartado 5.3.1. En el caso de MC, la portlandita aún se presenta como un compuesto de presencia alta, lo que significaría mayores avances de carbonatación con respecto al resto de mezclas que ya no presentan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como compuesto carbonatable o convertible a carbonato de calcio en edades avanzadas. Situación similar ocurre con M1, M4 y M5, matrices con presencia de MK que aún presentan cierta intensidad en sus picos de portlandita, por lo que el avance de carbonatación puede seguirse dando.

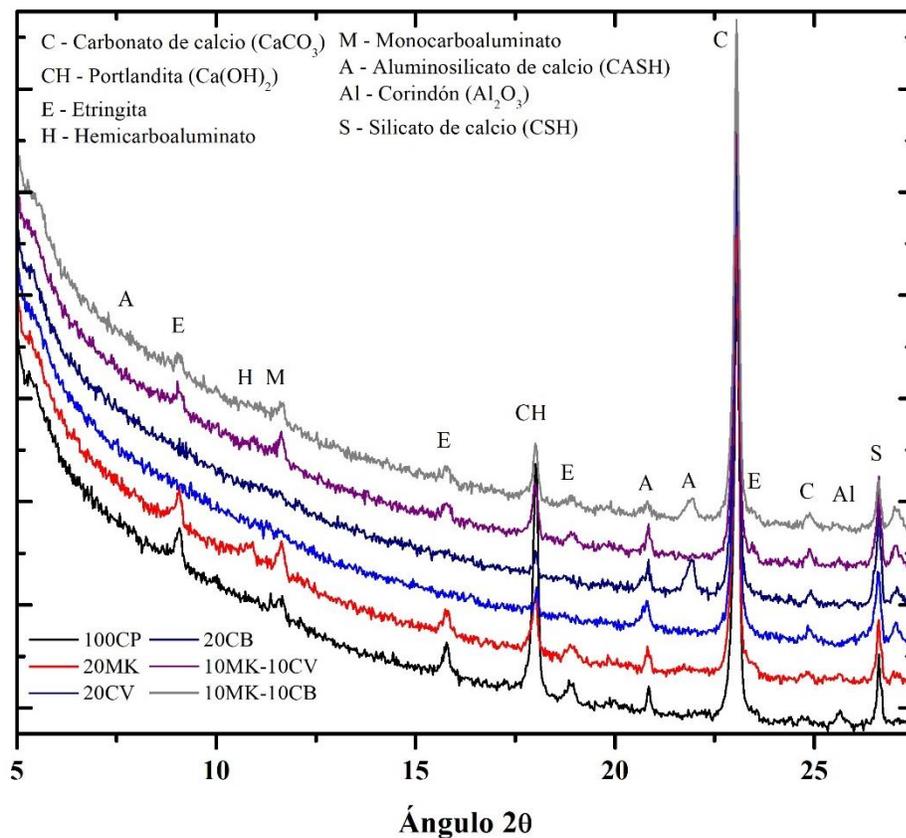


Figura 70.- Difractogramas de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de  $\text{CO}_2$  al 8% durante 180 días

Aunado a lo anterior, cabe destacar para este ambiente de exposición el nulo crecimiento de compuestos como la etringita y algunos ligeros incrementos en los carboaluminatos debido a la mayor presencia de carbonato. Lo anterior es atribuible al dominio del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  para la transformación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en carbonato y a la poca interacción de esta portlandita con la humedad y los aluminatos para la formación de compuestos expansivos, como se da en el curado estándar a pesar de ser en cantidades menores (Zhou et al., 2016; Wei y Gencturk, 2019).

#### **5.4.1.3 Exposición a $\text{MgSO}_4$**

Las Figura 71, Figura 72 y Figura 73 muestran las fases encontradas en las matrices cementantes a los 28, 90 y 180 de exposición a  $\text{MgSO}_4$ , siendo las mismas que las encontradas en el curado estándar con variaciones significativas.

En primera instancia, a los 28 días de exposición se observan ligeros incrementos en los picos principales de etringita y carboaluminatos en los ángulos 9, 12, 16, 19 y  $23.5^\circ 2\theta$ . Esto se puede atribuir a las primeras reacciones del  $\text{MgSO}_4$  con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para la producción del sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), el cual posteriormente tiende a reaccionar con el aluminato tricálcico presente en el CP para la formación de mayor cantidad de etringita (Zhou et al., 2016).

De lo anterior, se debe destacar que la formación de compuesto expansivos es mínima, lo cual se refleja en la poca disminución de los picos de portlandita de todas las matrices. Así mismo, se debe destacar también que la formación de estos compuestos se presenta en mayor proporción en las matrices con sustituciones puzolánicas, principalmente el yeso. No obstante, las formaciones de etringita son similares en todas las matrices, incluyendo la matriz de referencia. Lo anterior puede deberse a la presencia de mayor cantidad de  $\text{C}_3\text{A}$  en la matriz MC, lo cual propicia que en las primeras edades de exposición el sulfato de calcio dihidratado se convierta en etringita rápidamente, a diferencia del resto de matrices, donde las cantidades de  $\text{C}_3\text{A}$  disminuyen con la disminución de la cantidad de CP (Ramezani pour, 2014; DeBelie 2018).

Posteriormente, a los 90 días de exposición, se aprecian ligeras disminuciones en los picos de portlandita. Lo anterior supone la interacción del  $\text{MgSO}_4$  con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  para

la formación de yeso y la posterior interacción de éste con el aluminato tricálcico para la formación de etringita, la cual aparece con picos de similar intensidad en el ángulo de  $9^\circ$   $2\theta$  y con intensidades diferenciadas en el ángulo de  $16^\circ$   $2\theta$ , de donde se puede mencionar que la matriz M1 presenta menor cantidad de etringita formada, seguida de las matrices M4 y M5, así como de M2 y M3, en ese orden, siendo la matriz de referencia la que mayor intensidad presenta en este pico, lo cual supondría una mayor expansión y posiblemente mayor deterioro (en el apartado 5.3.2 se discute el efecto de estas formaciones dentro de las matrices cementantes).

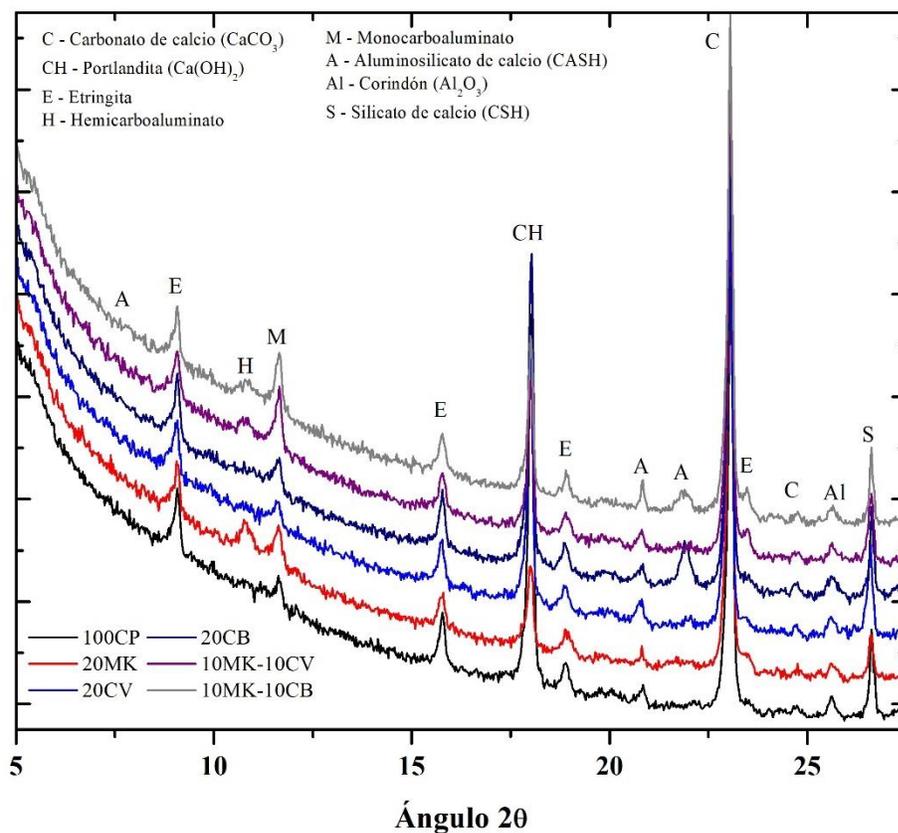


Figura 71.- Difractogramas de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 28 días

A 180 días de exposición se presenta el mismo comportamiento de las matrices que a los 90 días, donde la matriz de referencia presenta mayor cantidad de etringita, sin embargo, el resto de las matrices para esta edad presentan intensidades similares a la matriz de referencia en los picos de etringita principales, siendo las únicas diferenciaciones las

intensidades en los picos de carboaluminatos y la aparición de un nuevo pico de etringita en el ángulo de  $26.5^\circ 2\theta$ .

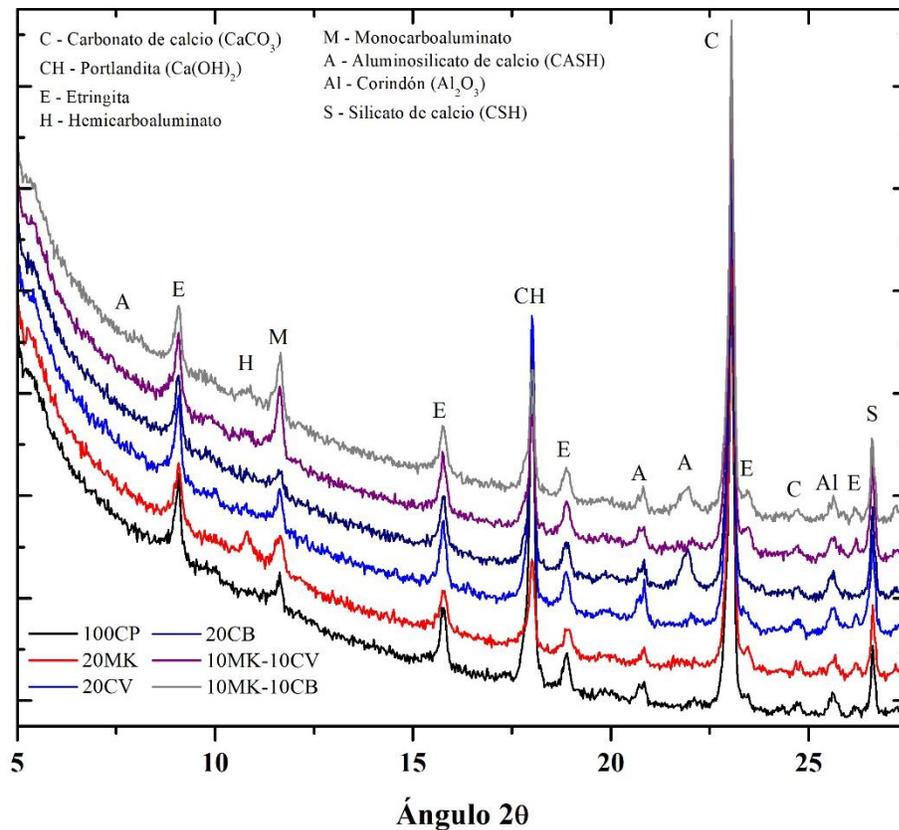


Figura 72.- Difractogramas de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 90 días

En este punto cabe destacar que se presentan ligeras disminuciones en los picos correspondientes al compuesto CSH, lo cual puede atribuirse a la descalcificación de este por acción del  $MgSO_4$  para la formación de MSH o brucita, compuestos que no ha sido posible identificar mediante la técnica de difracción de rayos X. Lo anterior posiblemente debido a que ambos son compuestos poco cristalinos difíciles de identificar con esta técnica, por lo que su presencia dentro de las matrices se verifica en el siguiente apartado mediante microscopía electrónica de barrido. Algunos otros autores han reportado casos similares donde el compuesto MSH o la brucita no se logran identificar mediante DRX (Pinto et al., 2020).

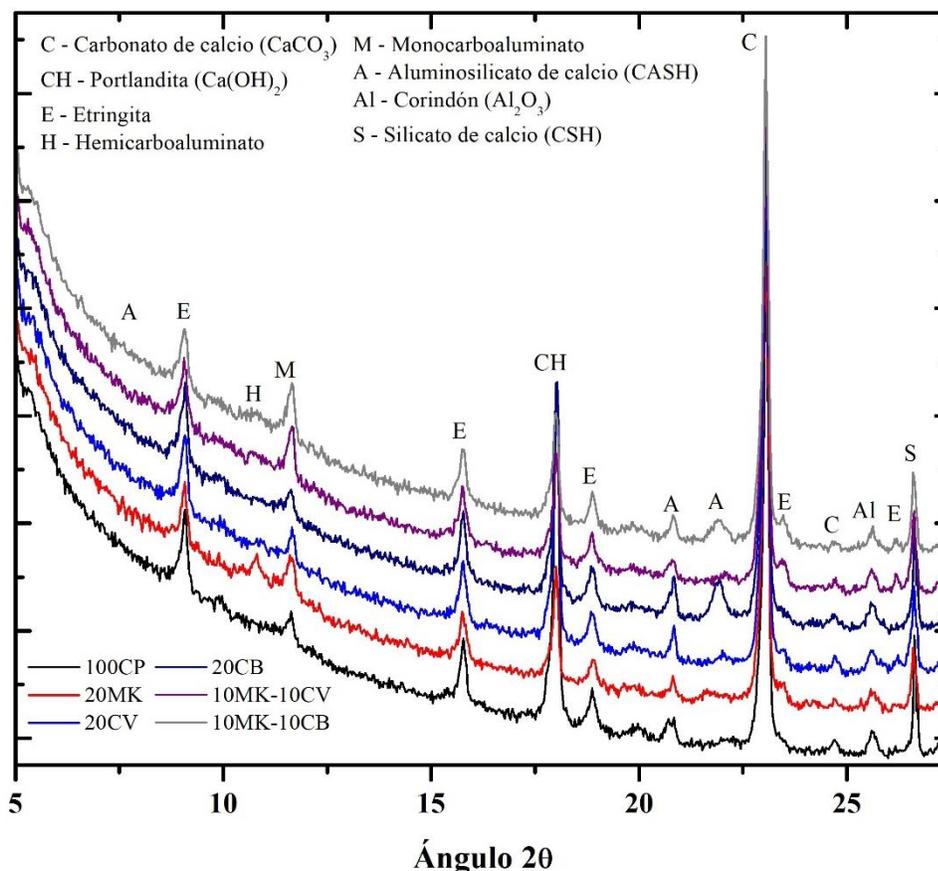


Figura 73.- Difractogramas de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 180 días

#### 5.4.2. Microscopía electrónica de barrido

La Figura 74 muestra las formaciones porosas que se presentaron en cada sistema cementante después de un curado estándar de 28 días. Como se puede observar, la matriz de referencia (Figura 74a) revela la formación de poros de diferentes tamaños que van de 10 a 140  $\mu m$ , en los cuales se alojaron compuestos producto de la hidratación del CP. Así mismo, se logra apreciar una matriz densa poco rugosa, sin formaciones o compuestos fuera de los poros. Por su parte, en la matriz M1 (Figura 74b) se observaron poros de menor tamaño, que en la matriz de referencia. En este caso presentándose mayor cantidad de microporos que van de 1 a 10  $\mu m$ , posiblemente por la formación de compuestos, dada la reacción puzolánica temprana del MK.

Por otro lado, los sistemas cementantes con CV y CB; es decir, las matrices M2 y M3, respectivamente (Figura 74c y Figura 74d), presentaron mayor cantidad de poros con respecto a las matrices antes mencionadas. En el caso de M2, se reportaron formaciones

porosas de tamaño menor, como en la matriz M1; no obstante, la cantidad de microporos formados fue visiblemente mayor. A su vez, se observaron algunos poros de mayor tamaño, en su mayoría rellenos con partículas de CV y algunos compuestos hidratados del CP. Por su parte, la matriz M3 presentó mayor cantidad de poros de tamaños considerables, encontrándose éstos en cúmulos. Cabe destacar que los poros formados en esta matriz, si bien, tenían mayor presencia, resultaron de menor tamaño con respecto a la matriz de referencia, siendo los más grandes de alrededor de 110  $\mu\text{m}$ , al igual que los de la matriz M2.

Por su parte, la matriz M4 (Figura 74e) presentó formaciones porosas con tamaños de 10 a 80  $\mu\text{m}$  y la matriz M5 (Figura 74f) presentó una mayor densificación sin porosidad visible. Esto se puede deber al mayor efecto de relleno provocado por las puzolanas poco reactivas en conjunto con los compuestos producto de las reacciones puzolánicas del MK. Para ambos casos, a diferencia del resto de matrices, se lograron observar mayor cantidad de formaciones fuera de los poros, siendo en M5 donde se aprecia de mejor manera este efecto.

Los compuestos formados en cada matriz cementante a 28 días de curado, así como el relleno de poros logrado por cada material puzolánico, se discuten en la Figura 75.

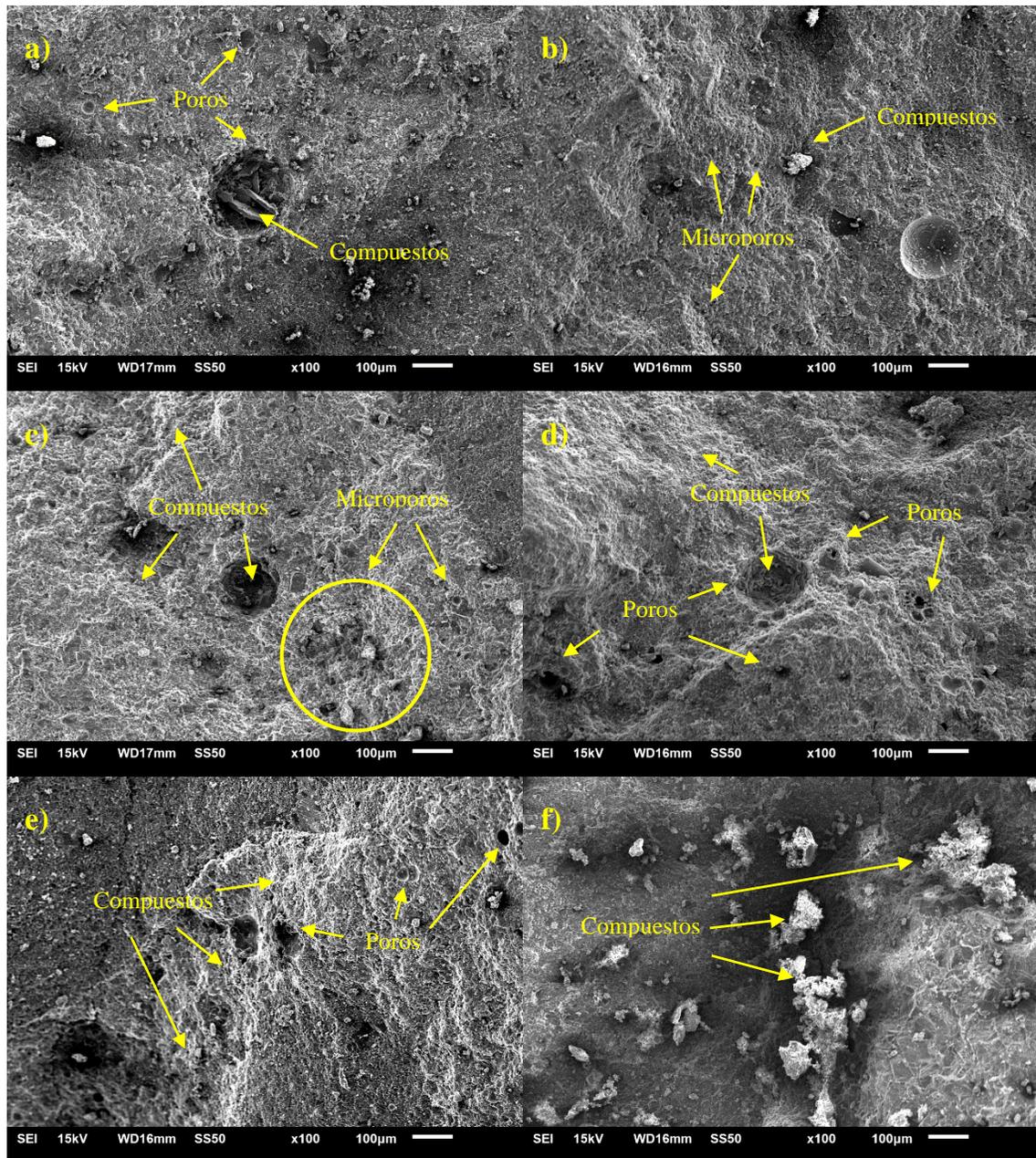


Figura 74.- Micrografías de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 28 días (100x)

a) MC, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4, f) M5

En la Figura 75 se muestran las micrografías correspondientes a las matrices curadas a 28 días mostradas anteriormente con aumentos a 1000x para observar los compuestos principales formados, iniciando con la matriz de referencia (Figura 75a). En ella se pudieron observar formaciones de placas hexagonales correspondientes al  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , formado a partir de la hidratación del CP. Así mismo, se encontraron compuestos

angulares en menor cantidad, correspondientes a la calcita perteneciente al clinker utilizado en la producción del cemento y, a su vez, se encontraron zonas ricas en sílice y calcio, las cuales fueron identificadas mediante EDS (ver Figura 76) y corroboradas con las formaciones encontradas por otros investigadores tales como Subaşı y Emiroğlu en el 2015. Éstas sugirieron la precipitación del gel CSH por la interacción de los silicatos de calcio del CP con el agua de reacción de la matriz, el cual presentó diferentes morfologías entre las que destacaron algunas redes compuestas principalmente por Ca, Si y en menor cantidad Al. Lo anterior concuerda con lo reportado por Subaşı y Emiroğlu en el 2015 y por Zhao et al., en el 2021. Por su parte, en la matriz correspondiente al 20% de MK (Figura 75b), se observaron menores cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dentro de los poros, los cuales cabe destacar presentaron menores tamaños. En ellos se encontraron formaciones fibrosas correspondientes a los aluminatos de calcio (CAH) formados por la alúmina presente en el MK (Zhao et al., 2021). Así mismo, fuera de los poros se encontraron compuestos correspondientes al gel CSH. Por lo anterior, dentro de los poros también se encontraron productos aparentemente aglomerados ricos en sílice, alumina y calcio, los cuales se identificaron como aluminosilicatos de calcio hidratados (CASH) formados a partir de la interacción de los compuestos CAH y CSH (Kalpokaitė-Dičkuvienė et al., 2019; Rispoli et al., 2020).

A diferencia de la matriz M1, en las matrices M2 y M3 a 28 días de curado (Figura 75c y Figura 75d), sí se observaron placas hexagonales correspondientes a la portlandita formada durante la hidratación del cemento. Dentro de estas matrices, además, se encontraron zonas de CSH, el cual se presentó en pequeñas cantidades debido a que únicamente correspondía a la hidratación de los silicatos de calcio del cemento. Lo anterior fue corroborado dado que en ambas matrices se identificaron partículas de  $\text{SiO}_2$ , las cuales, dadas las formas esféricas y semiesféricas, se identificaron como partículas de CV y CB, respectivamente. Lo anterior se replicó en las matrices M4 y M5 (Figura 75e y Figura 75f). En estas se encontraron partículas de CV y CB sin reaccionar, envueltas en coagulaciones de CASH y CAH producidos a partir de la hidratación del MK; es decir, se encontraron como partículas de relleno. Esto resultó de esta manera debido a la poca actividad puzolánica que presentan ambas cenizas en las primeras edades de hidratación; sin embargo, en edades posteriores las reacciones de ambas podrían

dar pie a la formación de mayor cantidad de compuestos benéficos para las matrices. Cabe destacar que, a diferencia de las matrices MC, M2 y M3, en éstas se presentaron pocas cantidades de  $\text{Ca(OH)}_2$ . Este compuesto que se encontró disminuido, en concordancia con la matriz M1, debido al alto potencial de reacción del MK en las primeras edades de hidratación; sin embargo, se debe resaltar que al presentarse menor cantidad de MK reactivo, a diferencia de M1, en estas matrices sí se encontraron pequeñas formaciones hexagonales de portlandita; es decir, se presentó un consumo parcial de este compuestos en las primeras edades de curado.

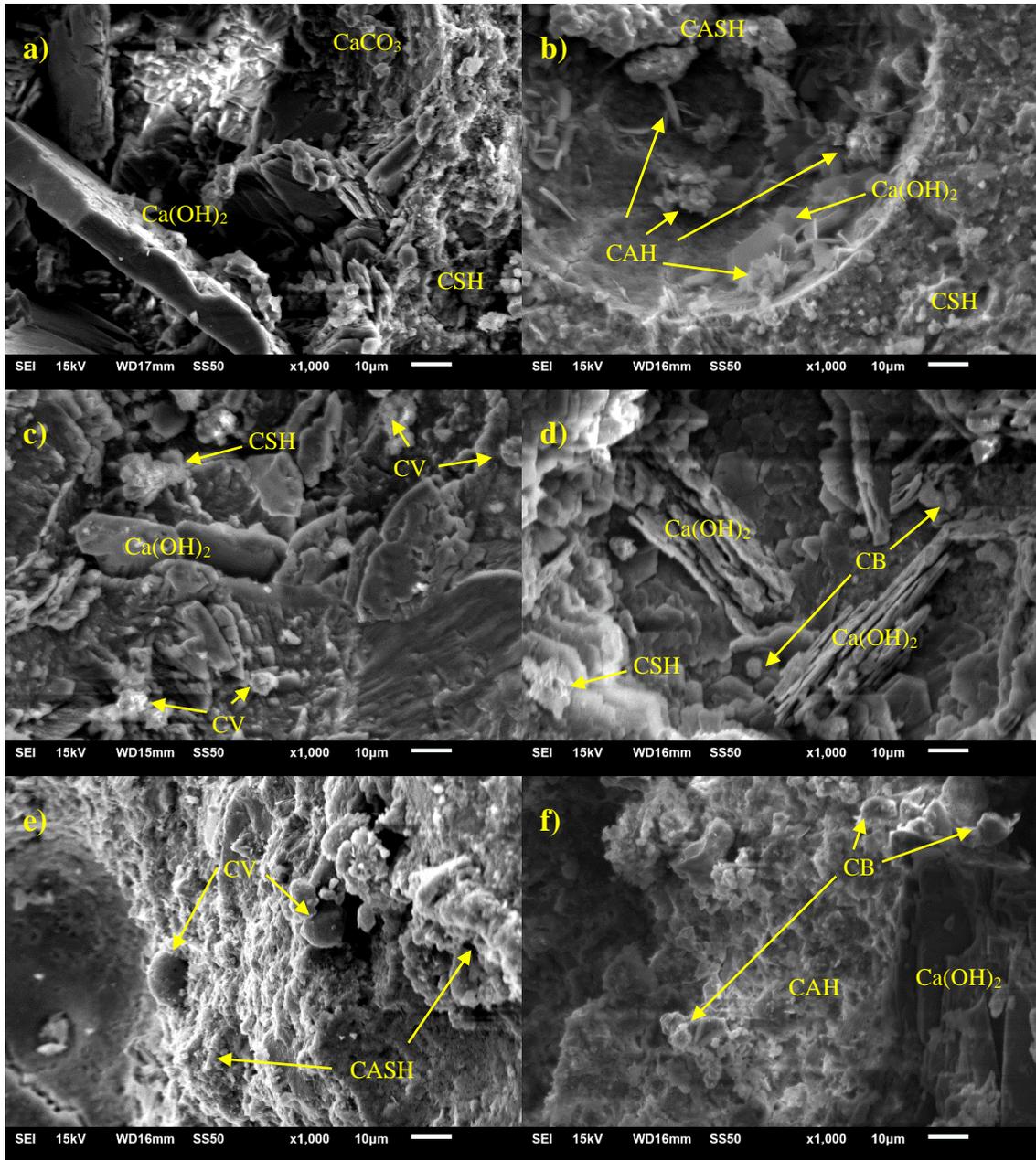


Figura 75.- Micrografías de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 28 días (1000x)

a) MC, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4, f) M5

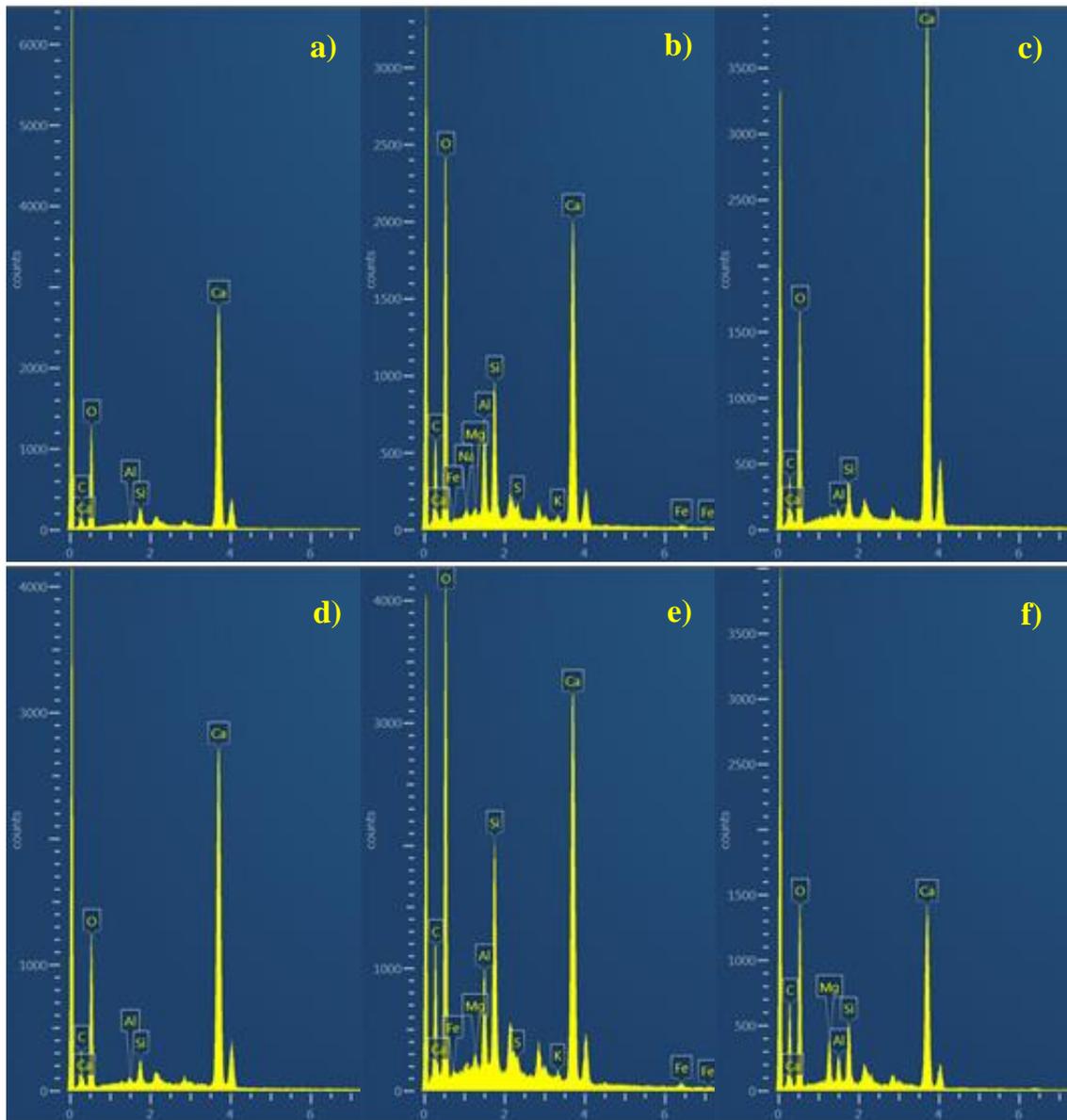


Figura 76.- Espectros EDS de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 28 días

a) MC, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4, f) M5

Aunado a lo anterior, en la Figura 77 se muestran los compuestos formados en cada matriz cementante al final del periodo de curado estándar de 180 días. En el caso de la matriz MC (Figura 77a), a esta edad presenta menor porosidad, aunado a una mayor formación de placas correspondientes a la portlandita. Así mismo, los compuestos CSH se presentaron en forma de fibras delgadas similares al compuesto de etringita; no obstante, se descartó la presencia de este compuesto expansivo mediante la identificación de los elementos químicos presentes en dichas formaciones, los cuales en

su mayoría resultaron ser sílice y calcio (ver Figura 78). Algunos autores han encontrado compuestos CSH o tobermorita con morfología similar (Subaşı y Emiroğlu, 2015; Rispoli et al., 2020). Por otro lado, la matriz M1 (Figura 77b), mediante las reacciones de hidratación del MK, presentó mayor cantidad de compuestos fibrosos correspondientes al aluminato de calcio, así como aglomeraciones de aluminosilicatos de calcio, los cuales se encontraron principalmente en las zonas porosas de la matriz, lo cual evoca en un mayor refinamiento de la red capilar, en comparación con la matriz de referencia (Kalpokaitė-Dičkuvienė et al., 2019).

En el caso de las matrices M2 y M3 (Figura 77c y Figura 77d), se presentaron menores cantidades de  $\text{Ca(OH)}_2$  con respecto a los 28 días de curado; sin embargo, se presentó un consumo menor en comparación con la matriz M1. A partir de las reacciones puzolánicas, tanto de la CV como de la CB se presentaron formaciones de CSH similares a lo encontrado en la matriz de referencia, siendo la matriz M2 de CV la que presentó una visible cantidad mayor de CSH acumulado en los poros. En el caso de las partículas de CB, éstas presentaron menores formaciones de agujas de tobermorita dentro de la red capilar; sin embargo, se encontraron zonas con altos contenidos de sílice y calcio correspondientes al gel CSH a las orillas de los poros, lo cual sugiere una reducción en el tamaño de estos. Cabe mencionar que en ambas matrices se encontraron partículas sin reaccionar aún a estas edades, lo cual puede dar pie a reacciones posteriores en edades avanzadas.

Por su parte, las matrices M4 y M5 (Figura 77e y Figura 77f) desarrollaron mayores cantidades de compuesto CASH, logrando microestructuras con mayor densidad, principalmente en la matriz M5, donde únicamente se encontraron microporos poco perceptibles. En el caso de la matriz M4, existió mayor presencia de poros en los que se alojaron compuestos CAH y CSH, a partir de los cuales se formaron cumulos de CASH similares a lo reportado por Zhao et al., en el 2021. Cabe destacar que en ambas matrices se encontraron cantidades menores de partículas no reactivas cubiertas en su mayoría por los compuestos de hidratación formados, con lo cual se apreció una mayor densificación en la que se involucraron efectos físico – químicos mediante la formación

de compuestos de hidratación, en conjunto con el efecto *filler* de las partículas de ambas cenizas.

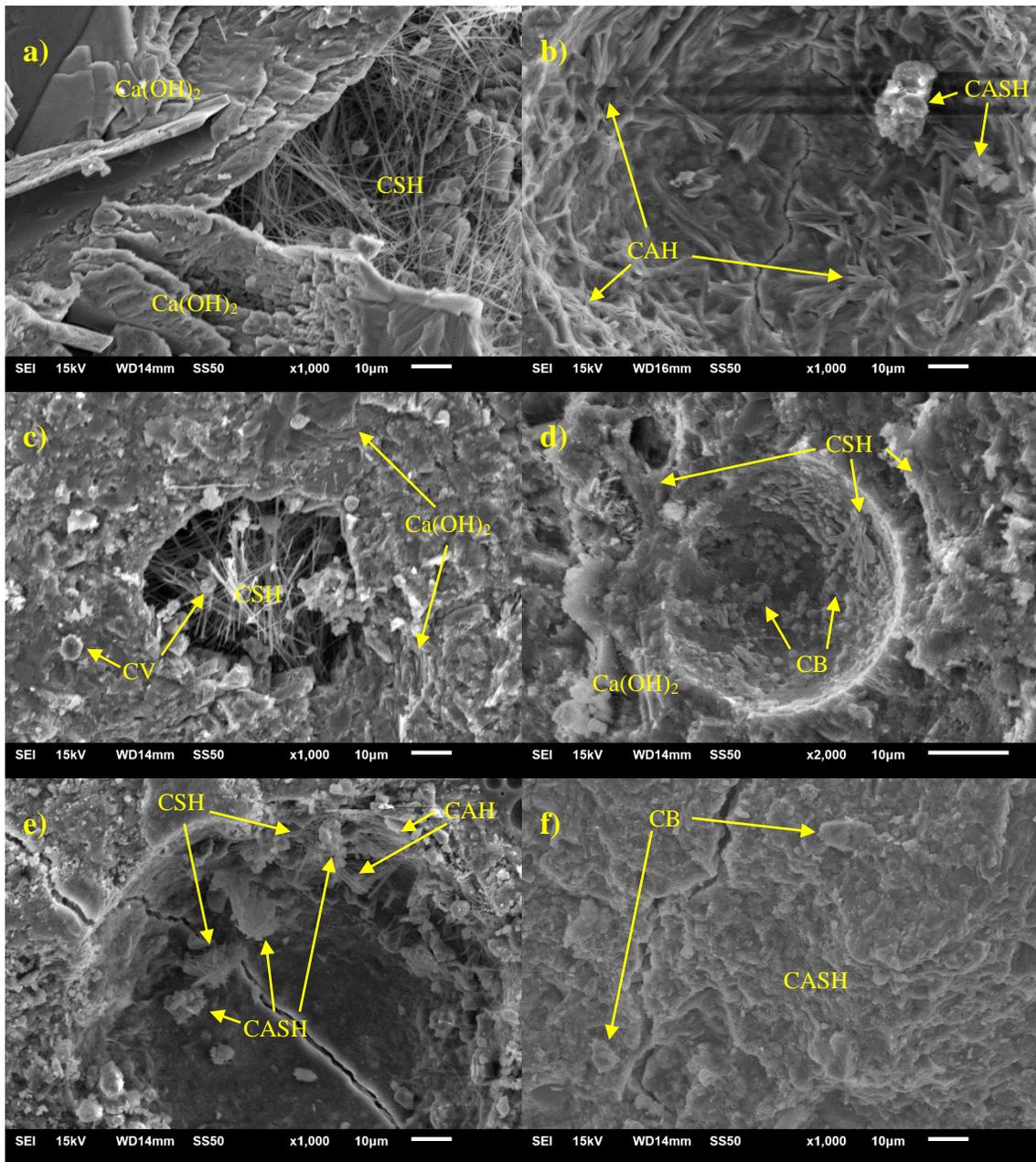


Figura 77.- Micrografías de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 180 días

a) MC, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4, f) M5

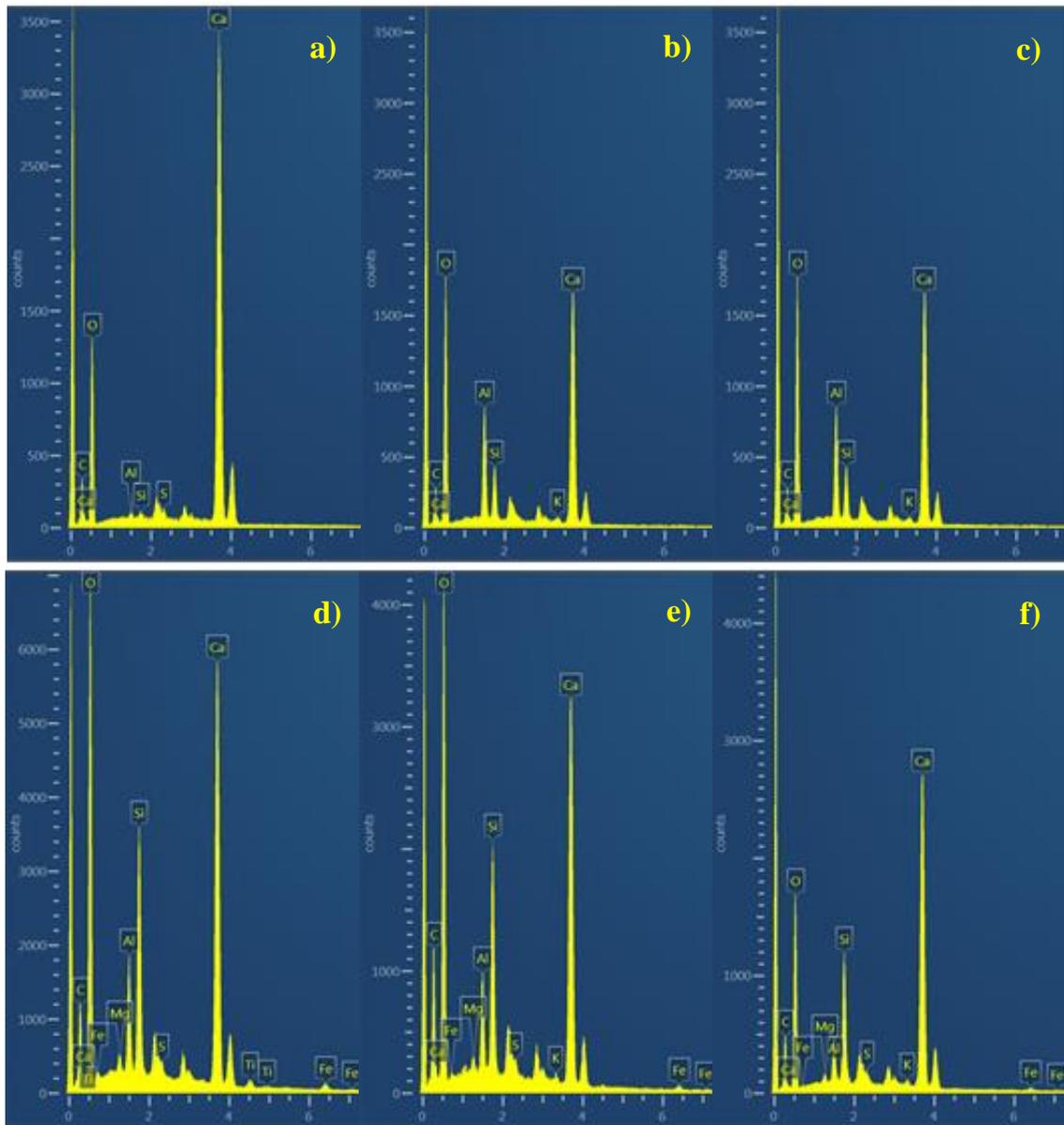


Figura 78.- Espectros EDS de las matrices en curado estándar en inmersión en agua saturada con cal al 3% durante 180 días

a) MC, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4, f) M5

Por otra parte, en la Figura 79 se presentan las micrografías obtenidas de las matrices cementantes expuestas a la carbonatación acelerada durante el periodo de 180 días posterior al tiempo de curado de 28 días. En el caso de la matriz de referencia (Figura 79a) se observaron formaciones de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y CSH en su mayoría, de manera similar a lo obtenido a los 180 días de curado. No obstante, debido a la exposición se encontraron formaciones angulosas identificadas como carbonato de calcio mediante análisis EDS

(ver Figura 80). Este compuesto se presentó en cantidades menores, posiblemente por el poco avance de la carbonatación en esta matriz cementante, sin embargo, la portlandita disponible dentro de este sistema supone que en edades más avanzadas se presentará mayor formación de carbonato, es decir, mayor carbonatación. En el caso de la matriz M1 (Figura 79b), la micrografía revela la formación de poca cantidad de  $\text{CaCO}_3$ ; sin embargo, no se presentan formaciones de  $\text{Ca(OH)}_2$ . En su lugar se presenta el compuesto CASH propio de la hidratación de esta puzolana. La poca formación de carbonato dentro de esta matriz se puede deber a la poca disponibilidad de  $\text{Ca(OH)}_2$  convertible, lo cual supone un menor avance de la carbonatación; no obstante, la poca o nula presencia de la portlandita debido al consumo del MK, también provoca desalcalinización, por lo cual los avances de carbonatación no resultan menores que los de la matriz de referencia (Homayoonmehr et al., 2021).

En el caso de las matrices M2 y M3 (Figura 79c y Figura 79d), se encontró mayor formación de carbonato dentro de los poros y a las afueras de ellos con poca presencia de  $\text{Ca(OH)}_2$ , lo que supone un mayor consumo de este compuesto por acción de la carbonatación y no así de las reacciones puzolánicas. Lo anterior se asocia con la poca formación de compuestos como CSH dentro de las matrices, así como a la presencia de mayor cantidad de partículas no reactivas, siendo éstas más perceptibles y en mayor cantidad en la matriz de CB. De lo anterior, también cabe destacar que debido a la menor formación de productos de hidratación por parte de las puzolanas se presentó una mayor cantidad de poros y microporos, principalmente en la matriz M3.

Por su parte, las matrices de materiales puzolánicos combinados M4 y M5 (Figura 79e y Figura 79f), presentaron mayores contenidos de  $\text{Ca(OH)}_2$ , CSH y CASH, así como formaciones correspondientes al carbonato de calcio, siendo entre los compuestos mencionados el de menor presencia el  $\text{Ca(OH)}_2$ . Lo anterior se atribuye a los procesos de reacción de las puzolanas, principalmente al del MK. Este compuesto, al reaccionar con la portlandita logra la formación del compuesto CASH, involucrando las reacciones de la sílice presente por la CV y la CB como se vio en el apartado 2.3. Ahora bien, la cantidad mínima de MK en estas matrices propicia la existencia de mayor cantidad de portlandita convertible en carbonato de calcio, por lo cual se observa mayor presencia de

este compuesto, en comparación con la matriz M1. No obstante, se esperaría un avance de carbonatación menor que la matriz de referencia en edades posteriores. Esto en función de la cantidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  disponible.

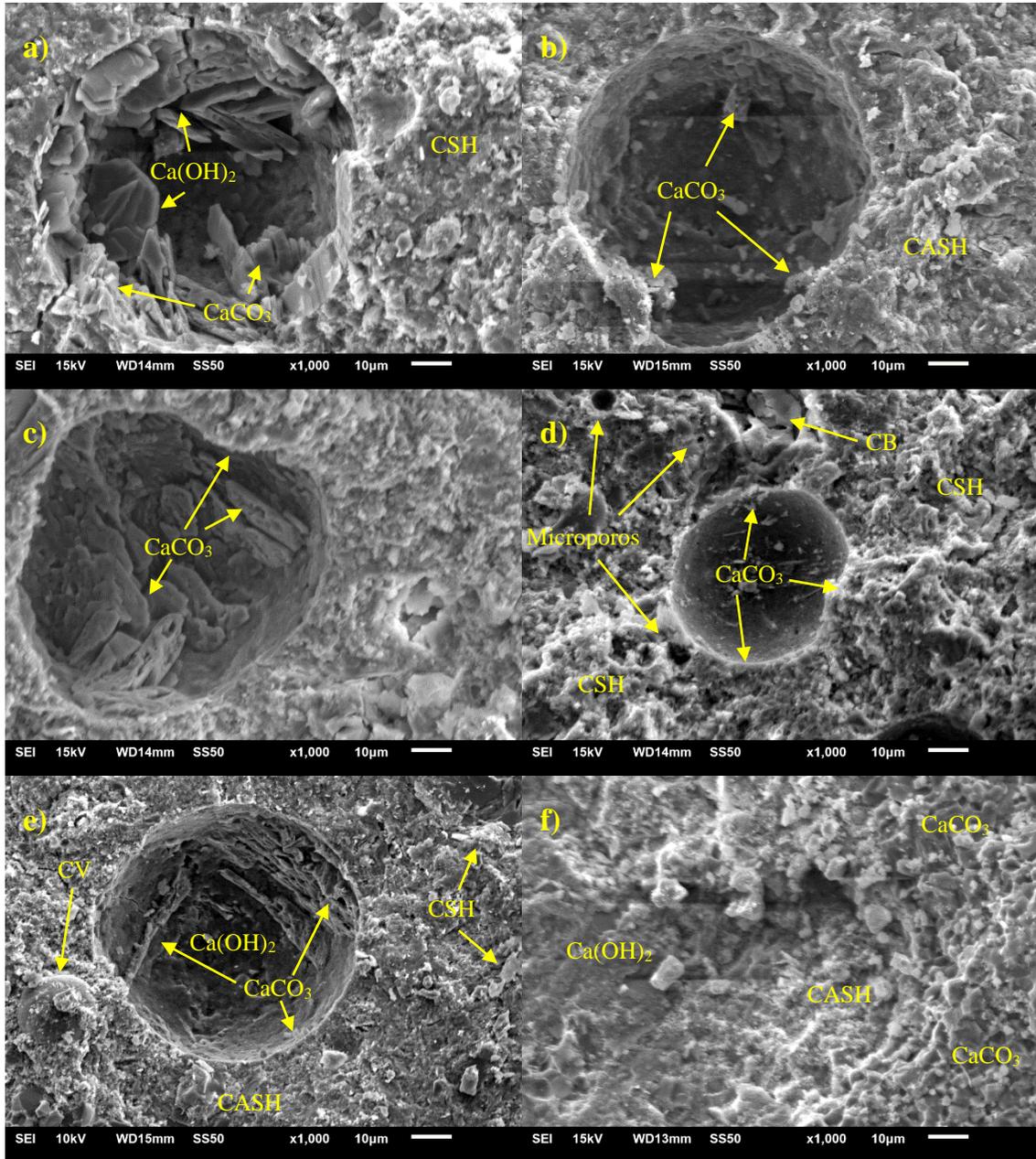


Figura 79.- Micrografías de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de  $\text{CO}_2$  al 8% durante 180 días  
a) MC, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4, f) M5

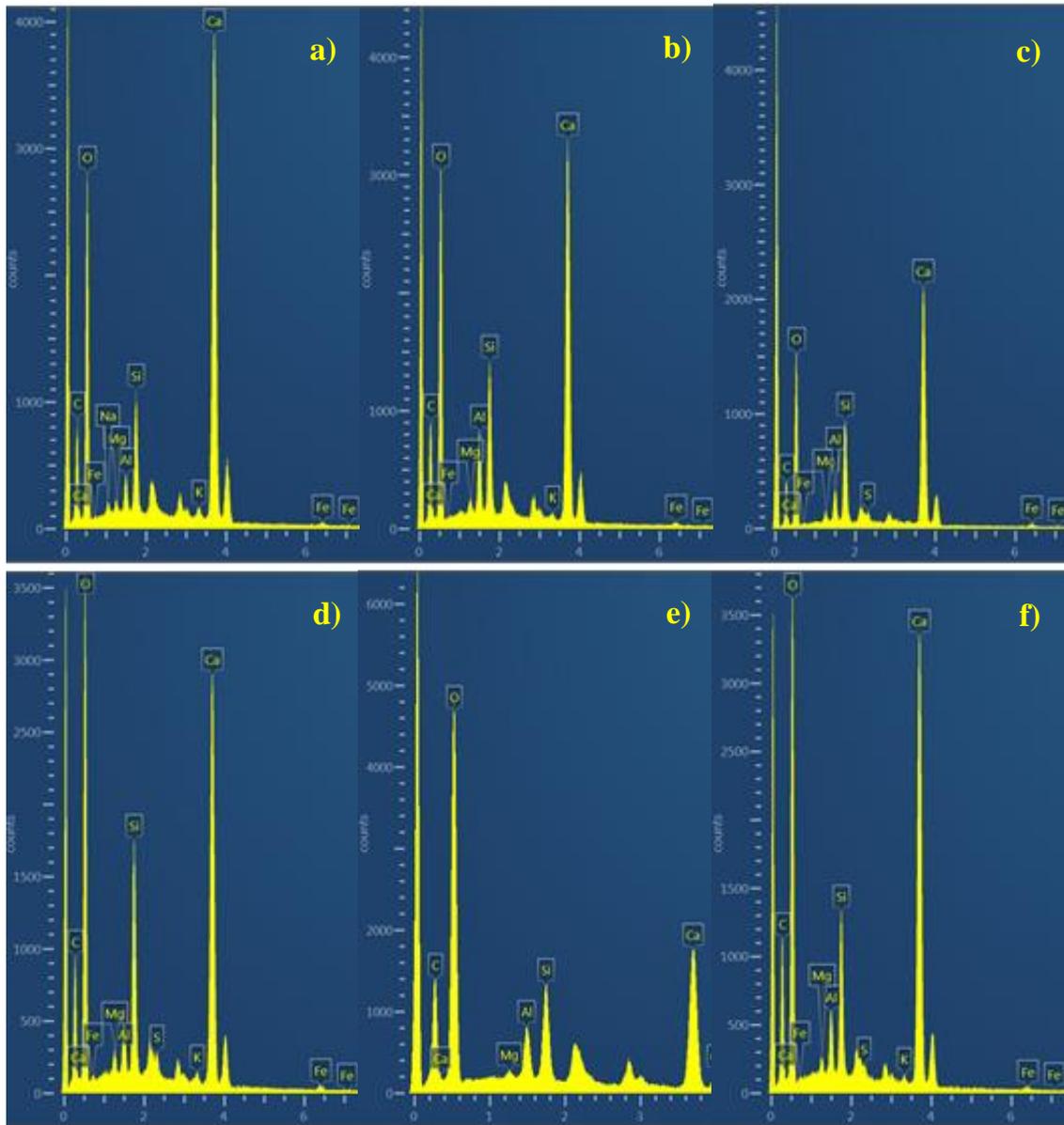


Figura 80.- Espectros EDS de las matrices expuestas en carbonatación acelerada con concentración de CO<sub>2</sub> al 8% durante 180 días

a) MC, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4, f) M5

Por último, la Figura 81 muestra los compuestos formados dentro de las matrices cementantes expuestas durante 180 días al deterioro por MgSO<sub>4</sub>. En el caso de la matriz MC (Figura 81a), ésta presentó en su mayoría compuestos generados por la acción de los sulfatos, teniendo como principales formaciones hidróxido de magnesio también conocido como brucita (Mg(OH)<sub>2</sub>), silicato de magnesio hidratado (MSH) y etringita, este último encontrado en menor cantidad y con agujas con tamaños cercanos a 1 μm.

Morfologías similares reportaron Abdel-Gawwad et al., en el 2018. En primera instancia, la brucita se presenta como partículas un tanto redondeadas de color blanco. Éstas surgen de la descalcificación del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , razón por la cual este compuesto se ve reducido (Pinto et al., 2020). Por su parte, el MSH se genera a partir de la descomposición del gel CSH. Este compuesto, al igual que el CSH, es poco perceptible; no obstante, se logró identificar mediante el análisis EDS como se muestra en la Figura 82. Como se sabe, el MSH es contrario al gel CSH en cuanto a propiedades cohesivas y de resistencia, por lo cual es susceptible a formar agrietamientos como el que se observa en la micrografía (Cheng et al., 2021). Por su parte, la matriz M1 (Figura 81b) presentó poca descomposición del gel CSH y mayor formación del compuesto CASH, por lo cual no se logró identificar la presencia del silicato de magnesio. Aunado a lo anterior, se presentó poca formación de compuestos expansivos como etringita, sumándose a este comportamiento la poca formación de brucita. Lo anterior puede deberse a la capacidad de reacción del MK, la cual, al presentarse desde las primeras edades de hidratación, puede no dar pie a la descalcificación de la portlandita, así como no da pie a la descomposición del gel CSH al convertirlo en gel CASH como se observó en la Figura 77.

En el caso de las matrices M2 y M3 (Figura 81c y Figura 81d), éstas presentaron en su mayoría formaciones de yeso y etringita, con la presencia de algunas partículas de brucita y casi nula presencia del compuesto MSH. De lo anterior, cabe resaltar que las formaciones de etringita presentan tamaños de alrededor de  $1 \mu\text{m}$ , como en el caso de la matriz de referencia, lo cual no supone mayor afectación en cuanto a agrietamientos de las matrices. Así mismo, las formaciones de brucita y MSH, resultaron menores. Lo anterior se puede atribuir principalmente a un proceso conjunto de acción entre las puzolanas y el sulfato, donde este último, dada la poca presencia de CSH por la lenta reacción de las puzolanas, da prioridad a la reacción con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , transformándolo en etringita o en brucita y no tanto en el gel MSH, compuesto que representaría mayores efectos negativos dentro de las matrices (Abdel-Gawwad et al., 2018). Por el contrario de éstas, las matrices M4 y M5 (Figura 81e y Figura 81f) presentaron formaciones de etringita de mayor tamaño y poca conversión del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en brucita, principalmente por la acción del MK, por lo que se observan mayores formaciones de CSH y CAH, así

como un aluminosilicato de magnesio de alta porosidad denominado MASH en las micrografías para fines prácticos, el cual, a diferencia del MSH, resulta ser más cohesivo y adherente por lo que no repercute en las propiedades mecánicas de las matrices cementantes.

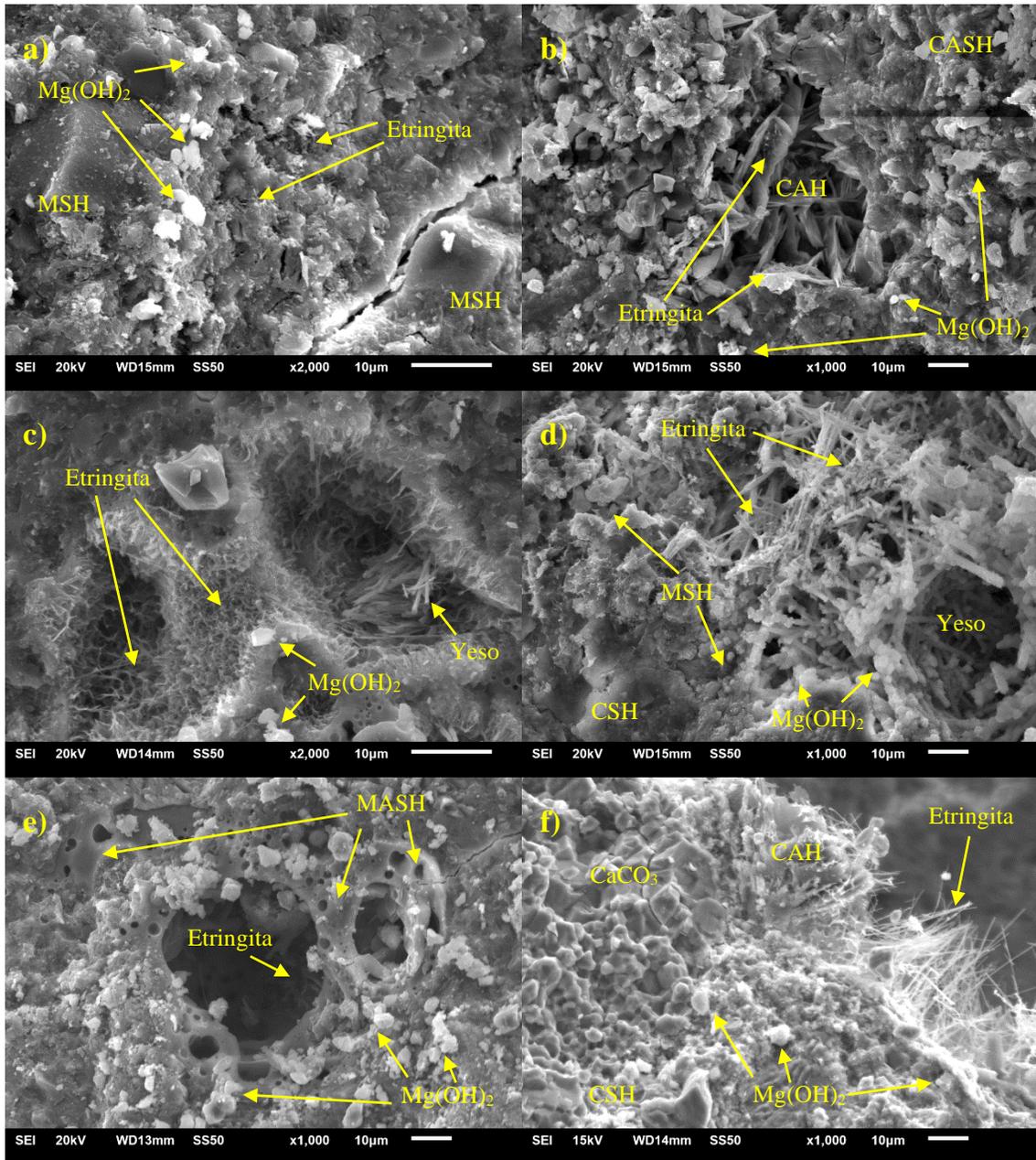


Figura 81.- Micrografías de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $MgSO_4$  con una concentración del 5% durante 180 días

a) MC, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4, f) M5

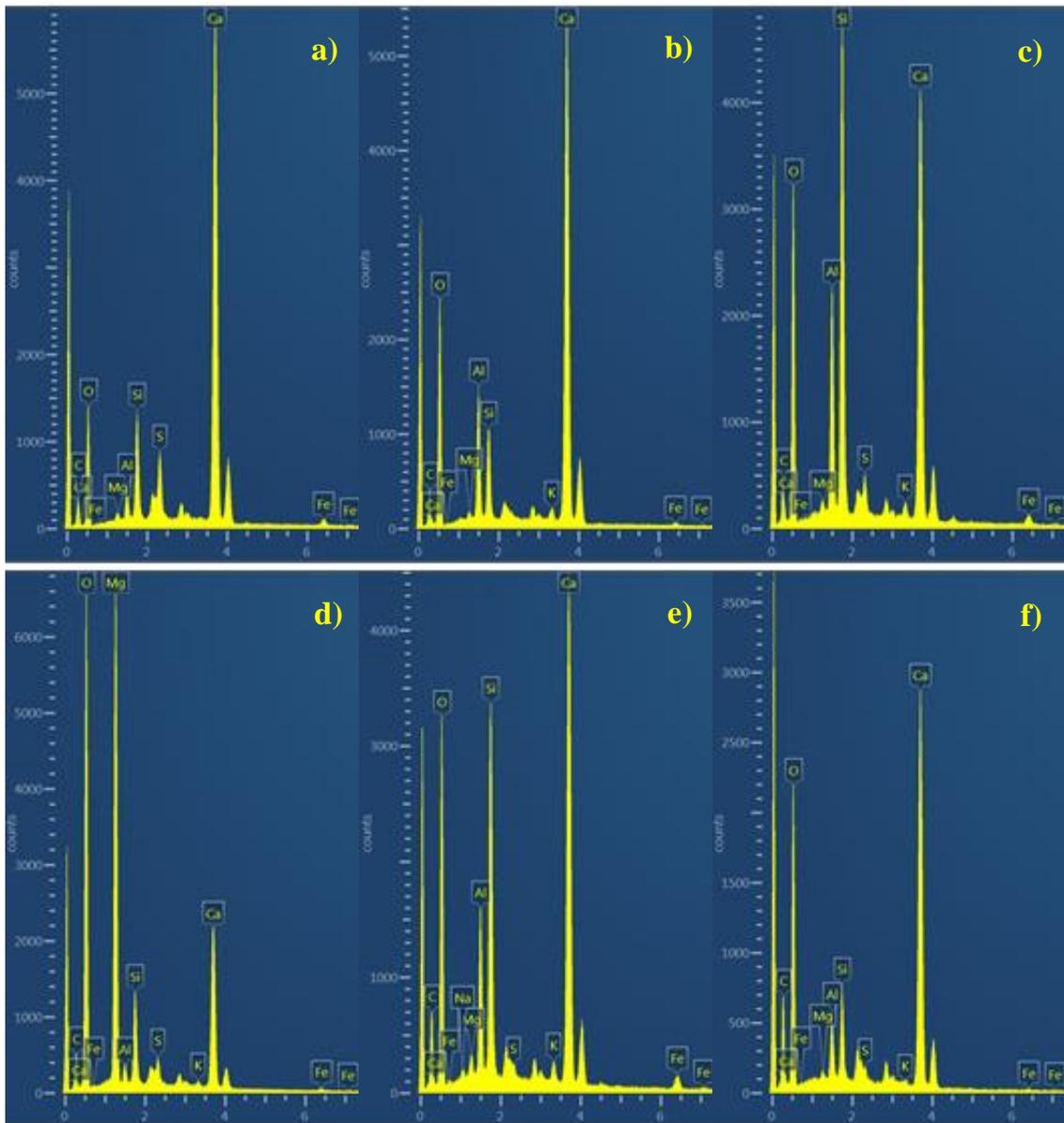


Figura 82.- Espectros EDS de las matrices expuestas en inmersión en una solución de  $\text{MgSO}_4$  con una concentración del 5% durante 180 días

a) MC, b) M1, c) M2, d) M3, e) M4, f) M5

## CONCLUSIONES

- I. Los materiales puzolánicos presentaron composiciones químicas y mineralógicas ricas en sílice y alúmina con grado de amorficidad variable, así como tamaños de partículas y morfologías distintas que al emplearse en combinaciones MK-CV y MK-CB propiciaron la formación de sistemas cementantes reactivos desde las primeras edades de hidratación y con fluidez aceptable.
- II. La combinación del metacaolín con puzolanas de reactividad tardía provoca el consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  por mayores periodos de tiempo, disminuyendo la formación de compuestos de baja cohesividad y adhesión como el  $\text{Mg(OH)}_2$ , manteniendo bajos decrementos de las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.
- III. La formación de  $\text{CaCO}_3$  en las matrices MK-CV y MK-CB provoca un mayor refinamiento capilar, permitiendo el incremento de algunas propiedades físicas y mecánicas, sin presentar avances de carbonatación excesivos que decremen la durabilidad de las matrices cementantes.
- IV. El proceso de carbonatación acelerada interfiere con los tiempos de reacción de las cenizas utilizadas debido a la reacción tardía de las puzolanas y a la reacción rápida del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  con la portlandita, lo que incrementa los avances de la carbonatación para las matrices con combinaciones de puzolanas.
- V. En exposición natural la alcalinidad de los sistemas cementantes se mantiene por mayores periodos de tiempo debido al poco consumo de  $\text{Ca(OH)}_2$  dado el lento avance de la carbonatación y la reactividad tardía de las cenizas utilizadas, lo que permite una mejor pasivación del acero de refuerzo y ralentiza el proceso de corrosión.
- VI. La incorporación de ceniza volante y ceniza de bagazo de caña de azúcar a la matriz de metacaolín genera una mayor densificación y menor porosidad debido a la mayor producción de CSH secundario en conjunto con las formaciones de gel CASH poco cristalizado, así como una disminución notable en las cantidades de portlandita dentro de las matrices que beneficia la durabilidad principalmente en términos del ataque por sulfatos debido a la menor conformación de compuestos dañinos.

## **Recomendaciones**

- I. Realizar estudios enfocados en propiedades en estado fresco o comportamiento reológico en el que se involucren una mayor cantidad de variables y técnicas para buscar su empleo en las nuevas tendencias de construcción como la impresión 3D.
- II. Estudiar el comportamiento físico – mecánico y los procesos químicos de los materiales puzolánicos con la aplicación de otras técnicas para ampliar el rango de conocimiento que se pueda tener sobre el comportamiento de estos materiales en conjunto.
- III. Realizar estudios detallados sobre la carbonatación en ambientes no acelerados para obtener un efecto sinérgico real ante este ambiente.
- IV. Continuar con las mediciones de potenciales de corrosión y velocidad de corrosión durante un periodo de tiempo mayor para conocer los tiempos de despasivación, así como la aparición de la corrosión en el acero de refuerzo.
- V. Evaluar diferentes contenidos y combinaciones de materiales puzolánicos que permitan obtener un mayor conocimiento sobre ellos, así como una mejor optimización para su empleo.

## REFERENCIAS

- Abbas, S., Sharif, A., Ahmed, A., Abbass, W., & Shaukat, S. (2019). Prospective of sugarcane bagasse ash for controlling the alkali-silica reaction in concrete incorporating reactive aggregates. *Structural Concrete*, 21(2), 781–793. <https://doi.org/10.1002/suco.201900284>
- Abdel-Gawwad, H., Abd El-Aleem, S., Amer, A., El-Didamony, H., & Arif, M. (2018). Combined impact of silicate-amorphicity and MgO-reactivity on the performance of Mg-silicate cement. *Construction and Building Materials*, 189, 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.171>
- Abdelli, K., Tahlaiti, M., Belarbi, R., & Oudjit, M. N. (2017). Influence of the pozzolanic reactivity of the Blast Furnace Slag (BFS) and metakaolin on mortars. *Energy Procedia*, 139, 224–229. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.200>
- Afridi, A. (2019). Use of sugarcane bagasse ash as a partial replacement of cement in concrete. *Journal of mechanics of continua and mathematical sciences*, 14(2). <https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.04.00006>
- Al-Akhras, N. M. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1727–1734. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.026>
- Alvarez, G. L., Nazari, A., Bagheri, A., Sanjayan, J. G., & de Lange, C. (2017). Microstructure, electrical and mechanical properties of steel fibres reinforced cement mortars with partial metakaolin and limestone addition. *Construction and Building Materials*, 135, 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.170>
- Amin, N. U. (2011). Use of Bagasse Ash in Concrete and Its Impact on the Strength and Chloride Resistivity. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(5), 717–720. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000227](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000227)
- Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. *Construction and Building Materials*, 74, 176–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.010>
- Arenas-Piedrahita, J., Montes-García, P., Mendoza-Rangel, J., López Calvo, H., Valdez-Tamez, P., & Martínez-Reyes, J. (2016). Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. *Construction and Building Materials*, 105, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>
- Ariza, H. A., Croche, R., Almeraya, F., Cabral, J., Gaona, C., Ramírez, A. C., ... Baltazar, M. A. (2019). Estudio De La Durabilidad De Concretos Ternarios Con Ceniza De Bagazo De Caña De Azúcar Y Humo De Sílice. *Memorias CONPAT 2019*, <https://doi.org/10.21041/conpat2019/v2pat177>
- Azarsa, P., & Gupta, R. (2017). Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1–30. <https://doi.org/10.1155/2017/8453095>
- Badogiannis, E. G., Sfikas, I. P., Voukia, D. V., Trezos, K. G., y Tsivilis, S. G. (2015). Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 82, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.023>
- Bahurudeen, A., Kanraj, D., Gokul Dev, V., & Santhanam, M. (2015). Performance evaluation of sugarcane bagasse ash blended cement in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 59, 77–88. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.004>
- Bahurudeen, A., Wani, K., Basit, M. A., & Santhanam, M. (2016). Assesment of Pozzolanic Performance of Sugarcane Bagasse Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015095. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001361](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001361)
- Baltazar, M. A., Bastidas, D. M., Santiago, G., Mendoza, J. M., Gaona, C., Bastidas, J. M., y Almeraya, F. (2019). Effect of Silica Fume and Fly Ash Admixtures on the Corrosion Behavior of AISI 304 Embedded

in Concrete Exposed in 3.5% NaCl Solution. *Materials*, 12(23), 4007. <https://doi.org/10.3390/ma12234007>

Baltazar-Zamora, M. A., Márquez-Montero, S., Landa-Ruiz, L., Croche, R., & López-Yza, O. (2020). Effect of the Type of Curing on the Corrosion Behavior of Concrete Exposed to Urban and Marine Environment. *European Journal of Engineering Research and Science*, 5(1), 91–95. <https://doi.org/10.24018/ejers.2020.5.1.1716>

Barbhuiya, S., Chow, P., y Memon, S. (2015). Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 95, 696–702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.101>

Batool, F., & Bindiganavile, V. (2018). Quantification of factors influencing the thermal conductivity of cement-based foam. *Cement and Concrete Composites*, 91, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.04.015>

Bentz, D. P., & Ferraris, C. F. (2010). Rheology and setting of high volume fly ash mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 32(4), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.008>

Berenguer, R. A., Capraro, A. P. B., de Medeiros, M. H. F., Carneiro, A. M., & de Oliveira, R. A. (2020). Sugar cane bagasse ash as a partial substitute of portland cement: Effect on mechanical properties and emission of carbon dioxide. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103655. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103655>

Bini, M. J., y Varghese, S. (2014), Ternary Blended Concrete with Bagasse Ash and Metakaolin. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 03(10), 1120–1122.

Bucher, R., Diederich, P., Escadeillas, G., & Cyr, M. (2017). Service life of metakaolin-based concrete exposed to carbonation. *Cement and Concrete Research*, 99, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.013>

Bumanis, G., Vitola, L., Stipniece, L., Locs, J., Korjakins, A., & Bajare, D. (2020). Evaluation of Industrial by-products as pozzolans: A road map for use in concrete production. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00424. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00424>

Bustillo Revuelta M. (2021) Cemento. En: *Materiales de construcción. Springer Textbooks en Ciencias de la Tierra, Geografía y Medio Ambiente*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-65207-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65207-4_11)

Bustillo Revuelta M. (2021) Morteros. En: *Materiales de construcción. Springer Textbooks en Ciencias de la Tierra, Geografía y Medio Ambiente*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-65207-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-65207-4_11)

Cayambe, M. E., y Pérez, F. C., (2013). *Obtención de concreto de alta resistencia mediante la adición de microsilice y superplastificantes en la mezcla, para su aplicación en elementos estructurales sometidos a grandes esfuerzos* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador.

Celik, K., Meral, C., Mancio, M., Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, 67, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.065>

Chand, G., Happy, S. K., & Ram, S. (2021). Assessment of the properties of sustainable concrete produced from quaternary blend of portland cement, glass powder, metakaolin and silica fume. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100179>

Cheng, H., Liu, T., Zou, D., & Zhou, A. (2021). Compressive strength assessment of sulfate-attacked concrete by using sulfate ions distributions. *Construction and Building Materials*, 293, 123550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123550>

Cheng, S., Shui, Z., Sun, T., Yu, R., Zhang, G., y Ding, S. (2017). Effects of fly ash, blast furnace slag and metakaolin on mechanical properties and durability of coral sand concrete. *Applied Clay Science*, 141, 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.02.026>

- Chi, M. C. (2012). Effects of sugar cane bagasse ash as a cement replacement on properties of mortars. *Science and Engineering of Composite Materials*, 19(3), 279–285. <https://doi.org/10.1515/secm-2012-0014>
- Cole, M., Eggleston, G., y Wang, Y. J. (2019). Understanding the causes of calcium carbonate crystal growth and inhibition during the carbonation refining of raw sugars. *Food Chemistry*, 275, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.076>
- CONADESUCA. (2021). Reporte final de producción de caña y azúcar en México. <https://www.gob.mx/conadesuca/>
- Cordeiro, G. C., Barroso, T. R., & Toledo Filho, R. D. (2018). Enhancement the Properties of Sugar Cane Bagasse Ash with High Carbon Content by a Controlled Re-calcination Process. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(4), 1250–1257. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0881-6>
- Delgado, J. M. P. Q. (2021). Durability of Concrete Structures (Building Pathology and Rehabilitation Book 16) (English Edition) (1st ed. 2021 ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62825-3>
- Demirboğa, R., Türkmen, B., & Karakoç, M. B. (2004). Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2329–2336. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.017>
- Doug, R., S. Zhutovsky & S. Kamali-Bernard (2018). Ternary Blends. En De Belie, N., Soutsos, M., y Gruyaert, E., (Eds.), Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials: State-Of-The-Art Report of the Rilem Technical Committee 238-Scm, Working Group 4: 25 (2018 eds. ed., pp. 303–315). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70606-1_9)
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2013). Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(1), 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.03.010>
- Duran-Herrera, A., De-León-Esquivel, J., Bentz, D., & Valdez-Tamez, P. (2019). Self-compacting concretes using fly ash and fine limestone powder: Shrinkage and surface electrical resistivity of equivalent mortars. *Construction and Building Materials*, 199, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.191>
- El bagazo de caña de azúcar, su lado ecológico – SmartGreen. (s. f.). Smart Green. Recuperado 3 de mayo de 2022, de <https://smartgreen.com.mx/bagazo-de-cana-de-azucar/>
- Faraldos, M., y Goberna, C. (2011). Técnicas de análisis y caracterización de materiales (Revisado 2 ed.). DiScript Preimpresión, S. L.
- Felix, E. F., Rodrigues Balabuch, T. J., Corrêa Posterlli, M., Possan, E., & Carrazedo, R. (2018). Análise da vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme por meio de um modelo com RNA acoplado ao MEF. *Revista ALCONPAT*, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.21041/ra.v8i1.256>
- Ferreira, R. M., Castro-Gomes, J. P., Costa, P., & Malheiro, R. (2015). Effect of metakaolin on the chloride ingress properties of concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4), 1375–1384. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0131-8>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>
- Gawel, K., Wenner, S., & Edvardsen, L. (2021). Effect of carbonation on bulk resistivity of cement/carbon nanofiber composites. *Construction and Building Materials*, 305, 124794. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124794>
- GCP Applied Technologies. (2021, 14 mayo). Controlando los tiempos de fraguado del concreto. GCP. Recuperado 29 de septiembre de 2021, de <https://gcpat.mx/es-la/about/news/blog/controlling-concrete-setting-times>

- Ghoddousi, P., & Adelzade Saadabadi, L. (2017). Study on hydration products by electrical resistivity for self-compacting concrete with silica fume and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 154, 219–228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.178>
- Gill, A. S., y Siddique, R. (2018). Durability properties of self-compacting concrete incorporating metakaolin and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 176, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.054>
- Gopalakrishnan, R., & Jeyalakshmi, R. (2020). The effects on durability and mechanical properties of multiple nano and micro additive OPC mortar exposed to combined chloride and sulfate attack. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 106, 104772. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104772>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Karaboğa, F., & Mermerdaş, K. (2013). Corrosion behavior of reinforcing steel embedded in chloride contaminated concretes with and without metakaolin. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1288–1295. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.085>
- Hasan, N. (2020). Durability and Sustainability of Concrete: Case Studies for Concrete exposures (English Edition) (1st ed. 2020 ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-51573-7>
- Hermenejildo, A., León, J., & Proaño, G. (s. f.). Caracterización básica de la limolita (formación Las Masas - Guayaquil) como material puzolánico y su influencia como aditivo en las propiedades del cemento tipo I. Repositorio de ESPOL. Recuperado 3 de mayo de 2022, de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10049/1/Caracterizaci%C3%B3n%20de%20la%20limolita%20como%20material%20puzol%C3%A1nico.pdf>
- Homayoonmehr, R., Ramezani pour, A. A., & Mirdarsoltany, M. (2021). Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: A review. *Journal of Building Engineering*, 44, 103011. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103011>
- Hu, L., & He, Z. (2020). A fresh perspective on effect of metakaolin and limestone powder on sulfate resistance of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 262, 119847. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119847>
- Hwang, S. S., & Moreno Cortés, C. M. (2021). Properties of mortar and pervious concrete with co-utilization of coal fly ash and waste glass powder as partial cement replacements. *Construction and Building Materials*, 270, 121415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121415>
- Inocente, J., Elyseu, F., Jaramillo Nieves, L., Jiusti, J., Cargnin, M., & Peterson, M. (2021). Production and characterization of high-reactivity metakaolins calcined in flash reactor. *Applied Clay Science*, 213, 106247. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106247>
- Instituto Mexicano del Transporte, Rendón, M., Martínez, M., Martínez, R. V., & Arroyo, M. (2019). Concretos híbridos durables y sustentables, con contenidos de ceniza volante (No. 559). IMT. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt559.pdf>
- Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., y Murugesan, R. (2018). Evaluation of mechanical properties of Sugar Cane Bagasse Ash concrete. *Construction and Building Materials*, 176, 608–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.037>
- Jalal, M., Pouladkhan, A., Harandi, O. F., & Jafari, D. (2015). RETRACTED: Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 94, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001>
- Jiang, D., Li, X., Lv, Y., Zhou, M., He, C., Jiang, W., Liu, Z., & Li, C. (2020). Utilization of limestone powder and fly ash in blended cement: Rheology, strength and hydration characteristics. *Construction and Building Materials*, 232, 117228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117228>

Jiménez-Quero, V. (2013). Efecto De La Ceniza De Bagazo De Caña Y Ceniza Volante En La Trabajabilidad, Propiedades Mecánicas Y Durabilidad De Concretos Ternarios (*Tesis doctoral*). Centro de Investigación en Materiales Avanzados CIMAV, Chihuahua.

Jiménez-Quero, V. G., Ortiz-Guzmán, M., & Montes-García, P. (2019). Durability of mortars containing sugarcane bagasse ash. *Journal of Physics: Conference Series*, 1221(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1221/1/012004>

Jiménez-Quero, V., León-Martínez, F., Montes-García, P., Gaona-Tiburcio, C., & Chacón-Nava, J. (2013). Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 40, 691–701. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.023>

Jittin, V., Minnu, S., & Bahurudeen, A. (2021). Potential of sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material and comparison with currently used rice husk ash. *Construction and Building Materials*, 273, 121679. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121679>

Joshaghani, A., & Moeini, M. A. (2017). Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 152, 818–831. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>

Juárez-Alvarado, C. A., González López, J. R., Mendoza-Rangel, J. M., y Zaldívar Cadena, A. A. (2017). Compuestos cementantes fibroreforzados de bajo impacto ambiental comportamiento mecánico, *Revista ALCONPAT*, 7(2), 135-147. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i2.189>

Jung, S. H., Choi, Y. C., y Choi, S. (2017). Use of ternary blended concrete to mitigate thermal cracking in massive concrete structures—A field feasibility and monitoring case study. *Construction and Building Materials*, 137, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.108>

Justnes, H., Skocek, J., ØStnor, T. A., Engelsen, C. J., & Skjølvold, O. (2020). Microstructural changes of hydrated cement blended with fly ash upon carbonation. *Cement and Concrete Research*, 137, 106192. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106192>

Kalpokaitė-Dičkuvienė, R., Baltušnikas, A., Levinskas, R., & ČėSnienė, J. (2019). Incinerator residual ash – Metakaolin blended cements: Effect on cement hydration and properties. *Construction and Building Materials*, 206, 297–306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.060>

Kannan, V., & Ganesan, K. (2014). Synergic Effect of Pozzolanic Materials on the Structural Properties of Self-Compacting Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(4), 2601–2609. <https://doi.org/10.1007/s13369-013-0928-z>

Kara De Maeijer, P., Craeye, B., Snellings, R., Kazemi-Kamyab, H., Loots, M., Janssens, K., & Nuyts, G. (2020). Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability. *Construction and Building Materials*, 263, 120493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120493>

Katare, V. D., & Madurwar, M. V. (2017). Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review. *Construction and Building Materials*, 152, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.142>

Katare, V. D., & Madurwar, M. V. (2021). Process standardization of sugarcane bagasse ash to develop durable high-volume ash concrete. *Journal of Building Engineering*, 39, 102151. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102151>

Kaur, R., Kothiyal, N., & Arora, H. (2020). Studies on combined effect of superplasticizer modified graphene oxide and carbon nanotubes on the physico-mechanical strength and electrical resistivity of fly ash blended cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 30, 101304. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101304>

- Kavitha, O., Shanthi, V., Arulraj, G. P., y Sivakumar, V. (2016). Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin. *Applied Clay Science*, 124–125, 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.011>
- Khaleel, O., & Abdul Razak, H. (2014). Mix design method for self compacting metakaolin concrete with different properties of coarse aggregate. *Materials & Design*, 53, 691–700. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.072>
- Kim, H., Lee, S., y Moon, H. (2007). Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1229–1237. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.007>
- Klathae, T., Tran, T. N. H., Men, S., Jaturapitakkul, C., & Tangchirapat, W. (2021). Strength, chloride resistance, and water permeability of high volume sugarcane bagasse ash high strength concrete incorporating limestone powder. *Construction and Building Materials*, 311, 125326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125326>
- Kolawole, J. T., Babafemi, A. J., Paul, S. C., & du Plessis, A. (2020). Performance of concrete containing Nigerian electric arc furnace steel slag aggregate towards sustainable production. *Sustainable Materials and Technologies*, 25, e00174. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00174>
- Kosmatka, S. H., & Wilson, M. L. (2011). Design and Control of Concrete Mixtures. Portland Cement Association.
- Kotwal, S., Singh, H., & Kumar, R. (2021). Study on sulphate and chloride resistance of self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*. Published. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.454>
- Kurda, R., de Brito, J., & Silvestre, J. D. (2019). Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 95, 169–182. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.004>
- Kurdowski, W. (2014). Cement and Concrete Chemistry (English Edition) (2014.a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- Le, D. H., Sheen, Y. N., & Lam, M. N. T. (2018). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete with sugarcane bagasse ash–slag blended cement. *Construction and Building Materials*, 185, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.029>
- Li, L., Xuan, D., Sojobi, A., Liu, S., & Poon, C. S. (2021). Efficiencies of carbonation and nano silica treatment methods in enhancing the performance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 308, 125080. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125080>
- Madandoust, R., & Mousavi, S. Y. (2012). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 35, 752–760. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.109>
- Makul, N. (2021). Principles of Cement and Concrete Composites. Springer Publishing.
- Maldonado-García, M. A., Hernández-Toledo, U. I., Montes-García, P., & Valdez-Tamez, P. L. (2018). The influence of untreated sugarcane bagasse ash on the microstructural and mechanical properties of mortars. *Materiales de Construcción*, 68(329), 148. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.13716>
- Malvern Panalytical. (s. f.). Malvern Panalytical | Analytical Instrumentation. Recuperado 1 de octubre de 2021, de [https://www.malvernpanalytical.com/es/?campaignid=880733932&adgroupid=47034532027&creative=255891934233&keyword=panalytical&matchtype=e&network=g&device=c&gclid=Cj0KCQjwpcOTBhCZARIsAEAYLuUkGbEq9ahogwf1H5i4pU1W8EVSGMpXAIiSreR7GdsGv8rPt11TuogaAl\\_3EALw\\_wcB](https://www.malvernpanalytical.com/es/?campaignid=880733932&adgroupid=47034532027&creative=255891934233&keyword=panalytical&matchtype=e&network=g&device=c&gclid=Cj0KCQjwpcOTBhCZARIsAEAYLuUkGbEq9ahogwf1H5i4pU1W8EVSGMpXAIiSreR7GdsGv8rPt11TuogaAl_3EALw_wcB)
- Mardani-Aghabaglou, A., İnan Sezer, G., & Ramyar, K. (2014). Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.089>

- Marroquín, J. B. (2008). *Efecto de la activación química, con un aditivo, de las puzolanas en morteros endurecidos de cemento* (Tesis de maestría). Universidad de San Carlos Guatemala.
- Medina, A., Gamero, P., Querol, X., Moreno, N., De León, B., Almanza, M., . . . Font, O. (2010). Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1-3), 82–90. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.096>
- Mejía, R., Rodríguez, C., Rodríguez, E., Torres, J., y Delvasto, S. (2009). Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 1(48), 55–64.
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601–605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>
- Mikhailenko, P., Cassagnabère, F., Emam, A., & Lachemi, M. (2018). Influence of physico-chemical characteristics on the carbonation of cement paste at high replacement rates of metakaolin. *Construction and Building Materials*, 158, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.021>
- Mirmoghtadaei, R., Mohammadi, M., Ashraf-Samani, N., y Mousavi, S. (2015). The impact of surface preparation on the bond strength of repaired concrete by metakaolin containing concrete. *Construction and Building Materials*, 80, 76–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.018>
- Mironyuk, I., Tatarchuk, T., Paliychuk, N., Heviuk, I., Horpynko, A., Yarema, O., & Mykytyn, I. (2021). Effect of surface-modified fly ash on compressive strength of cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, 35, 534–537. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.016>
- Mo, L., Lv, L., Deng, M., & Qian, J. (2018). Influence of fly ash and metakaolin on the microstructure and compressive strength of magnesium potassium phosphate cement paste. *Cement and Concrete Research*, 111, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.003>
- Mostofinejad, D., Hosseini, S. M., Nosouhian, F., Ozbakkaloglu, T., & Nader Tehrani, B. (2020). Durability of concrete containing recycled concrete coarse and fine aggregates and milled waste glass in magnesium sulfate environment. *Journal of Building Engineering*, 29, 101182. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101182>
- Neville, A. M. (1999). *Tecnología del Concreto*. CDMX, México: IMCYC.
- Nguyen, T. B. T., Chatchawan, R., Saengsoy, W., Tangtermsirikul, S., & Sugiyama, T. (2019). Influences of different types of fly ash and confinement on performances of expansive mortars and concretes. *Construction and Building Materials*, 209, 176–186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.032>
- Nie, Q., Zhou, C., Shu, X., He, Q., & Huang, B. (2014). Chemical, Mechanical, and Durability Properties of Concrete with Local Mineral Admixtures under Sulfate Environment in Northwest China. *Materials*, 7(5), 3772–3785. <https://doi.org/10.3390/ma7053772>
- Niknezhad, D., Kamali-Bernard, S., & Garand, C. (2015). Influence of Mineral Admixtures (Metakaolin, Slag, Fly Ash) on the Plastic, Free, and Restrained Shrinkage of SCCs. *CONCREEP 10*. Published. <https://doi.org/10.1061/9780784479346.138>
- Palla, R., Karade, S., Mishra, G., Sharma, U., & Singh, L. (2017). High strength sustainable concrete using silica nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 138, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.129>
- Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., DeFord, H. D., & Townsend, T. G. (2016). A review of waste products utilized as supplements to portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 121, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>
- Patil, C., Manjunath, M., Hosamane, S., Bandekar, S., & Athani, R. (2021). Pozzolonic activity and strength activity index of bagasse ash and fly ash blended cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, 42, 1456–1461. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.251>

Pedefferri, P. (2018). *Corrosion Science and Engineering (Engineering Materials) (English Edition) (1st ed. 2018 ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97625-9>

Pereira, A. M., Moraes, J. C., Moraes, M. J., Akasaki, J. L., Tashima, M. M., Soriano, L., . . . Payá, J. (2018). Valorisation of sugarcane bagasse ash (SCBA) with high quartz content as pozzolanic material in portland cement mixtures. *Materiales de Construcción*, 68(330), e153. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.00617>

Pereira, A., Akasaki, J. L., Melges, J. L., Tashima, M. M., Soriano, L., Borrachero, M. V., Monzó, J., & Payá, J. (2015). Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. *Ceramics International*, 41(10), 13012–13024. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.001>

Pinto, S. R., Angulski Da Luz, C., Munhoz, G. S., & Medeiros-Junior, R. A. (2020). Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate. *Cement and Concrete Research*, 136, 106172. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106172>

Portugal, P. (2007) *Tecnología del concreto de alto desempeño*. UNSA. Perú.

Praveenkumar, S., Sankarasubramanian, G., & Sindhu, S. (2020). Strength, permeability and microstructure characterization of pulverized bagasse ash in cement mortars. *Construction and Building Materials*, 238, 117691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117691>

Quedou, P. G., Wirquin, E., & Bokhoree, C. (2021). Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00545. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00545>

Rahla, K. M., Mateus, R., & Bragança, L. (2019). Comparative sustainability assessment of binary blended concretes using Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Ordinary Portland Cement (OPC). *Journal of Cleaner Production*, 220, 445-459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.010>

Rajasekar, A., Arunachalam, K., Kottaisamy, M., & Saraswathy, V. (2018). Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 171, 350–356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.140>

Ramezani-pour, A. A. (2013). *Cement Replacement Materials: Properties, Durability, Sustainability (2014 ed.)*. Springer. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>

Rao, S. K., Sravana, P., & Rao, T. C. (2016). Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 289–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.003>

Rispoli, C., de Bonis, A., Esposito, R., Graziano, S. F., Langella, A., Mercurio, M., Morra, V., & Cappelletti, P. (2020). Unveiling the secrets of Roman craftsmanship: mortars from Piscina Mirabilis (Campi Flegrei, Italy). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 12(1). <https://doi.org/10.1007/s12520-019-00964-8>

Rodríguez-Bucio, J., Reyes-Araiza, J. L., Alonso Guzmán, E. M., Manzano-Ramirez, A., Ramírez-Jiménez, R., Martínez Molina, W., Cobreros-Rodríguez, C., & Pérez Rea, L. (2015). Study on the Pozzolanic Effect of Sugarcane Bagasse Ash from Taretan, Michoacán, Mexico, on a Portland Cement Mortar. *Key Engineering Materials*, 668, 367–374. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.668.367>

Roychand, R., De Silva, S., Setunge, S., y Law, D. (2017). A quantitative study on the effect of nano SiO<sub>2</sub>, nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano CaCO<sub>3</sub> on the physicochemical properties of very high volume fly ash cement composite. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(6), 724-739. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1418681>

Ryans, P. H. (2019, 5 abril). Carbón bituminoso: descripción y usos. Multotec Canada. Recuperado 1 de julio de 2021, de <https://multotec.ca/es/blog/carbon-bituminoso-descripcion-y-usos/1/21>

- Sakai, Y. (2019). Correlations between air permeability coefficients and pore structure indicators of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 209, 541–547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.068>
- Samson, G., Cyr, M., & Gao, X. X. (2017). Formulation and characterization of blended alkali-activated materials based on flash-calcined metakaolin, fly ash and GGBS. *Construction and Building Materials*, 144, 50–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.160>
- San Nicolas, R., Cyr, M., & Escadeillas, G. (2014). Performance-based approach to durability of concrete containing flash-calcined metakaolin as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 55, 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.063>
- Santiago-Hurtado, G., Baltazar-Zamora, M. A., Olguin-Coca, J., López, L. D., Galván-Martínez, R., Ríos-Juárez, A., . . . Almeraya-Calderón, F. (2016). Electrochemical Evaluation of a Stainless Steel as Reinforcement in Sustainable Concrete Exposed to Chlorides. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(11), 2994–3006. <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajce>
- Schmerr, L. W. (2016). Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation. *Springer Series in Measurement Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-30463-2>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Scrivener, K., Snellings, R., & Lothenbach, B. (2018). A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. Amsterdam University Press.
- Setayesh Gar, P., Suresh, N., & Bindiganavile, V. (2017). Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 153, 929–936. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.107>
- Sfikas, I. P., Badogiannis, E. G., y Trezos, K. G. (2014). Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 64, 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.048>
- Sherwin-Mathachan, M. (2018). Ternary Blended Concrete with Metakaolin and Bagasse Ash. *Journal of Engineering*, 8(6), 31–34. [https://www.iosrjen.org/Papers/vol8\\_issue6/Version-3/D0806033134.pdf](https://www.iosrjen.org/Papers/vol8_issue6/Version-3/D0806033134.pdf)
- Singh, G., Thakur, N., y Kumar-Sharma, N. (2019). Experimental Research on the Strength Parameters of Concrete using Sugarcane Bagasse Ash, Marble Waste Powder and Recycled Concrete Aggregat. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(8), 1378–1381. <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i8/H7102068819.pdf>
- Singh, L., Ali, D., Tyagi, I., Sharma, U., Singh, R., y Hou, P. (2019). Durability studies of nano-engineered fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 194, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.022>
- Sua-iam, G., & Makul, N. (2013). Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. *Journal of Cleaner Production*, 57, 308–319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.009>
- Subaşı, A., & Emiroğlu, M. (2015). Effect of metakaolin substitution on physical, mechanical and hydration process of White Portland cement. *Construction and Building Materials*, 95, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.125>
- Sumer, M. (2012). Compressive strength and sulfate resistance properties of concretes containing Class F and Class C fly ashes. *Construction and Building Materials*, 34, 531–536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.023>
- Surahyo, A. (2019). Concrete Construction: Practical Problems and Solutions (English Edition) (1st ed. 2019 ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10510-5>

- Sutar, S. N., Patil, P. V., Chavan, R. V., & Maske, M. M. (2021). Study and review of ordinary portland cement. *ASEAN Journal of Science and Engineering*, 1(3), 153–160. <https://ejournal.upi.edu/index.php/AJSE/>
- Tafraoui, A., Escadeillas, G., y Vidal, T. (2016). Durability of the Ultra High Performances Concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 112, 980–987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.169>
- Teklay, A., Yin, C., Rosendahl, L., & K hler, L. L. (2015). Experimental and modeling study of flash calcination of kaolinite rich clay particles in a gas suspension calciner. *Applied Clay Science*, 103, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.11.003>
- Thomas, M. (2011). The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1224–1231. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.003>
- Titov, A. (2015). The impact of re-entrainment on the electrocyclone effectiveness. *Separation and Purification Technology*, 156, 795-802. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.11.004>
- Torres De Sande, V., Sadique, M., Pineda, P., Bras, A., Atherton, W., & Riley, M. (2021). Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete. *Journal of Building Engineering*, 39, 102277. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102277>
- Torres-Castellanos, N., Torres-Agredo, J., y Mejía, R. (2013). Performance under sulfate attack of concrete additions with Fluid Catalytic Cracking catalyst residue (FCC) and Metakaolin (MK). *Ingeniería e Investigación*, 33(1), 18–22.
- Trout, E. A. (2019). The History of Calcareous Cements. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 1–29. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100773-0.00001-0>
- Tsouli, S., Lekatou, A., Kleftakis, S., Matikas, T., & Dalla, P. (2018). Corrosion behavior of 304L stainless steel concrete reinforcement in acid rain using fly ash as corrosion inhibitor. *Procedia Structural Integrity*, 10, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.007>
- Vachtsevanos, G., Natarajan, K. A., Rajamani, R., & Sandborn, P. (2020). Corrosion Processes: Sensing, Monitoring, Data Analytics, Prevention/Protection, Diagnosis/Prognosis and Maintenance Strategies (Structural Integrity Book 13) (English Edition) (1st ed. 2020 ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32831-3>
- Valdez-Tamez, P. L., Durán-Herrera, A., Fajardo-San Miguel, G., y Juárez-Alvarado, C. A. (2009). Influencia de la carbonatación en cenizas volantes y morteros de cemento Portland . *En g. invertir. y tecnol. [en línea]*, vol.10, n.1, pp.39-49. ISSN 1405-7743.
- Vishnumaya, L., y Rekha, A. (2014). Strength and Durability of OPC-Fly Ash-Sugarcane Bagasse Ash Blended Concrete. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(7), 436–441. <https://www.ijser.org/researchpaper/Strength-and-Durability-of-OPC-Fly-Ash-Sugarcane-Bagasse-Ash-Blended-Concrete.pdf>
- WachiraPoonsawat. (2017, 22 enero). Use this high-quality concrete texture which it is very useful for. . . iStock. Recuperado 29 de septiembre de 2021, de <https://www.istockphoto.com/es/foto/textura-de-segregaci%C3%B3n-de-hormig%C3%B3n-gm636888204-113272237>
- Wang, C., Sun, K., Niu, H., Sun, G., Zhang, Z., & Kong, L. (2021). Effect of binary admixture of sepiolite and fly ash on carbonation and chloride resistance of modified cement mortar. *Construction and Building Materials*, 279, 122509. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122509>
- Wang, W., Lu, C., Li, Y., Yuan, G., y Li, Q. (2017). Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*, 138, 486–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.039>
- Wang, Z., Liu, C., Zuo, J., Zhang, Z., Han, Y., & Man, S. (2020). Monitoring and modeling the damage evolution in engineered cementitious composites subjected to sulfate attack through continuous ultrasonic

- measurements. *Construction and Building Materials*, 262, 120799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120799>
- Wei, J., & Gencturk, B. (2019). Hydration of ternary Portland cement blends containing metakaolin and sodium bentonite. *Cement and Concrete Research*, 123, 105772. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.017>
- Wu, M., Zhang, Y., Ji, Y., Liu, G., Liu, C., She, W., & Sun, W. (2018). Reducing environmental impacts and carbon emissions: Study of effects of superfine cement particles on blended cement containing high volume mineral admixtures. *Journal of Cleaner Production*, 196, 358–369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.079>
- Xu, R. (2006). *Particle Characterization: Light Scattering Methods*. Springer Publishing.
- Yaba, H. K., Naji, H. S., Younis, K. H., & Ibrahim, T. K. (2021). Compressive and flexural strengths of recycled aggregate concrete: Effect of different contents of metakaolin. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4719–4723. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.164>
- Yadav, A. L., Sairam, V., Muruganandam, L., & Srinivasan, K. (2020). An overview of the influences of mechanical and chemical processing on sugarcane bagasse ash characterization as a supplementary cementitious material. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118854>
- Yang, T., Zhu, H., Zhang, Z., Gao, X., Zhang, C., & Wu, Q. (2018). Effect of fly ash microsphere on the rheology and microstructure of alkali-activated fly ash/slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 109, 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.008>
- Yang, X., & Wang, X. Y. (2021). Strength and durability improvements of biochar-blended mortar or paste using accelerated carbonation curing. *Journal of CO2 Utilization*, 54, 101766. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101766>
- Yang, Y. (2020). Effect of Sugarcane Bagasse Ash and Ceramic Waste Dust as Partial Replacements of Portland Cement on Corrosion Behavior of HRB400 Low Carbon Steel Reinforcement in 3.5 % NaCl. *International Journal of Electrochemical Science*, 12410–12419. <https://doi.org/10.20964/2020.12.29>
- Zhang, Q. (2020). Effect of Bagasse Ash Admixture on Corrosion Behavior of Low Carbon Steel Reinforced Concrete in Marine Environment. *International Journal of Electrochemical Science*, 6135–6142. <https://doi.org/10.20964/2020.07.65>
- Zhao, D., & Khoshnazar, R. (2020). Microstructure of cement paste incorporating high volume of low-grade metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, 106, 103453. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103453>
- Zhao, Y., Gao, J., Xu, Z., Li, S., Luo, X., & Chen, G. (2021). Combined effect of slag and clay brick powder on the hydration of blended cement. *Construction and Building Materials*, 299, 123996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123996>
- Zhou, Y., Li, M., Sui, L., & Xing, F. (2016). Effect of sulfate attack on the stress–strain relationship of FRP-confined concrete. *Construction and Building Materials*, 110, 235–250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.038>
- Zunino, F., & Scrivener, K. (2021). The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 140, 106307. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106307>
- Zuquan, J., Wei, S., Yunsheng, Z., Jinyang, J., & Jianzhong, L. (2007). Interaction between sulfate and chloride solution attack of concretes with and without fly ash. *Cement and Concrete Research*, 37(8), 1223–1232. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.016>