

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**ELABORACIÓN DE MATERIALES BASE CEMENTO
AUTO-LIMPIANTES Y CON BAJA EXPANSIÓN TÉRMICA A
TEMPERATURA AMBIENTE**

**POR
ERIC ENRIQUE SÁNCHEZ DÍAZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES
DE CONSTRUCCIÓN**

NOVIEMBRE 2013

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

**ELABORACIÓN DE MATERIALES BASE CEMENTO
AUTO-LIMPIANTES Y CON BAJA EXPANSIÓN TÉRMICA A
TEMPERATURA AMBIENTE**

**POR
ARQ. ERIC ENRIQUE SÁNCHEZ DÍAZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES
DE CONSTRUCCIÓN**

NOVIEMBRE 2013



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

San Nicolás de los Garza, N. L., a 21 de Octubre del 2013

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ

Sub-director de Estudios de Posgrado

de la Facultad de Ingeniería Civil, UANL

Presente.-

Estimado Dr. Valdez:

Por este medio comunico a usted, que el joven **ARQ. ERIC ENRIQUE SÁNCHEZ DÍAZ** ha atendido todas y cada una de las recomendaciones que le han hecho saber los revisores de su trabajo de tesis titulado: **ELABORACIÓN DE MATERIALES BASE CEMENTO AUTO-LIMPIANTES Y CON BAJA EXPANSIÓN TÉRMICA A TEMPERATURA AMBIENTE.**

Por lo anterior solicito a Usted que amablemente giré los oficios necesarios para dar paso a los trámites correspondientes ante la rectoría de la UANL para que el joven **SÁNCHEZ DÍAZ** pueda seguir cumpliendo con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra Institución y una vez terminado dicho proceso, realizar la defensa de su tesis para la obtención del grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.

Agradeciendo de antemano la atención brindada a la presente, me es grato despedirme, quedando a sus apreciables órdenes.

ATENTAMENTE

DR. ISAÍAS JUÁREZ RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

San Nicolás de los Garza, N. L., a 16 de Octubre de 2013

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ
Sub-director de Estudios de Posgrado
Facultad de Ingeniería Civil, UANL
P r e s e n t e.-

Estimado Dr. Valdez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado Evaluador de la tesis “**ELABORACIÓN DE MATERIALES BASE CEMENTO AUTO-LIMPIANTES Y CON BAJA EXPANSIÓN TÉRMICA A TEMPERATURA AMBIENTE**”, que presenta el Arq. **Eric Enrique Sánchez Díaz**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis en el ámbito de competencia del suscrito dictamino que la misma es **APROBADA.**

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

A T E N T A M E N T E

DR. CHRISTIAN GÓMEZ SOLÍS
EVALUADOR DE LA TESIS



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

San Nicolás de los Garza, N. L., a 16 de Octubre de 2013

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ

Sub-director de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Civil, UANL

P r e s e n t e.-

Estimado Dr. Valdez:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado Evaluador de la tesis “**ELABORACIÓN DE MATERIALES BASE CEMENTO AUTO-LIMPIANTES Y CON BAJA EXPANSIÓN TÉRMICA A TEMPERATURA AMBIENTE**”, que presenta el Arq. Eric Enrique Sánchez Díaz, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis en el ámbito de competencia del suscrito dictamino que la misma es **APROBADA**.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

A T E N T A M E N T E



DRA. BERTHA ALICIA VÁZQUEZ MÉNDEZ

EVALUADOR DE LA TESIS



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Oficio SDEPI-396-2013

ING. LÁZARO VARGAS GUERRA

Director del Departamento de Escolar y de
Archivo de la UANL
Presente.-

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que el **Arq. Eric Enrique Sánchez Díaz**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución.

De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se dé el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,
"ALERE FLAMAM VERITATIS"
Cd. Universitaria a 4 de noviembre del 2013

DR. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ.
Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C.c.p. Archivo.
Rtp.

Elaboración de materiales base cemento auto-limpiantes y con baja expansión térmica a temperatura ambiente

Aprobación de la Tesis:

Dr. Isaías Juárez Ramírez
Director de tesis

Dr. Christian Gómez Solís
Revisor

Dra. Bertha Alicia Vázquez Mandes
Revisor

Dr. Pedro Leobardo Valdez Tamez
Subdirector de estudios de posgrado

Dedicatorias

A mis padres,
por el apoyo que me han brindado
durante toda mi vida.

A mis hermanos,
por su apoyo y comprensión.

Agradecimientos

En primer término a Dios, el alfa y el omega de todo lo que hacemos. Gracias Señor, por darme tantas oportunidades.

Mi más sincero agradecimiento a TODAS las personas que me han brindado su apoyo y colaboración, durante la realización de esta tesis.

A mi familia, por la enseñanza recibida y por estar ahí en el camino en cada momento; por su apoyo emocional y espiritual durante todo este tiempo.

También doy gracias al Dr. Isaías Juárez Ramírez, asesor de este trabajo de investigación, por ofrecerme esta gran oportunidad y confiar en mí, entonces y ahora, y por la ciencia que me ha enseñado.

Al Dr. Christian Gómez Solís, por el tiempo que me ha dedicado durante estos 2 años, y estar ahí en cada paso del proyecto, y por sus ideas.

A la Doctora Bertha Alicia Vázquez Méndez, por su objetividad y aporte como revisora de este trabajo.

A los doctores que fungieron como profesores en diferentes etapas que duró mi formación de posgrado y por el conocimiento transmitido.

Al personal del laboratorio de Ecomateriales y Energía del Instituto de Ingeniería Civil, FIC-UANL, por su tiempo, apoyo y disposición en el desarrollo de este proyecto, además de su compañerismo y amistad.

Al personal de los laboratorios de Investigación de Materiales de Construcción y Tecnología del concreto, por su disposición y atención durante el desarrollo de este proyecto, en especial, a Gumaro Tovar.

También agradezco al CONACYT la beca otorgada y al PAICYT, por el apoyo a esta investigación.

A la Subdirección de Estudios de Posgrado de la FIC-UANL, a cargo del doctor Pedro Valdez, por el apoyo brindado.

Un muy especial agradecimiento a mis compañeros y amigos, que no sólo me brindaron un apoyo moral, sino que también hicieron gratificante mi estancia en esta institución; a los M. C: Alejandro Herrera, Anayanci Campos, Héctor Campos, Miguel Ruz, Ricardo de León y Xiomara García; a los ingenieros Cesar Aguilar, Claudia Compeán, Dania Cárdenas, Enrique Armendariz, María Leyva, Mirna Guevara, Octavio Rivera y Rubén Ahumada; a los L.Q.I. Ali Huerta, Isidro de León y Omar Ali; a la Q.F.B. Lucero Serrato y a la alumna Cecilia Castillo. Perdón si se me olvidaron algunos nombres pero muchas gracias a todos por estar ahí en cada paso de este camino.

Índice General

	Página
Capítulo 1: Introducción y antecedentes.	1
1.1. Generalidades de materiales base cemento.	1
1.2. Propiedades del proceso de fotocatalisis.	5
1.2.1. Remoción de contaminantes orgánicos.	8
1.3. Materiales empleados para eliminar contaminantes o inducir la propiedad auto-limpiante.	10
1.3.1. Dióxido de titanio (TiO ₂).	12
1.3.2. Óxido de zinc (ZnO).	14
1.3.3. Materiales compuestos SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	15
1.4. Ejemplos de edificaciones auto-limpiantes.	17
1.5. Materiales base cemento con baja expansión térmica.	24
1.5.1. Expansión térmica negativa.	29
1.5.2. Ejemplos de materiales con baja expansión térmica.	31
Capítulo 2: Protocolo.	35
2.1. Justificación.	35
2.2. Hipótesis.	36
2.3. Objetivos de esta investigación.	37
Capítulo 3: Método experimental.	38
3.1. Preparación de los materiales utilizados como materia prima para la elaboración de morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica.	38
3.2. Síntesis de los compuestos: SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	39
3.3. Síntesis del aluminio-silicato de litio (LiAlSiO ₄).	40
3.4. Elaboración de morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica.	41
3.5. Caracterización estructural de la materia prima y los morteros preparados.	45
3.5.1. Difracción de rayos-X en polvos (DRX).	45
3.5.2. Microscopia electrónica de barrido (MEB).	46
3.6. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de la materia prima y de los	47

morteros preparados.	
3.6.1. Tiempo de fraguado.	48
3.6.2. Porosidad.	51
3.6.3. Determinación del E_g .	52
3.6.4. Área superficial específica (S_{BET}).	53
3.7. Evaluación de las propiedades térmicas y mecánicas.	54
3.7.1. Evaluación del comportamiento de expansión térmica de los morteros.	54
3.7.2. Resistencia a la compresión.	57
3.8. Evaluación de la actividad fotocatalítica en la degradación de Rodamina B	57
Capítulo 4: Resultados y discusión.	60
4.1. Análisis estructural de la materia prima para la elaboración de los morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica.	61
4.1.1. Análisis de difracción de rayos-X y microscopia electrónica de barrido del SiC-TiO ₂ .	61
4.1.2. Análisis de difracción de rayos-X y microscopia electrónica de barrido del SiC-ZnO	63
4.1.3. Análisis de difracción de rayos-X y microscopia electrónica de barrido del LiAlSiO ₄ .	64
4.2. Determinación de las propiedades de la materia prima empleada para la elaboración de los morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica.	66
4.2.1. Determinación del E_g del SiC-TiO ₂ .	66
4.2.2. Determinación del área superficial específica S_{BET} del SiC-TiO ₂ .	68
4.2.3. Determinación del E_g del SiC-ZnO.	69
4.2.4. Determinación del área superficial específica S_{BET} del SiC-ZnO.	69
4.2.5. Determinación del área superficial específica S_{BET} del LiAlSiO ₄ .	70
4.2.6. Determinación del coeficiente de expansión térmica del LiAlSiO ₄ .	70
4.3. Análisis estructural de los morteros auto-limpiantes.	71
4.3.1. Composición de fases (DRX), morteros con TiO ₂ .	71
4.3.2. Composición de fases (DRX), morteros con ZnO.	75
4.3.3. Composición de fases (DRX), morteros con SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	76

4.3.4. Microestructura de los morteros con TiO ₂ , ZnO, SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	77
4.3.4.1. Morteros con TiO ₂ .	80
4.3.4.2. Morteros con ZnO.	84
4.3.4.3. Morteros con SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	87
4.4. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los morteros auto-limpiantes.	89
4.4.1. Tiempo de fraguado de los morteros con TiO ₂ , ZnO, SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	89
4.4.2. Porosidad de los morteros con TiO ₂ , ZnO, SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	91
4.4.3. Área superficial específica (S_{BET}) de los morteros con TiO ₂ , ZnO, SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	93
4.4.4. E_g de los morteros con TiO ₂ , ZnO, SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	96
4.5. Determinación de las propiedades térmicas y mecánicas de los morteros auto-limpiantes.	100
4.5.1. Evaluación del comportamiento de expansión térmica de los morteros con TiO ₂ .	100
4.5.2. Evaluación del comportamiento de expansión térmica de los morteros con ZnO.	103
4.5.3. Evaluación del comportamiento de expansión térmica de los morteros con SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	105
4.5.4. Resistencia a compresión de los morteros con TiO ₂ , ZnO, SiC-TiO ₂ y SiC-ZnO.	107
4.6. Evaluación de la actividad fotocatalítica en la degradación de Rodamina B	109
4.7. Análisis estructural de los morteros con baja expansión térmica.	115
4.7.1. Composición de fases (DRX).	115
4.7.2. Morfología.	117
4.8. Determinación de propiedades fisicoquímicas de los morteros con baja expansión térmica.	119
4.8.1. Tiempo de fraguado.	119
4.8.2. Porosidad.	120
4.8.3. Área superficial específica (S_{BET}).	121
4.8.4. E_g de los morteros.	123
4.9. Determinación de las propiedades térmicas y mecánicas de los morteros	125

con baja expansión térmica.	
4.9.1. Comportamiento térmico lineal de morteros con LiAlSiO_4 .	125
4.9.2. Resistencia a compresión.	127
4.10. Evaluación de la actividad fotocatalítica de los morteros con LiAlSiO_4 .	128
Conclusiones y recomendaciones.	132
Bibliografía	135
Apéndice I	141
Apéndice II	157
Apéndice III	159
Resumen autobiográfico	164

RESUMEN

Tesista: Eric Enrique Sánchez Díaz

Fecha de Graduación: octubre de 2013

Licenciatura en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Maestría: Facultad de Ingeniería Civil, Instituto de Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Nuevo León

Título del Estudio: Elaboración de materiales base cemento auto-limpiantes y con baja expansión térmica a temperatura ambiente.

Número de páginas: 164 Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en materiales de Construcción.

Área de Estudio: Materiales de Construcción

Propósito y método del estudio: Los materiales base cemento, tienden a presentar diversos deterioros por presencia de contaminantes atmosféricos, aunado a las características como: rugosidad, porosidad y composición mineralógica; el proceso de deterioro se ve acelerado y con ello la reducción de la vida útil del material. En este trabajo se trató de desarrollar materiales base cemento, auto-limpiantes y que tengan baja expansión térmica, para lograr una mayor vida útil y durabilidad. Se obtuvieron y caracterizaron las materias primas, para la elaboración de mezclas cementantes que contenían material fotocatalítico: TiO_2 , ZnO , SiC-TiO_2 o SiC-ZnO . Posterior a la elaboración y curado de los morteros, se evaluó sus propiedades, incluyendo la evaluación de la actividad fotocatalítica por medio de la decoloración de Rodamina B en solución y por impregnación en los morteros. Los morteros con mayor eficiencia fotocatalítica se prepararon con un LiAlSiO_4 , esto con el fin de evaluar la variación de expansión térmica, así como la actividad fotocatalítica. Además, se analizó las propiedades y comportamiento de los morteros, para así determinar las mejores condiciones de preparación de morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica.

Contribuciones y Conclusiones: En los diversos ensayos realizados se pudo apreciar, en general, que es posible la fabricación de materiales cementantes con propiedad de auto-limpieza, con baja expansión térmica, sin que sus propiedades sufran cambios significativos en comparación con el mortero de referencia.

FIRMA DEL ASESOR: _____

Índice de tablas

		Página
Tabla 1	Composición del concreto utilizado en los paneles de la Iglesia “Dives in Misericordia”	18
Tabla 2	Coefficientes de expansión térmica a baja temperatura.	27
Tabla 3	Valores de la efectividad obtenida al agregar metilcelulosa y látex a elementos de cemento con relación al coeficiente de expansión térmica.	33
Tabla 4	Proporcionamiento para la mezcla de referencia	42
Tabla 5	Resumen de las mezclas elaboradas.	43
Tabla 6	Composición de óxidos del cemento Portland Ordinario (CPO 40) utilizado.	60
Tabla 7	Coefficientes de expansión térmica de β -espodumeno, petalita y β -eucryptita	72
Tabla 8	Tiempos de fraguado de las diferentes mezclas preparadas con porcentajes variados de material fotocatalítico.	89
Tabla 9	Valores de porosidad obtenidos.	92
Tabla 10	Área superficial de las muestras con diferentes porcentajes de fotocatalizador.	95
Tabla 11	Valores de E_g para los morteros con material fotocatalítico, en condiciones ambientales y secado al horno.	98
Tabla 12	Valores de coeficiente de expansión térmica de muestras con TiO_2 y muestra de referencia	101
Tabla 13	Valores de coeficiente de expansión térmica de muestras con ZnO y muestra de referencia	104
Tabla 14	Valores de coeficiente de expansión térmica de muestras con SiC-TiO_2 y SiC-ZnO y muestra de referencia	106
Tabla 15	Valores de CET de 28 a 100°C de morteros con humedad ambiental en comparación con morteros que han tenido un tratamiento térmico previo.	106
Tabla 16	Valores de resistencia a compresión obtenidos por cada una de las mezclas	108

Tabla 17	Porcentaje de decoloración de las soluciones de Rodamina B a 5 ppm en cada mortero y en los procesos de fotólisis y absorción.	112
Tabla 18	Constante de velocidad k y $t_{1/2}$ de las reacciones en los morteros con fotocatalizador adicionado	113
Tabla 19	Porcentaje de decoloración de Rodamina B impregnada en placas de mortero.	114
Tabla 20	Constantes de velocidad (k) y tiempo de vida media ($t_{1/2}$) de la Rodamina B sobre la superficie de morteros.	115
Tabla 21	Tiempo de fraguado de los morteros con LiAlSiO_4 en comparación con los morteros sin aluminio-silicato de litio.	120
Tabla 22	Valores de porosidad correspondientes a los morteros con LiAlSiO_4	121
Tabla 23	Área superficial específica de morteros con y sin LiAlSiO_4	122
Tabla 24	Valores de E_g para los morteros con material fotocatalítico y LiAlSiO_4 en condiciones ambientales y secado al horno.	124
Tabla 25	Valores de CET para los morteros con LiAlSiO_4 .	126
Tabla 26	Comparación de CET obtenido entre morteros con y sin LiAlSiO_4 de 28 a 100°C.	126
Tabla 27	Comparación de los valores de resistencia por cm^2 , de los morteros con y sin LiAlSiO_4 .	128
Tabla 28	Porcentajes de decoloración de Rodamina B a 5ppm por morteros con LiAlSiO_4 .	129
Tabla 29	Porcentajes de decoloración de las placas de morteros impregnados con Rodamina B.	130

Índice de figuras

		Página
Figura 1	Gráfico de reacción de un catalizador.	6
Figura 2	Espectro de radiación en función de su longitud de onda.	7
Figura 3	Formación de los pares electrón hueco del TiO ₂ y migración de los electrones y los huecos a la superficie del semiconductor.	9
Figura 4	Captura de los electrones y los huecos por especies adsorbidas, y combinación de las dos acciones producidas.	9
Figura 5	Banda de energía prohibida, conductores semiconductores y aislantes	10
Figura 6	Esquema de fotocátalisis en una superficie con óxido de titanio.	13
Figura 7	Estructuras cristalinas de ZnO: (a) sal de roca cúbica, (b) blenda de zinc cúbica y (c) wurzita hexagonal. Las esferas sombreadas en gris y negras representan átomos de Zn y O, respectivamente.	15
Figura 8	Iglesia “Dives in Misericordia”, en Roma, primera prueba con el uso de un fotocatalizador en un material base cemento.	18
Figura 9	Detalle de los paneles prefabricados que componen la fachada.	19
Figura 10	Gráficas de evolución del color de los paneles prefabricados de una fachada con el paso de los años.	20
Figura 11	Ciudad de la Artes de Chambery (Fuente: Catalogo TX Active®, Italcementi).	21
Figura 12	Túnel de Vía Porpora Milán, colocación de un pavimento de concreto con TiO ₂ .	22
Figura 13	Estructura de la molécula de agua.	28
Figura 14	Diagrama de fases del sistema Li ₂ O • Al ₂ O ₃ • 2 SiO ₂ según Hatch y Roy.	30
Figura 15	Difractograma de TiO ₂ depositado sobre SiC por molienda mecánica y tratamiento térmico a 450°C.	62
Figura 16	Micrografías de SiC-TiO ₂ .	62
Figura 17	Difractograma de ZnO depositado sobre SiC por molienda mecánica y tratamiento térmico a 450°C.	63
Figura 18	Micrografías de SiC-ZnO.	64
Figura 19	Difractograma teórico y experimental del LiAlSiO ₄ sintetizado.	65
Figura 20	Micrografías del LiAlSiO ₄ , sintetizado por estado sólido a 1200°C.	65

Figura 21	Espectro de absorbancia del material compuesto SiC-TiO ₂ vs el TiO ₂ utilizado.	66
Figura 22	Gráfica de las bandas de energía del TiO ₂ y del SiC y la interacción entre ellas.	67
Figura 23	Espectro de absorbancia del material compuesto SiC-ZnO vs el ZnO utilizado.	69
Figura 24	Arriba la gráfica de porcentaje de cambio lineal (PLC) que presentó la muestra de temperatura ambiente a 200°C y en la parte inferior los valores de PLC convertidos a una curva de α CTE.	71
Figura 25	Difractograma de la muestra M1 (muestra de referencia), se muestran las fases presentes en un ángulo 2 Theta de 10 a 70°.	73
Figura 26	Difractograma de la muestras M2, M3 y M4 comparados con la muestra de referencia M1.	74
Figura 27	Difractograma de las muestras M5, M6 y M7 con respecto a la muestra de referencia M1.	75
Figura 28	Difractograma de M8 y M9 comparados con la muestra de referencia.	76
Figura 29	Difractograma muestra M10 y M11.	77
Figura 30	Micrografía con mapeos de la muestra e referencia (M1).	78
Figura 31	Fases hidratadas en la muestra de referencia (M1).	79
Figura 32	Micrografías de muestras de morteros con TiO ₂ .	81
Figura 33	Estructura cristalina de Etringita a la izquierda y a la derecha estructura cristalina de Etringita con posible sustitución de iones de Al por Ti.	82
Figura 34	Mapeos realizados en los morteros con TiO ₂ .	83
Figura 35	Micrografías de muestras de morteros con ZnO.	85
Figura 36	Distribución del Zn en muestras M5, M6 y M7, 0.5, 1 y 5%, respectivamente.	86
Figura 37	Micrografías de muestras con SiC-TiO ₂ .	87
Figura 38	Micrografías de muestras con SiC-ZnO.	88
Figura 39	Gráfico de porosidad abierta y cerrada de los diferentes morteros.	93
Figura 40	Gráfico de absorción desorción de la muestra M1.	94
Figura 41	Tipos de isotermas de acuerdo a la clasificación de Brunauer.	94
Figura 42	Diagrama de Tauc de la muestra de referencia en condiciones ambientales y secado al horno a 100°C \pm 5°C.	97

Figura 43	Brecha de energía del mortero M1 graficado por medio del coeficiente de absorción α , señalando el tipo de brecha en los valores de E_g marcados en el diagrama de Tauc.	98
Figura 44	Gráfico con los valores de E_g de los diferentes morteros, marcando con el límite entre la región ultravioleta y visible.	99
Figura 45	Comportamiento térmico lineal de las muestras con TiO_2 en relación con la muestra de referencia señalando el área de cambio de comportamiento.	100
Figura 46	Curvas de pérdida de peso para C4AH, monosulfato y Etringita (TG. $10^\circ C/min$).	102
Figura 47	Comportamiento térmico lineal de las muestras con ZnO en relación con la muestra de referencia señalando el área de cambio de comportamiento.	104
Figura 48	Comportamiento térmico lineal de las muestras con SiC- TiO_2 y SiC-ZnO en relación con la muestra de referencia señalando el área de cambio de comportamiento.	105
Figura 49	Gráfico de resistencia a compresión de los morteros con material fotocatalítico adicionado en sustitución de un porcentaje de cemento.	108
Figura 50	A la izquierda, concentración de Rodamina B a un tiempo de 8 horas y a la derecha porcentaje de decoloración de la solución.	109
Figura 51	Decoloración de Rodamina B en un periodo de 8 horas en exposición a la luz solar, muestras con TiO_2 y referencia.	110
Figura 52	Decoloración de Rodamina B en un periodo de 8 horas en exposición a la luz solar, muestras con ZnO y referencia.	111
Figura 53	Decoloración de Rodamina B en un periodo de 8 horas en exposición a la luz solar, muestras con SiC- TiO_2 , SiC-ZnO y referencia.	112
Figura 54	Decoloración de Rodamina B en un periodo de 8 horas en exposición a la luz solar, muestras en placas.	114
Figura 55	Difractogramas de los morteros con $LiAlSiO_4$.	116
Figura 56	Micrografías de la muestra M1 con $LiAlSiO_4$.	117
Figura 57	Micrografías en sección superior de morteros con TiO_2 y $LiAlSiO_4$, en sección inferior mortero con ZnO y $LiAlSiO_4$.	118
Figura 58	Micrografías en sección superior de morteros con SiC- TiO_2 y $LiAlSiO_4$, en	119

	sección inferior mortero con SiC-ZnO y LiAlSiO ₄ .	
Figura 59	Puntos a y b dentro de los poros de materiales con multicapas.	123
Figura 60	Curvas dilatométricas de los morteros con LiAlSiO ₄ .	125
Figura 61	Resistencia a compresión de morteros con LiAlSiO ₄ .	127
Figura 62	Curvas de decoloración de Rodamina B por morteros con LiAlSiO ₄ .	128
Figura 63	Curvas de decoloración de placas de morteros impregnadas con Rodamina B y expuestas al sol en un periodo de 8 horas.	129

Capítulo 1: Introducción y antecedentes

1.1 Generalidades de materiales base cemento

En el área de la construcción existe una amplia gama de materiales utilizados, pero el cemento como materia prima es uno de los de mayor uso en la actualidad, con una producción reportada en el año 2000, por encima de los 1.5 billones de toneladas al año [1].

El cemento es un material inorgánico que tiene la propiedad de reaccionar al contacto con el agua, generándose un proceso de precipitación y nucleación de los granos de cemento, formando con ello fases hidratadas [2].

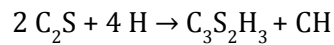
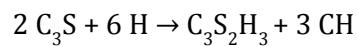
En la química del cemento se utiliza de modo habitual la siguiente notación abreviada para referirse a los distintos compuestos del cemento: C= CaO, A= Al₂O₃, F= Fe₂O₃, S= SiO₂, H= H₂O, M= MgO, N= Na₂O + K₂O, \hat{S} = SO₃.

Las fases del cemento son principalmente silicatos de calcio denominados alita (C₂S) y belita (C₃S), pero no son éstas las únicas fases; ya que, en menor porcentaje, también se compone de aluminato tricalcico (C₃A) y ferro-aluminato-tetracalcico (C₄AF), además de un porcentaje de yeso (CaSO₄) [1].

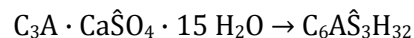
Cada una de las fases le confiere una propiedad específica al cemento en estado fresco, es decir, desde el momento del mezclado hasta el endurecimiento del material,

pasando por un proceso de fraguado, que es el proceso donde ocurren todas las reacciones de hidratación.

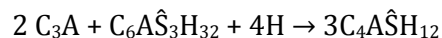
El C_2S , al reaccionar con el agua, forma silicato de calcio hidratado (C-S-H) y, en menor cantidad, forma Portlandita, $Ca(OH)_2$. Por su parte, el C_3S , al igual que la fase anterior, forma C-S-H pero es mayor su contribución a la formación de Portlandita [2].



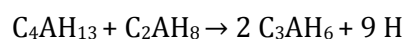
El C_3A es la fase de mayor velocidad de reacción y con ello la que proporciona la estabilidad del compuesto en las primeras horas. El aluminato tricálcico (C_3A), al combinarse con yeso y agua, produce la Etringita.



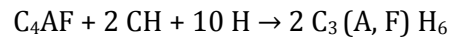
Y el aluminato de calcio con la Etringita y con agua se convierte en Monosulfato:



El aluminato tricálcico (C_3A) con el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ y con agua, se convierte en aluminato de calcio hidratado:



Por su parte el C_4AF proporciona el color del material, de ahí que, en la ausencia de esta fase, el cemento será blanco. Esto en menor medida, contribuye a la formación de geles y otras fases de calcio hidratado [3].



En general, los materiales base cemento tienen características mineralógicas que dependen del tipo de cemento cuya clasificación se otorga según su composición, es decir, según la variación en la proporción de sus fases. Además, todos los materiales base cemento presentan superficies rugosas; esto debido a que son materiales porosos y pueden presentar variaciones de color, dependiendo de la cantidad de hierro u otros minerales presentes.

Aunque estas propiedades en los materiales base cemento pueden ser causa del deterioro de los mismos, para una mayor porosidad se asocia menor resistencia mecánica. Esta propiedad física puede verse disminuida conforme aumente la porosidad del material, es decir, una porosidad capilar o porosidad abierta permite el ingreso de agentes externos que se encuentran en el medio circundante y que, una vez localizados en el interior de la matriz cementante, pueden generar reacciones con las fases formadas, generando su desestabilización y la formación de nuevas fases.

Con lo anterior, se verán alteradas las propiedades del material final, provocando generalmente mecanismos de fallas en el mortero o el concreto en cuestión.

La porosidad, además, confiere rugosidad al material que, aunado a la composición mineralógica, permite el depósito seco y húmedo de contaminantes atmosféricos en la superficie del material. Aunque en muchos casos no migre al interior en la matriz cementante, sí afectará las propiedades del material base cemento, alterando sus propiedades físicas y mecánicas con variaciones, según sea la naturaleza del contaminante: gas (deposición seca) o disoluciones de sales (deposición húmeda) [4].

Los agentes externos al material, según el tipo de aplicación y el sitio de exposición, generarán procesos de deterioro en el material cuya matriz aglomerante sea el cemento. En la actualidad se realizan diversos trabajos para evitar el deterioro de los materiales de construcción por efectos de compuestos relacionados en el medio en el que se encuentren; se agregan aditivos, pinturas, selladores o impermeabilizantes vinílicos o asfálticos. Sin embargo, esto no es suficiente, ya que además del alto costo que implica, algunos de estos materiales provocan daño al medio ambiente.

En los últimos años, se han empleado tecnologías emergentes que han contribuido a la limpieza del medio ambiente de manera favorable. En particular, la fotocatalisis heterogénea surge como una alternativa tecnológica que busca proveer propiedades de auto-limpieza a los materiales base cemento, contribuyendo con ello al desarrollo de las nuevas edificaciones sustentables e inteligentes [5].

La fotocatalisis heterogénea pertenece a los denominados procesos avanzados de oxidación (PAO's), que están basados en materiales semiconductores, factibles para la degradación de determinadas sustancias, en función de la intensidad de luz que reciben [6].

En la última década se ha propuesto el uso de semiconductores fotocatalíticos que permitan lograr una propiedad de auto-limpieza en los materiales de construcción. En el caso de matrices cementantes, uno de los materiales probados ha sido el dióxido de titanio (TiO_2), por su capacidad fotocatalítica al ser irradiado con luz UV [7].

1.2 Propiedades del proceso de fotocátalisis.

Uno de los procesos químicos más estudiados, en el nivel mundial, es la catálisis, donde se busca modificar la velocidad de una reacción, ya sea aumentándola o disminuyéndola, mediante la incorporación de un agente llamado catalizador. Una sustancia puede considerarse como catalizador cuando acelera una reacción química sin ser consumido como un reactivo, es decir, que aparece en la expresión de la velocidad que describe una reacción térmica sin aparecer en la ecuación estequiométrica [8].

Una reacción puede llevarse a cabo en una, dos o tres etapas denominadas elementales, durante las cuales participan las moléculas de los reactivos. En general, existirá una etapa más lenta que las otras y será ésta la que determine la velocidad global de la transformación. “Catalizar” una reacción implica reemplazar este paso por varias etapas más rápidas que se llevan a cabo “sólo” en presencia del catalizador. Esto significa que la intervención del catalizador abre un camino nuevo a la reacción o compuesto de reacciones elementales con energía de activación menor (Figura 1).

En la práctica, este aumento de velocidad en presencia del catalizador se aprovecha para obtener la misma velocidad, o ligeramente superior, pero a temperaturas mucho más bajas que las utilizadas en el caso de la reacción sin catalizador.

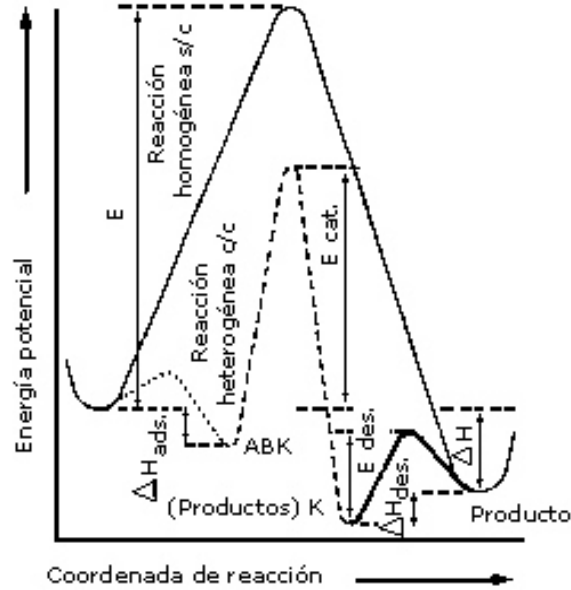


Figura 1. Gráfico de reacción de un catalizador.

Adicionalmente, lo que resulta en ocasiones mucho más valioso es que por acción del catalizador se obtienen productos que no pueden obtenerse de otra forma.

De acuerdo con las condiciones en las que se llevan a cabo las reacciones, es posible separar el fenómeno catalítico en tres dominios independientes: catálisis homogénea, catálisis heterogénea, y catálisis enzimática.

La catálisis heterogénea se caracteriza porque los catalizadores usados son insolubles en el medio en el que ocurre la reacción, así que las reacciones, de líquidos o de gases, suceden en la superficie. Caso contrario a la catálisis homogénea, donde el catalizador se disuelve en el medio donde se encuentra y, por lo tanto, todos los sitios están disponibles para que ocurra la reacción [9].

A su vez, dentro de los tipos de catálisis heterogénea, se encuentra la fotocatalisis, es decir, una reacción catalítica activada por la luz.

La ventaja de la fotocatalisis es la propiedad de ser activada por fotones, lo que permite su activación con lámparas de luz UV o luz visible, como se realiza en la mayoría de los casos de estudio. También es posible la activación de dicho proceso en la luz solar, esto debido a que el espectro solar incluye las longitudes de onda correspondientes, tanto a luz UV como a la luz visible, entre otras (Figura 2).

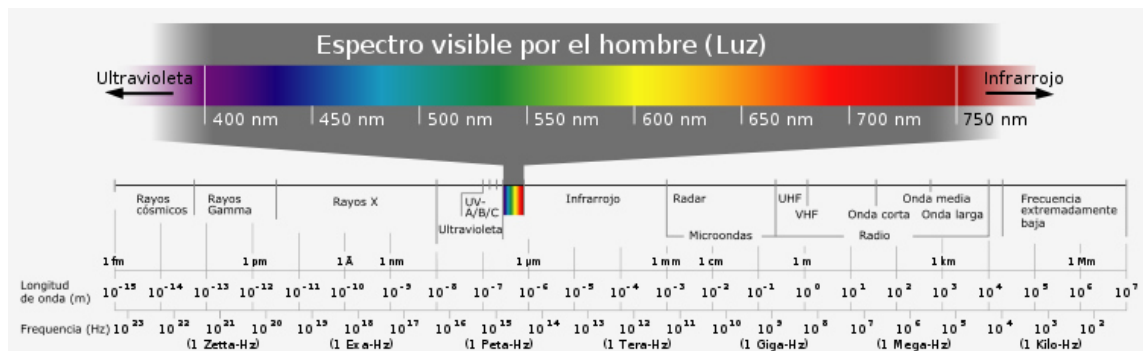


Figura 2. Espectro de radiación en función de su longitud de onda.

Un fotocatalizador, como bien define su nombre, funciona de igual manera que un catalizador, pero solamente cuando éste recibe “luz” en forma de radiación, ya sea solar o artificial, de una determinada longitud de onda que provoca su activación de manera que se exciten sus partículas, produciendo el efecto catalítico. Esta cualidad la presentan principalmente los materiales semiconductores, pero no todos tienen la misma efectividad como fotocatalizadores.

Entonces, la fotocatalisis se puede definir como la aceleración de una fotorreacción por la presencia de un catalizador. Esta definición incluye la fotosensibilización, un proceso por el cual una alteración fotoquímica se produce en una entidad molecular, como un resultado de la absorción inicial de la radiación por otra entidad molecular llamada el fotosensibilizador. Este proceso excluye la foto-aceleración de una reacción térmica estequiométrica, con independencia de si se produce en una solución homogénea o en la

superficie de un electrodo del sistema de iluminación. De lo contrario, cualquier fotorreacción sería catalítica.

Dependiendo de la fotorreacción específica, el catalizador puede acelerar la fotorreacción por la interacción con el sustrato en su suelo o estado excitado y/o con un fotoproducto primario [8].

Cuando la luz es absorbida por el catalizador, el sistema representa una fotorreacción sensible que puede ocurrir a través de dos formas diferentes:

1. A través de la transferencia de energía, mediante la formación de un estado activado de la sustancia reaccionante de interés, que se oxida más fácilmente que su estado fundamental.
2. A través de la transferencia de electrones, al actuar, ya sea como un donante o aceptor de electrones.

1.2.1 Remoción de contaminantes orgánicos.

El proceso de fotocatalisis comienza cuando el semiconductor, al recibir radiación de un determinado nivel de longitud de onda genera pares electrón/hueco como se muestra en la figura 3.

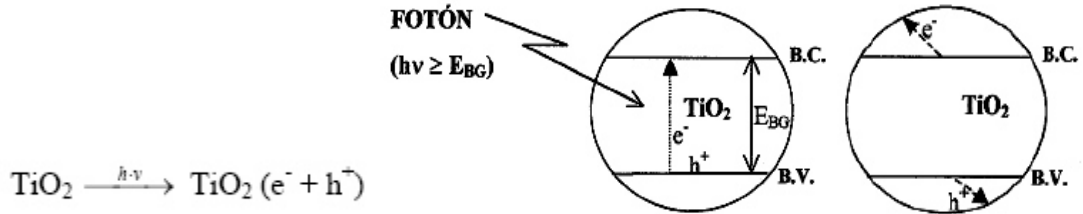


Figura 3. Formación de los pares electrón hueco del TiO₂ y migración de los electrones y los huecos a la superficie del semiconductor.

A causa de ello, los huecos foto-generados, dan lugar en la superficie del semiconductor a las reacciones de foto-oxidación y los electrones de la banda de conducción, dan lugar a las reacciones de foto-reducción.

La captura de los huecos y electrones por especies adsorbidas genera radicales muy reactivos, capaces de producir la oxidación de compuestos contaminantes (Figura 4).

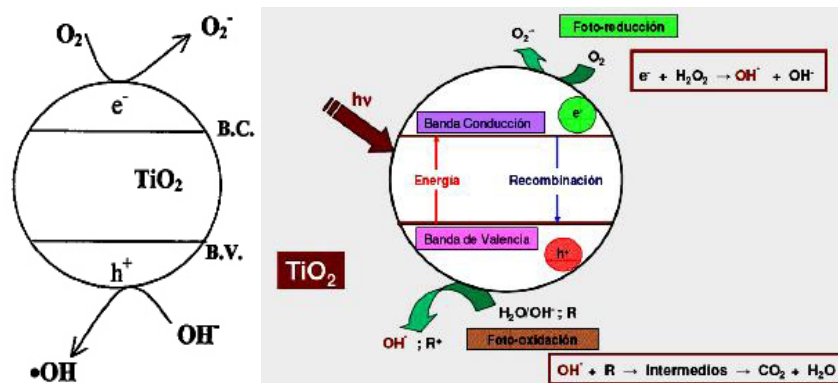


Figura 4. Captura de los electrones y los huecos por especies adsorbidas, y combinación de las dos acciones producidas.

Luego de la separación electrón-hueco, la transferencia interfacial de las cargas, que conduce a la oxidación de un compuesto orgánico por el hueco, puede producirse por cualquiera de los siguientes caminos:

- a) Transferencia directa del hueco a la sustancia adsorbida sobre el fotocatalizador

- b) A través de especies intermediarias fuertemente oxidantes, como el $\text{OH}\cdot$ o el superóxido (O_2^-), formados respectivamente por oxidación de agua o reducción del oxígeno adsorbido sobre el catalizador.
- c) Ambos caminos en simultáneo. El electrón foto-generado debe ser secuestrado por algún oxidante presente en el medio de reacción, típicamente oxígeno, agua oxigenada o persulfato de amonio, entre otros.

1.3 Materiales empleados para eliminar contaminantes o inducir la propiedad auto-limpiante.

Hay diversos materiales semiconductores que pueden utilizarse como fotocatalizadores, ya que poseen una diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción adecuada (Figura 5) para que se produzcan reacciones fotocatalíticas (reducción de oxígeno y oxidación del agua adsorbida); como por ejemplo, el TiO_2 , CdS , Fe_2O_2 y WO_3 [10].

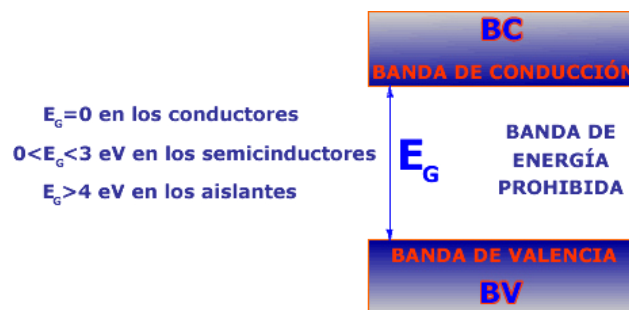


Figura 5. Banda de energía prohibida, conductores semiconductores y aislantes.

Aquellos semiconductores que tengan un potencial de oxidación mayor que 2 eV, respecto del electrodo normal de hidrógeno (ENH), son potenciales oxidantes de contaminantes orgánicos, tales como los fenoles, aminas aromáticas [11].

Los criterios para seleccionar un buen fotocatalizador son: un adecuado potencial redox de la banda de valencia, de modo que sea suficientemente positivo como para hacer factible la mineralización de la materia orgánica. Sin embargo su foto-activación debe caer dentro del intervalo de luz visible-UV cercano, necesariamente menor que 4,1 eV, para poder aprovechar la luz solar. Además, debe presentar resistencia a la foto-corrosión, baja toxicidad y elevada área activa.

La banda prohibida es la diferencia de energía, E_g , entre el punto más bajo de la banda de conducción y el más elevado de la banda de valencia. A 0°K, la conductividad es nula, porque todos los estados de la banda de valencia están llenos, mientras que todos los estados de la banda de conducción están vacantes. Cuando se aumenta la temperatura, los electrones se excitan térmicamente desde la banda de valencia hasta la banda de conducción, dejando un hueco en la banda de valencia y creando así lo que se denomina un par electrón-hueco. Tanto los electrones de la banda de conducción como las vacancias o huecos que dejan tras de sí en la banda de valencia contribuyen a la conductividad eléctrica [12].

Después de este proceso, es normal que ocurra una recombinación electrónica, donde los electrones pierden energía y vuelven a ocupar un nivel más bajo de energía, como lo es la banda de valencia.

Aunque en el uso de otros fotocatalizadores que no sean el TiO_2 no ha sido reportado en materiales base cemento por el comportamiento que han presentado en otros sistemas o por ser materiales compuestos recientemente investigados, lo que abre una posibilidad para su estudio en matrices cementantes considerando al material base cemento como el sustrato para un fotocatalizador, para así obtener un comportamiento sinérgico entre ambos materiales.

Depositar materiales fotocatalíticos sobre otro material que tenga propiedades específicas es un tema que se encuentra en desarrollo, lo cual va desde la creación de películas de un fotocatalizador sobre algún tipo de vidrio o inclusive depósitos en polvo sobre un material particulado, con un tamaño de partícula mayor que el de depósito, como es el caso del estudio de deposición de TiO_2 o ZnO sobre SiC .

1.3.1 Dióxido de titanio (TiO_2).

Entre los materiales que producen el efecto de óxido-reducción (redox) se localiza el dióxido de titanio TiO_2 , que ha sido uno de los compuestos más utilizados en la industria, ya que ha mostrado importantes propiedades de auto-limpieza. En este sentido, el TiO_2 ha sido considerado como aditivo en pinturas o materia prima en losetas cerámicas, ya que preserva el color blanco en los materiales, al descomponer la materia orgánica como resultado de su acción fotocatalítica.

El dióxido de titanio tiene tres estructuras cristalinas: anatasa, rutilo y brookita, y la fase del tipo anatasa generalmente muestra la foto-actividad más alta, en comparación con los otros tipos de dióxido de titanio. Por lo tanto, el dióxido de titanio de tipo anatasa se

utiliza industrialmente como un fotocatalizador eficaz, que se activa por la luz solar o la radiación ultravioleta, tal como lo describieron Fujishima y Honda en 1972 [8].

Las principales ventajas de TiO_2 son: su alta estabilidad química cuando se expone a compuestos ácidos y básicos, su no toxicidad, su coste relativamente bajo y su alto poder oxidante, que lo convierten en un candidato competitivo para muchas aplicaciones fotocatalíticas [8, 13]. Sin embargo dicha actividad es provocada por una irradiación de luz UV, por lo que, al emplear luz de mayor longitud de onda, como es el caso de la luz visible, su efectividad se verá disminuida.

La energía requerida, que tiene que ser suministrada por los fotones para la promoción de los electrones, depende de la brecha de banda para el material específico. El intervalo de banda es la energía mínima de luz necesaria para hacer que el material sea eléctricamente conductor. La energía de banda prohibida, por ejemplo de TiO_2 (anatasa) es 3.2 eV, lo que corresponde a los fotones con una longitud de onda de 388 nm.

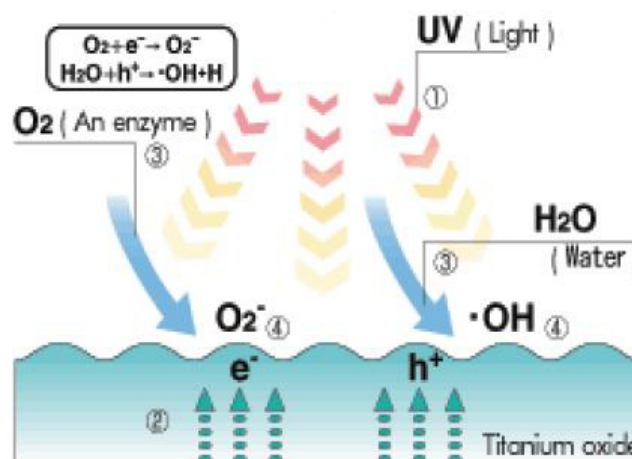


Figura 6. Esquema de Fotocatálisis en una superficie con Oxido de Titanio.

Por lo anterior, en los últimos años se ha potenciado el uso del TiO_2 como purificador del agua potable, ya sea adicionándolo directamente o aplicándolo como recubrimiento (Figura 6) [5].

Fue en la década de los 90's que se comenzó a potenciar el empleo del TiO_2 en materiales base cemento, para desarrollar la propiedad de auto-limpieza. Dentro de los primeros trabajos se puede mencionar el diseño de la mezcla de concreto de la iglesia "Dives in Misericordia", en Roma [14].

1.3.2 Óxido de zinc (ZnO).

Otro de los materiales que se ha empleado como fotocatalizador es el óxido de zinc (ZnO) que es un material semiconductor, el que en años recientes ha generado un gran interés debido a sus propiedades físicas, ópticas y eléctricas que han sido investigadas ampliamente. Lo anterior ha provocado que el ZnO sea considerado en la actualidad como un material con cualidades muy promisorias para utilizarse en numerosas aplicaciones tecnológicas, como sensores de gas en forma de películas delgadas, varistores, láseres ultravioleta y visible, componentes de celdas solares y como fotocatalizador para la degradación de compuestos orgánicos [15].

Las estructuras cristalinas que presenta el ZnO son: la wurzita, la blenda de zinc y la sal de roca (Figura 7). En condiciones ambientales normales, la fase más estable es la wurzita. La estructura de blenda de zinc puede obtenerse creciendo el ZnO sobre sustratos con estructura cristalina cúbica, y la estructura de sal de roca puede obtenerse con presiones relativamente altas [15].

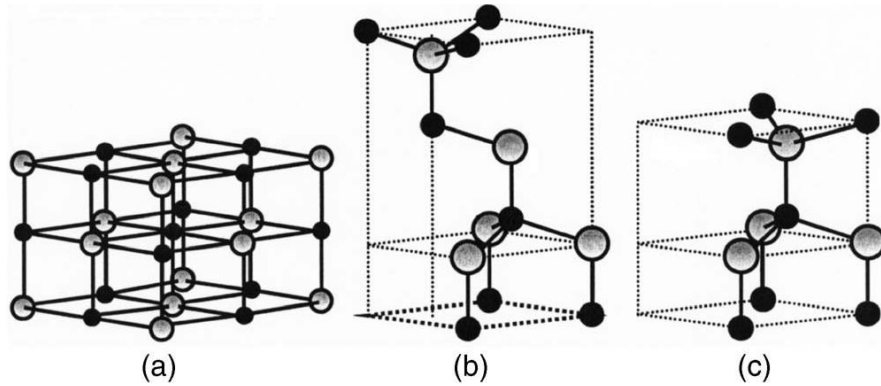


Figura 7. Estructuras cristalinas de ZnO: (a) sal de roca cúbica, (b) blenda de zinc cúbica y (c) wurzita hexagonal. Las esferas sombreadas en gris y negras representan átomos de Zn y O, respectivamente.

En particular, el ZnO en su fase wurzita, es el más empleado en los procesos fotoinducidos. Esto debido a que presenta un valor de energía de banda prohibida (E_g) de 3.37 eV [16].

Dentro de las propiedades del ZnO se puede mencionar su fuerte sensibilidad de conductividad en su superficie, a espacios adsorbidos, su alta conductividad térmica y su interesante valor de E_g (3.37 eV) similar al del TiO_2 .

Por este motivo, este material puede ser propuesto para aplicaciones fotocatalíticas similares al uso del TiO_2 [17].

1.3.3 Materiales compuestos SiC- TiO_2 y SiC-ZnO.

La mayoría de las investigaciones sobre fotocatalizadores mencionan que éste se emplea en forma de polvo, disperso en solución, es decir en suspensión, lo que provoca algunos problemas para su recuperación. En este caso, la inmovilización es una técnica que permite reducir costos en los procesos de separación de las fases del sistema [18].

Sin embargo, es necesario que el soporte cumpla algunos criterios como son: una fuerte adherencia con el fotocatalizador, conservar o incrementar las propiedades fotocatalíticas y tener una elevada área superficial.

Diferentes materiales se han empleado como soportes de catalizadores para la degradación fotocatalítica de compuestos orgánicos. El vidrio, el carbón activado, el gel de sílice y algunos materiales poliméricos, se encuentran entre los más utilizados. Aunque existen otros soportes, éstos son menos comunes; por ejemplo, la piedra pómez, la celulosa, el acero inoxidable, y las arcillas de alúmina, entre otros [19].

Uno de los soportes empleados recientemente es el carburo de silicio (SiC), que presenta características y propiedades intrínsecas atractivas, ya que se considera un cerámico de alta tecnología. Este material se utiliza a altas temperaturas, debido a sus propiedades: alta dureza, fuerza mecánica, bajo coeficiente de expansión térmica, alta transferencia de calor y buena resistencia a la oxidación, entre otras [19].

Algunos trabajos que reportan al SiC como soporte mencionan que existe una sinergia entre el SiC y el TiO₂, logrando incrementar la actividad fotocatalítica de este último [20, 21].

La elaboración de materiales soportados no sólo se ha realizado utilizando al TiO₂ como fotocatalizador. En 1996 Johnson y colaboradores [22] reportaron propiedades del ZnO sobre zafiro y sustratos de SiC y en 2006 Sha y Yan [23] describieron el proceso de formación de multicapas de SiC/ZnO sobre sustratos de sílice. Sin embargo, estos materiales no han sido probados como fotocatalizadores en procesos fotoinducidos. Por lo

anterior, será importante conocer las propiedades que el SiC aporta como sustrato de otros fotocatalizadores diferentes al TiO_2 . Se busca, por lo tanto, que se genere un efecto sinérgico, con el cual las propiedades fotocatalíticas se vean mejoradas, colocando al carburo de silicio como un material factible para su uso como soporte de diversos fotocatalizadores.

1.4 Ejemplos de edificaciones auto-limpiantes.

La aplicación de la fotocatálisis con dióxido de titanio sobre los materiales a base de cemento ha permitido la degradación de una amplia gama de compuestos orgánicos y algunos compuestos inorgánicos (NO_x y SO_2) que son agresivos con materiales cementantes y el medio ambiente. Por lo tanto, el TiO_2 podría utilizarse para aumentar el ciclo de vida de los materiales a base de cemento, mientras que también podría disminuir sustancialmente la concentración de algunos contaminantes del aire en la atmósfera urbana.

Teniendo en cuenta los resultados satisfactorios obtenidos en las aplicaciones anteriores de TiO_2 y, por otro lado, las condiciones ofrecidas por las construcciones en las ciudades (la exposición al sol y áreas de superficie considerables), la fotocatálisis a partir de dióxido de titanio se ha aplicado en diferentes materiales de cemento.

Existen varias investigaciones que reportan el uso de TiO_2 en materiales cementantes siendo la mayoría probados a nivel laboratorio, como con los experimentos realizados sobre la actividad de auto-limpieza de TiO_2 en materiales de cemento, para el diseño de las composiciones de mezcla de la iglesia "Dives in misericordia" (Roma, Italia),

mostrada en la Figura 8, y para evaluar la capacidad de auto-limpieza de un nuevo tipo de cemento (TX Millennium) [7, 24].



Figura 8. Iglesia “Dives in Misericordia” Roma, primera prueba con el uso de un fotocatalizador en un material base cemento.

Los resultados obtenidos de esos trabajos permitieron proponer el uso del TiO_2 en los materiales utilizados para la construcción de la iglesia. El diseño de la iglesia por el arquitecto Richard Meier, consiste, en la parte más notable, de tres velas hechas con bloques de cemento armado en color blanco llegando a un total de 346 bloques con medidas de 3 x 2 x 0.8 m que contienen dióxido de titanio [14].

Tabla 1. Composición del concreto utilizado en los paneles de la Iglesia Dives in Misericordia.

Material	Cantidad por m ³
Cemento blanco con TiO_2 (5%)	380 kg/m ³
Metacaolín blanco (con agente compatibilizante)	38.7 kg/m ³
Agregados: mármol triturado $d_{max} = 20$ mm	1850 kg/m ³
Super-plastificante acrílico (solución 30% extracto seco)	10.5 kg/m ³
Agua	160 l/m ³

Se ha analizado la iglesia de la Misericordia en Roma, seleccionando un 9% de los paneles colocados en cada una de las velas que forman su peculiar estructura, analizando su brillo, tanto por su parte interior como exterior.

Los paneles que se encuentran marcados con una X son aquellos en que ha sido analizado su brillo (Figura 9). Para analizar el brillo de estas piezas se ha estudiado el porcentaje de blanco/negro o luminosidad (L) que hay en ellas y también el % de amarillo/azul (b) en relación a la esfera del sistema cie LAB.

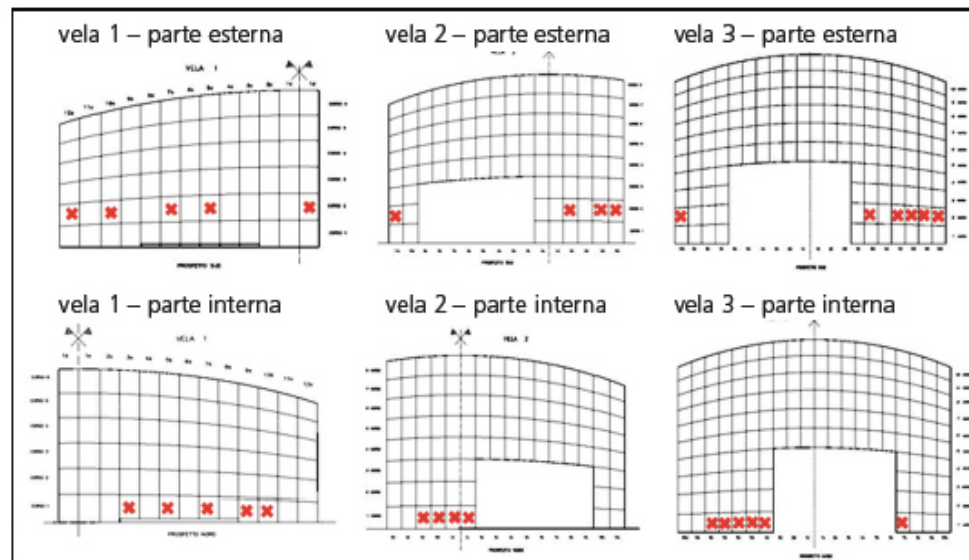


Figura 9. Detalle de los paneles prefabricados que componen la fachada [14].

Se determinó que desde el año 2000 cuando se fabricaron los paneles, al 2002, cuando terminaron de colocarse, éstos perdieron cierto brillo. Sin embargo, este brillo se ha mantenido a lo largo del tiempo hasta la última medición en 2009.

Los resultados han sido bastante aceptables en cuanto a la conservación del blanco original. Algo parecido ocurre con la ganancia de color amarillo/azul, donde se produce en los primeros años, sobre todo en las velas exteriores.

Este proceso prácticamente se frena, viéndose cómo en el último año incluso disminuye en algunos de ellos. Pero en otros, curiosamente, aumenta bastante. Esto es a causa de la arena silíceo en suspensión, de color amarillo, matriz inorgánica que se introduce en los poros del hormigón y no siendo posible su descomposición, le da un aspecto amarillento (Figura 10).

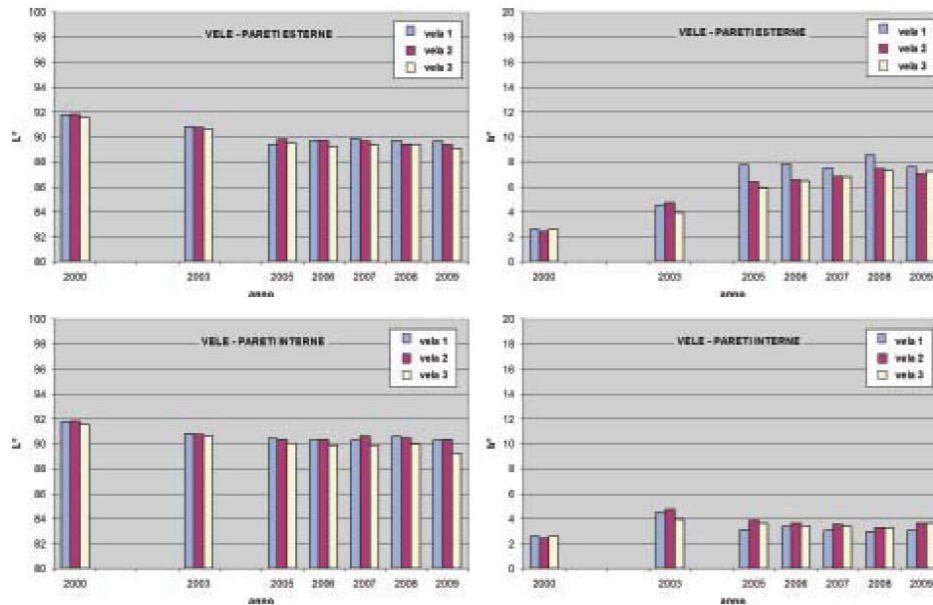


Figura 10. Gráficas de evolución del color de los paneles prefabricados de fachada con el paso de los años [14].

Otra de las edificaciones donde se probó esta técnica es el edificio de la ciudad de la Música de las Bellas Artes de Chambéry (Figura 11), así como la sede de la policía de Burdeos, en Francia, donde se analizó la actividad fotocatalítica en la degradación de compuestos orgánicos e inorgánicos [8].

Cuando se empezó utilizar la adición de TiO_2 , la característica que se quería conseguir era que la blancura de los concretos blancos se mantuviera inmutable a lo largo del tiempo, y no se perdiera por la suciedad a lo largo del tiempo, como ocurre en los concretos blancos tradicionales. Por ello, en los primeros edificios que se construyeron

según este proceso de fotocatalisis, “La ciudad de la música y las bellas artes de Chambéry” y “La iglesia de la Misericordia en Roma”, se les han ido realizando estudios de brillo para comprobar que realmente funcionan estos procesos fotocatalíticos.



Figura 11. Ciudad de la Artes de Chambéry (Fuente: Catalogo TX Active®, Italcementi).

Por otro lado, el proyecto PICADA (Photocatalytic Innovative Coverings Applications for Depollution Assesment) [25], investiga el uso de materiales de construcción con fotocatalizadores, para reducir la contaminación del aire. En las pruebas efectuadas se aplicaron colorantes naturales (rodamina B) a determinadas superficies que contenían TiO_2 y posteriormente se le expuso a la luz de lámparas para medir el factor de degradación de la rodamina B, obteniendo parámetros de recuperación del material en periodos no mayores de 24 horas [7].

Algunas otras edificaciones realizadas con agregado de TiO_2 en la mezcla para la fabricación de materiales han sido el Túnel de Vía Porpora en Milán (Figura 12), donde se empleó el fotocatalizador en pavimentos de alto rendimiento. Los resultados indican una disminución del 22.7% de la concentración del óxido de nitrógeno (NO_x) producido por el tráfico diario de hasta 30,000 vehículos.



Figura 12. Túnel de Vía Porpora Milán, colocación de un pavimento de concreto con TiO_2 .

En general, el uso de materiales con TiO_2 para pruebas *in situ* sobre la limpieza de las fachadas también se ha llevado a cabo en el edificio de la sede de Air France, en el Aeropuerto Roissy Charles de Gaulle, donde por la alta concentración de hidrocarburos se propuso una idea similar a la de la Iglesia Dives In Misericordia haciendo un trabajo con TiO_2 en las fachadas.

Aunque la lista de proyectos parece ampliarse cada día, gran parte de lo edificado ha sido sólo con el efecto de mantener el color original de las fachadas, no considerando otros efectos que se han puesto de manifiesto en las pruebas de laboratorio.

Una característica particular observada en pruebas de laboratorio ha sido el efecto hidrofílico que presenta el dióxido de titanio comercial, aunque esta característica puede variar dependiendo de la composición y la estructura del compuesto. Algo esencial de este efecto ha sido la demostración de que, en ausencia de la luz, esta característica se inhibe, pero la presencia de una adición de sílice o un material de base sílica permite que la propiedad hidrofílica siga activa aun en la oscuridad [9, 26].

En forma general, se está tratando de probar su uso y aplicación en materiales de construcción, pero llevando un control de laboratorio para considerar las posibles variables que en un momento determinado puedan influir y, además, para conocer los fenómenos físico-químicos que ocurren dentro de cada material.

Las pruebas de auto-limpieza, aunque han sido un gran avance, tienen un trasfondo mayor y se debe a la propiedad de descontaminación que tienen los fotocatalizadores.

Entre los contaminantes más comúnmente analizados para la verificación de la auto-limpieza y de la descontaminación de medios que logra el TiO_2 , están los colorantes naturales (rodamina B), compuestos inorgánicos (NO_x , SO_x , CO, entre otros), hidrocarburos, pesticidas, algunas bacterias, virus y hongos [9].

Todo lo antes citado constituye pruebas sobre los beneficios que la adición del TiO_2 ha demostrado tener. Pero existen muchos factores que se podrían considerar antes de dar por hecho la factibilidad total de su uso e implantación. Uno de ellos es la consideración de emplear otro tipo de catalizadores como sería el ZnO, similar en propiedades al TiO_2 .

Algunos estudios han confirmado que el óxido de zinc exhibe mejor eficiencia que el TiO_2 en la foto-degradación de colorantes en medio acuoso. Kormann (1989) realizó un estudio comparativo de la actividad fotocatalítica del ZnO, Fe_2O_3 y TiO_2 . Los resultados mostraron que el ZnO y el TiO_2 , exhiben mucha más efectividad fotocatalítica que el Fe_2O_3 en la degradación de hidrocarburos clorados. Sin embargo, el ZnO tiene el inconveniente de que sufre fotocorrosión con luz UV inducida por auto-oxidación, y este fenómeno es uno de

los responsables del decremento en la actividad fotocatalítica del ZnO, hasta su inactivación.

En el caso de la auto-limpieza en materiales cementicios, prácticamente todos los estudios hechos hasta la fecha se centran en cementos blancos y con acabados totalmente lisos, mucho más fáciles de medir y de cuantificar, ya que son fácilmente coloreables con colorantes orgánicos y su medición de degradación de color es relativamente sencilla.

En el caso de otro tipo de cementos que no son blancos, los estudios y utilización se centra más en la degradación de los contaminantes que existen en el aire, sobre todo el NO_x. Por todo ello, se hace necesario realizar ensayos de auto-limpieza con distintos tipos de cemento, ya que no sólo los cementos blancos se ensucian, aparte de que las características de estos cementos son prácticamente las mismas y, por lo tanto, su comportamiento será similar en todos los casos, cosa que no ocurre con los cementos grises que tienen diferentes composiciones, dependiendo el tipo de cemento que se utilice.

1.5 Materiales base cemento, con baja expansión térmica.

Por otro lado, otra de las propiedades de gran interés en los materiales es la expansión térmica. La expansión térmica es la tendencia de la materia a los cambios en volumen, en respuesta de un cambio en la temperatura. Cuando una sustancia se calienta, sus partículas comienzan a moverse más y, por lo tanto, mantienen una mayor separación media [27].

La expansión térmica puede ser positiva o negativa; es decir, expansión o contracción de los materiales. Aunque los materiales que se contraen con el aumento de temperatura son inusuales; este efecto es limitado en tamaño, y sólo se produce dentro de los niveles de temperatura limitados. Al grado de expansión dividido entre el cambio en la temperatura se llama coeficiente de expansión térmica (CET) del material y, por lo general, varía con la temperatura.

A diferencia de los gases o líquidos, los materiales sólidos tienden a mantener su forma cuando se someten a la expansión térmica.

La expansión térmica generalmente disminuye con el aumento de energía de enlace, que también tiene un efecto sobre el punto de fusión de los sólidos, por lo que, los materiales de alto punto de fusión son más propensos a tener la expansión térmica más baja.

En general, se mide el cambio fraccional en tamaño por cambio de grado en la temperatura, a una presión constante. Varios tipos de coeficientes se han desarrollado: volumétrico, de área, y lineal, que se utilizan en función de la aplicación particular y las dimensiones que se consideran importantes. Para los sólidos, se mide el cambio a lo largo de una longitud, o de un área.

En el caso especial de materiales sólidos, la presión no afecta apreciablemente el tamaño de un objeto, así que, por lo general, no es necesario especificar que la presión se mantiene constante.

Los sólidos generalmente tienen coeficientes de expansión térmica que no varían significativamente en el intervalo de temperaturas en el que están diseñados para ser utilizados, por lo que no se requiere una precisión extremadamente alta y cálculos prácticos que se pueden basar en una constante promedio, el valor de coeficiente de expansión. Sin embargo, una variación considerable en su expansión provoca la presencia de fracturas en el material.

Para comprender la expansión térmica, se considera que un sólido consta de un arreglo regular de átomos mantenidos unidos por fuerzas eléctricas. Por su naturaleza, las fuerzas interatómicas se consideran elásticas. Para temperaturas en los intervalos comunes de la naturaleza, los átomos vibran respecto a sus posiciones de equilibrio, con una amplitud aproximada de 10^{-11} m y una frecuencia de 1013 Hz.

La separación promedio entre los átomos es de 10^{-10} m.; al aumentar la temperatura del sólido, los átomos vibran con amplitudes más grandes y la separación promedio entre ellos aumenta, dando por resultado que el sólido, como un todo, se expanda cuando aumente su temperatura. Si la expansión de cualquier objeto es lo suficientemente pequeña en comparación con sus dimensiones, el cambio de cualquier parte, largo, ancho o alto, dentro de una buena aproximación, es una función lineal de la temperatura.

Supongamos que la dimensión lineal de un cuerpo a una cierta temperatura, a lo largo de alguna dirección es (L). La longitud aumentará en una cantidad (ΔL) para un cambio de temperatura (ΔT). Experimentalmente, se demuestra que el cambio en la longitud es proporcional al cambio de temperatura y a la longitud inicial (L_0), siempre que

ΔT sea pequeña. Por lo tanto, la ecuación básica para la expansión de un sólido es: $\Delta L = \alpha L \Delta T$.

Donde la constante de proporcionalidad α se llama coeficiente de expansión lineal para un material dado, se mide en $^{\circ}\text{C}^{-1}$. El orden de magnitud de α , para los sólidos, es de 1 mm por m, cada 100°C . El coeficiente α se considera promedio porque, en general, varía con la temperatura.

Tabla 2. Coeficientes de expansión térmica a baja temperatura.

Material	α ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Material	α ($1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Invar (aleación Ni-Fe)	0.9	Agua (0°C)	-0.68
Vidrio (pyrex)	3.2	Agua (100°C)	7.5
Vidrio (común)	9	Alcohol etílico	1.1
Acero	12	Benceno	1.2
Concreto	12	Acetona	1.5
Cobre	17	Mercurio	1.8
Latón y bronce	19	Glicerina	4.8
Aluminio	25	Petróleo	9.0
Zinc	26	Gasolina	9.6
Plomo	29	Helio	36.66
Hielo (-10 a 0°C)	51	Aire	36.67

En la tabla 2 se presenta una lista de coeficientes de expansión térmica lineal para diferentes materiales. Estos datos son valores medios en el intervalo de 0 a 100°C (excepto el hielo). Para los gases, la presión es constante y baja (presión atmosférica o inferior). Se debe observar que α es positivo para esos materiales, pero pueden existir valores negativos de α , lo que significa que los materiales se contraen en alguna dirección cuando aumenta la temperatura.

Por lo general, los líquidos aumentan su volumen al aumentar la temperatura y tienen coeficientes de expansión volumétrica aproximadamente 10 veces más grandes que el de los sólidos, aunque el agua es la excepción a esta regla.

El agua es una sustancia compuesta por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno. A la temperatura ambiente es líquida, inodora, insípida e incolora y se considera fundamental para la existencia de la vida. No se conoce ninguna forma de vida que tenga lugar en ausencia completa de esta molécula, cuyo esquema se muestra en la Figura 13.

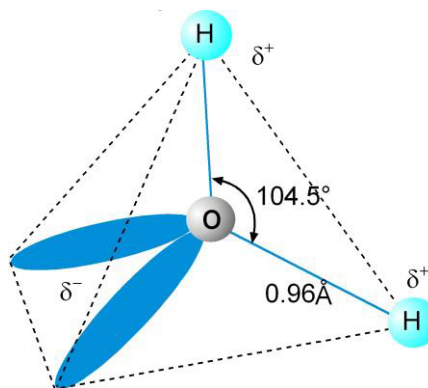


Figura 13. Estructura de la molécula de agua.

Casi todos los líquidos se expanden al calentarse, pero el agua hace todo lo contrario. El agua a 0°C se contrae al aumentar su temperatura hasta alcanzar los 4°C, valor a partir del cual comienza a expandirse, expansión que continúa hasta el punto de ebullición. Una cantidad dada de agua alcanza su volumen mínimo, y por lo tanto su densidad máxima a 4°C. La misma cantidad de agua tiene su volumen máximo y, por lo tanto, su densidad mínima en forma de hielo, por eso el hielo flota sobre el agua.

La explicación de este comportamiento tiene que ver con la estructura cristalina del hielo. Los cristales de la mayor parte de los sólidos están estructurados de tal manera que

el estado sólido ocupa un volumen menor que el estado líquido. Pero el hielo tiene cristales de estructura abierta, consecuencia de la forma angular de las moléculas de agua (Figura 13) y del hecho de que las fuerzas que unen las moléculas de agua son más intensas a ciertos ángulos.

Las moléculas de agua en esta estructura abierta ocupan un volumen mayor que en el estado líquido. Por eso el hielo es menos denso que el agua.

1.5.1 Expansión térmica negativa.

No todos los materiales se expanden al calentarse; existen algunos que al sufrir un calentamiento tienden a contraerse. Este fenómeno se conoce comúnmente como expansión térmica negativa, en lugar de "contracción térmica". Por ejemplo, el coeficiente de expansión térmica del agua cae a cero, ya que se enfría a aproximadamente 4°C y luego se convierte en negativo por debajo de esta temperatura, lo que significa que el agua tiene una densidad máxima a esta temperatura, y esto conduce a cuerpos de agua que mantienen la temperatura en sus profundidades más bajas, durante largos períodos de temperaturas bajo cero.

Otros materiales con expansión térmica negativa que han llamado la atención son los aluminosilicatos de litio (LAS), para su uso como material cerámico. Estos materiales alcanzaron una gran importancia a partir de los años cincuenta con los estudios de Roy et al, en los que se establecieron las relaciones de fases y los diagramas de equilibrio para el sistema de estos óxidos [28].

El diagrama (Figura 14) aparece fraccionado a temperaturas algo superiores a 1000°C. Por debajo de 375°C y a las presiones moderadas del experimento, se obtienen sólo fases hidratadas. Los cristales de α -espodumena se forman en el intervalo 375-500°C. La α -espodumena aparece como la fase estable por debajo de los 500°C, aunque quizás la petalita y la α -eucryptita reemplacen a la espodumena en las mismas condiciones.

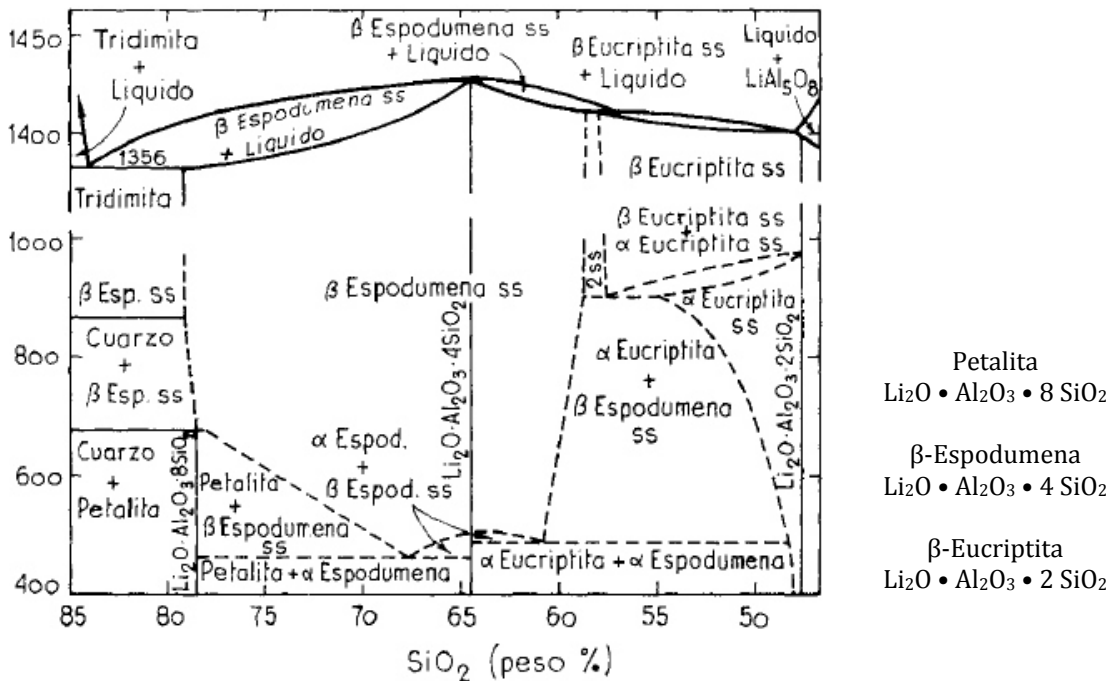


Figura 14. Diagrama de fases del sistema $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$ según Hatch y Roy [28].

Por encima de esta temperatura aparece la β -espodumena. La petalita pasa completamente a la forma de β -espodumena a $680 \pm 10^\circ\text{C}$. La α -espodumena parece ser solamente estable hasta $450\text{-}500^\circ\text{C}$.

Por otra parte, la inversión de la α -eucryptita a la forma β es muy lenta. Cuando ocurre esta inversión, tiene lugar un gran descenso en el índice de refracción y probablemente también en la densidad. La temperatura de transformación está reportada en $972 \pm 10^\circ\text{C}$.

En el diagrama se ve un amplio campo en que coexisten las estructuras de α -eucryptita y de α -espodumena; en cambio, el dominio en que coexisten la β -eucryptita y la β -espodumena es muy pequeño. A medida que las composiciones de las soluciones sólidas de la eucryptita se desplazan hacia la composición de la espodumena, disminuye la temperatura de transformación de α a β .

El comportamiento en la expansión térmica de los aluminosilicatos de litio es la característica más interesante de este sistema, ya que existen zonas en el diagrama de fases en las que el coeficiente de expansión térmica es prácticamente nulo o negativo [28].

El bajo coeficiente de expansión térmica (CTE o α) en este sistema se debe principalmente a las singulares características de las estructuras de la espodumena y de la eucryptita. Ambas son estructuras equivalentes a la estructura del cuarzo, en la que una porción de los iones de Si han sido reemplazados por iones Al, con iones Li compensando la carga en los canales principales de la estructura.

La fase β -eucryptita es la que muestra una mayor expansión negativa con la temperatura en el sistema LAS. Su comportamiento expansivo está directamente relacionado con su estructura. El α volumétrico de la β -eucryptita es negativo en un amplio intervalo de temperatura.

1.5.2 Ejemplos de materiales con baja expansión térmica.

Un factor que afecta a los materiales es la temperatura y, aunque generalmente se tiene por hecho que las reacciones fotocatalíticas no son afectadas de manera considerable

por los cambios de temperatura, el material empleado como base o soporte para el fotocatalizador sí se ve afectado [29].

En el caso de los materiales cementantes, existe un gran vacío de información sobre las afectaciones que pudiese tener en cuestiones térmicas la adición de un fotocatalizador sobre el material base cemento [30].

En el caso particular del coeficiente de expansión térmica del concreto, su análisis se basa en las afectaciones que puedan tener el contenido de humedad en la mezcla, la expansión térmica del material, la contracción o expansión en edades tempranas, los cambios de humedad relativa, el CET de los agregados, el volumen total, la edad del concreto, la temperatura ambiente, la relación agua/cemento y, en general, la composición de la mezcla [31].

La expansión térmica en diversos materiales regularmente se busca controlar con la presencia de un compuesto cuyo coeficiente de expansión térmica sea negativo; es decir, que el material sea resistente al choque térmico.

Un dato importante es la relación de compuesto con expansión térmica negativa y su proporción con el cemento, esto debido a que en muchos casos, disminuir la expansión térmica de un material requiere de grandes cantidades del compuesto que permita la reducción del CET [32]

Dentro de los materiales con expansión térmica negativa más estudiados se pueden mencionar el ZrW_2O_8 y el $LiAlSiO_4$. El primero ha sido empleado para reducir la expansión

térmica del concreto hasta un valor cercano a cero; sin embargo, se requiere agregarlo en una cantidad mayor que 60%, para disminuir considerablemente la expansión del concreto [33].

También se han empleado algunos compuestos orgánicos como el látex y la metilcelulosa para controlar la expansión del concreto. En particular, la adición de esta última ha permitido que con una adición relativa al peso del cemento de 0.4% se ha logrado la reducción del CET de $10 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ (Tabla 3).

En el caso del látex, se ha adicionado en un 20% en peso con relación al cemento, logrando un coeficiente de expansión térmica negativo de $-4 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$; lo cual, en comparación con la metilcelulosa, es una adición mucho mayor, aunque puede variar el resultado a diferentes temperaturas [34].

Tabla 3: Valores de la efectividad obtenida al agregar metilcelulosa y látex a elementos de cemento con relación al coeficiente de expansión térmica.

	30–35 °C	35–40 °C
Referencia	$10 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$	$10 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$
Con metilcelulosa	$-1 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1*}$	$-2 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1*}$
Con látex	$-4 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$	$-4 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$
* Aproximado debido al pequeño valor absoluto		

Existen diversos compuestos que presentan expansión térmica negativa, pero que no han sido probados en materiales de construcción; en específico, aquellos que son base cemento. En algunos estudios se ha buscado la viabilidad de dopar algunas sustancias para obtener mejores coeficientes de expansión térmica negativa. Ejemplo de ello es el realizado por G. J. Sheu y J. C. Chen, que analizaron las posibilidades y variantes de dopar el

aluminosilicato de litio ($\text{Li}_{1+x}\text{AlSiO}_{4+x/2}$) con TiO_2 , obteniendo tabletas de este compuesto y estudiando sus características propias, aunque con buenos resultados en una composición del 3% de TiO_2 , esto no se ha probado sobre algún otro material [35].

De esta manera, con la información previamente mencionada, se considera importante llevar a cabo el desarrollo de materiales base cemento que contengan una proporción de fotocatalizador (TiO_2 , ZnO) para impartirle la propiedad de auto-limpieza. Además, se busca que con la ventaja de que al contener también un compuesto con expansión térmica negativa (LiAlSiO_4), logre disminuir su expansión considerablemente, lo que abriría un gran número de potenciales aplicaciones.

Por tal motivo, en este trabajo se estarán desarrollando materiales base cemento, que incorporen tanto un material fotocatalizador como son el TiO_2 , ZnO , TiO_2/SiC y ZnO/SiC , y un material con expansión térmica negativa, como es el LiAlSiO_4 . Estos se agregarán en una proporción mínima a la mezcla cementante, para no afectar sus propiedades mecánicas, ni tampoco su proceso de hidratación para complementar el fraguado.

CAPÍTULO 2: Protocolo

2.1 Justificación

El estudio y análisis de la aplicación de un material fotocatalítico en materiales para la construcción es una rama de la tecnología que actualmente está en desarrollo con el objetivo de producir materiales que requieran un menor mantenimiento. Esto debido a la propiedad de auto-limpieza que el fotocatalizador genera sobre el material en el que ha sido adicionado. Éste es un beneficio para el material mismo, así como para el medio circundante, debido a la propiedad descontaminante que el fotocatalizador ejerce sobre su entorno.

Adicionalmente, la incorporación de compuestos con expansión térmica negativa ayuda a que un material con un alto índice de expansión térmica pueda reducir su valor de expansión a niveles en los que su comportamiento no presente contracciones y expansiones ante los efectos que ejerce la temperatura del medio que lo rodea, permitiendo con ello una mayor durabilidad del material.

2.2 Hipótesis

La incorporación de un fotocatalizador y un material cerámico permitirá obtener un material cementante con propiedades de auto-limpieza y baja expansión térmica, para extender la vida útil y su aplicación en construcciones sustentables.

2.3 Objetivos de esta investigación.

Objetivo general: desarrollar materiales base cemento, que sean auto-limpiantes y tengan baja expansión térmica para su mayor vida útil y su durabilidad.

Objetivos específicos:

- Obtener y caracterizar integralmente las materias primas a utilizar durante este trabajo de investigación.
- Desarrollar las mezclas cementantes que contengan el material fotocatalítico de TiO_2 , ZnO , SiC-TiO_2 y SiC-ZnO .
- Evaluar la actividad fotocatalítica de los materiales cementantes sobre el colorante Rodamina B.
- Desarrollar las mezclas cementantes que contengan el material fotocatalítico de TiO_2 , ZnO , SiC-TiO_2 y SiC-ZnO , y el material con expansión térmica negativa, LiAlSiO_4 .
- Evaluar la variación de expansión térmica en los materiales cementantes y medir la efectividad de la reducción de la expansión térmica.
- Evaluar fotocatalíticamente los materiales en que se haya presentado baja expansión térmica.
- Determinar la resistencia a la compresión de todos los materiales cementantes desarrollados.
- Relacionar las propiedades fisicoquímicas, mecánicas, fotocatalíticas y térmicas de los materiales cementantes.
- Determinar las mejores condiciones de preparación de los materiales cementantes auto-limpiantes y con baja expansión térmica.

Capítulo 3: Método experimental

3.1 Preparación de los materiales utilizados como materia prima para la elaboración de morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica

Para la elaboración de los morteros se seleccionó un cemento Portland ordinario (CPO 40). Éste es una mezcla de materiales inorgánicos que fragua y desarrolla resistencia mecánica por medio de una reacción química con el agua lo cual forma productos capaces de endurecer.

Como agregado ligero se seleccionó una arena sílica estándar, de baja o nula absorción, y granulometría controlada.

Como material fotocatalítico se utilizó dióxido de titanio (TiO_2) Degussa P25, óxido de zinc (ZnO) comercial, y materiales compuestos que consisten de dióxido de titanio sobre carburo de silicio (SiC-TiO_2) y de óxido de zinc sobre carburo de silicio (SiC-ZnO).

Además, para la etapa final, se propuso que a las mezclas con mayor eficiencia fotocatalítica se les adicionara un material cerámico con coeficiente de expansión térmica negativo, para cuyo caso se seleccionó un aluminio-silicato de litio (LiAlSiO_4), esto con el fin de controlar y disminuir los cambios volumétricos del mortero obtenido.

Los materiales compuestos, SiC-TiO₂, SiC-ZnO y el LiAlSiO₄ fueron preparados en el laboratorio como se describe a continuación.

3.2 Síntesis de los compuestos: SiC-TiO₂ y SiC-ZnO.

Se llevó a cabo la síntesis de materiales compuestos de SiC-TiO₂ y SiC-ZnO, mediante molienda mecánica, cuyo objetivo consiste en reducir el tamaño de partícula y modificar la morfología. Después, se desarrollaron las mezclas entre diferentes compuestos dando lugar a la aparición de uniones, y se formaron partículas nuevas mediante la combinación de los constituyentes.

La proporción utilizada en las mezclas para los diferentes materiales fue de un 20% de fotocatalizador y un 80% de sustrato, considerando como material fotocatalítico el TiO₂ y el ZnO, y el SiC como sustrato. Todos los materiales utilizados pueden adquirirse comercialmente.

El TiO₂ utilizado tiene un valor de área superficial de 50.2 m².g⁻¹ y un tamaño de partícula de 20 nm. En el caso del SiC, éste presentó un valor de área superficial de 29.5 m².g⁻¹ y un tamaño de partícula de 20 μm. Mientras que el ZnO empleado tiene un valor de área superficial de 6.81 m²/g y un tamaño de partícula < 100 nm.

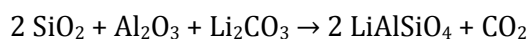
Para llevar a cabo la molienda, el material se colocó en un contenedor de ágata en forma de tambor, en el cual se agregó una mezcla de 0.2 g de fotocatalizador (TiO₂ o ZnO) con 0.8 g de SiC. Se añadieron 10 g de bolas cerámicas de alúmina de 2 diferentes tamaños, para aumentar la eficiencia en la molienda.

Se colocó el contenedor dentro del molino planetario de bolas, marca Pulverisette 7 FRITSCH, para iniciar el proceso de molienda, durante un lapso de 3 minutos, con una velocidad de 400 rpm.

Una vez realizada la molienda, al polvo obtenido se le realizó un tratamiento térmico en un horno tipo mufla a 450°C, durante 2 horas. Una vez calcinado el material, se procedió a su caracterización, a través de diferentes técnicas analíticas, que se mencionarán posteriormente.

3.3 Síntesis del aluminosilicato de litio (LiAlSiO₄).

Para la síntesis del aluminosilicato de litio (LiAlSiO₄), se mezcló en un mortero de ágata, óxido de silicio (SiO₂), grado industrial, con 6% retenido en la malla 325, óxido de aluminio (Al₂O₃) y carbonato de litio (Li₂CO₃), con base en la siguiente relación estequiométrica.



Las condiciones experimentales empleadas para la preparación del LiAlSiO₄ fueron las reportadas por Juárez Ramírez et al. (2006), donde se reporta en detalle el tratamiento térmico para este compuesto.

Primeramente, se colocaron en un mortero de ágata todos los reactivos, en las cantidades adecuadas, para preparar 30 gramos de LiAlSiO₄. Una vez mezclados los reactivos, éstos fueron colocados en un crisol de platino y posteriormente en un horno de

tipo mufla a 900°C, durante 8 horas, para conseguir la descarbonatación del Li_2CO_3 ; posteriormente, a 1000°C durante 10 horas, para comenzar el proceso de reacción.

Posteriormente, se sacaron de la mufla los reactivos, para realizar una molienda manual en un mortero de ágata, para conseguir una mayor homogeneidad y reactivación de la mezcla.

Se volvió a colocar el material a 1100°C durante 12, horas con una rampa de calentamiento de 10°C/minuto. Posteriormente, se dejó enfriar el material hasta la temperatura ambiente y se procedió a moler el cerámico obtenido, para analizarlo por DRX método de polvos, en vista de que todavía no reaccionaban todos los componentes, por lo que no estaba formada totalmente la fase deseada. Se procedió nuevamente a tratar el material térmicamente, a una temperatura de 1200°C, durante 12 horas.

Con este tratamiento final se obtuvo la fase pura que se esperaba ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$). La caracterización del LiAlSiO_4 se llevó a cabo a través de diferentes técnicas analíticas, las cuales se mencionarán posteriormente.

3.4 Elaboración de morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica.

El desarrollo de los morteros auto-limpiantes se llevó a cabo mediante la mezcla de las materias primas, de acuerdo con la proporción indicada en la tabla 4. Las proporciones empleadas para la preparación de los morteros se basaron en la norma ASTM C-109.

Además, en este caso, se realizó la incorporación de los fotocatalizadores antes mencionados, en sustitución de un porcentaje en masa del cemento.

Tabla 4. Proporcionamiento para la mezcla de referencia.

Mezcla 1 (Referencia)			
Materiales	Masa (g)	Densidad (gr/cm ³)	Volumen (ml)
Cemento (CPO 40)	500.00	3.08	162.34
Arena silica	1375.00	2.67	514.98
Agua	242.00	1.00	242.00
Densidad teórica		2.1	

Para este proyecto se propuso usar cantidades de fotocatalizador menores que el 5% como son 0.5 y 1% teniendo mezclas para los casos de TiO₂ y ZnO de un 5%, solo para comparación con la bibliografía. Las cantidades seleccionadas de material fotocatalítico se consideraron a partir de los reportes en la bibliografía, donde se ha empleado el TiO₂ en cantidades que van desde el 5 al 20% en peso, en relación con el material cementante. En este caso, además consideramos que lo importante es el tamaño de partícula y no la cantidad adicionada.

Por otro lado, el desarrollo de los morteros con baja expansión térmica se llevó a cabo seleccionando aquellas mezclas que tuvieron mayor eficiencia fotocatalítica en las pruebas de reacción con el colorante Rodamina B. Se prepararon las mezclas con las proporciones mencionadas en la tabla 4, con la diferencia de que, en este caso, se les agregó un porcentaje en masa de LiAlSiO₄, en sustitución del agregado de la mezcla. Lo anterior debido a que el agregado se considera como un material inerte y es el material con mayor influencia sobre el comportamiento térmico lineal del material.

Se procuró no cambiar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas obtenidas previamente en los morteros de las mezclas de fotocatalizador-cemento. La sustitución se realizó con base en un cálculo teórico, considerando la disminución del coeficiente de expansión térmica, pero sin tener que adicionar porcentajes que excedieran las cantidades iniciales de materia prima de la mezcla de referencia.

Con las adiciones y consideraciones anteriores, se desarrolló un total de 11 mezclas iniciales, más la de referencia; tal como se muestra en la tabla 5. Al ser 4 sistemas diferentes, se consideró una mezcla de cada sistema (con mayor eficiencia fotocatalítica) para la incorporación de LiAlSiO_4 . Dentro de estas mezclas se incluyó una que contenía la adición del aluminio-silicato de litio en la mezcla de referencia.

Tabla 5 Resumen de mezclas elaboradas.

Nomenclatura	Propiedad de auto-limpieza		Los morteros con mejor efecto fotocatalítico	Baja expansión térmica
	Fotocatalizador	Porcentaje		Porcentaje de LiAlSiO_4
M1-std	-	0%	5.0 % en sustitución del agregado	
M2	TiO_2	0.5 %		
M3		1.0 %		
M4		5.0 %		
M5	ZnO	0.5 %		
M6		1.0 %		
M7		5.0 %		
M8	SiC-TiO_2	0.5 %		
M9		1.0 %		
M10	SiC-ZnO	0.5 %		
M11		1.0 %		

Para la evaluación de las diferentes propiedades de cada mezcla se elaboraron cubos de 50 mm, siguiendo el procedimiento de elaboración similar al citado en la norma ASTM C-109. Se preparó 1 litro de mezcla para cada porcentaje de material fotocatalítico, con la finalidad de obtener 6 especímenes por mezcla.

Una vez que se pesó el material, se procedió al mezclado en una mezcladora, según se especifica en la norma ASTM C-305. Las variaciones realizadas al proceso de mezclado consistieron en la incorporación del material fotocatalítico, el cual se decidió incorporar una vez colocada el agua de reacción en el bol de la mezcladora. Esto debido a su baja densidad, comparada con los demás materiales añadidos a la mezcla y con ello a su dificultad de mezclado.

Posteriormente se adicionó el cemento y el agregado fino, siguiendo el método y los tiempos indicados en el proceso de mezclado de la norma ASTM C-109. Una vez mezclado el material, se realizó la conformación de los cubos de 50 x 50 mm.

Los cubos de mortero se desmoldaron después de 24 horas, con excepción de algunos que no habían alcanzado el fraguado y en cuyo caso se esperó que las muestras presentaran la rigidez que el fraguado les confiere para ser desmoldadas.

Una vez desmoldados los cubos, se procedió a su colocación en un recipiente con agua para el proceso de curado, donde quedaron sumergidos por un periodo de 28 días con una temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

Al concluir los 28 días del tiempo de curado de los especímenes realizados, se seleccionaron 3 cubos de cada mezcla para su ensaye a compresión y a los 3 especímenes restantes se les cortó en 4 secciones iguales, para realizar las pruebas de caracterización, porosidad, pruebas fotocatalíticas y medición de la expansión térmica.

Con el objetivo de conformar morteros con baja expansión térmica, del total de mezclas evaluadas en fotocatalisis, se seleccionó una mezcla por cada material fotocatalítico. La de la concentración más efectiva sirvió para medir la reacción de degradación del colorante Rodamina B.

Como se mencionó anteriormente, el aluminio-silicato de litio se incorporó a la mezcla en sustitución de un porcentaje en masa del agregado fino. Esto debido a que es el agregado el material con mayor influencia sobre el comportamiento de expansión térmica del mortero, y es por ello que durante el proceso de mezclado se añadió el LiAlSiO_4 junto con la arena sílica.

De igual forma que en los morteros anteriores, se conformaron cubos de 50 X 50 mm, con una relación de agua/cemento de 0.48 y con un periodo de curado de 28 días, posterior al desmolde. Estos cubos fueron sumergidos en agua con una temperatura ambiente controlada de $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

3.5 Caracterización estructural de la materia prima y los morteros preparados.

3.5.1 Difracción de rayos-X en polvos (DRX).

La difracción de rayos X es una técnica que se explica por medio de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos X de una determinada longitud de onda con una sustancia cristalina. La difracción de rayos X en una muestra policristalina permite la identificación de fases cristalinas.

Por tal motivo, en el presente trabajo todos los materiales preparados fueron caracterizados mediante la técnica de difracción de rayos X en polvos, utilizando un difractómetro Bruker, modelo D8 Advance, con radiación $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$. Este equipo tiene adaptado un detector Vantec de alta velocidad. Los difractogramas se obtuvieron en un intervalo de 2θ de 10 a 70° .

Todos los materiales de TiO_2 , ZnO , SiC-TiO_2 , SiC-ZnO y LiAlSiO_4 , fueron analizados en forma de polvo por DRX, para su caracterización. Los dos primeros se obtuvieron comercialmente, y los otros tres materiales se analizaron después de ser tratados térmicamente. Las muestras de mortero tuvieron que ser molidas para ser analizadas por esta técnica.

3.5.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB).

La microscopía electrónica de barrido permite la observación y caracterización de materiales orgánicos e inorgánicos en escala nanométrica y micrométrica. Permite también obtener la composición química mediante el microanálisis de rayos-X de energía dispersiva (EDS), que está acoplado al equipo.

En este caso, los análisis se realizaron en un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés) de bajo vacío JEOL JSM-6490LV equipado con una sonda de microanálisis de dispersión de energía de rayos X (EDS).

Los materiales analizadas por MEB se prepararon como se describe a continuación. Todos los materiales empleados como materia prima fueron analizados en forma de polvo,

mientras que las muestras de mortero fueron analizadas en pequeñas piezas cortadas de tamaño aproximado de 4 x 3 mm. Las muestras en polvo fueron colocadas sobre cinta de carbón, que estaba adherida a un portamuestra de aluminio.

En el caso del LiAlSiO_4 y los morteros, se cortaron en forma de placas, con una dimensión no mayor que 4 mm y una altura de 3 mm. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en el porta-muestras sobre cinta de carbón y recubiertas con una fina capa de oro-paladio (Au-Pd). Después, se colocaron dentro de la antecámara del equipo para su análisis. Las condiciones de operación del microscopio fueron las siguientes: voltaje de aceleración de 20 kV, con una distancia de trabajo de 11 mm, y un tamaño de haz de 60. El análisis por EDS se llevó a cabo por mapeo, durante un tiempo de 60 a 90 segundos, como mínimo.

3.6 Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de la materia prima y de los morteros preparados

Los parámetros medidos en cada una de las mezclas realizadas consistieron en las siguientes pruebas: en estado fresco se midió el tiempo de fraguado y en estado endurecido la porosidad, por el método de Arquímedes y el área superficial por fisorción de nitrógeno (S_{BET}). Además, se determinó el E_g de los diferentes morteros mediante la técnica de espectroscopía de UV con reflectancia difusa. Cada uno de los análisis y mediciones se describen a continuación.

3.6.1 Tiempo de fraguado.

Se determinó el tiempo de fraguado de las mezclas de concreto, mediante la resistencia a la penetración, norma (NMX C 161). Esta Norma Mexicana establece el método para la determinación del tiempo de fraguado de las mezclas de concreto, con revenimiento mayor que cero, mediante el mortero obtenido que pasa la criba 4,75 mm (No. 4) de la mezcla. Aunque para el caso del presente trabajo, como se evalúan morteros, no fue necesario cribar el material.

La muestra debe obtenerse de acuerdo con la Norma NMX C 161. Los recipientes para los especímenes de mortero deben ser rígidos, estancos, no absorbentes, de sección transversal circular o rectangular y sin aceitar.

Éstos deben permitir una superficie del mortero suficiente para efectuar lecturas de 10 penetraciones, sin que haya alteración entre ellas.

La distancia entre las penetraciones debe ser de por lo menos dos veces el diámetro de la aguja que se emplee.

El equipo a utilizar es un penetrómetro que debe ser un aparato equipado con resorte, sistema hidráulico o mecánico, con una capacidad mínima de 588,2 N (60 kg) y una precisión mínima de 9,8 N (1 kg).

Se debe disponer de agujas removibles y cada vástago de las agujas debe tener una marca periférica a una distancia de 25 mm de la superficie de apoyo. La longitud de la

aguja con área de $0,16 \text{ cm}^2$ no debe ser mayor que 80 mm, con objeto de reducir la flexión a un mínimo.

La preparación de la muestra consiste en que el mortero se coloca dentro de los moldes y se compacta mediante varillado, el que se efectúa haciendo penetrar la varilla por el extremo redondeado sobre el mortero, una vez cada 6 cm^2 del área expuesta del espécimen y se distribuyen los golpes uniformemente sobre la superficie expuesta. Una vez terminada la compactación, se golpean ligeramente las paredes del recipiente con la varilla de compactación, a fin de eliminar los vacíos que haya dejado tal varilla y para nivelar la superficie libre del mortero.

Después de la preparación completa del espécimen, la superficie del mortero debe quedar aproximadamente 10 mm abajo del borde superior del recipiente, para dejarle un espacio al agua de sangrado que permita eliminarla, evitando el contacto entre la superficie del mortero y la cubierta protectora.

Se debe eliminar el agua de sangrado de la superficie de los especímenes de mortero, con pipeta o con un instrumento adecuado, antes de efectuar la prueba de penetración.

Para el ensayo, se le coloca al penetrómetro una aguja del diámetro adecuado, de acuerdo con el grado de endurecimiento del mortero y se pone en contacto la superficie de apoyo de la aguja con la del mortero.

Gradualmente y en forma uniforme, se aplica en el aparato una fuerza vertical hacia abajo, hasta que la aguja penetre hasta una profundidad de 25 mm, como lo indica la marca grabada en la aguja.

El tiempo requerido para la penetración de 25 mm debe ser aproximadamente de 10 segundos; se registra la fuerza requerida y el tiempo de aplicación, medido como el lapso transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el de la resistencia a la penetración. En las siguientes penetraciones, se debe cuidar de no efectuarlas sobre áreas del mortero que hayan sido alteradas por penetraciones previas.

La penetración inicial se debe hacer después de 2 ó 3 horas. Las pruebas subsecuentes se pueden efectuar en intervalos de 1 hora, hasta que el incremento en la resistencia de penetración indique que son aconsejables intervalos más cortos o más largos.

El número de penetraciones que se deben efectuar en cada prueba de endurecimiento en un mínimo de 6 determinaciones de resistencia de penetración, hasta que se alcance una resistencia a la penetración mayor que 280 kg/cm².

La resistencia a la penetración debe ser el promedio de 3 ó más determinaciones en kg/cm², que es el cociente de la fuerza requerida para alcanzar una penetración de 25 mm de la aguja entre el área de la superficie de contacto de la misma.

3.6.2 Porosidad.

La medición de la porosidad se obtiene por medio del método de Arquímedes, que consiste en el desplazamiento de un líquido de densidad conocida que, para el caso de este estudio, se utilizó agua destilada.

El test consiste en el secado de la muestra en un horno a una temperatura de 110°C; posteriormente se deja enfriar la muestra en un desecador hasta que alcance la temperatura ambiente y se procede a tomar el peso de la muestra, dicho proceso se repite hasta alcanzar un valor constante en la muestra analizada. Una vez obtenido el peso seco de la muestra, se procede a colocarlo en agua por un periodo de 6 horas; esto con la finalidad de obtener un peso con el agua de absorción de la muestra.

En una tercera etapa se saturan las muestras, lo cual se puede realizar de 2 formas diferentes: la primera de ellas es la colocación de la probeta a medir en agua hirviendo, manteniendo el punto de ebullición por un periodo de tiempo constante, superior a las 4 horas, sin permitir que la cantidad de agua disminuya del nivel de la muestra. Otra forma de realizar dicha saturación es mediante el uso de una bomba de vacío y después la incorporación de agua que se ha hervido previamente. Posteriormente, se toma el peso de la muestra, pero suspendido en un recipiente con agua, para medir el peso del desplazamiento de dicha cantidad de agua.

Además, en esta etapa se toma la temperatura del líquido para posteriormente conocer la densidad del agua a esa temperatura y emplearla en las ecuaciones correspondientes. Como cuarto punto, se toma el peso de la muestra, pero secando su

superficie, es decir, un peso saturado superficialmente seco. Según la norma ASTM C 642 método de prueba estándar para la densidad, la absorción y los huecos en el concreto endurecido.

Las muestras evaluadas se obtuvieron del corte de secciones de los cubos de mortero. Cada probeta obtenida fue de una dimensión de 2.5 X 2.5 X 5 cm, el recipiente utilizado fue un vaso de precipitado de 250 mL, por sus dimensiones, para evaluar el test en una balanza analítica.

3.6.3 Determinación del E_g .

Conocer su valor permite predecir si el material presentará su mejor eficiencia fotocatalítica bajo radiación UV o luz visible. Ésta es una manera de medir el E_g de los semiconductores a través de su espectro de absorción de radiación en el nivel de 200 a 700 nm. La pendiente del espectro de absorción se relaciona directamente con el E_g , pues su presencia se atribuye a la transición fundamental del semiconductor, al pasar el electrón de la banda de valencia a la banda de conducción. Los espectros de absorbancia de cada uno de los semiconductores se obtuvieron en un espectrofotómetro Ultravioleta-Visible Perkin-Elmer Lambda 35, equipado con una esfera de integración para análisis de sólidos (análisis de reflectancia difusa).

Los valores de energía de banda prohibida (E_g) del material compuesto de SiC-TiO₂ y SiC-ZnO preparado por el método de molienda mecánica se calculó con la ecuación derivada a partir del método propuesto por J. Ibáñez et al [36]. Para ello se traza una línea

recta sobre la pendiente más pronunciada de la curva de absorbancia frente a la longitud de onda, buscando la intersección de las dos líneas tangentes.

$$E_g = h\nu_g = \frac{hc}{\lambda_g} = (6.626 \times 10^{-34} \text{ Js})(20.998 \times 10^{17} \text{ nm}^{-1}) = \left(\frac{1240}{\lambda_g}\right) \text{ eV}$$

Donde λ_g (longitud de onda) es expresada en nanómetros.

Para determinar el valor de energía de banda prohibida de los morteros preparados, se procedió a obtener placas de 5.0 X 2.5 X 0.3 cm, que fueron medidas en un espectrofotómetro con ayuda de una esfera de integración. Las mediciones se realizaron en un nivel de longitud de onda λ de 200 a 700 nm, obteniendo los valores de absorbancia y de reflectancia difusa, en modo de absorbancia a un tamaño de paso óptico de 1 nm. Además, en modo de reflectancia difusa para comparar los valores obtenidos aplicando la teoría de Kubelka-Munk.

3.6.4 Área superficial específica (S_{BET}).

Los materiales sintetizados y los morteros fueron caracterizados mediante la técnica de fisisorción de nitrógeno, para determinar el área superficial de cada uno de ellos. Este análisis es fundamental para el control de la velocidad de interacción química entre diversas sustancias (sólidas, líquidas y gaseosas) ya que el resultado permite inferir sobre el área de contacto que presenta el material, la cual es uno de los factores más importantes para el mejoramiento de la actividad fotocatalítica del material.

El análisis se llevó a cabo en un Analizador de Área Superficial NOVA 2000e Quantachrome Instruments, utilizando nitrógeno líquido como adsorbato a la temperatura de 77°K.

Para estos análisis, en el caso del material en polvo (SiC-TiO₂, SiC-ZnO y LiAlSiO₄), se colocaron 150 mg de material dentro de una celda corta (aprox. 10 cm de largo) de cuarzo sin bulbo. La celda con el polvo se sometió a desgasificación a 300°C durante 4 horas.

Se procedió de forma similar para el caso de los morteros, aunque estas muestras fueron colocadas como material sólido, colocando en las celdas probetas de 4 x 4 x 10 mm de alto.

Después se llevó a cabo el análisis de adsorción/desorción midiendo un total de 40 puntos de P/P₀ desde 0.025 hasta 1.0, los cuales caen dentro del conjunto de presiones donde se cumple la ecuación S_{BET} .

3.7 Evaluación de las propiedades térmicas y mecánicas

3.7.1 Evaluación del comportamiento de expansión térmica de los morteros

El valor del coeficiente de expansión térmica se midió a través de un dilatómetro Orton™, donde se monitorea una señal de desplazamiento, en función del tiempo (coincidente con temperatura). El dilatómetro usa la longitud inicial de la muestra y

convierte cada movimiento absoluto en un movimiento en porcentaje. El porcentaje de cambio lineal (expresado como PLC) inicial del ensaye es cero.

Todos los demás valores de PLC's, sean de expansión o contracción, se comparan con el valor inicial de la pieza.

Para ciertas aplicaciones, se requiere el PLC para un nivel de temperatura, y este valor se obtiene a través de una simple ecuación aritmética.: $PLC_{(T1 \text{ a } T2)} = PLC_{T2} - PLC_{T1}$.

En el caso de expansiones no lineales, el PLC se determina entre las condiciones del punto inicial y final de la curva; pero en algunas ocasiones se requiere obtener el PLC por niveles de temperatura, en cuyo caso se calcula el PLC de la siguiente forma:

$$PLC_{(T1 \text{ a } T2)} = 100\% * (\text{Longitud}_{a T2} - \text{longitud}_{a T1}) / \text{longitud}_{\text{inicial}}$$

O en caso de tener los valores de PLC a diferentes temperaturas:

$$PLC_{(T1 \text{ a } T2)} = (PLC_{a T2} - PLC_{a T1})$$

Un PLC positivo indica expansión y un PLC negativo indica contracción.

Las características de expansión térmica de los materiales no son lineales, por lo que es importante especificar el nivel de temperatura en que el PLC fue calculado. Aunque en la práctica común las características de expansión térmica se expresan como un

coeficiente de expansión térmico (CTE). El CTE se determina dividiendo la diferencia de PLC sobre un nivel específico de temperatura.

$$\text{CTE}_{(T1 \text{ a } T2)} = (\text{PLC}_{\text{a}T2} - \text{PLC}_{\text{a}T1}) / 100$$

La diferencia de PLC es muy pequeña y las unidades de longitud se anulan. La diferencia de temperatura es muy larga, en comparación, y las unidades son en °C o °F. El resultado de esta simple división es un número muy pequeño, descrito en notación científica y es usualmente descrita por cada grado de temperatura.

Para la medición del CTE se cortaron muestras de 2.54 cm X 0.6 m X 0.6 cm, de los cubos de morteros, esto con la finalidad de colocar las muestras dentro del equipo utilizado para medir el porcentaje de cambio lineal (PLC) de las muestras, según los cambios de temperatura programados.

Para el caso de este trabajo, las piezas evaluadas se midieron en un nivel de temperatura ambiente (25°C) a 200°C con una rampa de calentamiento de 5°C por minuto. Los valores obtenidos se comparan contra valores teóricos obtenidos a partir de fórmulas para predecir el coeficiente de expansión térmica de materiales compuestos. Según las fórmulas de Kelly para un material poroso:

$$\text{CET comp} = ((\text{CET1} * (\text{V1} - \text{V1P})) + ((\text{CET2} * (\text{V2} - \text{V2P})) + ((\text{CET3} * (\text{V3} - \text{V3P})))$$

3.7.2 Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión es una de las propiedades mecánicas evaluadas en los materiales de construcción, debido a que en su vida útil estarán éstos sometidos a situaciones de carga.

Se evalúa por medio de un ensaye a compresión en donde se ensayan 2 ó más especímenes por cada mezcla, para obtener un valor promedio de la resistencia alcanzada por dicha mezcla, a cierto periodo de tiempo. Dicho ensaye debe tener una variación menor que el 8%, para ser aceptado.

En este caso se ensayaron 3 cubos en una prensa ELE international tomando los valores obtenidos de kgf de carga total y se dividió dicho valor entre el área de aplicación de la carga que para este caso eran 25 cm², obteniendo con ello el valor de resistencia a compresión por cm² del mortero. El procedimiento se debe repetir para cada una de las mezclas a evaluar.

3.8 Evaluación de la actividad fotocatalítica en la degradación de Rodamina B.

La propiedad auto-limpiante de los morteros de cemento adicionadas con material fotocatalítico se determinó mediante la medición de la degradación de un colorante orgánico llamado Rodamina B. La evaluación se realizó en un montaje experimental elegido para la exposición solar de las muestras.

Las probetas conformadas para realizar las mediciones de degradación de colorante consistió en secciones de $\frac{1}{4}$ de los cubos de 5 x 5 cm; es decir, prismas de 2.5 x 2.5 x 5 cm, las cuales se cortaron utilizando una cortadora de precisión Isomet 1000, a una velocidad de corte de 200 rpm, para no alterar la estructura de las muestras.

La relación agua-cemento de las muestras era de 0.48 y cada pieza con un volumen de 31.25 cm³, considerando que cada espécimen a evaluar contenía teóricamente 0.07 g, 0.15 g y 0.78 g de material fotocatalítico, en el caso de las sustituciones de 0.5, 1.0 y 5.0% de material fotocatalítico por cemento.

Además de las probetas preparadas en forma de prismas, se obtuvieron placas de 2.5 x 5.0 x 0.3 cm de espesor, para evaluar la degradación del colorante en la superficie de la muestra.

Para la medición de la degradación de la Rodamina B. las probetas fueron colocadas dentro de un frasco de vidrio con tapa, donde se colocó, además, una solución de 100 ml de Rodamina B a 5 ppm.

Se colocaron los frascos a la intemperie, para recibir la radiación solar de forma directa, colocados, además, en una zona sin intervención de objetos que les produjeran sombra a las probetas para evitar interferencias de la radiación solar.

El tiempo de exposición de las probetas fue de 8 horas, esto debido a buscar un periodo de mayor incidencia solar; es decir, en horario solar comprendido de las 8:00 am a las 4:00 pm, colocando la exposición de la muestra entre un periodo comprendido de 4

horas a ambos puntos del cenit solar, ya que al ser un prisma el que está en exposición de forma vertical se planteó periodos de tiempos iguales de radiación para las caras del prisma inmerso en la solución. Además de las probetas preparadas en forma de prismas, se obtuvieron placas para evaluar la degradación del colorante en la superficie de la muestra. Estas placas se saturaron en la solución de Rodamina B, por un periodo de 12 horas y posteriormente expuestas a la radiación solar de forma directa, por un periodo de 8 horas.

La toma de muestras, en el caso de las probetas expuestas en solución, se realizó con una pipeta, tomando 3 mL a cada hora, desde el tiempo cero, midiendo la absorción del colorante en un espectrofotómetro UV-VIS en un rango de la longitud de onda 400 a 700 nm, colocando la solución en celdas de cuarzo.

En el caso de las muestras en placas se realizó la medición por medio de una esfera de integración, donde se colocó la placa para medir la degradación del color por medio de los valores de absorción. Esta prueba se realizó de igual forma que la anterior, en periodos de 1 hora.

Con el objetivo de realizar comparaciones, se calculó la concentración del colorante partiendo de una concentración inicial a tiempo cero y se procedió a realizar el mismo cálculo para cada muestra tomada con respecto a la inicial.

Se determinó el tiempo de vida media y se calculó la constante de velocidad, utilizando la siguiente ecuación. $-(\ln[C] - \ln[C_0]) = kt$. Las gráficas son logaritmo de la concentración residual versus tiempo y $1/(concentración\ residual)$ versus tiempo.

Capítulo 4: Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la realización del presente trabajo de investigación. La mayoría de los materiales usados se emplearon tal como se consiguen comercialmente y sólo se sintetizaron algunos materiales compuestos para etapas específicas del proyecto.

El cemento empleado para la elaboración de los morteros se analizó por fluorescencia de rayos X, obteniendo los resultados presentados en la siguiente tabla.

Tabla 6: Composición de óxidos del cemento Portland Ordinario (CPO 40) utilizado.

Compuesto	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P.P.I.
Porcentaje	63.95	20.2	4.41	1.81	1.53	0.52	0.46	5.05	0.56	1.51

El tamaño promedio de partícula del cemento fue de 20 µm. Para el caso de la arena utilizada como agregado, se empleó arena sílica estándar según la norma ASTM C-778, con un tamaño promedio de 490 µm.

Como material fotocatalítico se usó dióxido de titanio Degussa P25, que tiene un tamaño promedio de partícula de 20 nm y óxido de zinc comercial, con un tamaño promedio < 100 nm.

Además de los materiales ya mencionados, se usaron materiales compuestos de SiC-TiO₂ y SiC-ZnO, preparados por molienda mecánica, así como del LiAlSiO₄, sintetizado por estado sólido, los cuáles se describen a continuación.

4.1 Análisis estructural de la materia prima para la elaboración de los morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica.

Primeramente, se llevó a cabo la preparación de los materiales compuestos SiC-TiO₂ y SiC-ZnO sintetizados por molienda mecánica, los cuales se obtuvieron en forma de polvos con una coloración gris.

Así mismo, se llevó a cabo la preparación del LiAlSiO₄ por estado sólido. Después de la calcinación se obtuvo un material sólido de color blanco.

Las características obtenidas de cada uno de los materiales preparados se presentan a continuación.

4.1.1 Análisis de difracción de rayos-X y microscopía electrónica de barrido del SiC-TiO₂

En la figura 15 se muestra el patrón de rayos-X del material compuesto SiC-TiO₂, sintetizado por molienda mecánica. Se puede observar que sólo están presentes las dos fases de sus componentes individuales. Lo anterior indica que no existe la formación de una fase nueva, sino que solamente se logró depositar las partículas de TiO₂ sobre el SiC.

Una de las características que se puede apreciar en el difractograma es la presencia de anatasa y rutilo, lo cual corresponde a la titania P25, ya que existe una mezcla de estas 2 fases. Este resultado permite señalar que no existe reacción química en el proceso de molienda o calcinación a 450 °C, similar a lo reportado por Juárez Ramírez et al 2011 [37].

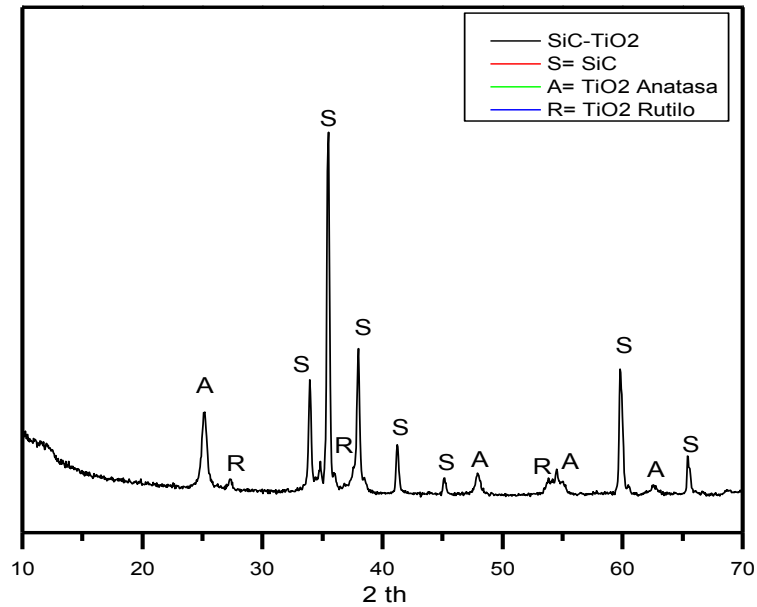


Figura 15. Difractograma de TiO_2 depositado sobre SiC por molienda mecánica y tratamiento térmico a 450°C

De esta manera, una vez corroborado que no existe una reacción entre el SiC y el TiO_2 , se procedió a su análisis microestructural en el SEM. En la figura 16 se presentan las micrografías que muestran la presencia de partículas de TiO_2 depositadas sobre partículas de SiC.

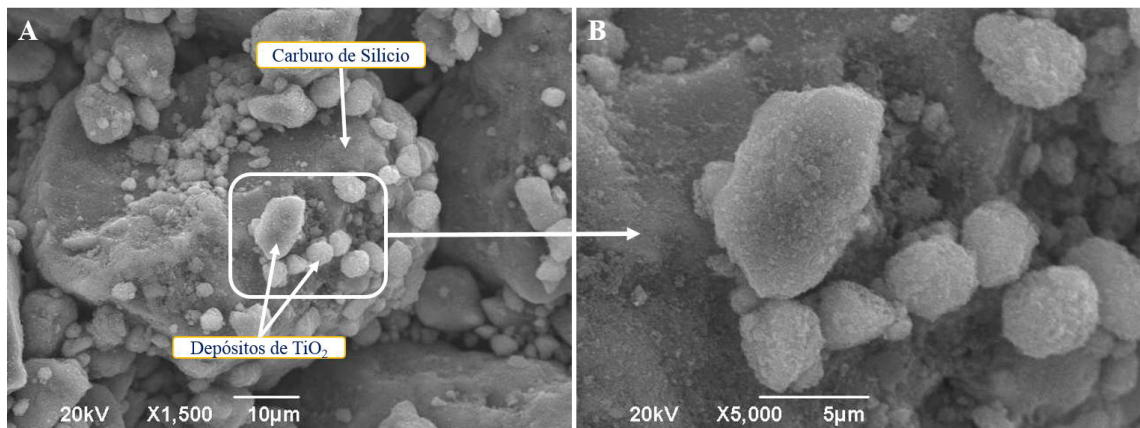


Figura 16. Micrografías de SiC- TiO_2 .

En la micrografía de la figura 16 (A) se observa cómo partículas de TiO_2 de diferentes tamaños están sobre la matriz de las partículas de SiC. Una vista del detalle

permite apreciar que las partículas de TiO_2 están cubriendo de manera heterogénea la superficie de las partículas de SiC, ver figura 16 (B).

Se espera que el TiO_2 depositado propicie una sinergia entre ambos materiales, modificando con ello algunas propiedades como el área superficial y la energía de banda prohibida (E_g), parámetros de gran importancia en el proceso fotocatalítico.

4.1.2 Análisis de difracción de rayos-X y microscopía electrónica de barrido del SiC-ZnO

En la figura 17 se muestra el difractograma correspondiente al material compuesto SiC-ZnO, donde, al igual que en el caso anterior, se puede apreciar que no existe reacción química entre los materiales y por ello es posible observar las fases de los compuestos añadidos sin la presencia de fases adicionales.

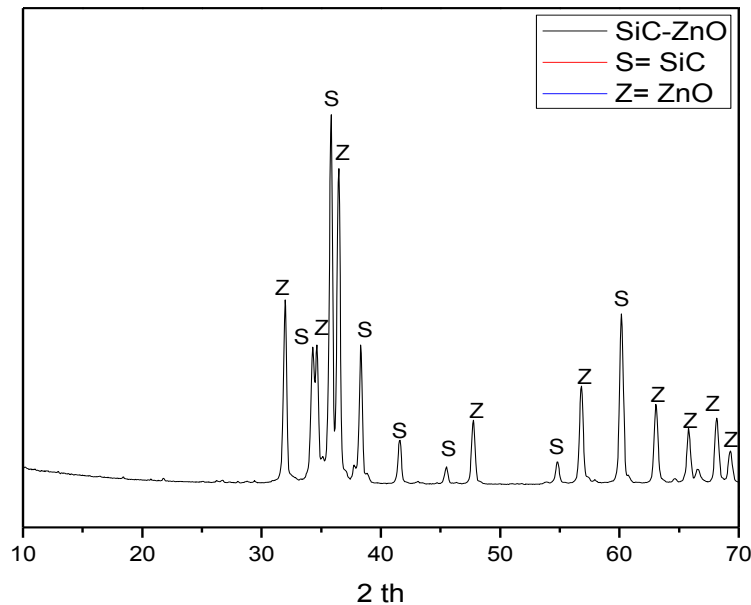


Figura 17. Difractograma de ZnO depositado sobre SiC por molienda mecánica y tratamiento térmico a 450°C

Al llevar a cabo el análisis por microscopía electrónica se encontró que el ZnO aparece depositado homogéneamente sobre la superficie del SiC y su tamaño es más pequeño, comparado con el del TiO₂. Es decir, en este caso el ZnO cubre casi en su totalidad la superficie del SiC.

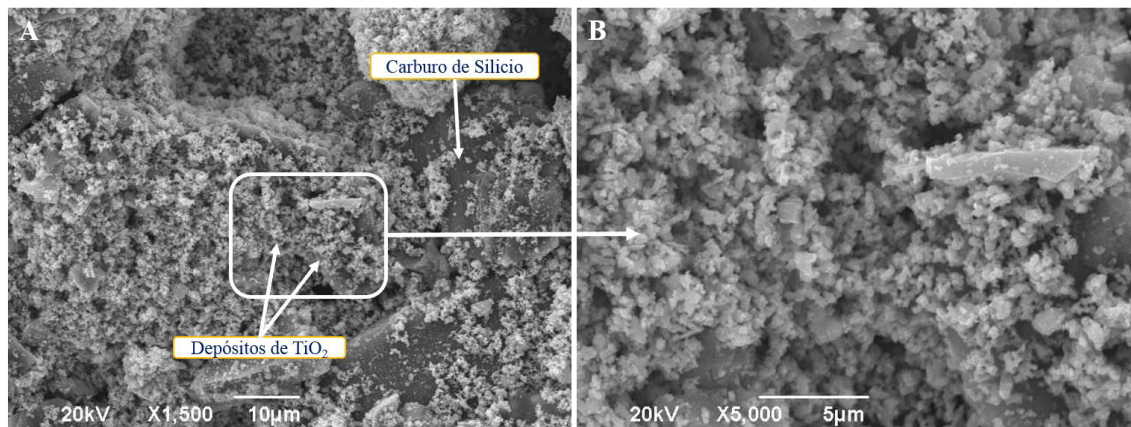


Figura 18. Micrograffías de SiC-ZnO

4.1.3 Análisis de difracción de rayos-X y microscopía electrónica de barrido del LiAlSiO₄.

Otro de los materiales utilizados como materia prima fue el LiAlSiO₄. Este material, después de ser sintetizado, fue analizado por rayos-X. En la figura 19 se muestra el difractograma correspondiente a la fase obtenida del LiAlSiO₄ que se sintetizó por estado sólido para este proyecto.

De acuerdo con lo observado en el patrón de rayos-X, existe una total congruencia entre el patrón teórico y el patrón experimental del compuesto sintetizado por estado sólido a 1200 °C durante 12 horas de reacción.

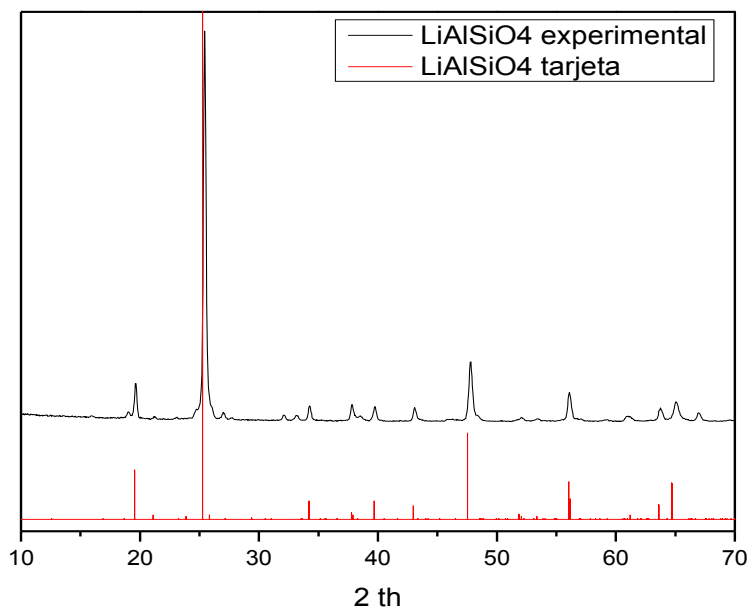


Figura 19. Difractograma teórico y experimental del LiAlSiO₄ sintetizado.

Por otro lado, en la figura 20 se presentan las micrográficas de SEM del LiAlSiO₄. Se aprecia que este compuesto (A) presenta un tamaño de partícula mayor que 1 μm, de forma homogénea y con un hábito de cristalización igual en toda el área analizada, que se puede observar mejor en la vista detallada (figura 20-B)

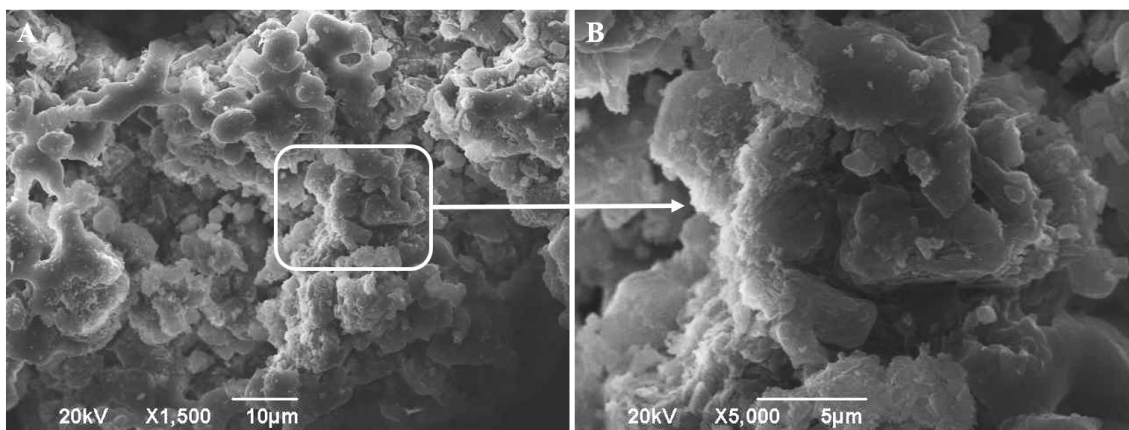


Figura 20. Micrográficas del LiAlSiO₄, sintetizado por estado sólido a 1200 °C.

4.2 Determinación de las propiedades de la materia prima empleada para la elaboración de los morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica.

4.2.1 Determinación del E_g del SiC-TiO₂.

En la figura 21 se muestran las curvas de absorbancia por UV-VIS del SiC-TiO₂ y el TiO₂, de donde se calcularon sus valores de E_g , encontrando que para el TiO₂ se tiene un E_g de 3.1 eV y para el SiC-TiO₂ el valor obtenido es de 2.78 eV.

Estos valores están dentro de los intervalos de banda de TiO₂ y SiC que se estiman en 3,01 y 2,47 eV, respectivamente [38], a partir de los inicios de los espectros de absorción UV/Vis. En el espectro del SiC-TiO₂, se puede ver la banda de absorción de TiO₂ en la región visible, aumentado por la carga de SiC.

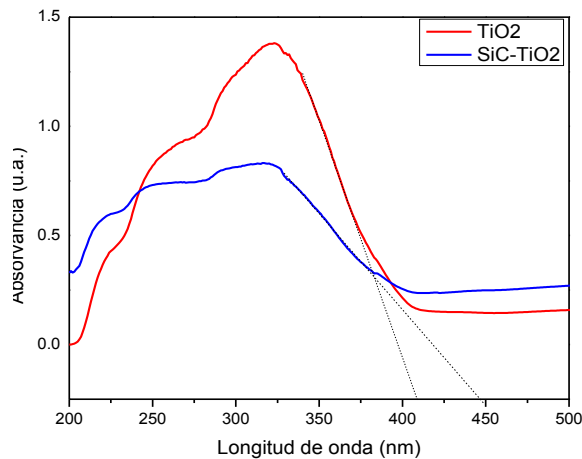


Figura 21. Espectro de absorbancia del material compuesto SiC-TiO₂ vs el TiO₂ utilizado.

Lo anterior está relacionado con un escalonamiento entre las bandas de los materiales, es decir, entre la banda de conducción del TiO_2 y la banda de valencia del SiC , como se esquematiza en la figura 22.

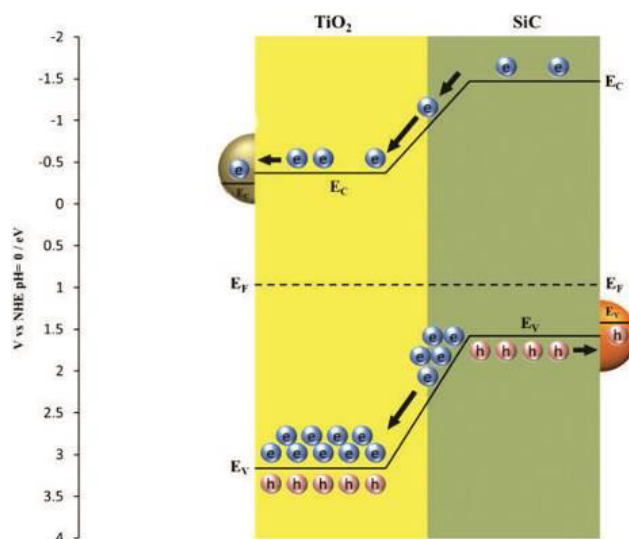


Figura 22. Gráfica de las bandas de energía del TiO_2 y del SiC y la interacción entre ellas.

Para utilizar el efecto de sinergia de los semiconductores como una de las estrategias para el desarrollo de fotocatalizadores compuestos, se suele practicar el acoplamiento de un semiconductor de banda ancha con uno de banda estrecha.

Es decir, el TiO_2 por sí mismo tiene una actividad limitada, debido a que es un material de banda ancha y sólo absorbe una pequeña proporción de la energía en el extremo UV del espectro. En comparación con el SiC-TiO_2 , que tiene una banda de conducción (BC) y de valencia (BV), más negativa que la del TiO_2 solo, así como un intervalo de banda mucho más estrecho que éste. Estas propiedades compensan la desventaja que tiene el TiO_2 respecto al SiC-TiO_2 .

Cuando los dos materiales se combinan adecuadamente, sus niveles de Fermi se alinean. El espacio en el nivel de energía evoluciona en la interfaz que mejora la eficiencia de la separación de carga. El SiC puede hacer uso de la luz visible, abundante para producir electrones libres, luego desembocan en el TiO₂.

Al mismo tiempo, los huecos producidos por el TiO₂ transfieren de nuevo al SiC. Por lo tanto, el SiC-TiO₂ es más activo que el TiO₂. Sin embargo, se debe tener en cuenta que no es bueno cargar demasiado el SiC en la superficie del TiO₂, porque el propio SiC es mucho menos activo que el TiO₂, y el exceso de SiC puede blindar la luz que sería absorbida por el TiO₂ [38].

4.2.2 Determinación del área superficial específica S_{BET} del SiC-TiO₂.

El valor obtenido de área superficial por el método BET es de 10.41 m²/g, el cual es menor, en comparación con los materiales de partida ya que el TiO₂ P25 tiene un área de 50.2 m²/g y el SiC de 29.5 m²/g.

Este resultado indica que la interacción entre las partículas demuestra una deposición del TiO₂ y con ello la actuación de partículas de mayor tamaño y menor área superficial; que para este caso han sido aún menores que los reportados por Juárez Ramírez et al [37]. En los compuestos reportados, los valores obtenidos fueron de 11.2 m²/g.

4.2.3 Determinación del E_g del SiC-ZnO.

El análisis de las curvas de absorción de los compuestos SiC-ZnO, ver figura 23, indica que los valores de E_g serán muy similares, ya que presentan un comportamiento muy parecido.

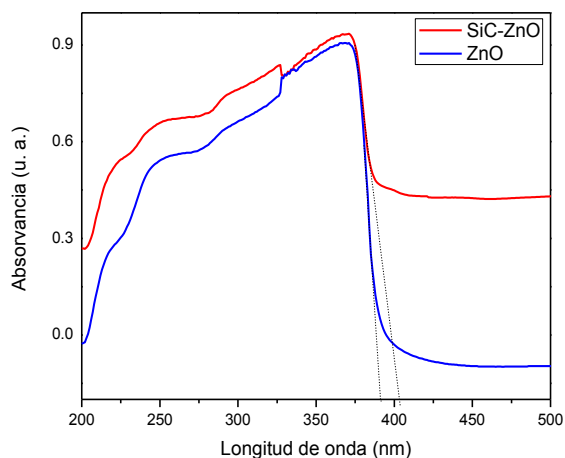


Figura 23. Espectro de absorbancia del material compuesto SiC-ZnO vs el ZnO utilizado.

En este caso, los valores obtenidos son 3.17 eV para el ZnO y 3.07 eV para el SiC-ZnO, lo que muestra un ligero desplazamiento del valor de E_g del material compuesto hacia el intervalo de luz visible, lo cual lo hace más conveniente para trabajar en el límite de luz UV y luz visible, que es el punto al que se quiere llegar considerando su uso bajo irradiación solar.

4.2.4 Determinación del área superficial específica S_{BET} del SiC-ZnO.

Al llevar a cabo el análisis de área superficial de los materiales SiC-ZnO, se encontró que los valores obtenidos son de alrededor de 11 m²/g. Estos valores son inferiores al área mostrada por el SiC. Es decir, la presencia del ZnO en la superficie de las partículas

disminuye el valor de área superficial, debido a que por sí solo el ZnO presenta un área superficial específica de $7 \text{ m}^2/\text{g}$.

Lo anterior ocurre como consecuencia de la saturación de partículas de ZnO sobre la superficie del SiC.

4.2.5 Determinación del área superficial específica S_{BET} del LiAlSiO_4

Por otro lado, el análisis de área superficial para el LiAlSiO_4 indicó que éste presenta un valor de $6 \text{ m}^2/\text{g}$. Este valor es entendible ya que el material fue preparado por estado sólido, a alta temperatura y la sinterización de sus partículas provoca que crezcan en tamaño hasta alcanzar valores cercanos a las 28 micras.

Por lo tanto, el área superficial específica se ve afectada; sin embargo, sigue siendo un valor considerablemente importante para su reacción química.

4.2.6 Determinación del coeficiente de expansión térmica del LiAlSiO_4 .

Debido a que el LiAlSiO_4 presenta un valor de expansión térmica negativo, en este trabajo se decidió corroborar esto, ya que el material fue preparado por estado sólido en el laboratorio y se tenía que asegurar que efectivamente sufriera una expansión negativa al calentarlo.

En la figura 24 (a) se muestra el comportamiento mostrado por este material a medida que aumenta la temperatura desde $25 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Claramente se observa que

el porcentaje de expansión lineal va disminuyendo de manera gradual con el aumento de la temperatura. En la figura 24 (b) se muestra la variación del coeficiente de expansión térmica medida en este intervalo de temperatura.

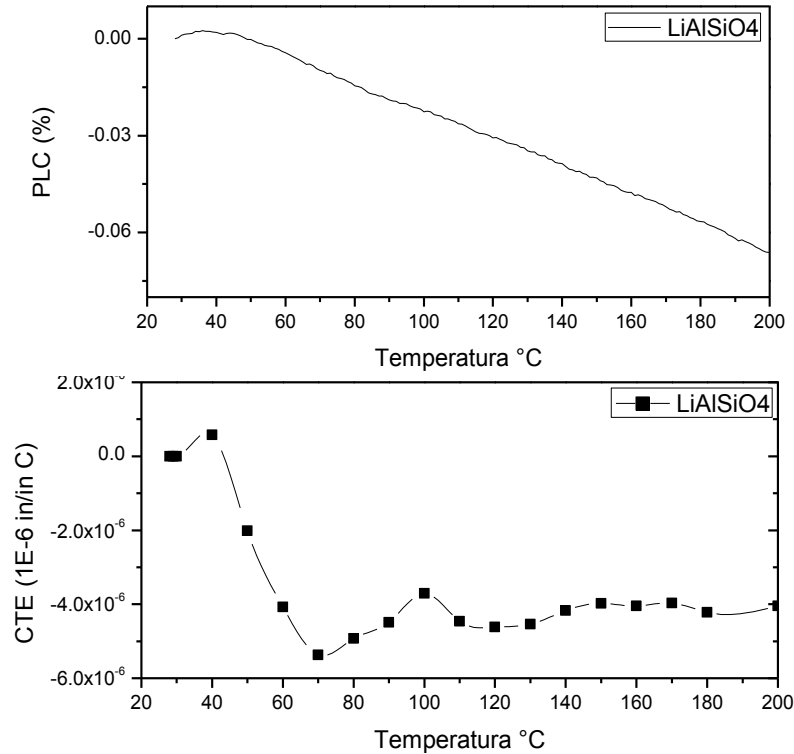


Figura 24. Arriba la gráfica de porcentaje de cambio lineal (PLC) que presentó la muestra de temperatura ambiente a 200°C y en la parte inferior los valores de PLC convertidos a una curva de α CTE.

Se puede apreciar que este material llega a alcanzar un valor de expansión térmica negativa cercano a los $-6.0 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$, que se mantiene prácticamente en todo el intervalo de temperatura. Este valor es muy similar al valor reportado para este material, que es de $-6.2 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ [28].

Dentro del sistema $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [28], de las fases formadas, sólo la β -eucryptita tiene un CTE negativo, mientras que la espodumena y la petalita tienen valores muy cercanos a cero, pero positivos, como se representa en la tabla 7, donde se aprecia que los

materiales de este sistema presentan valores de expansión térmica cercanos a cero, con excepción de la β -eucryptita (β -LiAlSiO₄) que muestra una expansión negativa.

Tabla 7. Coeficientes de expansión térmica de β -espodumeno, petalita y β -eucryptita

Compuesto	Coeficiente lineal de dilatación	Límite de temperatura (°C)
β -espodumena	$0.9 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$	De la temperatura ambiente a 1000 °C
Petalita	$0.3 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$	De la temperatura ambiente a 1000 °C
β -eucryptita	$-6.2.0 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$	De la temperatura ambiente a 650 °C

Con este resultado se corrobora que el LiAlSiO₄ sintetizado tiene expansión negativa y, por lo tanto, podrá ser utilizado para realizar mezclas con el cemento en la preparación de los morteros para que presenten baja expansión térmica una vez curados.

4.3 Análisis estructural de los morteros auto-limpiantes.

Una vez analizada la materia prima, se procedió a preparar los morteros auto-limpiantes, así como su caracterización de propiedades.

4.3.1 Composición de fases (DRX), morteros con TiO₂.

Primeramente se llevó a cabo el análisis por difracción de rayos-X del mortero empleado como material de referencia. En la figura 25 se muestra el patrón de difracción de rayos-X del mortero preparado únicamente con cemento, agua y arena. En dicho difractograma se observa la presencia de una gran cantidad de picos bien definidos, que fueron identificados en su totalidad. Estos picos corresponden a las fases típicas del cemento y algunos de sus precursores.

Las fases identificadas corresponden a silicatos de calcio hidratado o como la bibliografía menciona, C-S-H que en este caso corresponde a 2 fases: la primera de ellas es la Tobermorita $\text{Ca}_5(\text{Si}_6\text{O}_{16})(\text{OH})_2$, la otra fase corresponde igual a un silicato de calcio hidratado $\text{Ca}_3\text{SiO}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. La existencia de 2 fases de silicatos de calcio tienen que ver con el material disponible para la precipitación y formación de las fases, esto debido a que los silicatos de calcio del cemento, de igual forma están en dos fases y que aportarán en menor o mayor grado material para la formación de dichos compuestos y el material restante será parte de la solución de poros del mortero, en este caso Portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que es otra de las fases identificadas. En menor medida es posible identificar también la presencia de calcita (CaCO_3).

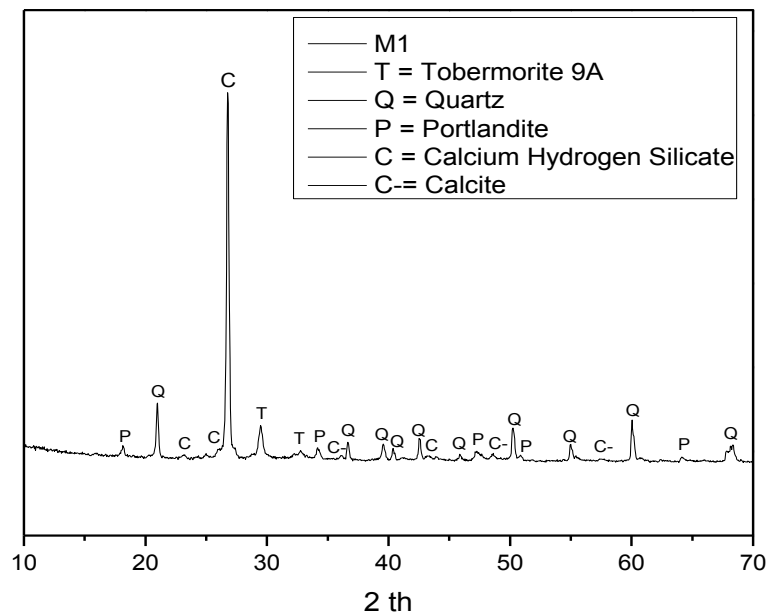


Figura 25. Diffractograma de la muestra M1 (muestra de referencia), se muestran las fases presentes en un ángulo 2 Theta de 10 a 70 °.

Por otro lado, al analizar los morteros que contenían el TiO_2 como fotocatalizador, se observaron muy pequeñas diferencias en los patrones de difracción de rayos-X. En este caso, la diferencia consistió básicamente en la presencia de los picos correspondientes a la fase de Etringita. Ver la figura 26.

En la figura 26 se puede observar que todos los patrones de rayos-X son muy similares lo que era de esperarse, debido a que las sustituciones en masa del cemento por material fotocatalítico son muy pequeñas, del 0.5, 1 al 5 % como máximo, y considerando que no es el cemento el único material en el mortero, la cantidad de material fotocatalítico está por debajo del 1% del total de material adicionado en la mezcla.

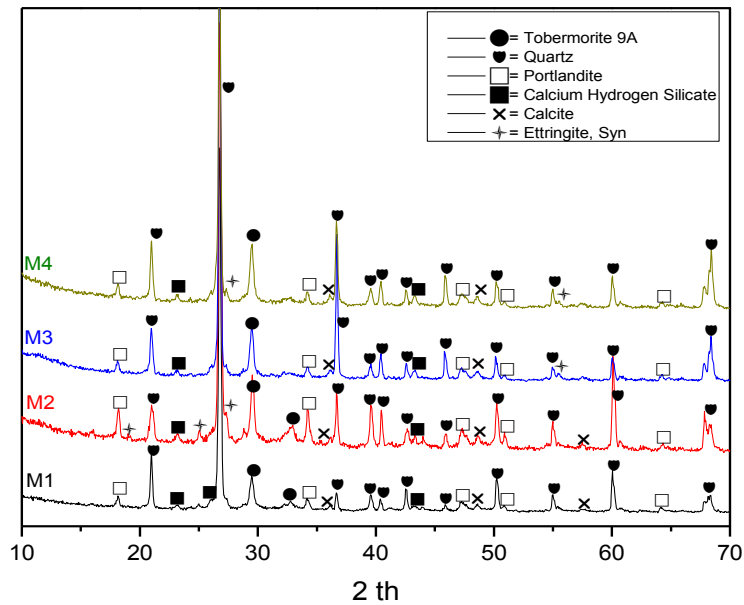


Figura 26. Difractograma de la muestras M2, M3 y M4 comparados con la muestra de referencia, M1.

La principal y única diferencia observada es la presencia de algunos pequeños picos correspondientes a la fase de la Etringita, la cual aparece a consecuencia del incremento en la cantidad de TiO_2 . Por supuesto que las otras fases se ven afectadas por la presencia del TiO_2 .

Por ejemplo, el pico correspondiente a la Tobermorita, en los 33° , se ve disminuido a mayor cantidad de TiO_2 que se ha adicionado y la Portlandita en la muestra 2 tiene un aumento en sus picos, pero disminuyen en la M3 y M4. Ambos factores están relacionados con la mayor presencia de TiO_2 en la muestra.

Si la hipótesis es correcta, a mayor cantidad de TiO_2 hay un porcentaje mayor de Etringita, con lo que se ve disminuida la cantidad de material disponible para reacción. Esto es, el C_3A y el CaSO_4 , que son los materiales de mayor velocidad de reacción y que causarán la reacción de la Etringita, lo que consumirá una gran cantidad de agua previa al curado y con ello las demás fases tendrán una menor cantidad de agua disponible para reaccionar.

4.3.2 Composición de fases (DRX), morteros con ZnO .

Al analizar los morteros preparados con ZnO , se apreció en los difractogramas de la figura 27 que en todos ellos se presentan los picos correspondientes a las fases típicas del cemento.

En este caso, a diferencia de los morteros preparados con TiO_2 , no se observa la presencia de picos correspondientes a la Etringita.

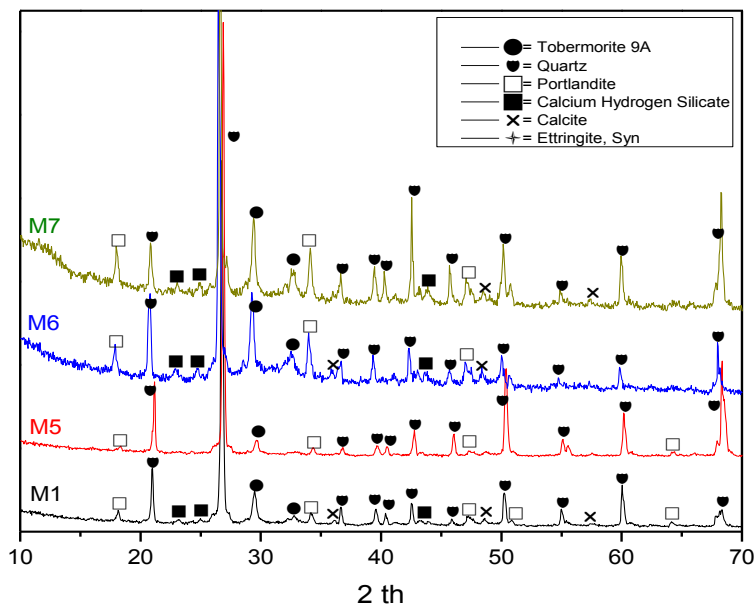


Figura 27. Difractograma de las muestras M5, M6 y M7 con respecto a la muestra de referencia, M1.

4.3.3 Composición de fases (DRX), morteros con SiC-TiO₂ y SiC-ZnO.

Las figuras 28 y 29 muestran los difractogramas correspondientes a las muestras con materiales compuestos que tienen como fotocatalizador SiC-TiO₂ y SiC-ZnO, respectivamente. En estos difractogramas se observan las fases típicas del cemento, que coinciden con el material de referencia.

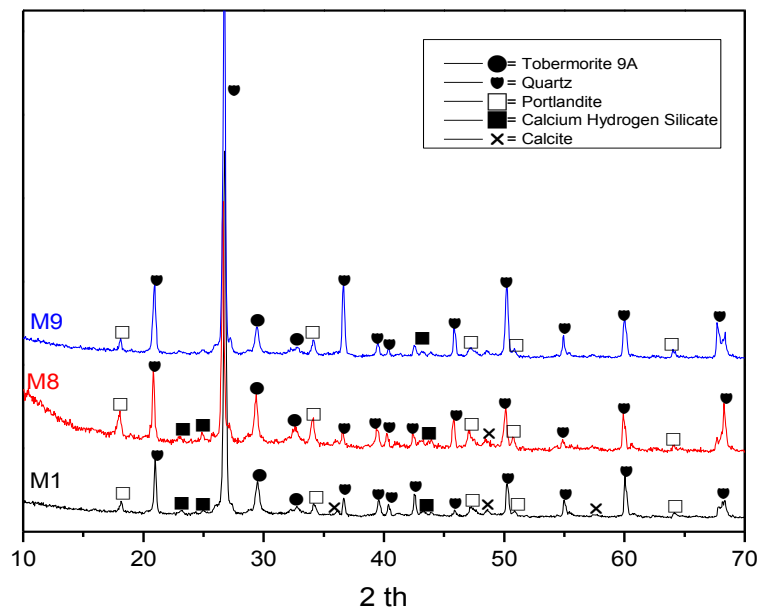


Figura 28. Difractograma de M8 y M9 comparados con la muestra de referencia.

En este caso no se observa la formación de Etringita, lo que sí se observa es que las fases relacionadas con los silicatos de calcio hidratado son más cristalinas en el caso de las muestras SiC-ZnO, similar a lo ocurrido en las muestras con ZnO.

Lo anterior lleva a asumir que muy probablemente la resistencia del material no se verá afectada por la presencia del fotocatalizador.

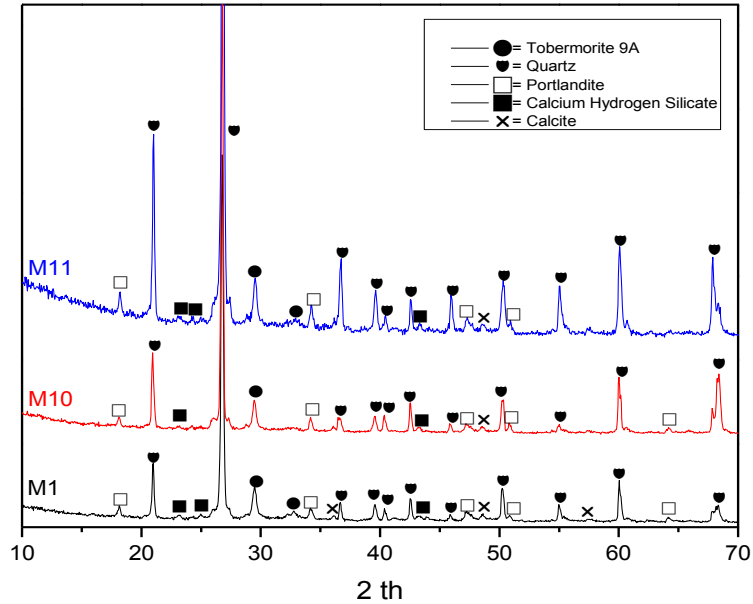


Figura 29. Difractograma muestra M10 y M11.

4.3.4 Microestructura de los morteros con TiO_2 , ZnO , SiC-TiO_2 y SiC-ZnO .

En el análisis de fases de los diferentes morteros una de las fases más representativas es la del cuarzo (SiO_2), debido a que es el material presente en mayor porcentaje en la mezcla (65%) y que fue adicionado como agregado. Esta fase es fácilmente identificable en las micrografías, por el tamaño de partícula.

En la figura 30 se muestra la micrografía del material de referencia (M1); es decir, el mortero sin adición de fotocatalizador. Se observa claramente la presencia de partículas de gran tamaño que corresponden al SiO_2 .

El análisis por EDS corroboró la composición química de estos materiales que están formando las fases cementantes. Esto indica que la reacción de hidratación se está llevando a cabo de manera gradual, lográndose la consolidación del material cementante.

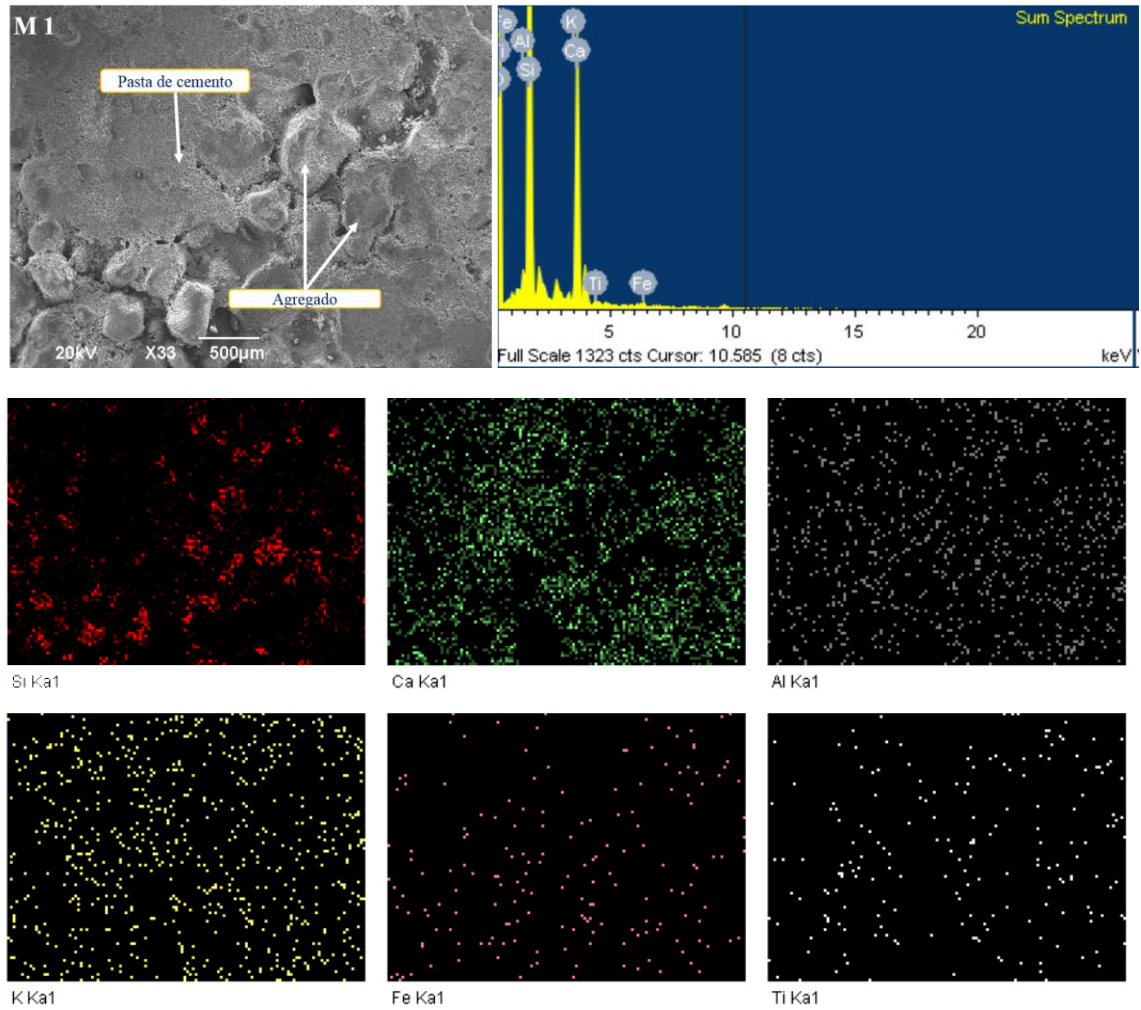


Figura 30. Micrografía con mapeos de la muestra de referencia (M1).

De igual forma, en la figura 30 se observa, en el análisis de EDS por mapeo de superficie, que en el área analizada existe la presencia de otros elementos como el calcio (Ca) y el aluminio (Al), así como la presencia de óxidos menores como el fierro (Fe) y el titanio (Ti), lo cual se corrobora en el espectro de rayos-X de la misma figura.

Los mapeos permiten observar cómo existe una distribución homogénea de los óxidos menores, lo cual se refiere a la existencia en la materia mineral utilizada para la formación del cemento, por eso su estado no es de un óxido simple, sino más bien se

encuentran ligados a otras fases del cemento, principalmente al C_3A [2], (los mapeos de superficie de todos los morteros se observan en el apéndice I).

En la figura 31 se observan micrográficas correspondientes a la muestra de referencia en otras áreas, en diferentes magnificaciones, lo que permite la identificación de morfologías correspondientes a determinadas fases, es decir la fase más apreciable es la de los silicatos de calcio hidratado (C-S-H), que según Jennings [39] se puede clasificar de dos formas: “outer” (O) e “inner” (I); es decir, de baja y alta densidad, lo cual se puede observar en la figura 31-A y B, respectivamente.

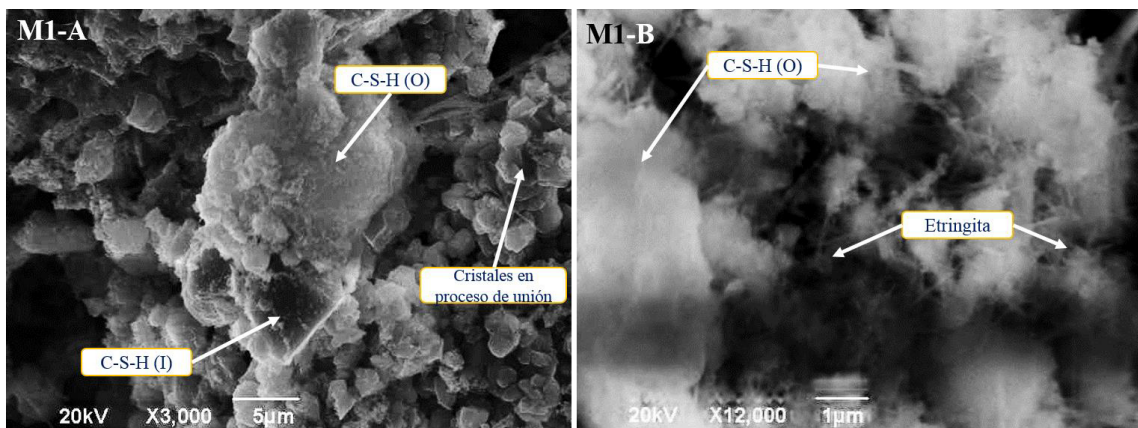


Figura 31. Fases hidratadas en la muestra de referencia (M1)

En A los productos de alta densidad, “Inner”, son productos de hidratación formados dentro de los límites de las partículas de cemento originales. Éstos suelen aparecer como una matriz muy homogénea, con poros de muy pequeño tamaño, distribuidos por todo el espacio y sin otras características reseñables [3].

Por otra parte, en B los productos de baja densidad, “Outer”, suelen aparecer adheridos a los anteriores y se forman tanto en los espacios originales de los poros como en las zonas en las que las partículas se han disuelto completamente. Éstos contienen

bastantes morfologías diferentes que van desde fases cristalinas de Etringita y Monosulfato hasta C-S-H amorfo.

Sin embargo, también se observa en las micrografías de la muestra M1 la presencia de cristales que todavía se encuentran en proceso de unión. A pesar del proceso de curado de 28 días sumergido en agua y del tiempo transcurrido desde el amasado de la mezcla hasta su análisis, por diversos factores, no todo el material interno ha terminado su proceso de reacción. Lo anterior es común debido a factores como la cantidad de agua disponible, la porosidad presente en el mortero y la cantidad accesible de agua desde el exterior, además de la cinética de las propias reacciones. Durante este proceso de hidratación, se llegó a tener la presencia de otras fases como la Etringita que es una de las fases que se forma a edades cortas del proceso de hidratación, y que posteriormente, en periodos de 24 horas o más, se puede transformar en monosulfoaluminatos.

4.3.4.1 Morteros con TiO₂.

Por otro lado, al observar la micrografía de los morteros con adiciones de TiO₂, se puede ver en la figura 32 (A, B y C), tanto de forma general como en detalle, que existe una diferencia marcada con respecto al mortero M1, principalmente por la presencia de Etringita. Se aprecia claramente cómo, a medida que aumenta la cantidad de TiO₂ en los morteros de M2 a M4, la cantidad de Etringita aumenta en todos los casos.

En las micrografías se puede ver una distribución de Etringita en toda el área observada, cuya morfología, además, presenta tamaños mayores que en las micrografías de las muestras M2 y M3, que contiene 0.5 y 1.0 % de TiO₂.

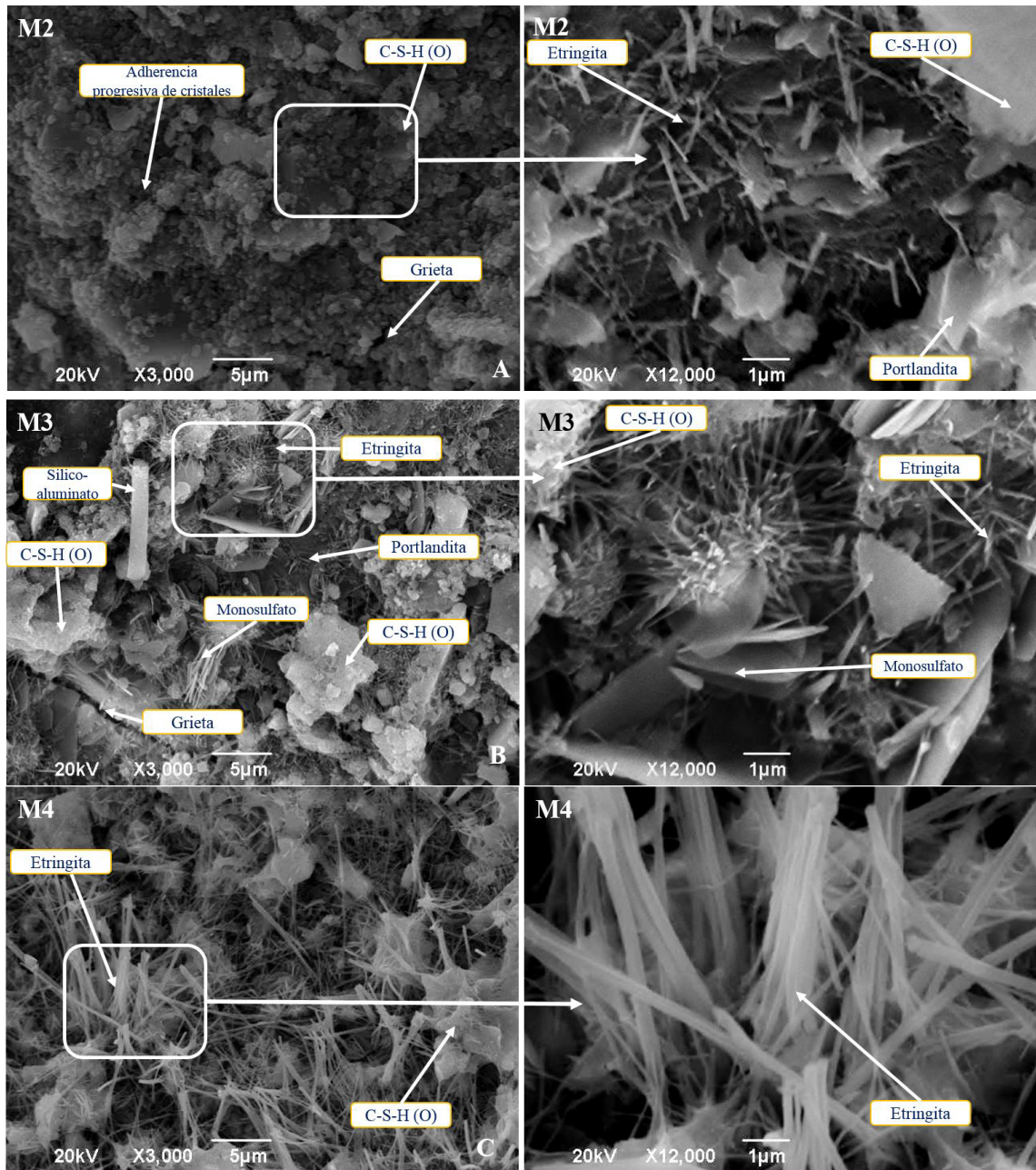


Figura 32. Micrografías de muestras de morteros con TiO_2 .
 M2, 0.5 % de TiO_2 ; M3, 1.0 % de TiO_2 y M4, 5.0 % de TiO_2 .

Este resultado corrobora lo observado previamente mediante los rayos-X, donde se detectó la presencia de la Etringita. Es importante mencionar que no todas las morfologías corresponden a la misma composición, pues si la hipótesis de Bensted y Varma [40, 41] es correcta, en muchos casos no será una Etringita con el aluminio como ion de enlace. En

este caso parece que el titanio es el que está sirviendo de enlace para la formación de la Etringita.

La suposición anterior se basa en que la estructura de la Etringita puede ser sustituido el ion de Al^{3+} por algunos iones metálicos trivalentes (Figura 33) que pueden dar octaedros adecuados sin destruir la estructura de la Etringita como el Cr^{3+} , Fe^{3+} , Mn^{3+} y Ti^{3+} . Estos iones metálicos tienen radios iónicos comparables y potenciales de ionización terceros, lo que podría explicar, en este caso, la capacidad del titanio para formar los enlaces que den paso a la estructura de la Etringita, tal como se muestra en la figura 33.

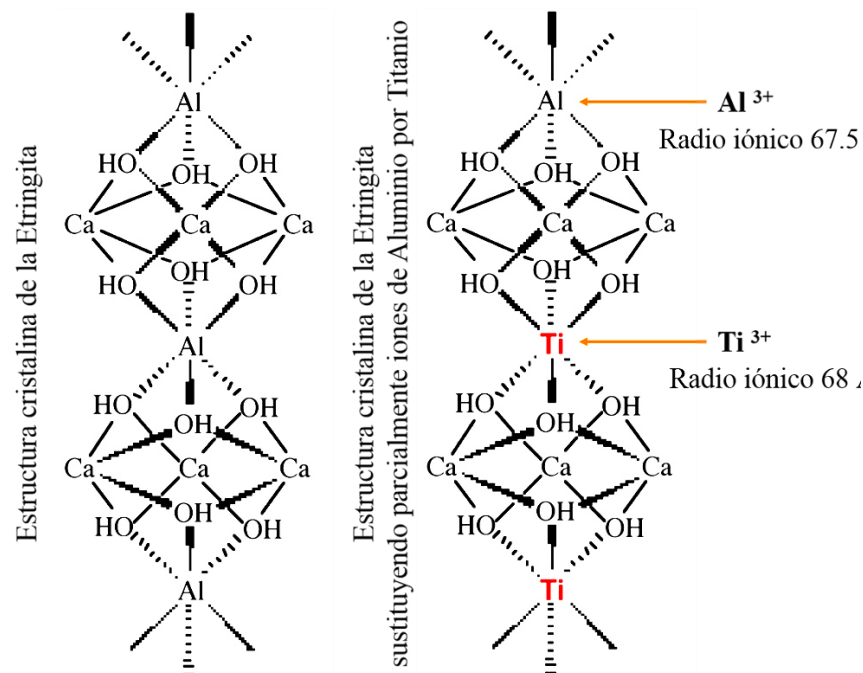


Figura 33. Estructura cristalina de Etringita a la izquierda. A la derecha estructura cristalina de Etringita con posible sustitución de iones de Al por Ti.

Sin embargo, no todo el Ti adicionado reaccionará para formar Etringita, pues gran parte del material puede no reaccionar y/o ser inmovilizado por los espacios generados entre las capas laminares de los C-S-H, e inclusive ocupar el lugar del Si en sustituciones parciales, formando titanatos de calcio, como ocurre en estado natural con las arcillas.

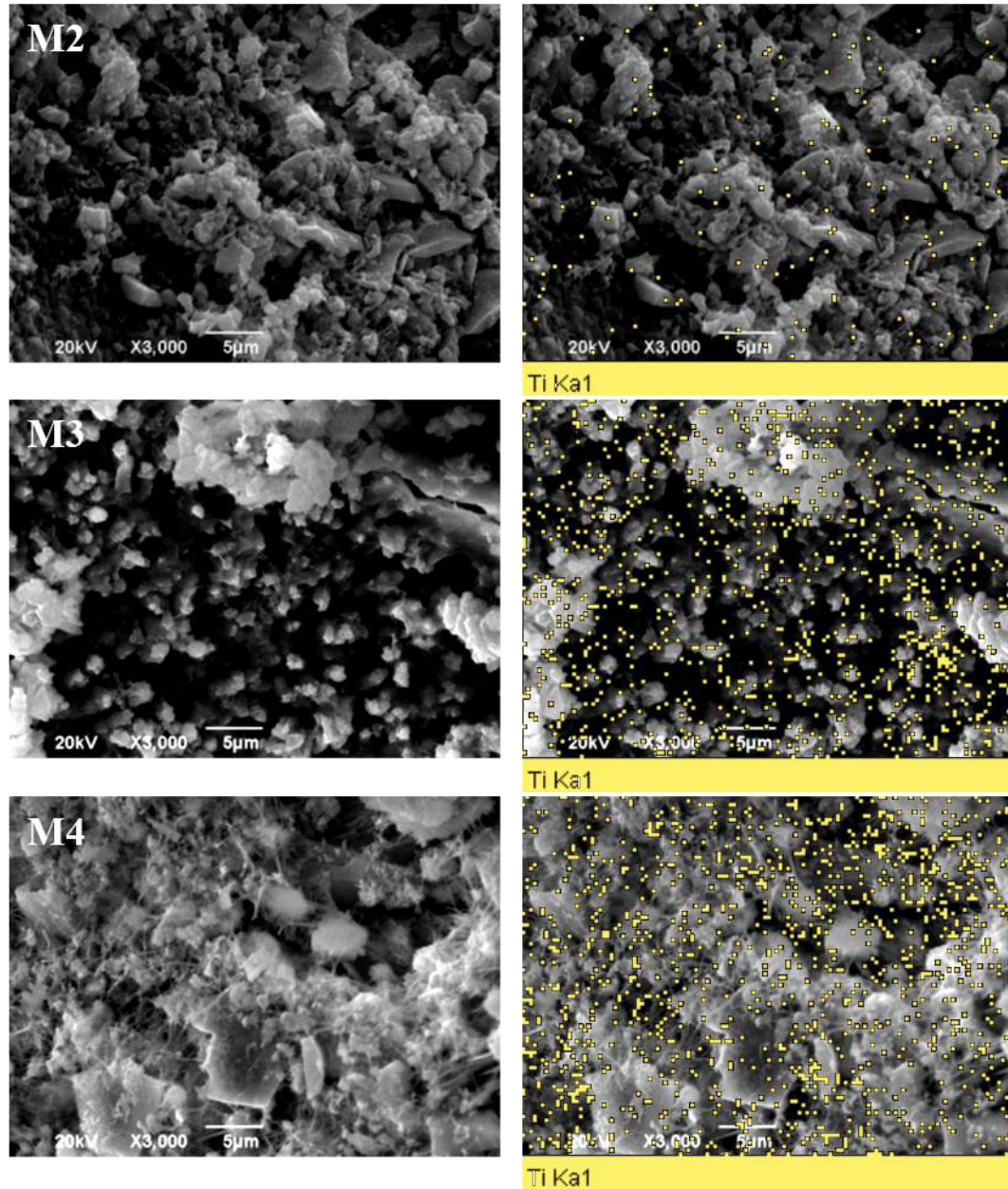


Figura 34. Mapeos realizados en los morteros con TiO_2

Con la finalidad de determinar la presencia del titanio, se llevó a cabo un análisis por EDS de superficie por mapeo. En la figura 34 de las muestras M2, M3 y M4 se puede apreciar que la cantidad de Titanio detectado se incrementa, a medida que incrementa el contenido de TiO_2 y es más visible en la muestra que contiene una mayor formación de Etringita (M4).

En general, se observa que el Titanio se encuentra distribuido de manera homogénea, indicando con ello que se tuvo una reacción casi completa para la formación de Etringita. Tal vez exista la posibilidad de que una pequeña proporción de TiO_2 no haya reaccionado para formar Etringita, pero sí estará sustituyendo a otros elementos como el Si complementando la formación de las fases cementantes.

4.3.4.2 Morteros con ZnO.

Por otro lado las muestras con ZnO presentan algunas características diferentes a las de las muestras con TiO_2 , esto debido a que el material ya reaccionó para formar fases más estables o, aún después del curado, no ha reaccionado en su totalidad, generando todavía la adherencia entre los granos de cemento. Ver figura 35, para M5, M6 y M7.

En la figura 35 se aprecia el análisis general y una vista en detalle, donde se puede ver claramente cómo la adición de ZnO en porcentaje de 0.5 % (M5) tiende a presentar cristales en su mayoría completamente hidratados, principalmente C-S-H de alta densidad (inner). Cuando se incrementa el % de ZnO, se observa que hay zonas no homogéneas, lo que indica que el material no ha reaccionado. Este efecto es más notorio en los morteros con mayor cantidad de ZnO.

En este caso, la muestra M7 contiene la mayor cantidad de ZnO y se observa que no ha reaccionado en su totalidad. Esto es similar a lo propuesto por Behfarnia y Keivan [42], quienes mencionan que en materiales en pasta de cemento se observa un proceso de retardo de fraguado de 9 a 13 días o completamente la inhibición del fraguado de la

mezcla, debido a los depósitos del Zn sobre la superficie de los demás cristales, y por ello, hasta que el Zn haya reaccionado, comienza la hidratación de las demás fases.

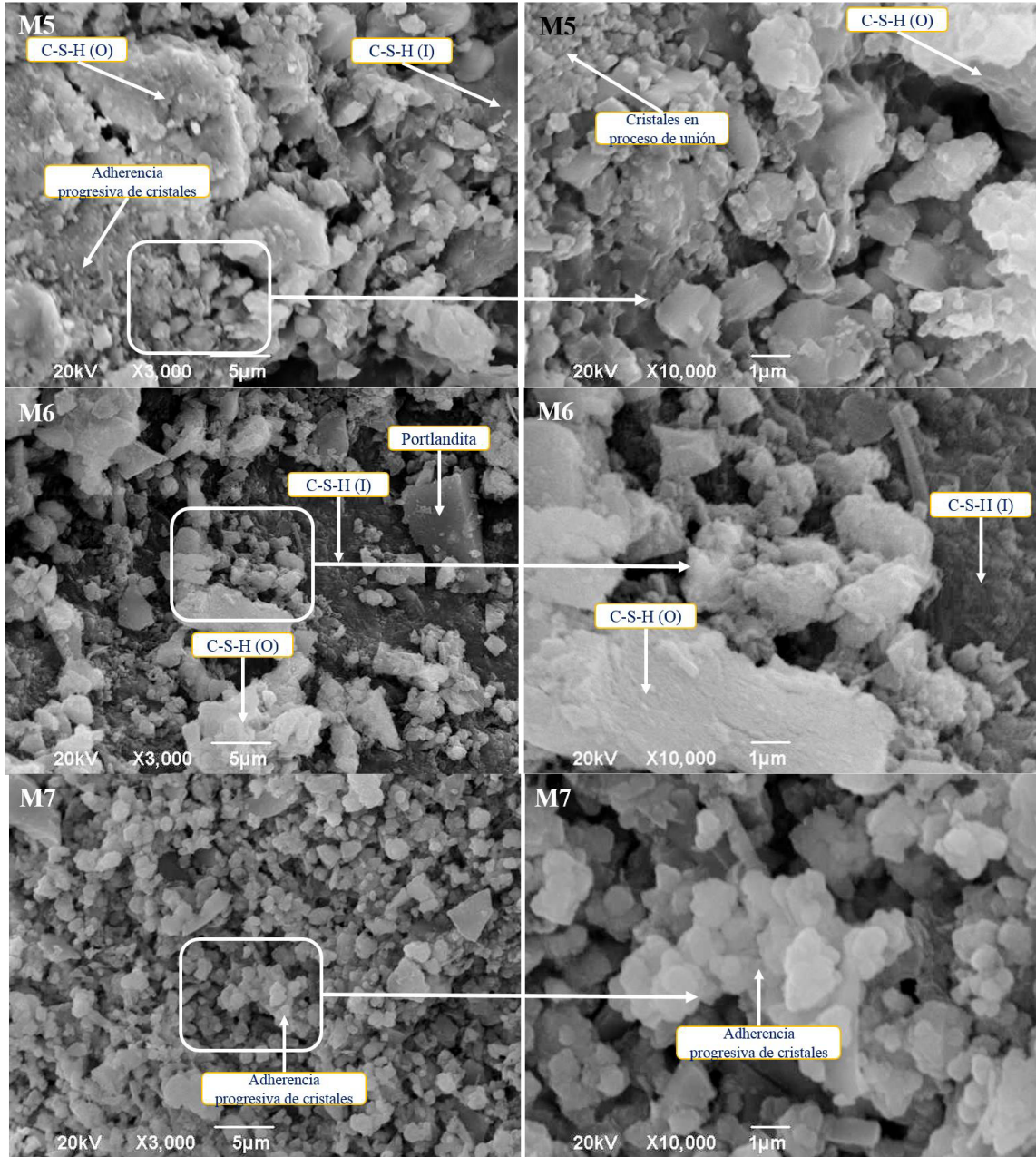


Figura 35. Micrografías de muestras de morteros con ZnO.

Gawlicki et al. [43], por su parte, han sugerido que este retraso resulta de la precipitación de una capa amorfa de $Zn(OH)_2$ sobre los granos anhidros, pero que el

proceso de hidratación podría ser reiniciado una vez que la concentración de Ca en la solución sea suficiente para inducir la cristalización de hidróxido de calcio y zinc.

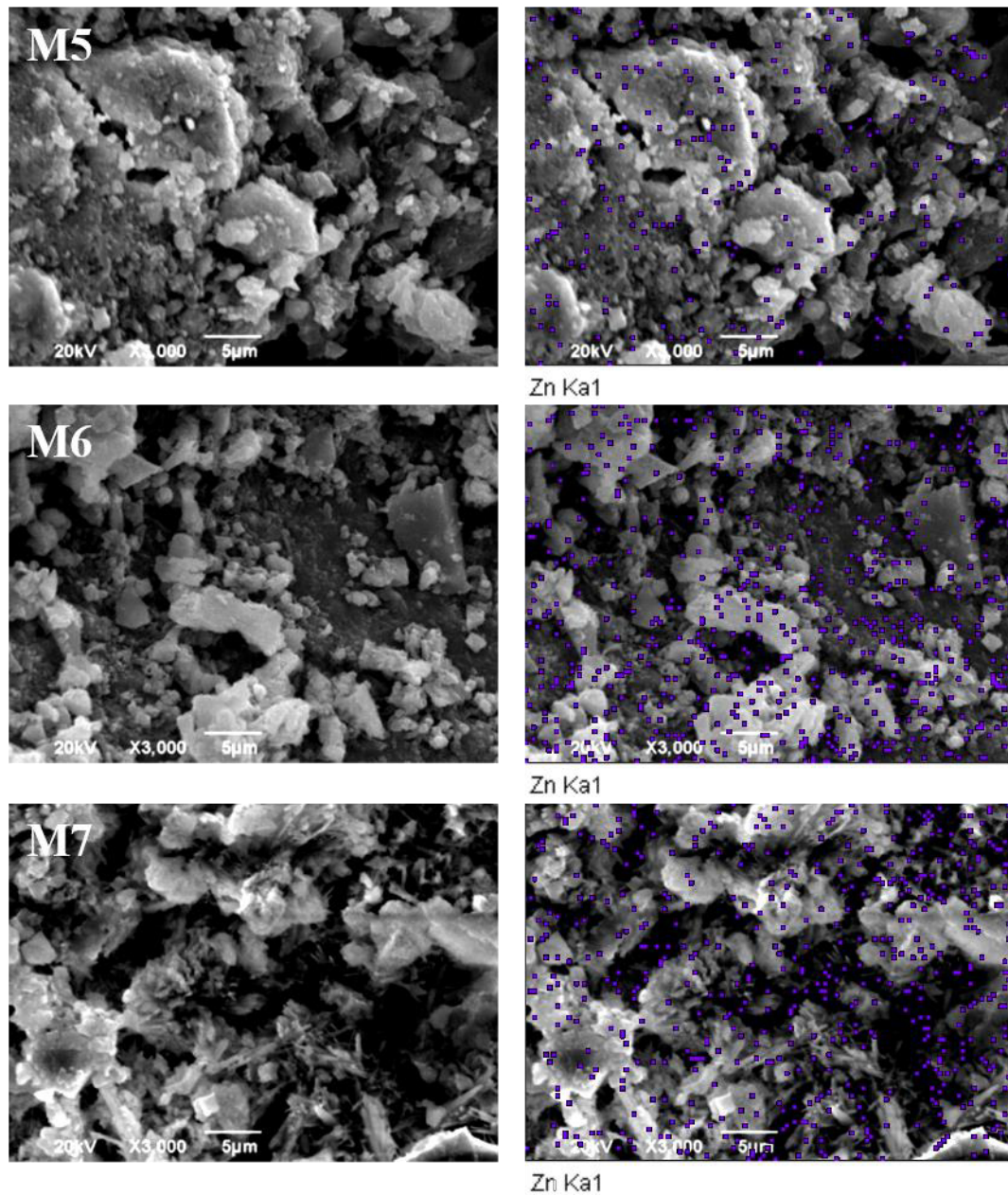


Figura 36. Distribución del Zn en muestras M5, M6 y M7, 0.5, 1 y 5%, respectivamente.

En cambio, Yousuf et al. [44] sugieren que la formación de la superficie de $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ impide el transporte del material necesario para la hidratación del C_3S . En la figura 36 de las muestras M5, M6 y M7, en el análisis por mapeo, se muestra la distribución

del Zn sobre la superficie de los morteros. Se aprecia una distribución uniforme y, junto con ello, diversos depósitos sobre el material que aún no ha alcanzado su estado de hidratación completo. (Ver los demás mapeos en apéndice I).

4.3.4.3 Morteros con SiC-TiO₂ y SiC-ZnO.

Por su parte, las muestras con TiO₂ y ZnO, depositados sobre SiC, no presentan los comportamientos de las muestras anteriores. Esto debido a que la mayor parte de dichos metales, Ti y Zn se encuentra en un estado estable sobre la superficie del carburo de silicio ya que es nula la cantidad que puede quedar a disposición para reacciones con las fases del cemento.

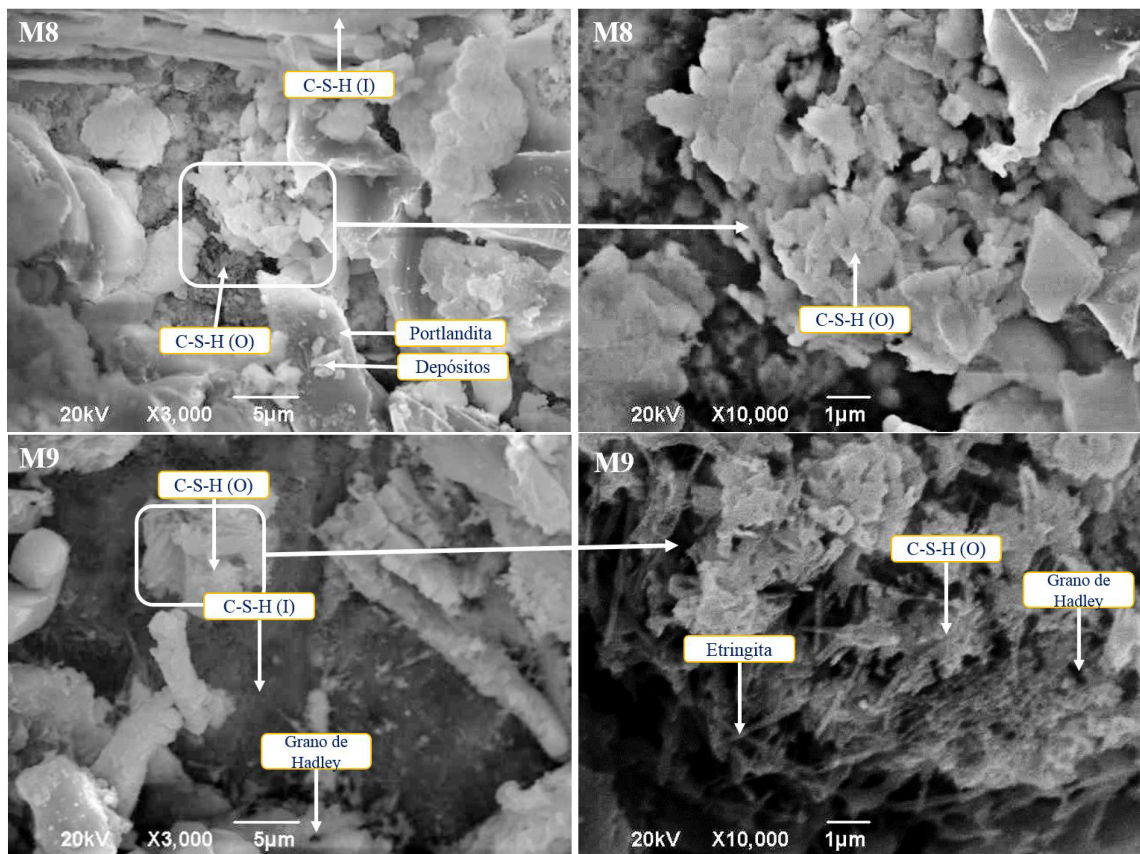


Figura 37. Micrografías de muestras con SiC-TiO₂

Por ello en la figura 37 de las muestras M8 y M9, así como en la figura 38 de las muestras M10 y M11 se observa, tanto en el análisis general como en la vista en detalle, que las formaciones de C-S-H son más uniformes y más desarrolladas que en las micrografías de las muestras anteriores. En este caso, la presencia de Etringita es muy pequeña en la muestra que contiene SiC-TiO₂, mientras que no se detecta en la muestra con SiC-ZnO.

En general, las muestras que contienen SiC-TiO₂ y SiC-ZnO no impiden que ocurra el proceso de hidratación del cemento, lo que permite el desarrollo de las fases del mismo. Por ello, el material seguramente mantendrá sus propiedades de resistencia sin afectaciones.

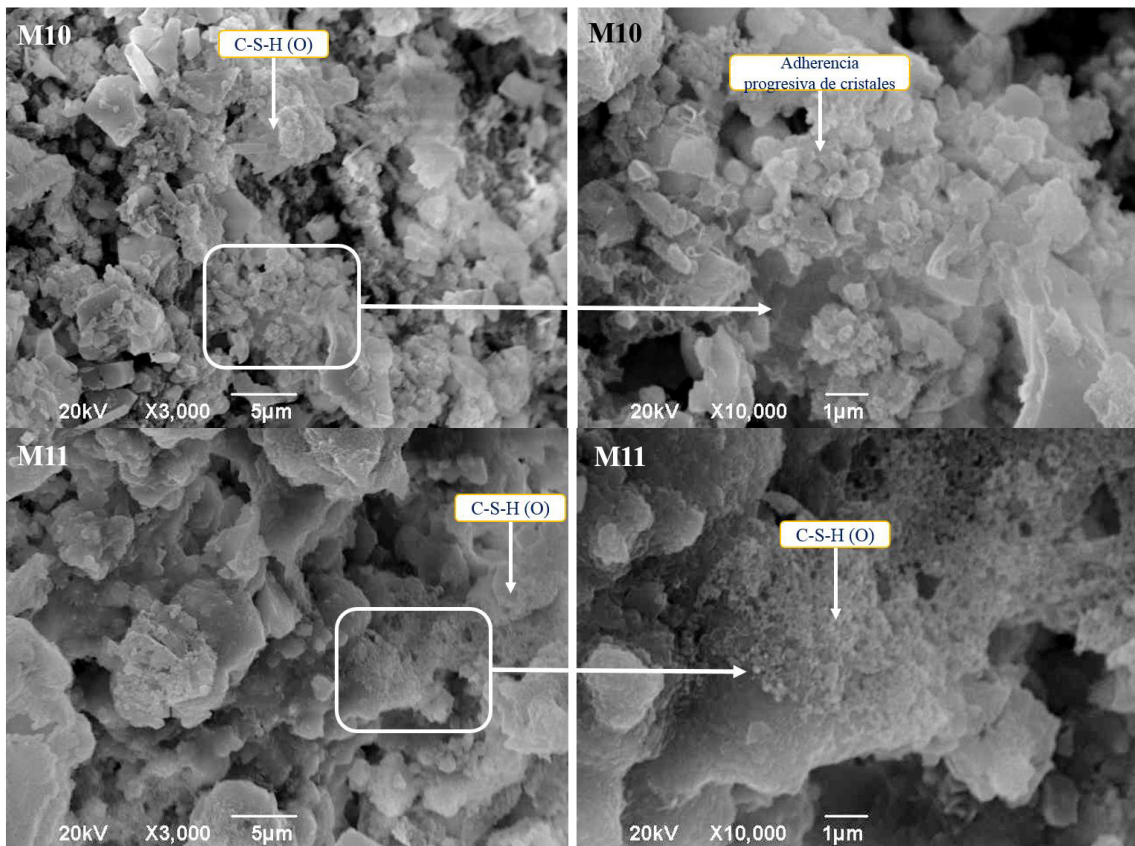


Figura 38. Micrografías de muestras con SiC-ZnO.

4.4 Determinación de las propiedades fisicoquímicas de los morteros auto-limpiantes

4.4.1 Tiempo de fraguado de los morteros con TiO₂, ZnO, SiC-TiO₂ y SiC-ZnO.

El tiempo de fraguado es una de las propiedades que generalmente se miden cuando se considera que la incorporación de algún material en la mezcla puede generar alteraciones en alguna de las fases. Lo anterior puede provocar una aceleración o retardo en el proceso de endurecimiento final del material.

A continuación, en la siguiente tabla, se muestran los tiempos de fraguado obtenidos para cada uno de los materiales preparados.

Tabla 8. Tiempos de fraguado de las diferentes mezclas preparadas con porcentajes variados de material fotocatalítico.

	Fotocatalizador	Porcentaje (%)	Tiempo de fraguado (horas)
M1-std	-	0	5 ½ h
M2	TiO ₂	0.5	4 ½ h
M3		1.0	4 ½ h
M4		5.0	3 h
M5	ZnO	0.5	20 h
M6		1.0	43 h
M7		5.0	60 h
M8	SiC-TiO ₂	0.5	5 ½ h
M9		1.0	5 ½ h
M10	SiC-ZnO	0.5	6 h
M11		1.0	6 ½ h

Como puede apreciarse en la tabla 8, las muestras que contienen ZnO tienen tiempos de fraguado muy prolongados, llegando incluso a las 60 horas.

Según la bibliografía consultada estas afectaciones se deben a reacciones del ZnO con el cemento, efecto que ya había sido observado cuando, al realizarse mezclas de concreto sobre láminas de zinc, se apreció un retardo en el tiempo de fraguado, según lo reportó E. Rengade [45].

En definitiva, la presencia del ZnO retarda el proceso de fraguado, al afectar directamente las reacciones de hidratación del cemento y, con ello, la resistencia temprana del material.

Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado y se ha generado una serie de reportes al respecto. Weeks et al. [46] propusieron un mecanismo basado en la conversión de un hidróxido de metal a las especies hidroxilo del metal. Esta reacción consume calcio y los iones de hidróxido y reduce la sobresaturación de la solución con respecto a C-S-H y Ca(OH)_2 , por lo tanto, retrasa esta precipitación.

Trezza [47], por su parte, reporta que el Zn en el cemento puede reaccionar para formar Zn(OH)_2 . Éste tiene iones hidroxilo adicionales, que pueden producir un complejo de oxianión con posibilidad de precipitar como una sal de calcio insoluble: $\text{Ca(Zn(OH)}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Por lo tanto, la hidratación se retardará hasta que estas reacciones se completen, debido a que ambos -OH y concentraciones de Ca^{2+} se mantienen bajos.

Por otro lado, Asavapisit [48] informó que el retraso grave causado por los residuos de Zn indica la formación de una membrana de baja permeabilidad sobre las partículas de cemento formada por el $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$. Este compuesto sería precipitado durante el período de inducción y, en consecuencia, la hidratación no continuará porque las concentraciones requeridas en la solución no son suficientes para la formación de los productos de hidratación, hasta que la formación de $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ no se haya completado. En consecuencia, cuanto mayor es la concentración de iones de zinc en la solución mayor será el retraso en la hidratación.

Sucede lo contrario en las muestras que contienen TiO_2 . En éstas se puede apreciar que el tiempo de fraguado disminuye, debido a la reacción del TiO_2 con el C_3A . Bensted y Varma [40, 41] indican que el Al es sustituido por el Ti, formando compuestos como la Etringita.

En este caso, la reacción del TiO_2 con el C_3A acelera el proceso de fraguado, provocando la formación de una gran cantidad de Etringita, a edades tempranas de curado.

4.4.2 Porosidad de los morteros con TiO_2 , ZnO, SiC- TiO_2 y SiC-ZnO.

En la tabla 9 se presentan los valores de porosidad obtenidos para cada uno de los morteros preparados. Se puede apreciar que en general las muestras presentan una porosidad de aproximadamente un 12% y su capacidad de absorción es de alrededor del 4.6%.

Tabla 9. Valores de porosidad obtenidos.

	Densidad	Volumen de porosidad (%)			Capacidad
	Aparente g/cm ³	Abierta	Total	Cerrada	Absorción %
M1-std	2.0	12.0	12.8	0.8	6.0
M2	2.0	9.0	13.0	4.0	4.5
M3	2.0	9.8	12.5	2.7	4.9
M4	2.0	11.7	13.3	1.6	6.5
M5	2.0	8.5	12.8	4.4	4.2
M6	2.0	9.3	13.1	3.8	4.6
M7	2.0	9.7	12.3	2.6	4.8
M8	2.2	8.3	12.3	4.0	4.1
M9	2.2	8.4	12.3	3.9	4.1
M10	2.2	9.3	13.6	4.3	4.7
M11	2.2	9.0	13.7	4.7	4.5

Los valores de porosidad total obtenidos presentan una desviación estándar de 0.51. Las diferencias se hacen más evidentes en los valores de la porosidad abierta o capilar y en la capacidad de absorción de las muestras.

En la figura 39 se representa el gráfico con los valores de porosidad abierta, versus el valor de porosidad cerrada de cada muestra, usando como referente la muestra M1. Se puede observar que la porosidad abierta de las muestras con fotocatalizador es más baja que la de la muestra de referencia. Sin embargo, hay un incremento de la porosidad cerrada, debido a que la adición de material con un tamaño de partícula menor a la del cemento (1 a 20 μm) funciona, en una gran cantidad de situaciones, como un obstructor de los capilares en el mortero. Es importante considerar que el material no debe estar reaccionando con las fases de cemento, ya que si se produce dicha reacción puede variar el comportamiento.

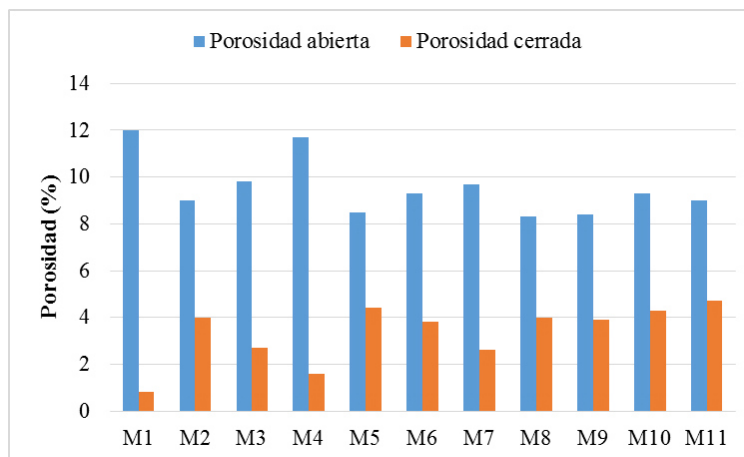


Figura 39. Gráfico de porosidad abierta y cerrada de los diferentes morteros.

Con excepción de las muestras que contienen TiO_2 , en los demás casos se observa que al aumentar la cantidad de fotocatalizador, la porosidad cerrada se incrementa. Esto se debe a que se obstruyen los poros del material cementante. Sin embargo, el TiO_2 reacciona en las fases el cemento, provocando que haya menor material libre que pudiese obstruir los poros.

El comportamiento de las muestras con SiC es igual, en relación a la porosidad abierta, que en la absorción al agua ya que tiene un valor similar en ambos casos, a diferencia de los demás morteros.

4.4.3 Área superficial específica (S_{BET}) de los morteros con TiO_2 , ZnO, SiC- TiO_2 y SiC-ZnO.

Los valores de porosidad están relacionados con los valores de área superficial específica, lo que permite tener una mejor idea de las interacciones que existen internamente en cada mortero. En la figura 40 se muestra una curva representativa de la isoterma de absorción-desorción de nitrógeno de la muestra de referencia, M1.

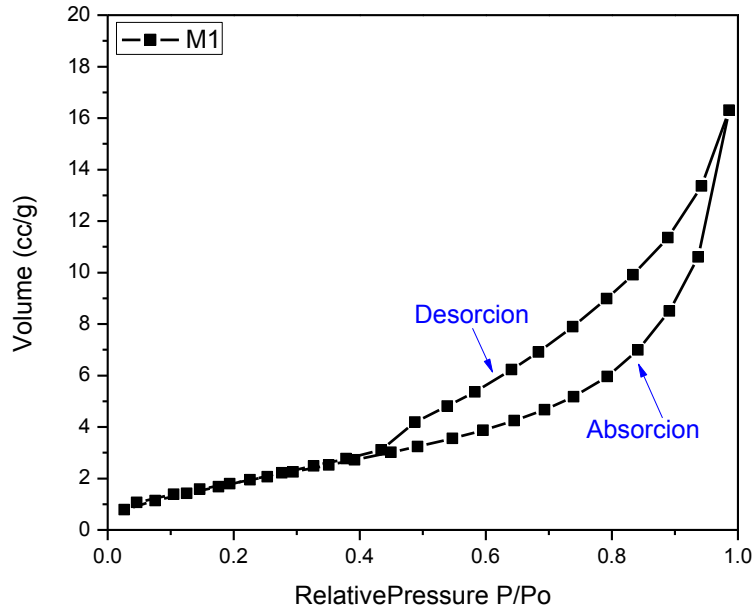


Figura 40. Gráfico de absorción-desorción de la muestra M1.

La curva de absorción-desorción del material, comparado con los esquemas ya establecidos (figura 41) asemeja al obtenido a un isoterma tipo 3, referido a un material muy infrecuente; es decir, sólidos no porosos o macro-porosos, como es el caso de los morteros analizados con una interacción gas-sólido extremadamente débil.

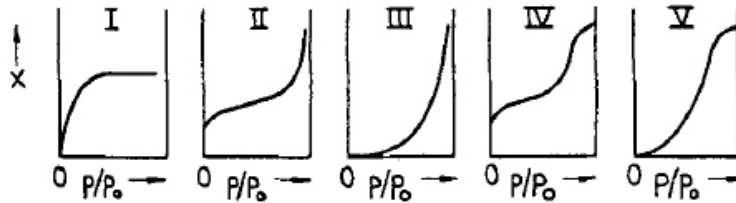


Figura 41. Tipos de isothermas de acuerdo con la clasificación de Brunauer [49]

El ciclo de histéresis que se observa en las curvas es una característica de los materiales compuestos por partículas laminares, que no muestran un límite de absorción a presiones relativamente altas. En este caso, coincide con la formación de geles de C-S-H, que son compuestos laminares, igual que la Portlandita de la muestra. Este isoterma indica

que la fisión ocurre en un proceso multicapa y, aunque no esté llena la primera capa, la siguiente ha comenzado a saturarse.

Esta situación implica que el cálculo de meso-porosidad por esta técnica sería impreciso, debido a que los poros no son rígidos y se encuentran en una distribución de tamaño muy amplio, además de que, a una máxima presión relativa no todos los poros estarán llenos. Por esta razón, en la mayoría de las ocasiones, por esta técnica solamente se determinan los valores de área superficial específica. En la tabla 10 se presentan los valores de área obtenidos para cada una de las muestras.

De manera general, los valores no presentan variaciones significativas, lo que era de esperarse ya que es muy pequeña la cantidad de fotocatalizador añadido. En el caso de los morteros que contienen TiO_2 , se observa una ligera disminución del área, al incrementar la cantidad de TiO_2 . Esto se entiende si se considera lo que se ha mencionado anteriormente sobre el hecho de que el TiO_2 esté reaccionando con las fases del cemento.

Tabla 10. Área superficial de las muestras con diferentes porcentajes de fotocatalizador.

	Fotocatalizador	Porcentaje de fotocatalizador	Area superficial m^2/g
M1-std	-	0	7.51
M2	TiO_2	0.5	9.66
M3		1.0	9.73
M4		5.0	6.96
M5	ZnO	0.5	8.19
M6		1.0	7.87
M7		5.0	7.62
M8	SiC- TiO_2	0.5	8.57
M9		1.0	8.19
M10	SiC-ZnO	0.5	6.04
M11		1.0	6.51

Para el caso de las muestras con ZnO, no se observan cambios considerables en los valores de área superficial. En este caso, el ZnO solamente se aglomera retardando la reacción de hidratación.

Por otro lado, las muestras que contenían SiC-TiO₂ y SiC-ZnO presentaron valores de área muy similares a los obtenidos para el material de referencia, M1. Es decir, debido a la incorporación de los fotocatalizadores a la mezcla, su propiedad de área superficial específica no se afectó considerablemente.

4.4.4 E_g de los morteros con TiO₂, ZnO, SiC-TiO₂ y SiC-ZnO.

Debido a la adición de un catalizador como el TiO₂ o ZnO a la mezcla cementante, el valor de E_g puede sufrir afectaciones. En este caso, dado el objetivo que es preparar materiales auto-limpiantes, es importante conocer la variación de esta propiedad, en función de la cantidad de fotocatalizador agregado.

El concreto es un material que se comporta como un dieléctrico o conductor en función de su contenido en humedad. El concreto húmedo tiene una resistividad de alrededor de 50 Ωm a 1 KHz; es decir, se sitúa en el campo de los semiconductores. Sin embargo, cuando está completamente seco, la resistividad alcanza niveles de 10⁹ Ωm, lo que corresponde a un aislante [50].

Tomando en consideración la presencia o ausencia de humedad en las muestras, las mediciones por espectroscopía para obtener el valor de E_g de los diferentes morteros, el

análisis se realizó en condiciones ambientales (las muestras de morteros cortadas después del curado) y en condiciones de secado al horno a $100\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

En la figura 42 se muestra el diagrama de Tauc, correspondiente al mortero M1 (referencia). Siguiendo la teoría donde se establece el trazo de una tangente en el punto de deflexión de la curva, y considerando que la muestra tiene diversas fases, se aprecia que en las curvas se presentan más de 2 pendientes. Esto es, se obtienen al menos 2 valores de E_g para las muestras analizadas.

Para el caso de la curva en condiciones ambientales, se pueden obtener 3 valores aunque 2 de ellos coinciden. Esto se debe a que los puntos de deflexión 1 y 3 de la curva cruzan en un valor de E_g cercano a 3.2 eV y el punto 2 cruza en un valor de E_g de 3.7 eV, mientras que las pendientes observadas en la curva de la muestra secada al horno cruzan en valores de E_g de 3.5 y 3.7 eV.

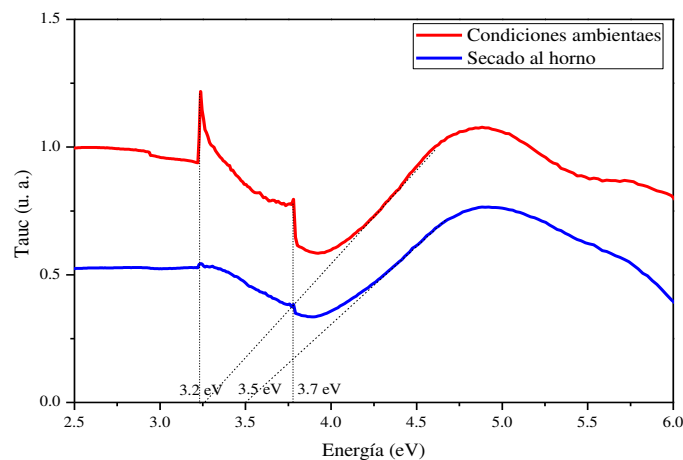


Figura 42. Diagrama de Tauc de la muestra de referencia en condiciones ambientales y secado al horno a $100\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

En la figura 43 se muestra el gráfico correspondiente a la brecha de energía del mortero M1. Se puede observar que, para los 4 casos, la brecha de energía es indirecta, lo

cual es considerable, debido a que el material es un compuesto y con ello existirá la presencia de impurezas en las diversas fases que el material presenta.

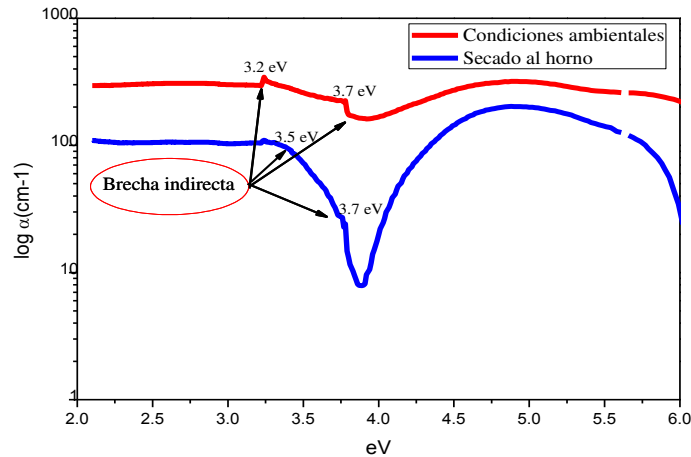


Figura 43. Brecha de energía del mortero M1 graficado por medio del coeficiente de absorción α , señalando el tipo de brecha en los valores de E_g marcados en el diagrama de Tauc.

En la tabla 11 se muestran los resultados de E_g para los diversos morteros, marcando ambas condiciones, es decir, con humedad y secado al horno.

Tabla 11. Valores de E_g para los morteros con material fotocatalítico, en condiciones ambientales y secado al horno.

Muestra	Condiciones ambientales		Secado al horno	
M1-std	3.2 eV	3.7 eV	3.5 eV	3.7 eV
M2	3.0 eV	3.8 eV	3.1 eV	3.8 eV
M3	3.2 eV	3.7 eV	3.2 eV	3.7 eV
M4	3.0 eV	-	3.1 eV	-
M5	3.2 eV	3.7 eV	3.2 eV	3.5 eV
M6	3.2 eV	3.7 eV	-	3.5 eV
M7	3.2 eV	3.6 eV	3.2 eV	3.6 eV
M8	3.2 eV	3.3 eV	3.2 eV	3.5 eV
M9	3.2 eV *	3.7 eV *	3.2 eV *	3.7 eV *
M10	3.2 eV *	3.7 eV *	3.2 eV *	3.7 eV *
M11	3.2 eV *	3.7 eV *	3.2 eV *	3.8 eV *

*Valores obtenidos al graficar α (coeficiente de absorción) de las diversas muestras)

En la figura 44 se muestra una gráfica con la posición relativa de los valores de E_g entre los diferentes morteros, representando los diversos valores obtenidos en ambas condiciones. En dicho gráfico se puede observar que todas las muestras están dentro del rango de luz UV y sólo un par de ellas estaría en los límites de la luz UV y luz visible ($E_g = 3.0$ eV).

Es decir, de acuerdo con los valores de E_g obtenidos, los materiales cementantes que contienen el fotocatalizador no presentarán variaciones considerables en sus valores de E_g , lo que permite asumir que presentarán actividad fotocatalítica bajo irradiación de luz UV.

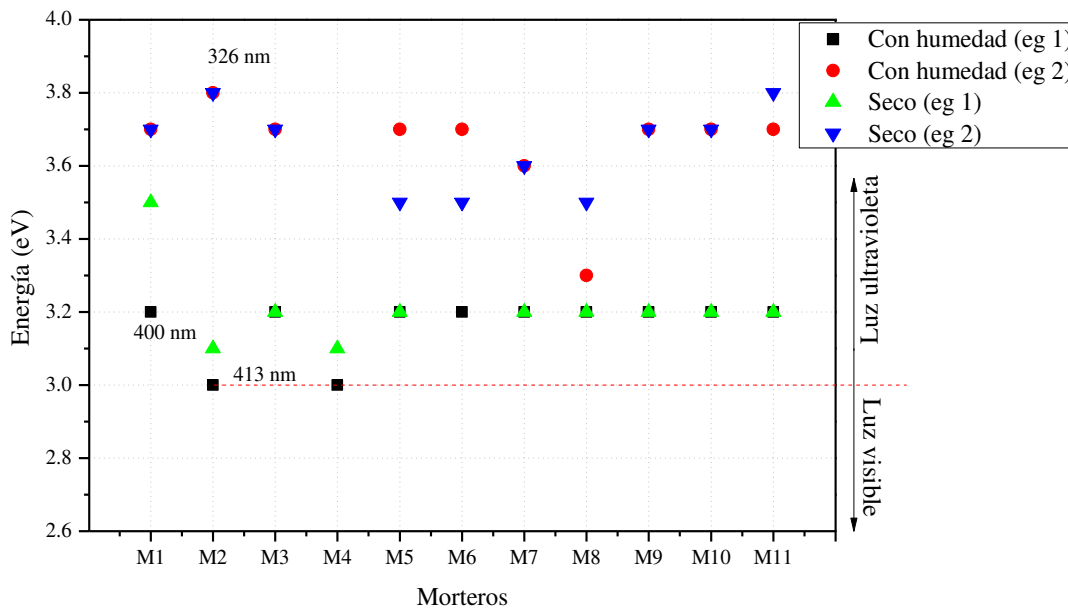


Figura 44. Gráfico con los valores de E_g de los diferentes morteros, marcando con el límite entre la región ultravioleta y visible.

4.5 Determinación de las propiedades térmicas y mecánicas de los morteros auto-limpiantes.

4.5.1 Evaluación del comportamiento de expansión térmica de los morteros con TiO₂.

En la figura 45 se muestran las curvas del comportamiento de la expansión térmica de los morteros preparados con incorporaciones de TiO₂ a diferentes concentraciones, así como el mortero de referencia (M1). En esta figura se observa que las diferentes muestras presentan un comportamiento lineal, desde la temperatura ambiente a 100°C. Posterior a esta temperatura en los siguientes 20°C a 30°C se comienzan a presentar variaciones en el comportamiento, así como una contracción entre 130°C y 170°C. Esta contracción se asocia con la pérdida de agua del material, el cual vuelve a presentar un comportamiento de expansión lineal por encima de los 170°C.

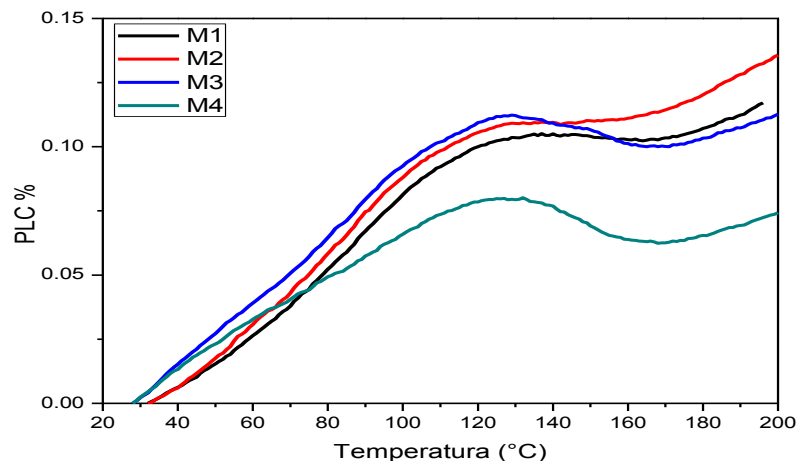


Figura 45. Comportamiento térmico lineal de las muestras con TiO₂ en relación con la muestra de referencia señalando el área de cambio de comportamiento.

Aunque las diferentes curvas presentan un comportamiento similar se puede observar que la interacción entre ellas es diferente esto con respecto a la muestra de referencia. De temperatura ambiente a 100°C las muestras con 0.5 y 1% de TiO₂ presentan una expansión ligeramente mayor que la muestra de referencia, pero la muestra con 5% de TiO₂ tiene un porcentaje de cambio lineal menor.

Dicho comportamiento se mantiene similar hasta los 130°C. Por su parte, la muestra con 1% de TiO₂ presenta un porcentaje de cambio lineal negativo mayor que el de las muestras M1 y M2, razón por la cual una vez que las muestras comienzan a mostrar nuevamente un comportamiento positivo de expansión, la curva representativa de la M3 queda por debajo de las curvas M1 y M2.

Tabla 12. Valores de coeficiente de expansión térmica de muestras con TiO₂ y muestra de referencia

Muestra	Coeficiente de expansión térmica ($1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)			
	28 a 100 °C	101 a 130 °C	131 a 170 °C	171 a 200 °C
M1-std	12.0	7.17	-0.0098	5.64
M2	12.9	6.77	1.38	7.21
M3	12.8	6.28	-2.94	4.37
M4	9.15	4.30	-4.35	3.95

Se puede apreciar en la tabla 12 que, al inicio, el material sufre una expansión considerable y que por encima de los 100°C, el material comienza a presentar valores más bajos de expansión, inclusive llega a presentar valores de expansión negativa.

Los valores relacionados con la muestra de referencia, principalmente aquellos obtenidos de temperatura ambiente a 100°C son similares a los reportados por algunos autores como Kosmatka [29], quien reporta valores de 7 a 11 millonesimas de cambio

longitudinal por grado celcius, mientras que el ACI 224 (Joints in Concrete Construction) reporta valores de $11 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$, aunque se deja claro en ambos casos que las variaciones dependen principalmente del tipo de agregado y, en ambos casos, las mediciones se realizaron a concreto y no a morteros.

De los resultados obtenidos, queda claro que los morteros sufren expansión debido a la presencia del agua retenida, la que al calentarse por encima de los 100°C es liberada y con ello se provocan microgrietas que hacen que el coeficiente de expansión térmica se vea disminuido o incluso llegue a ser negativo.

Taylor [2] reportó que el agua retenida tiene relación con las fases de monosulfatos y Etringita y que al aumentar la temperatura por arriba de los 100°C , esta agua es eliminada gradualmente, tal como se observa en la figura 46.

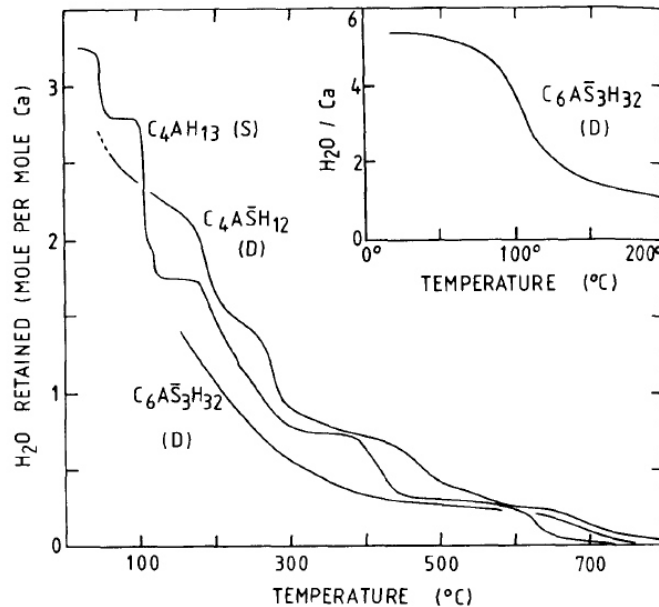


Figura 46. Curvas de pérdida de peso para C₄AH, monosulfato y Etringita (TG. 10°C/min) [2]

Considerando la información anterior, es entendible que al ir incrementando la temperatura, las moléculas del agua comienzan a vibrar hasta provocar el cambio de líquido a vapor. Por eso, en un inicio, el material tiende a expandirse libremente; sin embargo, al transformarse en gas, éste tiende a salir, provocando microgrietas, con lo cual la expansión se ve disminuida.

Sin embargo, una vez que el agua se evapora, el material cementante vuelve a expandir linealmente, al seguir incrementando la temperatura.

4.5.2 Evaluación del comportamiento de expansión térmica de los morteros con ZnO.

En el caso de las muestras con ZnO como material fotocatalítico, ver figura 47, se observa un comportamiento similar al de los morteros con TiO₂. Es decir, nuevamente se presenta una expansión lineal desde los 25°C hasta los 100°C y una contracción por arriba de los 130°C. Sin embargo, a diferencia de las muestras con TiO₂, en este caso la contracción se prolonga más allá de los 170°C.

En este caso no se observa gran diferencia entre los morteros que contienen diferentes proporciones de ZnO. Incluso el comportamiento es muy similar al del material de referencia.

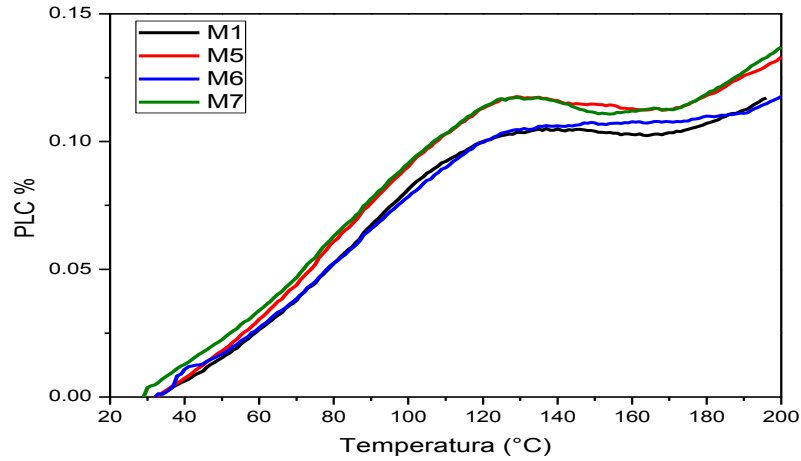


Figura 47. Comportamiento térmico lineal de las muestras con ZnO en relación con la muestra de referencia señalando el área de cambio de comportamiento.

En la tabla 13 se muestran los valores de expansión térmica de los morteros con ZnO. Al igual que las muestras con TiO₂, los valores del coeficiente de expansión térmica fueron muy similares al material de referencia. Esta situación era de esperarse, ya que la cantidad de fotocatalizador no es mucha y el TiO₂, como el ZnO, presenta valores de expansión térmica positiva.

Tabla 13. Valores de coeficiente de expansión térmica de muestras con ZnO y muestra de referencia

Muestra	Coeficiente de expansión térmica (1 X 10 ⁻⁶ °C ⁻¹)			
	28 a 100 °C	101 a 130 °C	131 a 170 °C	171 a 200 °C
M1-std	12.0	7.17	-0.0098	5.64
M5	13.3	8.80	-1.12	7.04
M6	11.5	8.57	0.67	3.44
M7	12.9	8.34	-1.02	8.49

4.5.3 Evaluación del comportamiento de expansión térmica de los morteros con SiC-TiO₂ y SiC-ZnO.

En el caso de los morteros que contienen el fotocatalizador SiC-TiO₂ y SiC-ZnO, se presentó un comportamiento similar a los anteriores. En la figura 48 se observa que las curvas de expansión térmica presentan un comportamiento similar al material de referencia.

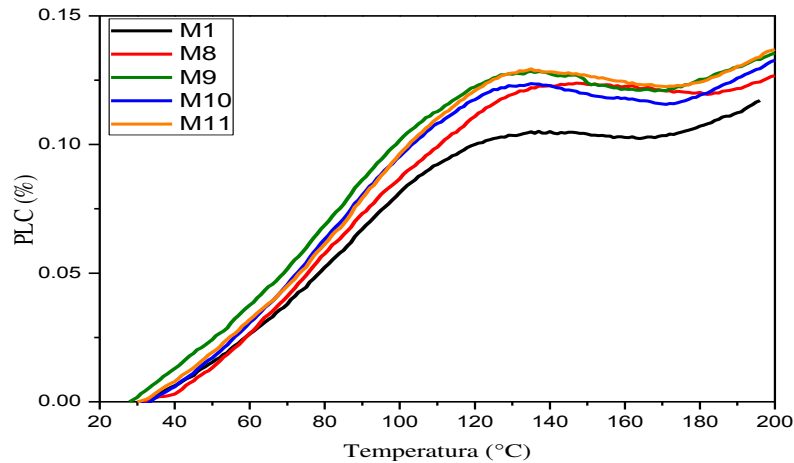


Figura 48. Comportamiento térmico lineal de las muestras con SiC-TiO₂ y SiC-ZnO en relación con la muestra de referencia señalando el área de cambio de comportamiento.

En la tabla 14 se presentan los valores del coeficiente de expansión térmica de cada una de las muestras que contienen SiC-TiO₂ y SiC-ZnO. Se observa que todas ellas muestran un valor mayor al que se obtuvo para el material de referencia. Principalmente al inicio del calentamiento de 25°C a 100°C.

En este caso se observa una ligera contracción, más bien se observa un comportamiento sin gran variación entre 130°C y 170°C.

Tabla 14. Valores de coeficiente de expansión térmica de muestras con SiC-TiO₂ y SiC-ZnO y muestra de referencia.

Muestra	Coeficiente de expansión térmica ($1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)			
	28 a 100 $^\circ\text{C}$	101 a 130 $^\circ\text{C}$	131 a 170 $^\circ\text{C}$	171 a 200 $^\circ\text{C}$
M1-std	12.0	7.17	-0.0098	5.64
M8	12.6	10.7	0.26	2.07
M9	14.1	8.30	-1.70	5.04
M10	13.8	8.93	-1.76	5.92
M11	13.8	10.3	-1.33	4.97

En general, todos los materiales presentaron coeficientes de expansión térmica similares al del mortero de referencia. Aunque se debe mencionar que todos los morteros, incluido el de referencia y los que contenían fotocatalizador, mostraron una ligera contracción entre 130 $^\circ\text{C}$ y 170 $^\circ\text{C}$. Situación que fue atribuida a la eliminación del agua contenida.

Tabla 15. Valores de CET de 28 a 100 $^\circ\text{C}$ de morteros con humedad ambiental en comparación con morteros que han tenido un tratamiento térmico previo.

	Fotocatalizador	Porcentaje de fotocatalizador	CET con humedad ambiental 28 a 100 $^\circ\text{C}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	CET con tratamiento térmico previo 28 a 100 $^\circ\text{C}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
M1-std	-	0	12.0	10.0
M2	TiO ₂	0.5	12.9	8.89
M3		1.0	12.8	8.23
M4		5.0	9.15	9.53
M5		ZnO	0.5	13.3
M6	1.0		11.5	11.0
M7	5.0		12.9	9.85
M8	SiC-TiO ₂	0.5	12.6	10.4
M9		1.0	14.1	9.73
M10	SiC-ZnO	0.5	13.8	11.2
M11		1.0	13.8	10.6

Por otro lado, con la finalidad de conocer el comportamiento de expansión térmica de los morteros después de un tratamiento previo para eliminar el agua, se realizó el análisis en el mismo intervalo de temperatura (25°C a 100°C). Previamente las muestras fueron secadas a 110°C por 12 horas y posteriormente una vez enfriadas a temperatura ambiente se procedió a su análisis. En la tabla 15 se muestran los valores obtenidos de coeficiente de expansión térmica.

Como puede apreciarse, la expansión se vio disminuida considerablemente, ya que, al no estar el agua presente, los poros comienzan a cerrarse y por lo tanto afectan la expansión. Aunque no es muy drástica la variación, si es una modificación considerable entre la muestra que contienen agua y la muestra seca (13.8 vs 8.3). Las gráficas correspondientes a estas mediciones del material en seco se observan en el apéndice II.

4.5.4 Resistencia a compresión de los morteros con TiO₂, ZnO, SiC-TiO₂ y SiC-ZnO.

Los valores de compresión obtenidos en un curado de 28 días indican un aumento, de forma general, en los valores de resistencia a compresión, al adicionar TiO₂ y ZnO a las mezclas cementantes en diferentes proporciones.

Se observa que aún en un proceso de sustitución en masa de cemento, aumentan los valores respectivos de resistencia a la compresión, particularmente las muestras que contienen ZnO, alcanzando la mezcla M7 el valor máximo en esta prueba, con un resultado de un 50% mayor que los morteros de referencia, tal como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores de resistencia a compresión obtenidos por cada una de las mezclas

	Fotocatalizador	Porcentaje de fotocatalizador	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)
*M1-std	-	0	411
M2	TiO ₂	0.5	431
M3		1.0	375
M4		5.0	457
M5	ZnO	0.5	519
M6		1.0	508
M7		5.0	609
M8	SiC-TiO ₂	0.5	485
M9		1.0	495
M10	SiC-ZnO	0.5	309
M11		1.0	445

*Nota: Material empleado como referencia, mortero preparado con cemento CPO 40

Si bien, algunas muestras presentaron valores menores que el obtenido para la muestra de referencia, existe un claro incremento en la mayoría de las muestras que contienen el material fotocatalítico. En la figura 49 se muestra de manera gráfica el comportamiento de resistencia a la compresión de cada una de las muestras analizadas.

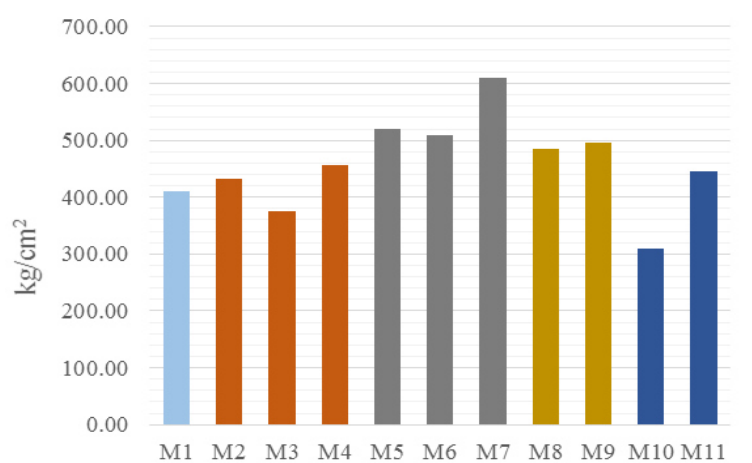


Figura 49. Grafico de resistencia a compresión de los morteros con material fotocatalítico adicionado en sustitución de un porcentaje de cemento.

Este comportamiento, según Lucas y Ferreira [51], es común e indica el porcentaje de material que es posible alojar en la matriz cementante y la estabilización del material, mencionando que dicho comportamiento, con la incorporación de TiO_2 en mezcla con materiales cementantes, es similar en parámetros como la distribución de tamaño de poro.

4.6 Evaluación de la actividad fotocatalítica en la degradación de Rodamina B.

Para evaluar la actividad fotocatalítica de los morteros se preparó una solución de Rodamina B, a 5 ppm y una vez obtenida la solución se colocaron dentro de envases de vidrio piezas de 2.5 X 2.5 X 5 cm de los morteros. Todas las muestras fueron expuestas a la luz solar por un periodo de 8 horas.

Para medir la degradación se colocó una muestra de referencia o blanco para medir la fotólisis del colorante en el mismo lapso que la exposición de las muestras, obteniendo una pérdida de color de 13.5 %.

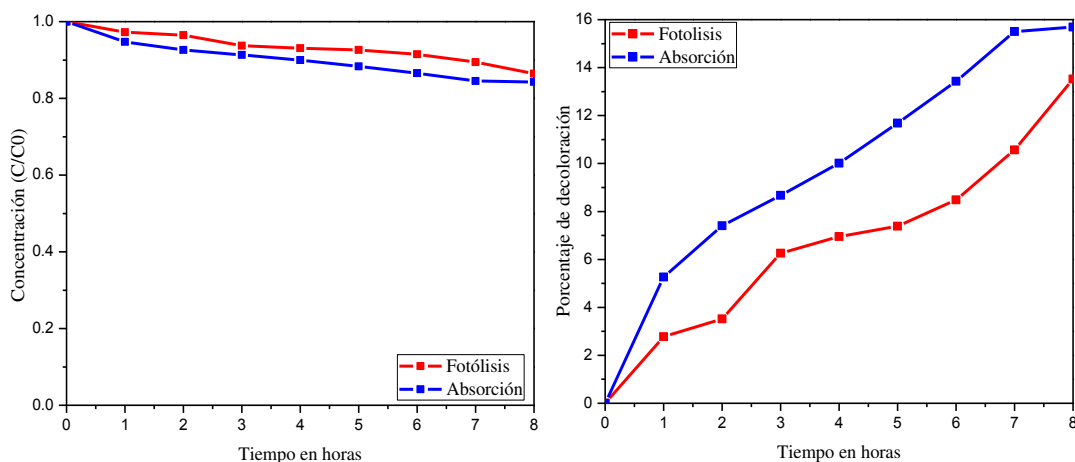


Figura 50. A la izquierda concentración de Rodamina B a un tiempo de 8 horas y a la derecha porcentaje de decoloración de la solución.

Se realizó también la medición de la absorción del colorante por la muestra de mortero (prueba realizada en la oscuridad) obteniendo una decoloración de la solución de 15.6 %. Ambos datos se pueden observar en la figura 50.

La figura 51 muestra los datos obtenidos en las muestras que contenían TiO_2 y la muestra de referencia (M1). En la gráfica se observa que la muestra con mayor decoloración es la muestra M2 que es aquella que contiene 0.5% de TiO_2 , en sustitución de masa de cemento. La muestra M3 tiene una concentración al final de las 8 horas, muy similar a la muestra de referencia y M4 que es el mortero con un 5% de sustitución de cemento. Aunque presenta una concentración de Rodamina B menor que la muestra de referencia y que la muestra M3 sigue siendo un valor menor que M2. En general, se observa que se produce la decoloración de la Rodamina B, lo que indica que hay materiales auto-limpiantes.

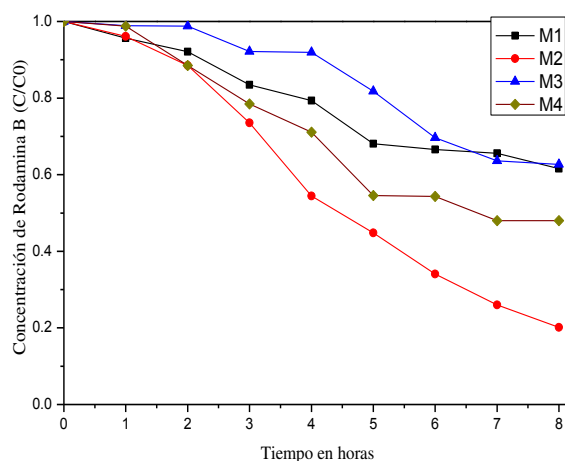


Figura 51. Decoloración de Rodamina B en un periodo de 8 horas en exposición a la luz solar, muestras con TiO_2 y referencia.

Como se ha mencionado en secciones anteriores, entre más TiO_2 se adiciona en la mezcla, hay reacciones con los aluminatos generando la formación de fases como la

Etringita. Aun y con ello, la cantidad de TiO_2 que queda sin reaccionar es suficiente para provocar la decoloración de la Rodamina B.

Por otro lado, en la figura 52 se presentan los datos de los morteros con ZnO , en comparación con la muestra de referencia. La característica particular del proceso de decoloración de estos morteros es que, a mayor cantidad de fotocatalizador, mayor decoloración de la muestra.

Así mismo, se observa que aun cuando se agregó una pequeña cantidad de ZnO , esta muestra también fue capaz de provocar la decoloración de la Rodamina B. en este caso, después de 8 horas se logra una decoloración un poco mayor que la mostrada con TiO_2 . Esto es entendible, ya que de acuerdo con los valores de E_g , es más factible que el ZnO sea más activo bajo luz solar que el propio TiO_2 , y con este resultado queda evidenciado lo anterior.

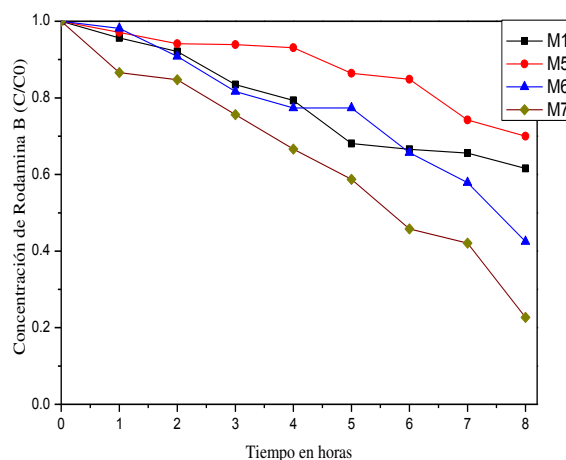


Figura 52. Decoloración de Rodamina B en un periodo de 8 horas en exposición a la luz solar, muestras con ZnO y referencia.

En relación a las muestras que contienen el fotocatalizador SiC-TiO_2 y SiC-ZnO , se observa que la decoloración es mayor que las anteriormente mostradas. Es decir, el hecho

que el TiO₂ o el ZnO estén soportados en SiC permite que haya una sinergia que mejora la actividad fotocatalítica.

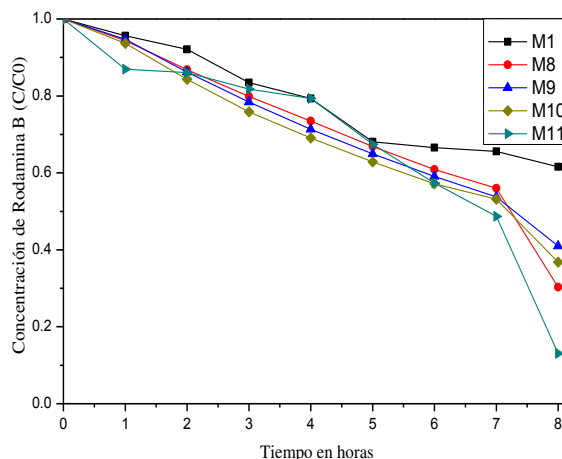


Figura 53. Decoloración de Rodamina B en un periodo de 8 horas en exposición a la luz solar, muestras con SiC-TiO₂, SiC-ZnO y referencia.

En la tabla 17 se presentan los valores de decoloración obtenidos a cada hora. Se observa que, en general, la mayoría de las muestras presentan mayor grado de decoloración que la muestra de referencia.

Tabla 17. Porcentaje de decoloración de las soluciones de Rodamina B a 5 ppm en cada mortero y en los procesos de fotólisis y absorción.

% Decoloración													
Hora	Fotólisis	Adsorción	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2.8	5.3	4.3	3.9	1.1	1.2	2.9	1.8	13.4	5.6	5.3	6.3	13.0
2	3.5	7.4	7.9	11.5	1.2	11.5	5.9	9.2	15.3	13.2	13.8	15.7	13.9
3	6.3	8.7	16.5	26.5	7.8	21.6	6.1	18.4	24.4	20.1	21.6	24.1	18.2
4	7.0	10.0	20.6	45.6	8.1	28.9	6.9	22.6	33.4	26.5	28.6	31.0	20.7
5	7.4	11.7	31.9	55.2	18.2	45.5	13.6	22.6	41.3	33.1	35.1	37.2	32.6
6	8.5	13.4	33.4	65.9	30.4	45.7	15.2	34.3	54.2	39.1	40.9	42.8	42.7
7	10.6	15.5	34.4	74.0	36.4	52.0	25.8	42.1	57.9	44.0	46.2	46.8	51.3
8	13.5	15.7	38.5	79.9	37.3	52.0	30.0	57.5	77.3	69.7	59.0	63.2	86.9

Aunque se debe mencionar que aun después de 8 horas de reacción, no se ha logrado una completa decoloración de la Rodamina B bajo luz solar. El máximo % de decoloración es de 87% y se alcanza utilizando como fotocatalizador al SiC-ZnO. Este resultado indica que la sinergia de utilizar SiC y ZnO se ve favorecida bajo luz solar.

En relación con la cinética de reacción de la decoloración de la solución de Rodamina B a 5 ppm, la ecuación que mejor se ajusta a una recta corresponde a reacciones de primer orden. En la tabla 18 se muestra la cinética de las reacciones correspondientes a cada uno de los morteros y el tiempo de vida media de la solución de Rodamina B.

Tabla 18. Constante de velocidad K y $t_{1/2}$ de las reacciones en los morteros con fotocatalizador adicionado.

	Fotocatalizador	Porcentaje de fotocatalizador	K (horas ⁻¹)	$t_{1/2}$ (horas)
Fotólisis	-	0	0.0158	43.86
M1-std	-	0	0.0654	10.60
M2	TiO ₂	0.5	0.2122	3.27
M3		1.0	0.0669	10.36
M4		5.0	0.1074	6.45
M5	ZnO	0.5	0.0421	16.46
M6		1.0	0.0952	7.28
M7		5.0	0.1596	4.34
M8	SiC-TiO ₂	0.5	0.1206	5.75
M9		1.0	0.1035	6.70
M10	SiC-ZnO	0.5	0.1111	6.24
M11		1.0	0.1814	3.82

Los morteros con mayor eficiencia en la decoloración de Rodamina B en solución se utilizaron para evaluar el desempeño fotocatalítico, al ser impregnados con el colorante Rodamina B y expuestos a irradiación solar. En la figura 54 se observa que nuevamente se presenta decoloración de la superficie del fotocatalizador. En este caso se dejó secar el

colorante en su superficie en un desecador y a la oscuridad para disminuir cualquier efecto previo a la exposición solar.

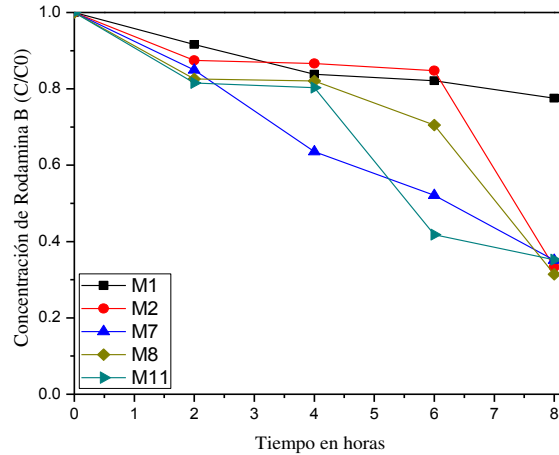


Figura 54. Decoloración de Rodamina B en un periodo de 8 horas en exposición a la luz solar, muestras en placas.

Todas las muestras presentaron una decoloración mayor que 60%, después de 8 horas, 3 veces mayor que la decoloración mostrada por la muestra de referencia (22%) en el mismo tiempo de exposición.

Tabla 19. Porcentaje de decoloración de Rodamina B impregnada en placas de mortero.

% Decoloración					
Hora	M1	M2	M7	M8	M11
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	8.40	12.55	15.08	17.38	18.46
4	16.15	13.37	36.46	17.94	19.70
6	17.86	15.22	47.88	29.50	58.18
8	22.44	66.68	64.90	68.58	64.80

En la siguiente tabla se muestran los valores correspondientes a la cinética de la reacción correspondiente a la decoloración de las placas impregnadas con Rodamina B.

Tabla 20. Constantes de velocidad (k) y tiempo de vida media ($t_{1/2}$) de la Rodamina B sobre la superficie de morteros.

Morteros	Fotocatalizador	Porcentaje de fotocatalizador	K (hora ⁻¹)	T ½ (horas)
M1	-	0	0.0259	26.76
M2	TiO ₂	0.5	0.1115	6.22
M7	ZnO	5.0	0.1291	5.37
M8	SiC-TiO ₂	0.5	0.1237	5.60
M11	SiC-ZnO	1.0	0.1378	5.03

4.7 Análisis estructural de los morteros con baja expansión térmica.

Con la finalidad de contar con materiales auto-limpiantes y con baja expansión térmica, se procedió a agregar una pequeña proporción de aluminosilicato de litio en sustitución de un porcentaje del agregado. Los morteros empleados fueron aquellos que presentaron la mayor actividad fotocatalítica.

4.7.1 Composición de fases (DRX).

En los morteros con LiAlSiO₄ se incorporó un porcentaje de un 5%, en sustitución del agregado en masa, y como se ilustra en la figura 55 la presencia del aluminosilicato se hace evidente en los difractogramas de cada una de los morteros.

Uno de los cambios evidentes entre los difractogramas presentados en la figura es la variación en la intensidad de las reflexiones del cuarzo, la Portlandita y la Tobermorita,

que para todos los casos son claramente apreciables los picos correspondientes a dichas fases.

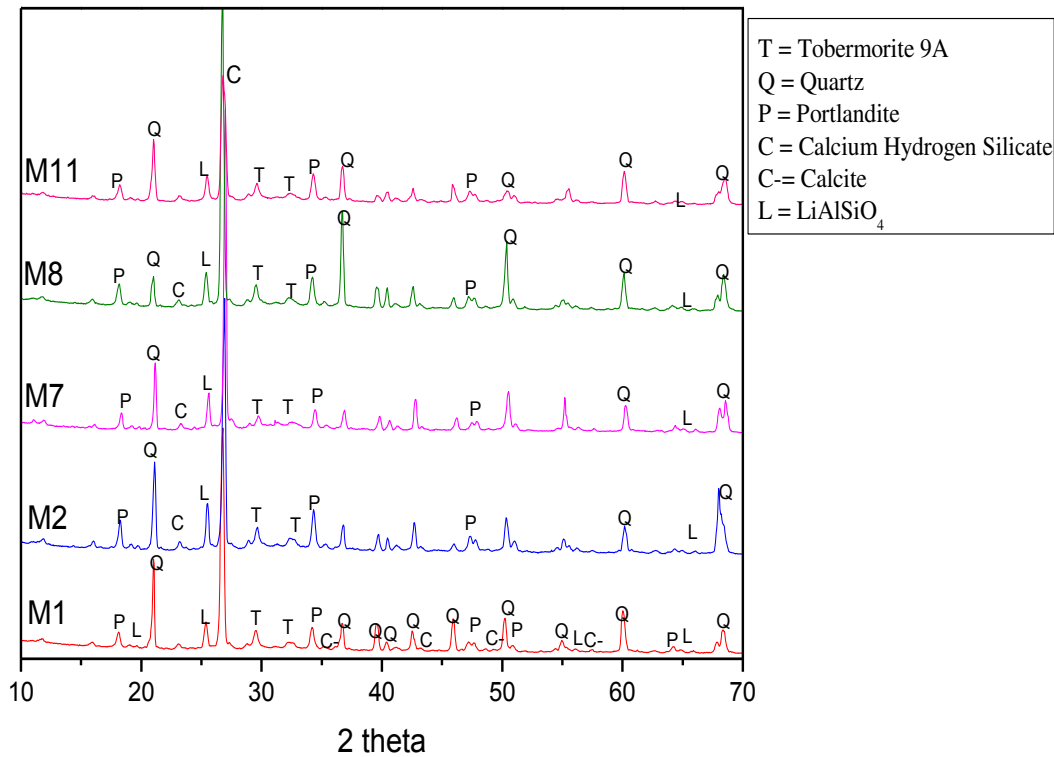


Figura 55. Difractogramas de los morteros con LiAlSiO₄

Por consiguiente, se considera que la presencia del LiAlSiO₄ mantiene estable el porcentaje de Portlandita y Tobermorita o inclusive se puede ver favorecido su mayor producción. Una de las fases que no se detectó en los difractogramas es la Etringita.

Lo anterior resulta favorable en consideración de la presencia de fases estables y, además, que la presencia de la Portlandita mantiene un pH alto en los morteros. Lo que indica que hay materiales alcalinos.

4.7.2 Morfología.

En los morteros con aluminosilicato de litio, es difícil la identificación de formas específicas. Esto debido a que en toda el área del mortero de forma general, como en la vista a detalle, se aprecian depósitos sobre la superficie de los demás cristales y aunque sí se observan cristales respectivos a C-S-H denso sobre la superficie de dichas morfologías, existe una gran cantidad de material que impide definir el alcance de algunas formas, como se muestra en la figura 56 (M1-LAS, muestra de referencia con LiAlSiO_4).

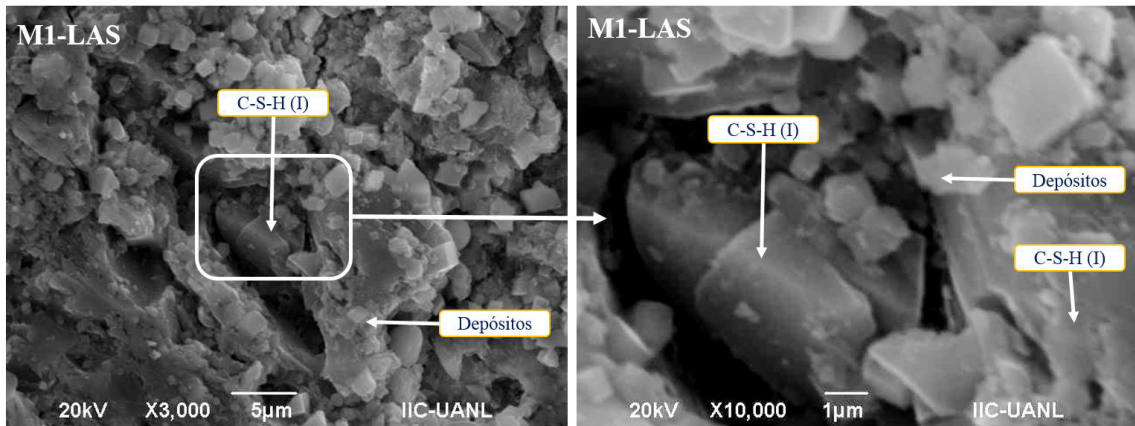


Figura 56. Micrografías de la muestra M1 con LiAlSiO_4

Para el caso de los morteros con fotocatalizador y LiAlSiO_4 , el comportamiento fue el mismo. Es decir, no hay una morfología específica. Lo que sí es evidente es que no se aprecia la morfología de tipo agujas, típico de la presencia de la fase Etringita.

En la figura 57 se presentan las micrografías correspondientes a morteros con TiO_2 (M2-LAS), en vista general y en detalle, así como el mortero ZnO (M3-LAS) en vista general y en detalle, con LiAlSiO_4 incorporado en la matriz cementante. En ambos casos se puede observar la presencia de material granular sin reaccionar que se atribuye al aluminosilicato de litio adicionado, aunque para el caso del mortero M7 que es el que se muestra en

la sección inferior de la figura 57, la presencia del aluminosilicato de litio favorece al crecimiento de C-S-H de alta densidad y la formación de cristales de Portlandita.

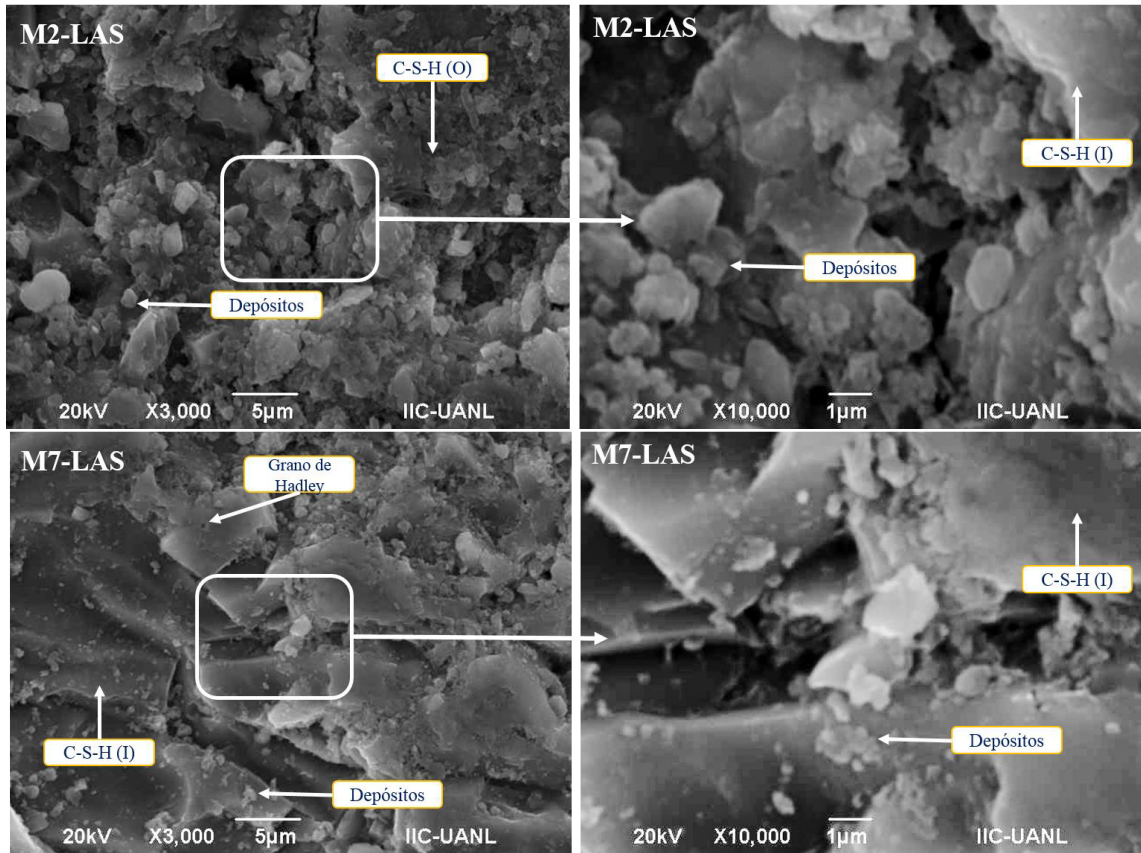


Figura 57. Micrografías en sección superior de morteros con TiO_2 y LiAlSiO_4 , en sección inferior mortero con ZnO y LiAlSiO_4 .

En la figura 58 se observan las micrografías de los morteros M8 y M11 en vista general y en detalle. En ambos casos no se observan formas definidas, sino más bien una aglomeración de material que son depósitos en la superficie de las fases que se detectan por DRX o inclusive de los agregados de cuarzo.

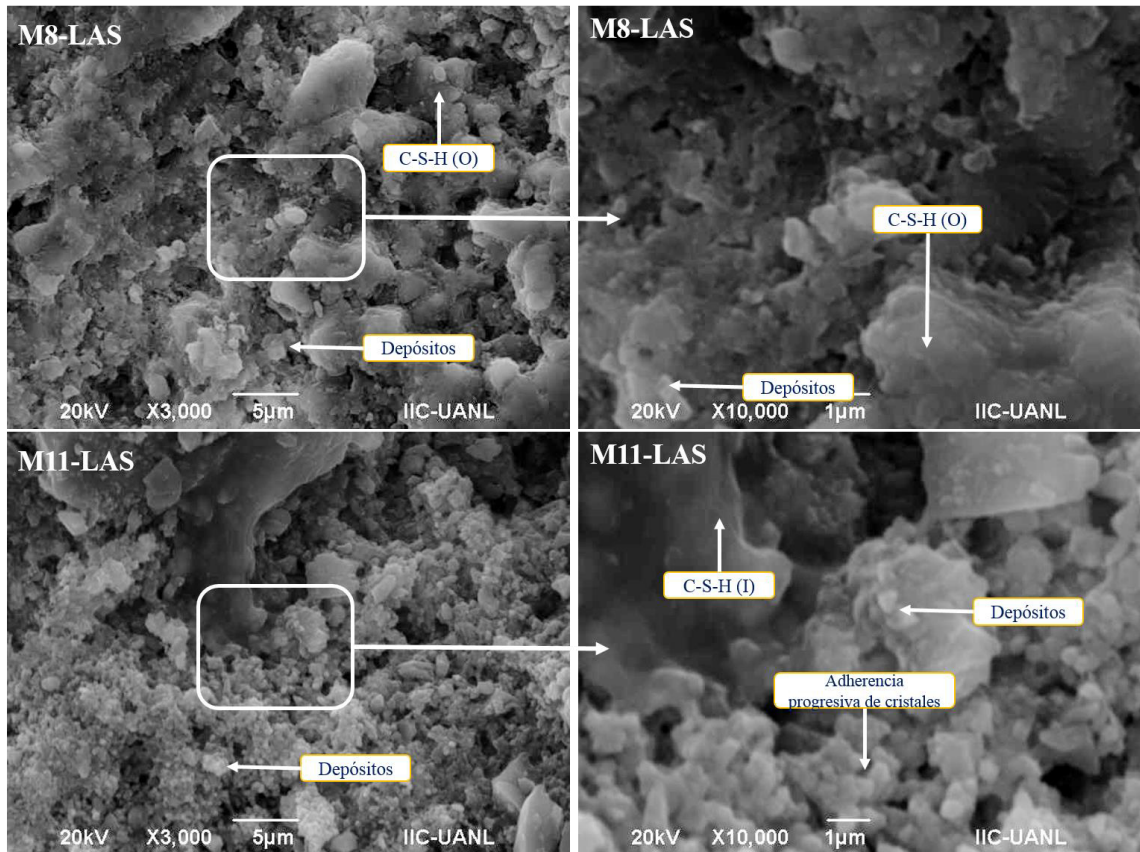


Figura 58. Micrograffías en sección superior de morteros con SiC-TiO₂ y LiAlSiO₄, en sección inferior mortero con SiC-ZnO y LiAlSiO₄.

4.8 Determinación de propiedades fisicoquímicas de los morteros con baja expansión térmica.

4.8.1 Tiempo de fraguado.

Los morteros con LiAlSiO₄ presentaron un tiempo de fraguado similar al de las muestras sin dicho material, como se presenta en la tabla 21, donde se puede observar que el único valor que presenta mayor cambio es el del mortero con ZnO.

Tabla 21. Tiempo de fraguado de los morteros con LiAlSiO_4 , en comparación con los morteros sin aluminio-silicato de litio.

Mortero	Fotocatalizador	Porcentaje de fotocatalizador	Tiempo de fraguado (horas) con LiAlSiO_4	Tiempo de fraguado (horas) sin LiAlSiO_4
M1	-	0	5 ½	5 ½
M2	TiO_2	0.5	4 ½	4 ½
M7	ZnO	5.0	48	60
M8	SiC-TiO_2	0.5	5 ½	5 ½
M11	SiC-ZnO	1.0	5 ½	6 ½

Los morteros con ZnO o con SiC-ZnO tienen un mayor tiempo de fraguado que el resto de los morteros, pero la presencia del LiAlSiO_4 disminuye el tiempo de fraguado. Aunque sigue siendo superior al del mortero de referencia, es menor al de los morteros con ZnO sin el aluminio-silicato hasta en un 20% de tiempo.

El efecto presentado tiene su explicación en que el ZnO se deposita sobre la superficie de los granos de material mezclado. Como el LiAlSiO_4 tiene un tamaño de partícula menor que el agregado, $491 \mu\text{m}$, es decir, una relación de 20 veces menor el aluminio-silicato de litio que el agregado de cuarzo. Esto genera una mayor área de contacto entre los granos de material mezclado y el LiAlSiO_4 adicionado permitiendo con ello que una mayor cantidad de los granos de cemento queden sin ser recubiertos en su superficie y puedan reaccionar sin la interferencia de procesos de hidratación del ZnO .

4.8.2 Porosidad.

La porosidad en los morteros se ve afectada por la presencia del LiAlSiO_4 , esto debido a que el material adicionado presenta un tamaño de partícula similar a la del cemento, pero no está reaccionando. El LiAlSiO_4 sigue estando presente en la fase

adicionada, aunque puede estar obstruyendo la porosidad abierta, ya que, con excepción del mortero M7, los otros morteros preparados con aluminosilicato de litio tienen una porosidad total menor que sus pares, aquellos que no contienen aluminosilicato de litio, como se observa en la tabla 22.

Tabla 22. Valores de porosidad correspondientes a los morteros con LiAlSiO_4

	Densidad Aparente g/cm^3	Volumen de porosidad (%)			Capacidad Absorción %	Porosidad total Morteros sin LiAlSiO_4
		Abierta	Total	Cerrada		
M1	2.1	8.7	9.2	0.5	4.1	12.8
M2	2.1	9.2	10.8	1.6	4.5	13.0
M7	2.0	12.0	13.0	1.0	5.9	12.3
M8	2.2	5.2	8.5	3.3	2.5	12.3
M11	2.3	5.0	6.3	1.3	2.3	13.7

En el caso del mortero M7 (5.0% de ZnO), hay que recordar que ya se había planteado el hecho de que el ZnO forma capas en la superficie de los granos de cemento impidiendo su hidratación rápida y al tener el mismo tamaño que los granos de cemento el LiAlSiO_4 , el efecto podría replicarse a esta fase y con ello existir depósitos de ZnO sobre el aluminosilicato de litio, generando granos de mayor tamaño y/o material más sólido o compacto, lo que permite la generación de mayor área libre para la formación de porosidad.

4.8.3 Área superficial específica (S_{BET}).

En cuestión del área superficial específica, ésta ha sido una de las propiedades con mayor dificultad para obtenerla y es que, como se trata de un material formado en multicapas, la presencia del LiAlSiO_4 no permite una adsorción estable, es decir, se considera que no se consigue una saturación total del nitrógeno y en el proceso de

desorción ésta no se logra en su totalidad y es por ello que sólo se ha obtenido el valor de 2 de los morteros (tabla 23)

Tabla 23. Área superficial específica de morteros con y sin LiAlSiO_4

Mortero	Área superficial específica de mortero sin LiAlSiO_4 m^2/g	Área superficial específica de mortero con LiAlSiO_4 m^2/g
M1	7.51	9.50
M2	9.66	---
M7	7.62	---
M8	8.57	8.07
M11	6.51	---

Debido a la poca información que se logró obtener por esta técnica, se considera que, llegado a un punto, las isothermas corresponden o se ajustan mejor a los tipos IV y V que corresponden a adsorción en multicapas sobre materiales porosos.

El ciclo de histéresis se debe a la condensación por la forma irregular de los capilares. El sitio donde primeramente aparece la condensación capilar será donde, de acuerdo con la ecuación de Kelvin, el radio sea menor, es decir, en el punto "a" (figura 59).

El poro queda taponado, pero al aumentar la presión, este tapón es empujado hacia dentro, se igualan las presiones en todo el capilar y vuelve a aparecer condensación en el punto "a" y en aquellos otros puntos que les corresponda, según la ecuación de Kelvin. Este proceso de equilibrio tendrá lugar hasta que el capilar esté lleno. En cambio, para la desorción el proceso es completamente diferente. El capilar se vaciará hasta la parte "a" y se debería tener un equilibrio según la ecuación de Kelvin.

Con esta presión debería haberse ya evaporado el líquido situado en el punto “b”, ya que el radio es mayor. Sin embargo, el sitio por donde puede evaporarse el líquido es por la parte “a”. Pero en “a” la presión de vapor es menor ($r_a < r_b$) y, por consiguiente, no habrá evaporación. Así, hasta que la presión exterior disminuya hasta el valor apropiado, no se producirá el vaciado de golpe de todo el capilar (Figura 59). El proceso de desorción no es de equilibrio, mientras que el de adsorción si lo es, de ahí la histéresis.

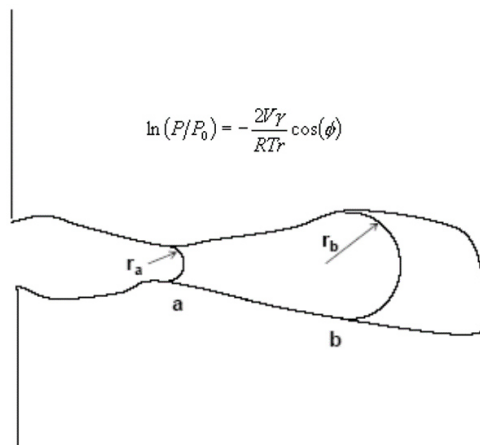


Figura 59. Puntos a y b, dentro de los poros de materiales con multicapas.

4.8.4 E_g de los morteros.

Los morteros con LiAlSiO_4 , a través de las curvas de Kubelka Munk, dieron como resultado valores de E_g muy similares en ambos casos: tanto en condiciones con humedad ambiental, como en condiciones con un secado previo. Como se muestra en la tabla 24, la muestra de referencia con adición de LiAlSiO_4 es el mortero que presenta los menores valores de E_g , a diferencia de lo que se podría esperar debido a que el resto de los morteros tienen la presencia de algún porcentaje de fotocatalizador.

Tabla 24. Valores de E_g para los morteros con material fotocatalítico y LiAlSiO_4 en condiciones ambientales y secado al horno.

Muestra	Fotocatalizador	% de fotocatalizador	Condiciones ambientales		Secado al horno	
M1	-	0	2.9 eV	3.2 e.V	3.2 eV	-
M2	TiO_2	0.5 %	3.2 eV	3.7 e.V	3.2 eV	3.7 eV
M7	ZnO	5.0 %	3.2 eV	3.6 e.V	3.2 eV	3.5 eV
M8	SiC-TiO_2	0.5 %	3.0 eV	3.2 e.V	3.0 eV	3.2 eV
M11	SiC-ZnO	1.0 %	3.2 eV	3.3 e.V	3.2 eV	3.3 eV

Todos los morteros siguen teniendo valores de banda prohibida dentro del campo de los materiales semiconductores. La diferencia entre los valores obtenidos en el mortero M1 y los demás morteros con aluminio-silicato de litio se atribuye a que, como se ha mencionado en secciones anteriores, el TiO_2 y el ZnO, llegan a tener determinadas reacciones. Estas reacciones van desde la formación de fases al reaccionar con el cemento, hasta la formación de capas en la superficie de los granos de cemento y no se descarta que el proceso ocurra de igual forma en estos morteros, sólo que la presencia del LiAlSiO_4 no permite una clara observación de dicho efecto.

Si el TiO_2 y el ZnO reaccionan en los morteros es de esperarse que los valores que se obtengan del mortero de referencia (si fotocatalizador) sean diferentes a los demás valores obtenidos y que para este caso le confieren un valor de E_g más bajo que el de los otros morteros y hay que recordar que de por sí los morteros ya son materiales semiconductores según ciertas condiciones; la diferencia principal es el desplazamiento de ese valor de banda prohibida por la presencia del LiAlSiO_4 .

Otro efecto observado es que la presencia del LiAlSiO_4 crea una condición de estabilidad en los morteros con material fotocatalítico, obteniendo comportamientos

similares en condiciones con y sin humedad, característica diferente a los morteros sin LiAlSiO_4 .

4.9 Determinación de las propiedades térmicas y mecánicas de los morteros con baja expansión térmica.

4.9.1 Comportamiento térmico lineal de morteros con LiAlSiO_4 .

En la figura 60 se muestran las curvas de PLC de los morteros con LiAlSiO_4 y entre las primeras características observables es que el comportamiento térmico lineal de los morteros se mantiene, es decir, de 0 °C a 100 °C el desarrollo es lineal; pero, de 100 °C en adelante, la curva presenta una contracción y una posterior recuperación o incremento, al superar los 170 °C. Este comportamiento es muy similar al mostrado por los morteros antes de agregarles el LiAlSiO_4 .

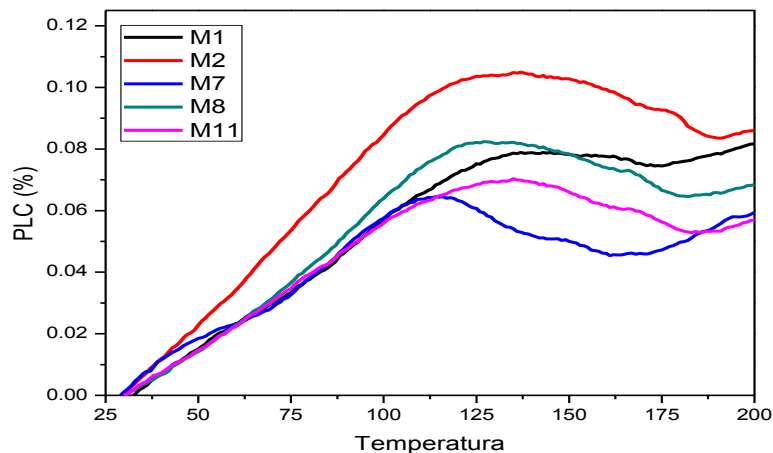


Figura 60. Curvas dilatométricas de los morteros con LiAlSiO_4 .

En la tabla 25 se observan los valores de CET obtenidos de las curvas de PLC de la figura 61. En esta tabla se aprecia cómo los valores obtenidos con excepción a M2 de 28 °C

a 100 °C son menores que los reportados (11 a $13 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). Otra característica que se observa es que, posterior a los 170°C los valores de CET obtenidos para 3 de los 5 casos siguen siendo valores negativos, cercanos al cero y que en la gráfica se aprecia un leve incremento del PLC; pero el promedio del coeficiente de expansión térmico da un valor negativo, caso contrario a los morteros sin el aluminio-silicato adicionado.

Tabla 25. Valores de CET para los morteros con LiAlSiO_4 .

Muestra	Coeficiente de expansión térmica ($10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)			
	28 a 100 °C	101 a 130 °C	131 a 170 °C	171 a 200 °C
M1-std	8.08	6.53	-0.55	2.46
M2	11.5	6.13	-2.49	-2.58
M7	8.10	-0.60	-2.59	4.64
M8	9.05	5.73	-2.86	-0.39
M11	7.98	4.25	-2.57	-0.57

Para efecto de la comparación de los valores obtenidos, la tabla 26 muestra los datos de CET de 28 °C a 100 °C de los morteros con LiAlSiO_4 y sus homólogos sin dicha adición.

Tabla 26. Comparación de CET obtenido entre morteros con y sin LiAlSiO_4 de 28 a 100°C

Muestra	Coeficiente de expansión térmica ($10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)		Porcentaje de CET disminuido
	28 a 100 °C (sin LiAlSiO_4)	28 a 100 °C (con LiAlSiO_4)	
M1	12.0	8.08	33 %
M2	12.9	11.5	11 %
M7	12.9	8.10	37 %
M8	12.6	9.05	28 %
M11	13.8	7.98	42 %

Los valores presentados en la tabla 25 demuestran que la incorporación del 5.0 % de LiAlSiO_4 , en sustitución del agregado tiene el efecto esperado al disminuir desde un 11

hasta un 42% los valores de CET en niveles de 28 °C a 100 °C, que normalmente son los niveles de temperatura en que trabajaran los materiales de construcción, sin tener afectaciones o pérdida de sus propiedades.

4.9.2 Resistencia a compresión.

En consideración con los morteros sin LiAlSiO_4 , esta propiedad se ve afectada al presentarse una disminución de la resistencia a compresión en todas las muestras. En la figura 61 se muestra el gráfico de los valores de resistencia a compresión que han alcanzado los morteros con LiAlSiO_4 y, considerando que el valor del mortero de referencia sin LiAlSiO_4 fue de 411.13 kg/cm^2 , la reproducción de dicha mezcla con la incorporación del aluminio-silicato da un resultado de 388.40 kg/cm^2 , lo que representa una disminución de 33 kg/cm^2 , es decir la disminución de 3 MPa de resistencia por cada cm^2 , debido a la presencia del LiAlSiO_4 .

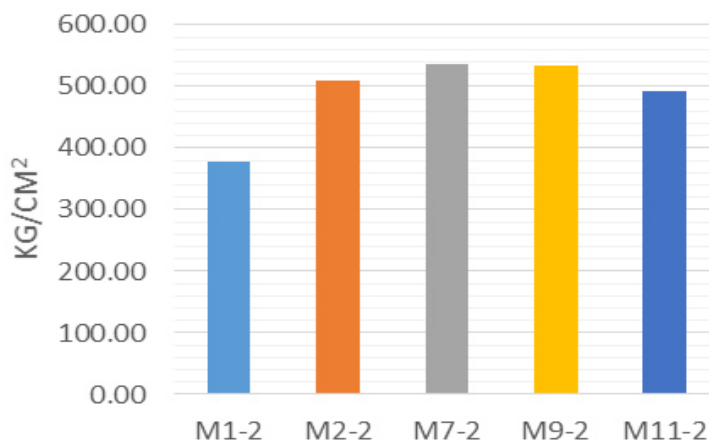


Figura 61. Resistencia a compresión de morteros con LiAlSiO_4 .

Se puede decir que en general, todos los morteros que contienen LiAlSiO_4 presentan altas resistencias a la compresión. En la tabla 27 se muestran los valores de resistencia de cada uno de los morteros.

Tabla 27. Comparación de valores de resistencia por cm² de morteros con y sin LiAlSiO₄.

Mortero	Resistencia sin LiAlSiO ₄ (kg/cm ²)	Resistencia con LiAlSiO ₄ (kg/cm ²)	Kg/cm ² de diferencia
M1	411.13	378.13	- 33
M2	431.30	509.83	+ 78.53
M7	608.87	535.37	- 73.5
M8	485.13	533.17	+ 48.04
M11	444.60	493.10	+ 48.5

4.10 Evaluación de la actividad fotocatalítica de los morteros con LiAlSiO₄.

En la figura 62 se observan las curvas de decoloración de la solución de Rodamina B producida por los morteros con LiAlSiO₄. En dicha gráfica se observa que los 5 morteros tienen un comportamiento similar y que las únicas líneas que se muestran separadas del grupo son las relativas a la absorción y a la fotólisis.

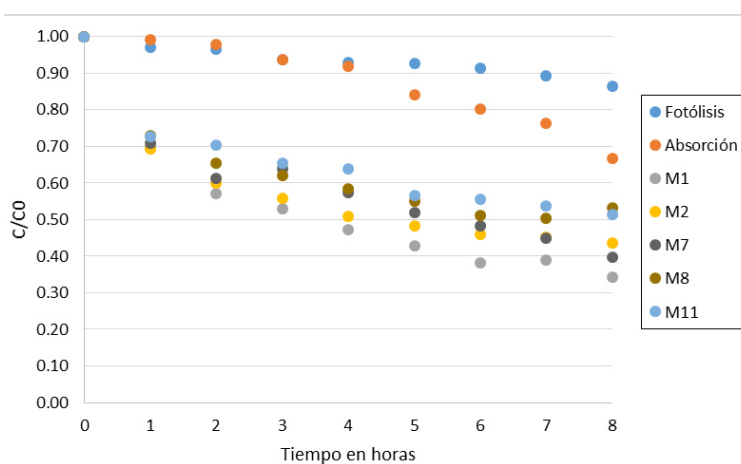


Figura 62. Curvas de decoloración de Rodamina B, por morteros con LiAlSiO₄.

En la tabla 28 se muestran los valores de decoloración para cada uno de los morteros preparados. De acuerdo con lo observado en la tabla, existe decoloración en las muestras que contienen LiAlSiO₄ y fotocatalizador.

Tabla 28. Porcentajes de decoloración de Rodamina B, a 5ppm por morteros con LiAlSiO₄.

Decoloración (1-(C/C0)*100)							
Hora	Fotolisis	Absorción	M1	M2	M7	M8	M11
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2.8	0.9	30.5	30.6	29.2	27.1	27.2
2	3.5	2.0	43.0	40.0	38.6	34.5	29.6
3	6.3	6.3	47.1	44.2	36.2	38.0	34.4
4	7.0	8.0	52.8	49.2	42.6	41.5	36.1
5	7.4	15.8	57.1	51.8	48.0	44.9	43.5
6	8.5	19.8	61.7	53.9	51.7	48.8	44.6
7	10.6	23.7	61.0	54.7	55.0	49.7	46.1
8	13.5	33.3	65.7	56.4	60.2	46.9	48.5

Por otro, lado el mortero de referencia (sin material fotocatalítico) pero preparado con LiAlSiO₄, ha demostrado el mayor porcentaje de decoloración.

Lo anterior indica que es posible la preparación de morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica. Estos son capaces de mostrar actividad fotocatalítica bajo irradiación de luz solar. Incluso, los morteros que fueron impregnados con Rodamina B mostraron un efecto favorable en la decoloración del material. En la figura 63 se muestran las curvas de las pruebas realizadas a morteros impregnados con el colorante.

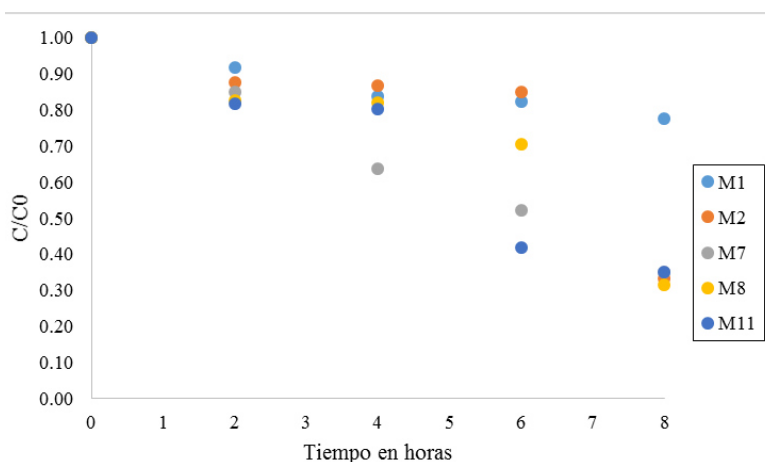


Figura 63. Curvas de decoloración de placas de morteros impregnadas con Rodamina B y expuestas al sol en un periodo de 8 horas.

En la tabla 29 se puede observar cómo en la decoloración de la Rodamina B en un proceso de auto-limpieza, el efecto cambia siendo las placas de morteros con material fotocatalítico las que presentan un mayor valor de decoloración, superior al 60 %, mientras que el mortero M1 con LiAlSiO_4 sólo se decolora un 22 %.

Lo anterior coincide con los valores de Eg obtenidos, esto debido a que el mortero en un estado seco cambia a un valor de banda prohibida de 3.2 e.V, similar al del resto de los morteros en esa condición, pero la diferencia radica en que los demás morteros tienen la presencia de TiO_2 , ZnO o material compuesto SiC-TiO_2 o SiC-ZnO , mientras que el mortero M1, aunque sí contiene Ti debido a la materia prima del cemento, no se incorporó un material fotocatalítico en alguna etapa de la preparación del mortero.

Tabla 29. Porcentajes de decoloración de las placas de morteros impregnados con Rodamina B.

Decoloración $(1-(C/C_0))*100$					
Hora	M1	M2	M7	M8	M11
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	8.40	12.55	15.08	17.38	18.46
4	16.15	13.37	36.46	17.94	19.70
6	17.86	15.22	47.88	29.50	58.18
8	22.44	66.68	64.90	68.58	64.80

De esta manera, en este trabajo ha sido posible llevar a cabo la preparación de morteros con propiedad auto-limpiante, con baja expansión térmica. Los que podrían ser considerados para aplicaciones en el área de la construcción, ya que tanto las propiedades mecánicas como las propiedades fisico-químicas se mantienen e incluso en algunos casos son mejores que el material de referencia.

Además, es importante resaltar que los resultados obtenidos indican que estos materiales serán capaces de realizar la función de auto-limpieza bajo la luz solar, lo que sin duda es de gran valía, ya que se requiere el empleo de tecnologías de bajo costo y que sean efectivas para una determinada función.

Conclusiones y Recomendaciones

Con base en los resultados de este trabajo, se pueden mencionar las siguientes conclusiones y recomendaciones.

En el presente trabajo se logró la obtención de materiales cementantes con propiedad de auto-limpieza, al adicionar materiales con propiedades fotocatalíticas como son: TiO_2 , ZnO , SiC-TiO_2 y SiC-ZnO .

Se determinó que la presencia de dióxido de titanio (TiO_2) en materiales base cemento contribuye en otras propiedades en los morteros, esto debido a que cantidades pequeñas generan un efecto de auto-limpieza, pero conforme se adicionan porcentajes del 1.0 % o superiores, en relación de masa del cemento, el TiO_2 tiende a reaccionar facilitando la formación de fases como Etringita lo que acelera el fraguado en los morteros.

Se encontró que la incorporación de ZnO tiene un efecto contrario al TiO_2 , debido a que, a mayores cantidades mejor efecto de auto-limpieza y decoloración de soluciones con colorantes orgánicos; pero el fraguado se ve retardado; aunque, una vez obtenido y curado por 28 días el mortero, se alcanzan las mayores resistencias a compresión, en comparación con el resto de los morteros analizados.

Se observó que los materiales compuestos SiC-TiO_2 y SiC-ZnO tienen un buen efecto de auto-limpieza, debido a la sinergia entre ambos semiconductores. En particular, el SiC-ZnO presenta el mayor valor de decoloración, de las 11 mezclas para morteros con

material fotocatalítico analizadas, ya que la activación del ZnO depositado sobre SiC es mejor bajo la luz solar.

Se determinó que la adición de un material con expansión térmica negativa provoca la disminución de la expansión térmica del mortero, sin demeritar sus propiedades mecánicas ni fisicoquímicas de manera considerable.

En general, se puede concluir que es posible la fabricación de materiales cementantes con propiedad de auto-limpieza, con baja expansión térmica sin que sus propiedades sufran cambios significativos, en comparación con el mortero de referencia.

Lo anterior es importante, ya que la idea principal es que estos nuevos materiales puedan ser propuestos como candidatos a ser empleados en el área de la construcción, con la ventaja de que serán auto-limpiantes y tendrán baja expansión térmica, lo que contribuirá a su durabilidad y su mayor uso.

Es recomendable utilizar cantidades menores que el 1.0% de TiO_2 , en la relación en masa de cemento, para la obtención de morteros auto-limpiantes, ya que con ello se evitarán afectaciones en tiempos de fraguado o por formación de Etringita. En caso de que se decidiera utilizar ZnO en las mezclas, se deben considerar los problemas relacionados con mayor tiempo de fraguado requerido y también con la posible fotocorrosión, que es común en este material expuesto a irradiación por mucho tiempo.

De ser posible, se deben utilizar los compuestos de SiC- TiO_2 o SiC-ZnO como fotocatalizadores, ya que permiten tener morteros con propiedad auto-limpiante y no

permiten el crecimiento de fases que puedan alterar el comportamiento de la matriz cementante, además de que las cantidades de material requeridas son pequeñas, como el 1.0% o menor, en relación en masa del cemento.

Se recomienda llevar a cabo estudios más profundos de los morteros que contengan como fotocatalizador el SiC-TiO₂ y/o el SiC-ZnO, y en la adición de LiAlSiO₄ buscando optimizar las propiedades auto-limpiantes y de expansión térmica de los morteros. Es decir, se debe buscar incrementar la eficiencia fotocatalítica para la decoloración de los colorantes y también disminuir la expansión para tener materiales con cero expansiones térmicas. Además, se debería probar estos materiales para llevar a cabo la descontaminación del aire mediante fotocátalisis.

Bibliografía

- [1] A. Pierre-Claude, (2007) Binders for Durable and Sustainable Concrete, United Kingdom: Taylor Francis Ltd, p. 55.
- [2] H. F. W. Taylor, (1990) Cement Chemistry, London: Academic Press, pp. 159-163.
- [3] I. Segura Perez, A. Moragues Terrados y J. J. Anaya Velayos, (2008) «Caracterización microestructural de materiales base cemento mediante ensayos destructivos – parte 1,» Cemento y Hormigon, nº 921.
- [4] S. Martinez Ramirez y G. E. Thompson, (1998) «Deterioro de morteros de cemento producido por la "deposición" seca y húmeda de contaminantes atmosféricos,» Materiales de construcción, vol. 48, nº 250, pp. 15-31.
- [5] X. Domènech, W. F. Jardim y M. I. Litter, (2001) Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes, Buenos Aires, Argentina: Comisión Nacional de Energía Atómica, Unidad de Actividad Química, pp. 3-14.
- [6] W. H. Glaze, J.-W. Kang y D. H. Chapin, (1987) «The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation,» Ozone Science & Engineering, vol. 9, pp. 335-352.
- [7] A. Maury y N. De Belie, (2010) «State of the art of TiO₂ containing cementitious materials: self-cleaning properties,» Materiales de construcción, vol. 60, nº 298, pp. 33-50.
- [8] Y. Ohama y D. Van Gemert, (2011) «Application of Titanium Dioxide Photocatalysis to Construction Materials,» de State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 194-TDP, Japon, Springer, pp. 5-10.
- [9] D. J. Cole Hamilton y T. R.P., (2006) Homogeneous catalysis-Advantages and problems,

- in Catalyst Separation, Recovery and Recycling, Netherlands.: Springer.
- [10] A. Mills y S. Le Hunte, (1997) «An overview of semiconductor photocatalysis,» *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, n° 108, pp. 1-35.
- [11] J. Rodriguez, R. J. Candal, J. Solis, W. Estrada y M. A. Blesa, (2005) «El fotocatalizador: síntesis, propiedades y limitaciones,» de *Solar Safe Water*, Argentina, CNEA, pp. 135-152.
- [12] O. B., (2010) «Photocatalysis A to Z—What we know and what we do not know in a scientific sense,» *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, n° 11, pp. 157-178.
- [13] Y. Paz, (2010) «Application of TiO₂ photocatalysis for air treatment: Patents' overview,» *Applied Catalysis B: Environmental*, n° 99, pp. 448-460.
- [14] L. Cassar, C. Pepe, G. Tognon, G. L. Guerrini y R. Amadelli, (2003) «White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties,» de *11th Int. Congr. on the Chemistry of Cement*, Durban.
- [15] J. A. Perez Taborda, J. L. Gallego, W. Stiven Roman y H. Riascos Landázuri, (2008) «PELÍCULAS NANOESTRUCTURADAS DE OXIDO DE ZINC (ZnO),» *Scientia et Technica*, n° 39, pp. 416-421.
- [16] Z. Fan y J. G. Lu, (2005) «Zinc Oxide Nanostructures: Synthesis and Properties,» *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 5, n° 10, pp. 1561-1573.
- [17] A. Janotti y C. G. Van de Walle, (2009) «Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor,» *Reports on Progress in Physics*, n° 72, pp. 1-29.
- [18] R. Pozzo, M. Baltanas y A. Cassano, (1997) «Supported Titanium Oxide as Photocatalyst in Water Decontamination: State of the Art,» *Catalysis Today*, vol. 39, pp. 219-231.

-
- [19] J. Byrne, B. Eggins y N. Brown, (1998) «Immobilisation of TiO₂ powder for the treatment of polluted water,» *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 17, pp. 25-36.
- [20] H. Yamashita, Y. Nishida, S. Yuan, K. Mori, M. Narisawa, Y. Matsumura, T. Ohmichi y I. Katayama, (2007) «Design of TiO₂-SiC photocatalyst using TiC-SiC nano-particles for degradation of 2-propanol diluted in water,» *Catalysis Today*, vol. 120, pp. 163-167.
- [21] C. Gómez Solís, I. Juárez Ramírez, E. Moctezuma y L. M. Torres-Martínez, (2012) «Photodegradation of indigo carmine and methylene blue dyes in aqueous solution by SiC-TiO₂ catalyts prepared by sol-gel,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 217, pp. 194-199.
- [22] J. Shizuo Fujita, W. H. Rowland, W. C. Hughes, J. W. Cook y J. F. Schetzina, (1996) «MBE Growth and Properties of ZnO on Sapphire and SiC Substrates,» *Journal of Electronic Materials*, vol. 25, nº 5, pp. 855-862.
- [23] Z. D. Sha, Y. Yan, W. X. Qin, X. M. Wu y L. J. Zhuge, (2006) «Structure and optical properties of the SiC/ZnO five-layer multi-layer on Si (111) substrate with a SiC buffer layer,» *Journal Of Physics D: Applied Physics*, vol. 39, pp. 3240-3243.
- [24] Italcementi, (2009) «TX Active, The Photocatalytic Active Principle. Technical report,» Italcementi Group, Bergamo, Italia.
- [25] C. Gobin, A. Plassais, J. Maltby, T. Aarre, R. Cope, A. Strini, J. Bartzis, N. Moussiopoulos y F. Barmpas, (2006) «PICADA project. Photocatalytic Innovative Coverings Applications for De-pollution Assessment,» *Science and Society- Descartes Prizes*.
- [26] G. L. Guerrini y F. Corazza, (2008) «White cement and photocatalysis part 2: applications,» de *First Arab International Conference and Exhibition on The Uses of White Cement*, Cayro, egipto.
- [27] F. Cardarelli, (2000) *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*, Tucson,

- Arizona: Springer.
- [28] J. M. González Peña, (1967) «Materiales cerámicos de bajo coeficiente de dilatación^ a base de silicoaluminatos de litio,» de VIII Reunión Anua] de la Sociedad Española de Cerámica, Sevilla.
- [29] S. H. Kosmatka, (2010) Diseño y control de mezclas de concreto, Illinois EE. UU: Portland Cement Association.
- [30] K. O. Sakyi-Bekoe, (2008) Assessment of the coefficient of thermal expansion of Alabama concrete, Auburn, Alabama: Auburn University.
- [31] G. T. Halvorsen y R. W. Poston, (2001) «Joints in Concrete Construction,» ACI Committee 224.
- [32] J. J. Corace, (2009) «Dilatación,» de Física II, Argentina.
- [33] M. Kofteros y S. Rodriguez, (2001) «A preliminary study of termal expansión compensation in cement by ZrW_2O_8 addittions,» Scripta Materialia, vol. 45, pp. 369-374.
- [34] P.-W. Chen y D. Chung, (1995) «Effect of polymer addition on the thermal stability and thermal expansion of cement,» Cement and Concrete Research, vol. 25, nº 3, pp. 465-469.
- [35] G.-J. Sheu y J.-C. Chen, (2005) «Synthesis of negative thermal expansion TiO_2 -doped LAS substrates,» Scripta Materialia, vol. 53, pp. 677-580.
- [37] J. Ibañez, O. Solorza y E. Gómez del Campo, (1991) «J. Chem Edu 68», pp. 872-875.
- [36] I. Juarez Ramirez, E. Moctezuma, L. M. Torres Martinez y C. Gómez Solís, (2012) «Short time deposition of TiO_2 nanoparticles on SiC as photocatalysts for the degradation of organic dyes,» Research on Chemical Intermediates.
- [38] Y. Li, Z. Yu, J. Meng y Y. Li, (2013) «Enhancing the activity of a SiC- TiO_2 composite

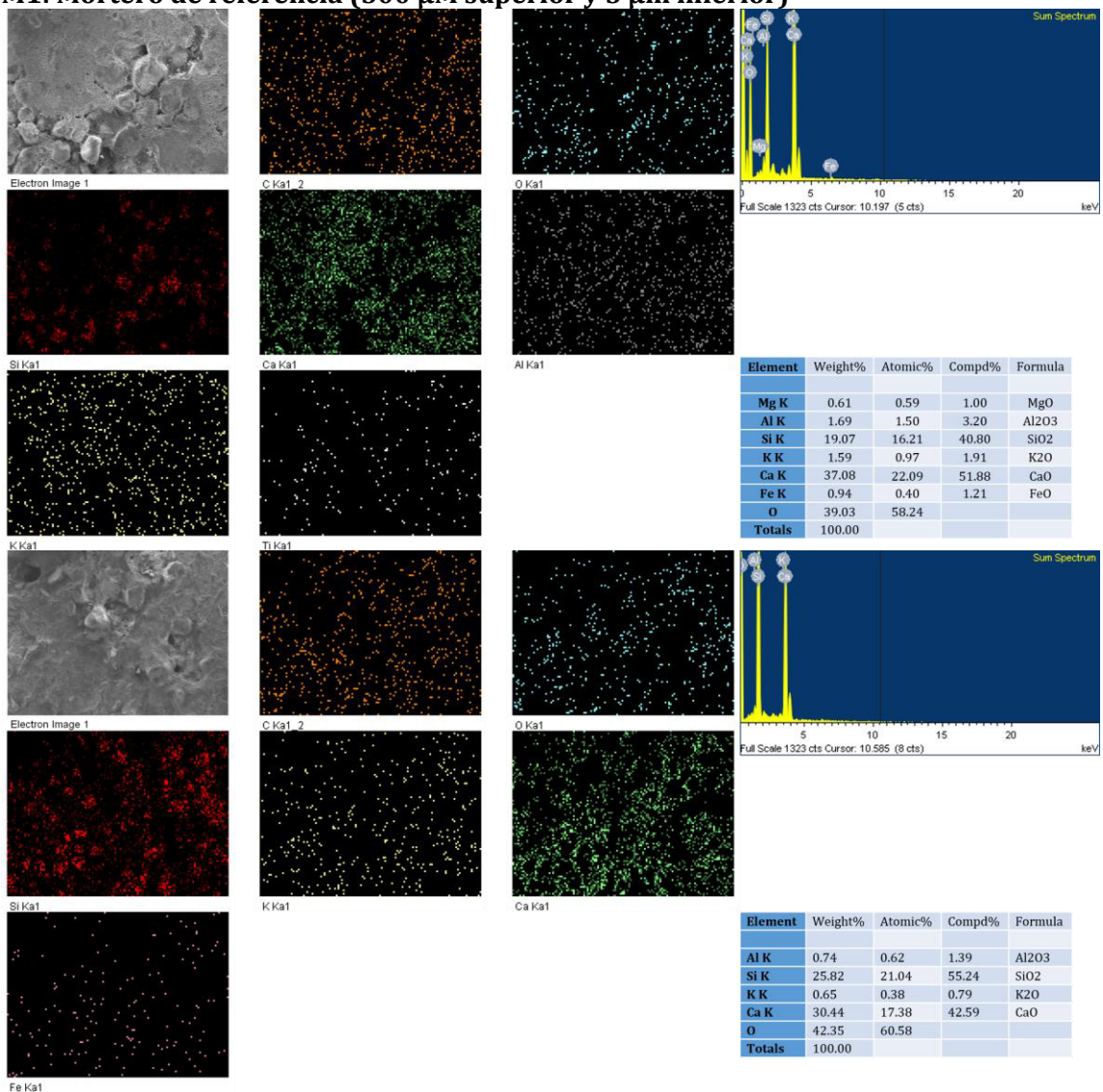
- catalyst for photo-stimulated catalytic water splitting,» international journal of hydrogen energy, vol. 38, pp. 3898-3904.
- [39] H. Jennings, (1991) «Towards establishing relationships between microstructure and properties of cement-based materials, en Ceramics Transactions,» de Advances in cementitious materials, Westerville, Ohio, The American Ceramic Society, pp. 289-316.
- [40] V. Ramachandran y J. Beaudoin, (1999) «Handbook of analytical techniques in concrete science and technology,» de Building materials series.
- [41] J. Bensted y S. Varma, (1972) «Studies of ettringite and its derivatives, Part III: Investigations of strontium and barium substitution in ettringite,» Cement Technology.
- [42] K. Behfarnia y A. Keivan, (2013) «The effects of TiO₂ and ZnO nanoparticles on physical and mechanical properties of normal concrete,» Asian Journal of Civil Engineering (BHRC), vol. 14, n° 4, pp. 517-531.
- [43] M. Gawlicki y D. Czamarska, (1992) «Effect of zinc on the hydration of portland cement,» de Thermal Anal 38, pp. 2157-2161.
- [44] M. Yousuf, A. Mollah, R. Vempati, T.-C. Lin y D. Cocke, (1995) «The interfacial chemistry of solidification/stabilization of metals in cement and pozzolanic material systems,» Waste Manage, vol. 15, n° 2, pp. 137-148.
- [45] E. Rengade, (1929) «The Effect of Zinc and Zinc Oxide on the Setting of Various Hydraulic Cements,» Materiaux et construction.
- [46] C. Weeks, R. Hand y J. Sharp, (2008) «Retardation of cement hydration caused by heavy metals present in ISF slag used as aggregate,» Cement and Concrete Compos, vol. 30, pp. 970-978.
- [47] M. A. Trezza, (2007) «Hydration Study of Ordinary Portland Cement in the Presence of

- Zinc Ions,» *Materials Research*, vol. 10, nº 4, pp. 331-334.
- [48] S. Asavapisit, G. Fowler y C. Cheeseman, (1997) «Solution chemistry during cement hydration in the presence of metal hydroxide wastes,» *Cement and Concrete Research*, vol. 27, nº 8, pp. 1249-1260.
- [49] G. Fagerlund, (1973) «Determination of specific surface by the BET method,» *Materiauz et constructions*, vol. 6, nº 33, pp. 239-245.
- [50] N. Buenfeld, J. Newman y C. Page, (1986) «The resistivity of mortars immersed in sea water,» *Cement and Concrete Research*, vol. 16, nº 511.
- [51] S. Lucas, V. Ferreira y J. Barroso de Aguiar, (2013) «Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars — Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity.,» *Cement and Concrete research*, vol. 43, pp. 112-120.

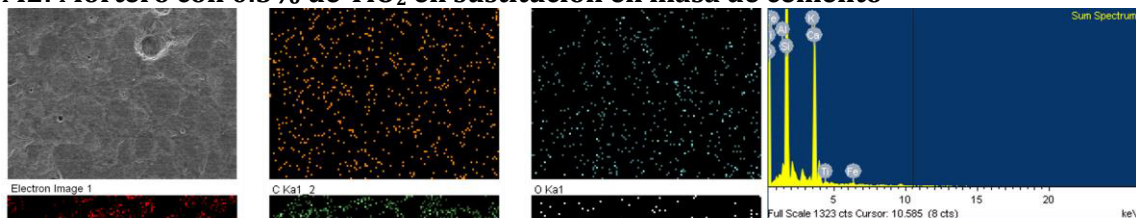
Apéndice I

Análisis de EDS por mapeo de superficie de los diferentes morteros en vista general y a detalle

M1: Mortero de referencia (500 µM superior y 5 µm inferior)

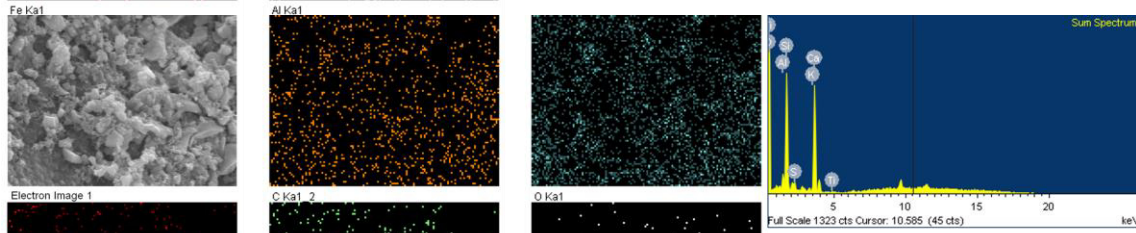


M2: Mortero con 0.5% de TiO₂ en sustitución en masa de cemento



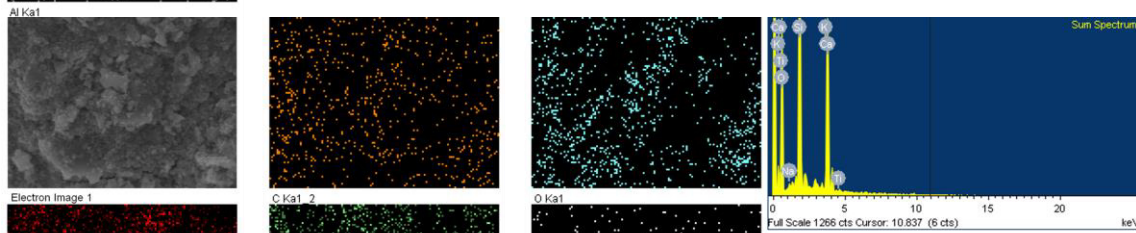
500 μm

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Al K	0.77	0.62	1.46	Al ₂ O ₃
Si K	33.60	25.99	71.88	SiO ₂
K K	0.49	0.27	0.59	K ₂ O
Ca K	18.02	9.77	25.21	CaO
Ti K	0.03	0.01	0.05	TiO ₂
Fe K	0.63	0.24	0.81	FeO
O	46.46	63.09		
Totals	100.00			



5 μm

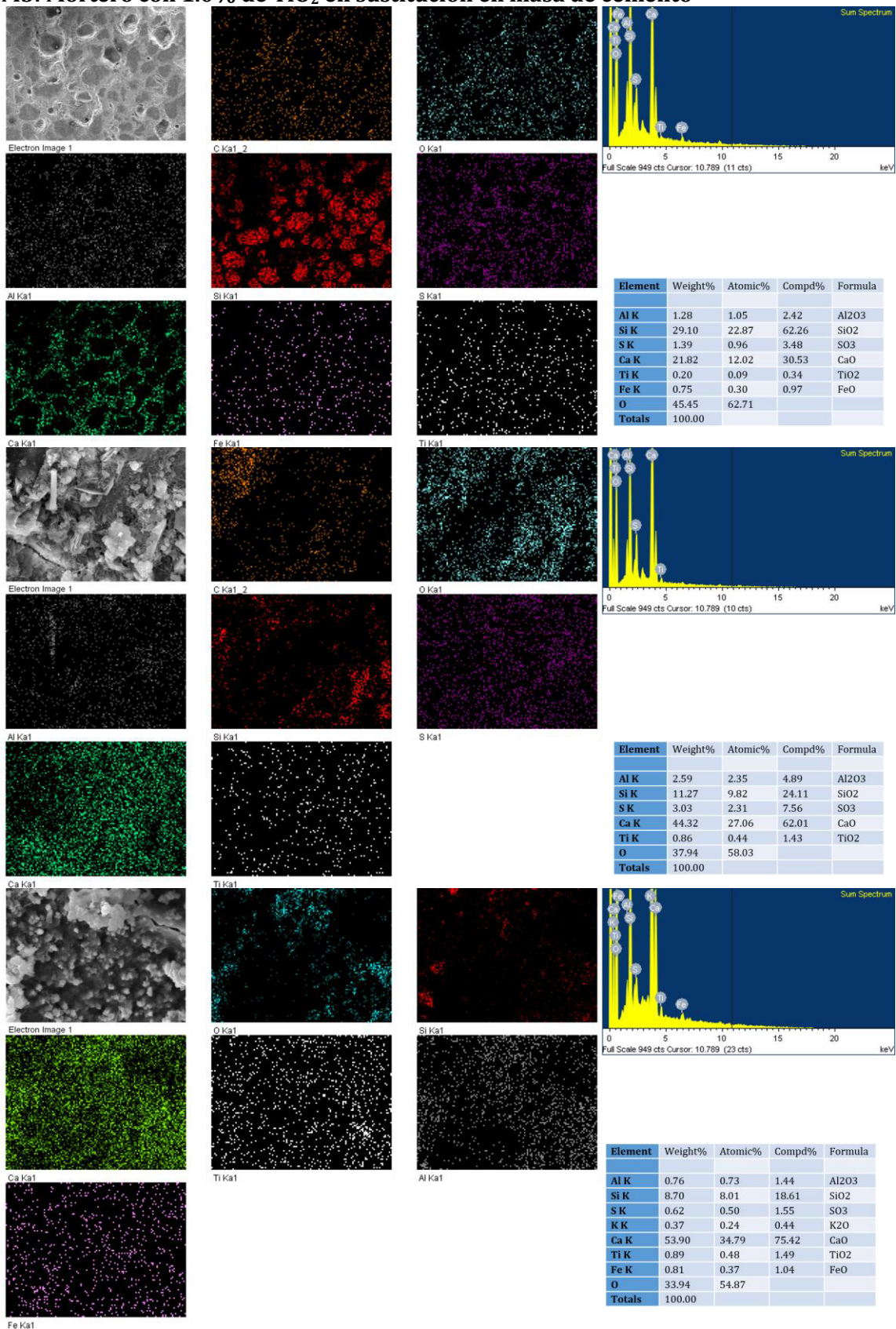
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Al K	2.50	2.15	4.72	Al ₂ O ₃
Si K	21.34	17.59	45.65	SiO ₂
S K	1.14	0.82	2.84	SO ₃
K K	0.96	0.57	1.16	K ₂ O
Ca K	32.09	18.54	44.90	CaO
Ti K	0.44	0.21	0.73	TiO ₂
O	41.54	60.12		
Totals	100.00			



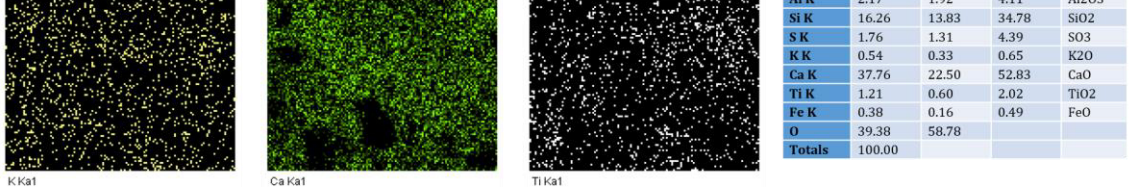
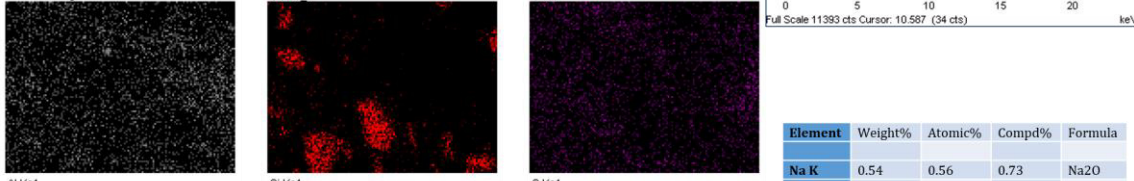
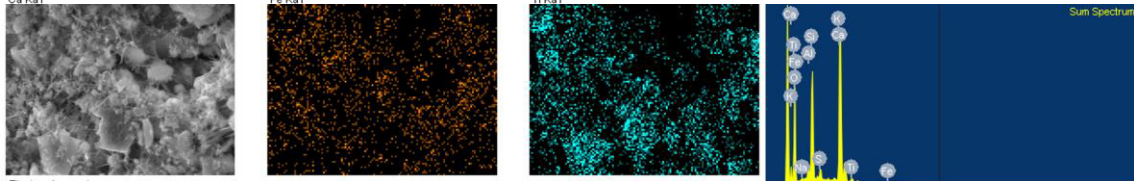
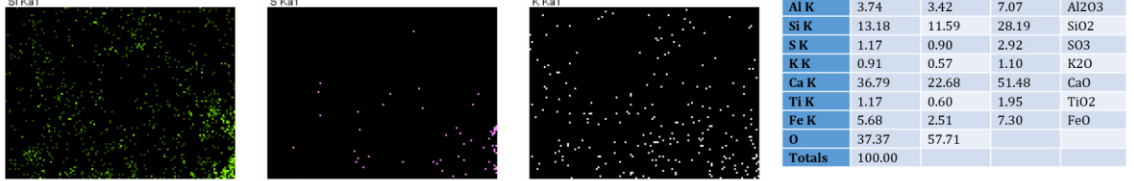
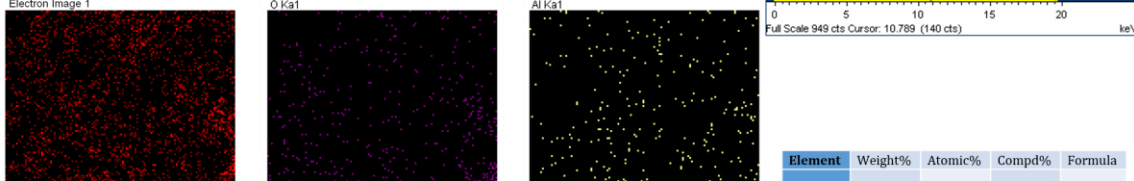
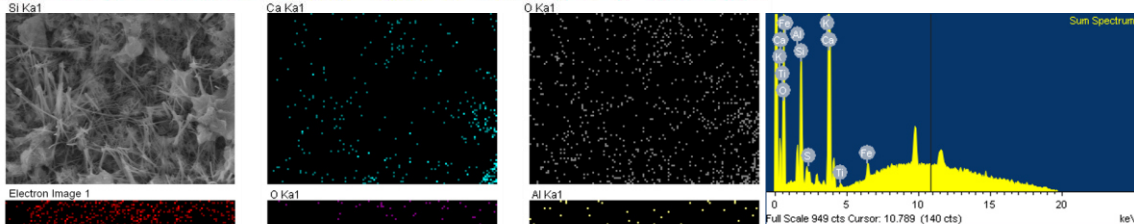
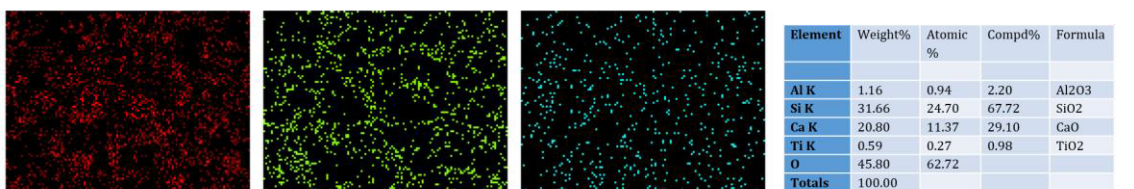
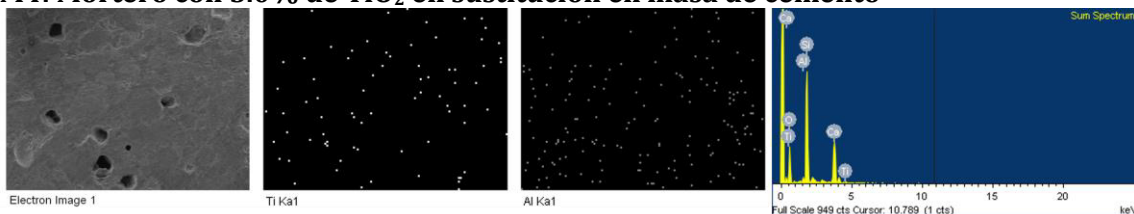
5 μm

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Na K	0.46	0.43	0.62	Na ₂ O
Si K	35.44	27.11	75.81	SiO ₂
K K	0.52	0.29	0.63	K ₂ O
Ca K	16.30	8.74	22.81	CaO
Ti K	0.08	0.04	0.13	TiO ₂
O	47.20	63.40		
Totals	100.00			

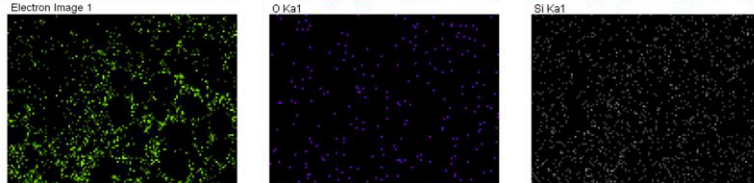
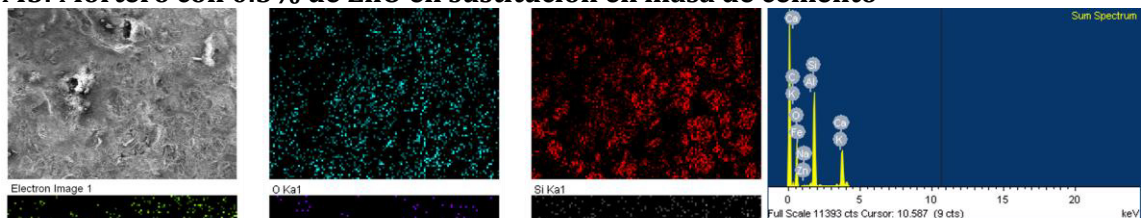
M3: Mortero con 1.0% de TiO₂ en sustitución en masa de cemento



M4: Mortero con 5.0% de TiO₂ en sustitución en masa de cemento



M5: Mortero con 0.5% de ZnO en sustitución en masa de cemento

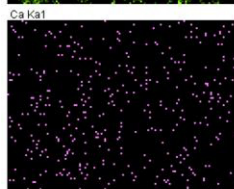


O Kα1

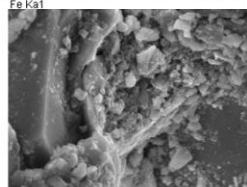
Zn Kα1

Al Kα1

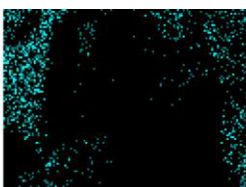
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	10.22	15.80	37.43	CO2
Na K	0.30	0.24	0.40	Na2O
Al K	0.50	0.34	0.94	Al2O3
Si K	19.47	12.88	41.65	SiO2
K K	0.74	0.35	0.89	K2O
Ca K	12.72	5.90	17.80	CaO
Fe K	0.41	0.14	0.53	FeO
Zn K	0.27	0.08	0.34	ZnO
O	55.36	64.27		
Totals	100.00			



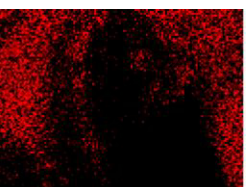
Ca Kα1



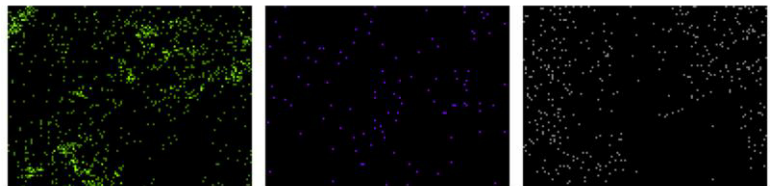
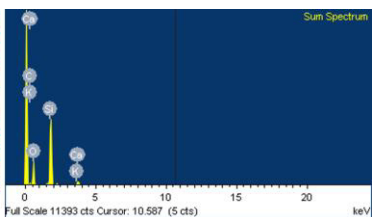
Fe Kα1



O Kα1



Si Kα1

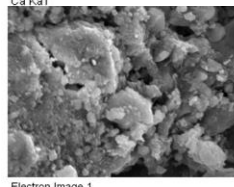


Ca Kα1

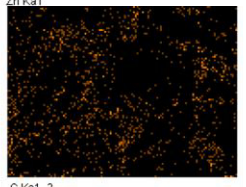
Zn Kα1

Al Kα1

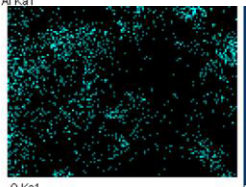
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	11.65	16.93	42.68	CO2
Si K	25.51	15.85	54.57	SiO2
K K	0.23	0.10	0.27	K2O
Ca K	1.71	0.74	2.39	CaO
Zn K	0.07	0.02	0.08	ZnO
O	60.84	66.36		
Totals	100.00			



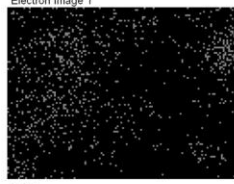
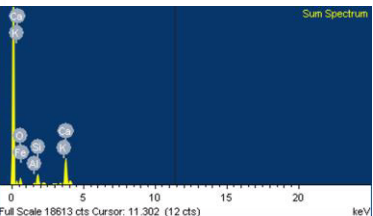
Ca Kα1



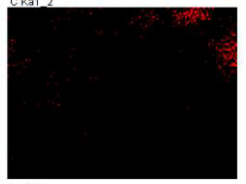
Zn Kα1



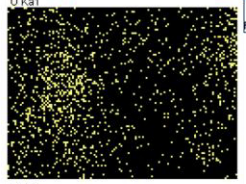
Al Kα1



Al Kα1

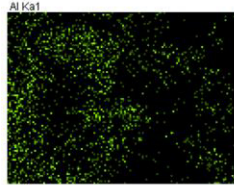


Si Kα1

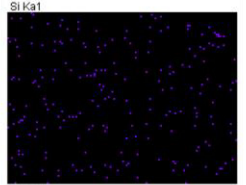


K Kα1

Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Na K	1.11	1.22	1.49	Na2O
Mg K	0.66	0.69	1.09	MgO
Al K	1.42	1.33	2.68	Al2O3
Si K	11.06	10.00	23.66	SiO2
K K	2.65	1.72	3.19	K2O
Ca K	46.36	29.38	64.86	CaO
Fe K	1.91	0.87	2.45	FeO
Zn K	0.45	0.18	0.57	ZnO
O	34.39	54.60		
Totals	100.00			



Ca Kα1

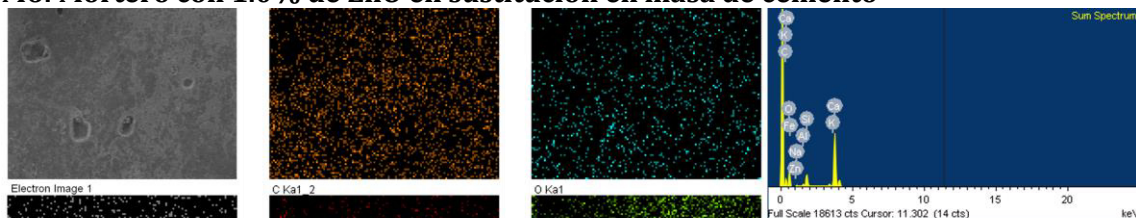


Zn Kα1

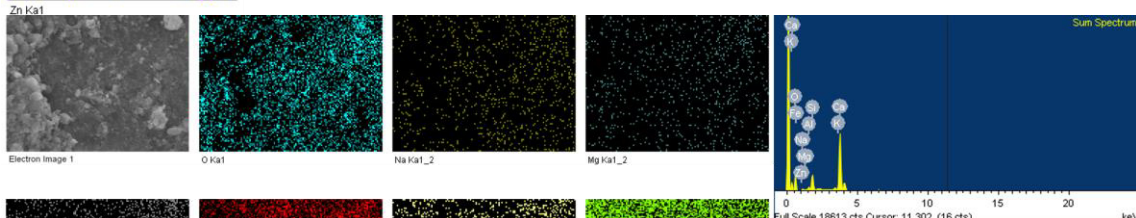
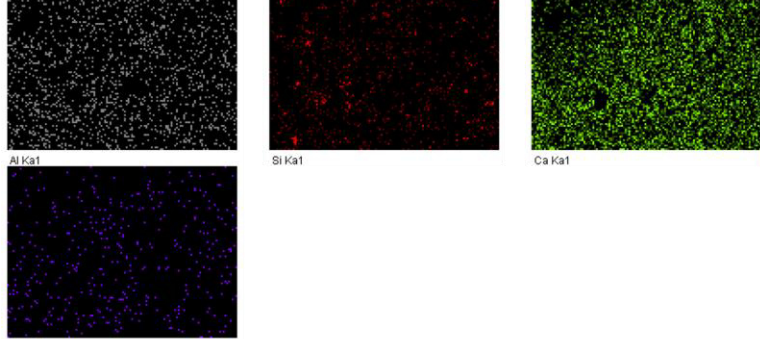


Zn Kα1

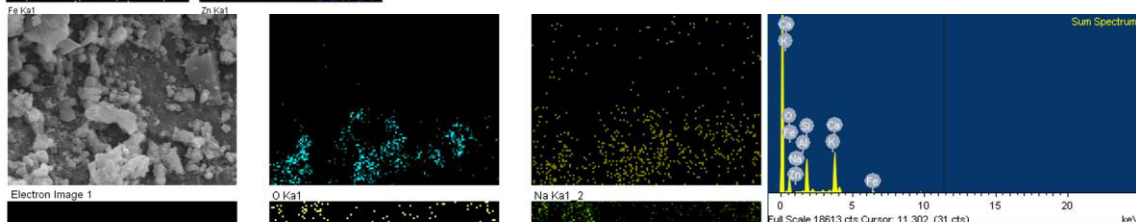
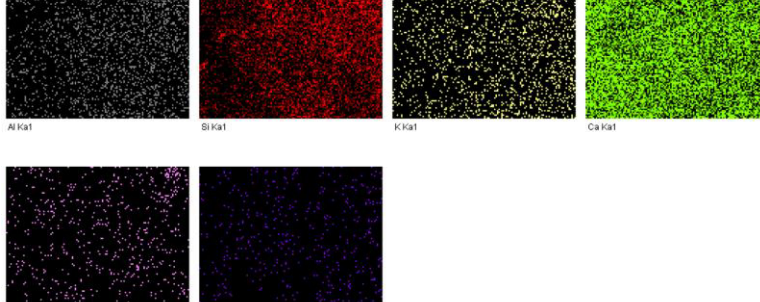
M6: Mortero con 1.0% de ZnO en sustitución en masa de cemento



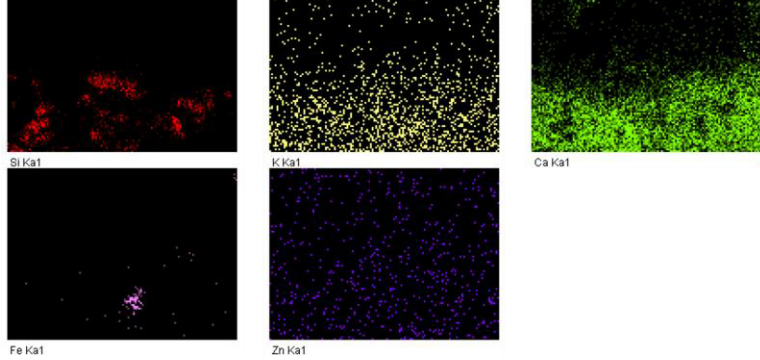
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	15.07	22.92	55.20	CO2
Na K	0.43	0.35	0.59	Na2O
Al K	0.70	0.47	1.32	Al2O3
Si K	3.32	2.16	7.10	SiO2
K K	0.82	0.39	0.99	K2O
Ca K	24.02	10.95	33.61	CaO
Fe K	0.32	0.10	0.41	FeO
Zn K	0.62	0.17	0.78	ZnO
O	54.69	62.48		
Totals	100.00			



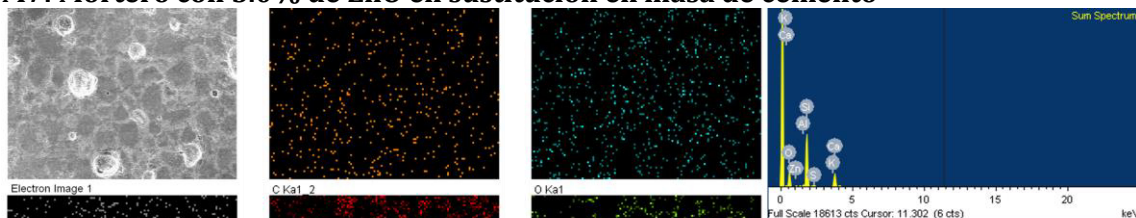
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Na K	1.11	1.25	1.49	Na2O
Mg K	0.48	0.51	0.79	MgO
Al K	1.79	1.72	3.38	Al2O3
Si K	8.35	7.72	17.87	SiO2
K K	1.86	1.23	2.24	K2O
Ca K	50.50	32.69	70.66	CaO
Fe K	1.35	0.62	1.73	FeO
Zn K	1.48	0.59	1.84	ZnO
O	33.09	53.67		
Totals	100.00			



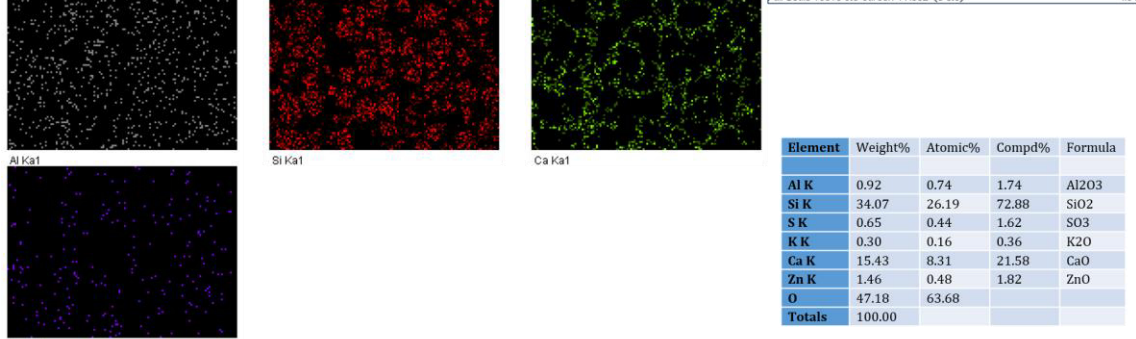
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Na K	0.55	0.58	0.74	Na2O
Al K	0.77	0.69	1.45	Al2O3
Si K	18.79	16.21	40.20	SiO2
K K	1.59	0.99	1.92	K2O
Ca K	37.25	22.51	52.12	CaO
Fe K	1.61	0.70	2.08	FeO
Zn K	1.20	0.45	1.50	ZnO
O	38.23	57.88		
Totals	100.00			



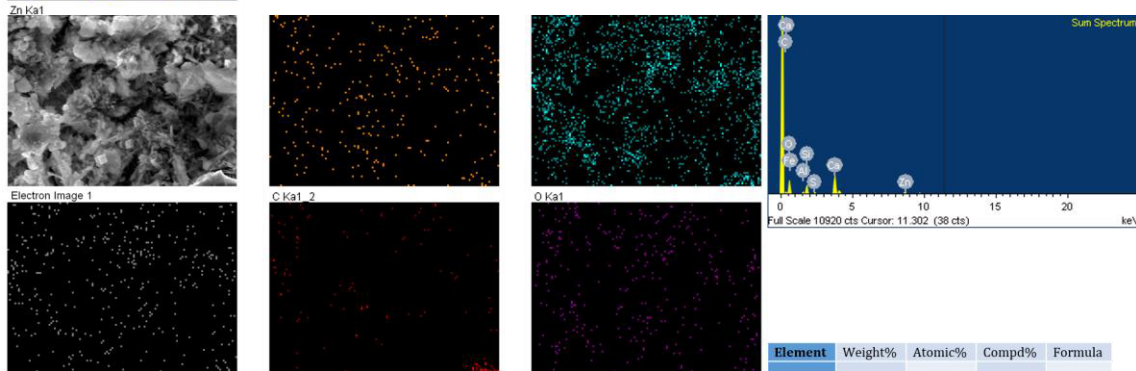
M7: Mortero con 5.0% de ZnO en sustitución en masa de cemento



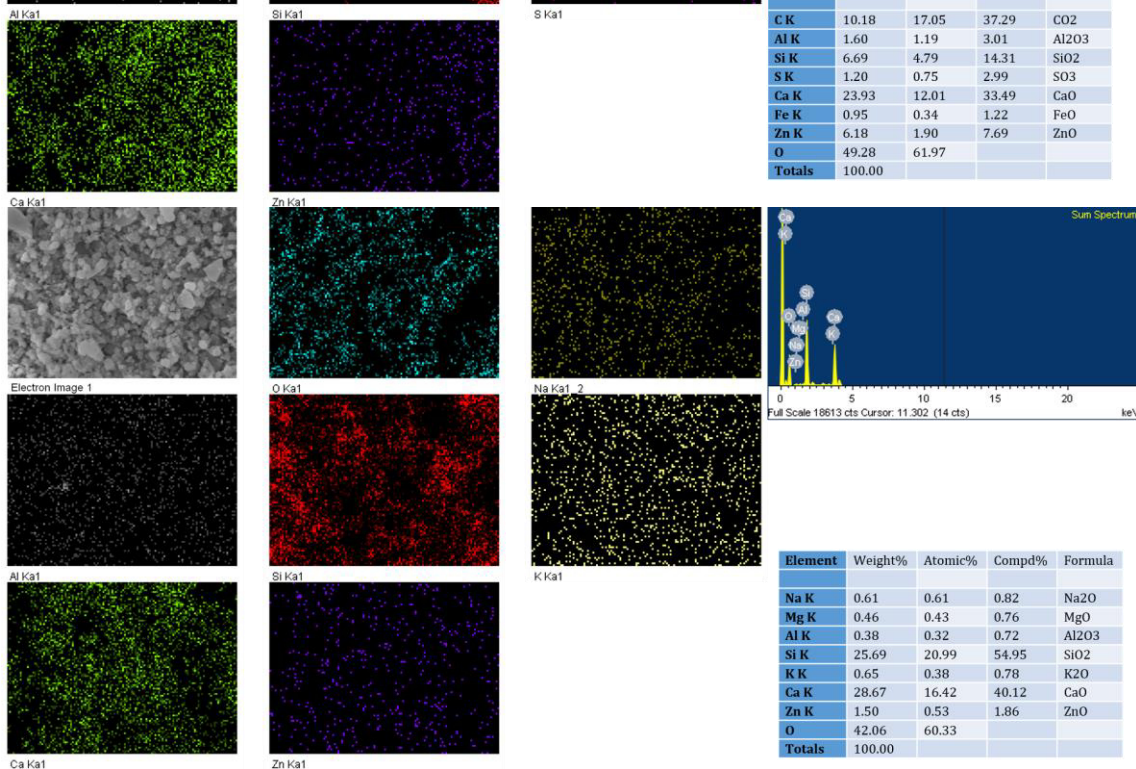
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Al K	0.92	0.74	1.74	Al ₂ O ₃
Si K	34.07	26.19	72.88	SiO ₂
S K	0.65	0.44	1.62	SO ₃
K K	0.30	0.16	0.36	K ₂ O
Ca K	15.43	8.31	21.58	CaO
Zn K	1.46	0.48	1.82	ZnO
O	47.18	63.68		
Totals	100.00			



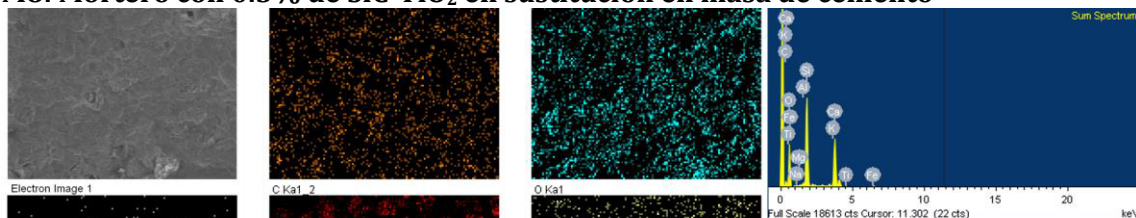
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	10.18	17.05	37.29	CO ₂
Al K	1.60	1.19	3.01	Al ₂ O ₃
Si K	6.69	4.79	14.31	SiO ₂
S K	1.20	0.75	2.99	SO ₃
Ca K	23.93	12.01	33.49	CaO
Fe K	0.95	0.34	1.22	FeO
Zn K	6.18	1.90	7.69	ZnO
O	49.28	61.97		
Totals	100.00			



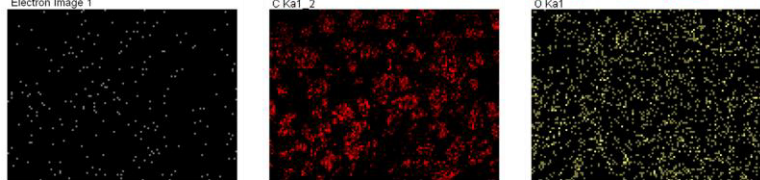
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Na K	0.61	0.61	0.82	Na ₂ O
Mg K	0.46	0.43	0.76	MgO
Al K	0.38	0.32	0.72	Al ₂ O ₃
Si K	25.69	20.99	54.95	SiO ₂
K K	0.65	0.38	0.78	K ₂ O
Ca K	28.67	16.42	40.12	CaO
Zn K	1.50	0.53	1.86	ZnO
O	42.06	60.33		
Totals	100.00			



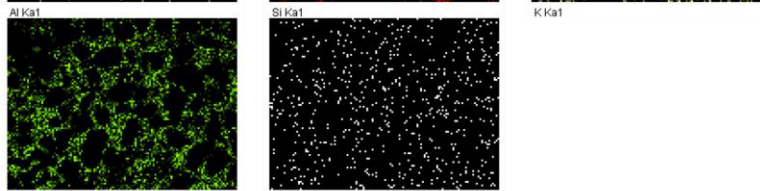
M8: Mortero con 0.5% de SiC-TiO₂ en sustitución en masa de cemento



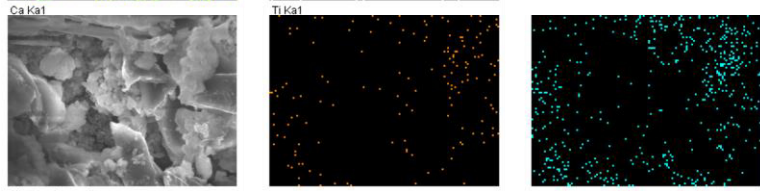
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	8.86	14.15	32.45	CO2
Na K	0.40	0.33	0.53	Na2O
Mg K	0.21	0.17	0.35	MgO
Al K	0.54	0.39	1.03	Al2O3
Si K	18.70	12.78	40.00	SiO2
K K	0.78	0.38	0.94	K2O
Ca K	17.27	8.27	24.16	CaO
Ti K	0.02	0.01	0.04	TiO2
Fe K	0.38	0.13	0.49	FeO
O	52.84	63.39		
Totals	100.00			



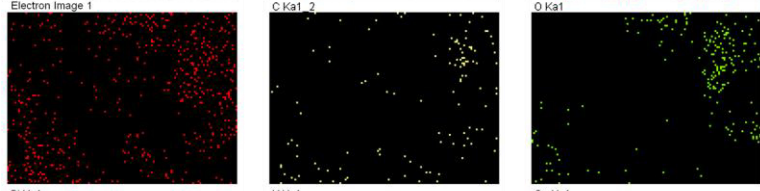
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	9.23	15.67	33.83	CO2
Si K	8.08	5.86	17.29	SiO2
K K	1.21	0.63	1.45	K2O
Ca K	33.97	17.27	47.53	CaO
Ti K	-0.06	-0.03	-0.11	TiO2
O	47.57	60.59		
Totals	100.00			



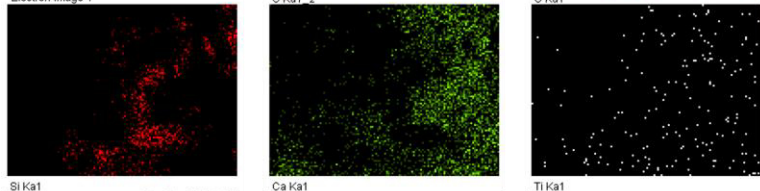
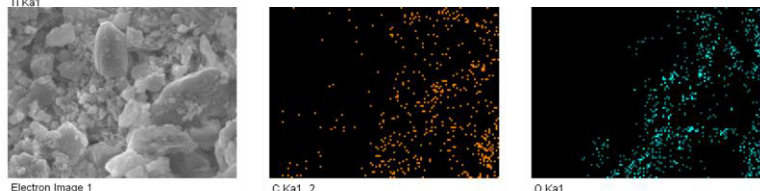
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	7.52	12.67	27.54	CO2
Mg K	0.54	0.45	0.90	MgO
Al K	0.50	0.38	0.95	Al2O3
Si K	14.91	10.75	31.90	SiO2
K K	0.54	0.28	0.65	K2O
Ca K	27.17	13.72	38.02	CaO
Ti K	0.03	0.01	0.04	TiO2
O	48.79	61.74		
Totals	100.00			



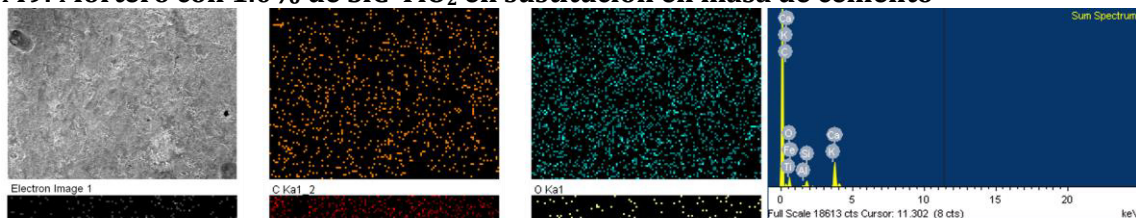
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	7.52	12.67	27.54	CO2
Mg K	0.54	0.45	0.90	MgO
Al K	0.50	0.38	0.95	Al2O3
Si K	14.91	10.75	31.90	SiO2
K K	0.54	0.28	0.65	K2O
Ca K	27.17	13.72	38.02	CaO
Ti K	0.03	0.01	0.04	TiO2
O	48.79	61.74		
Totals	100.00			



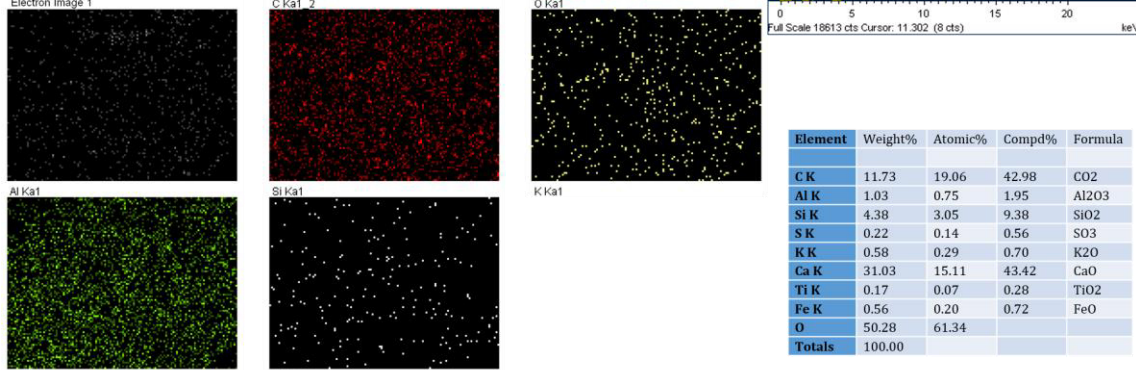
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	7.52	12.67	27.54	CO2
Mg K	0.54	0.45	0.90	MgO
Al K	0.50	0.38	0.95	Al2O3
Si K	14.91	10.75	31.90	SiO2
K K	0.54	0.28	0.65	K2O
Ca K	27.17	13.72	38.02	CaO
Ti K	0.03	0.01	0.04	TiO2
O	48.79	61.74		
Totals	100.00			



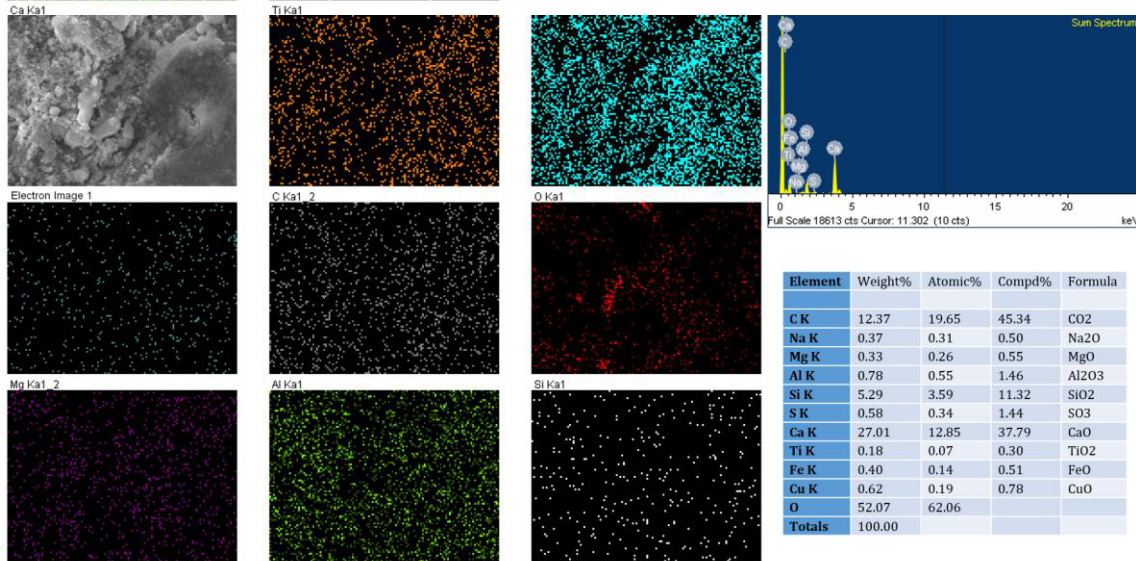
M9: Mortero con 1.0% de SiC-TiO₂ en sustitución en masa de cemento



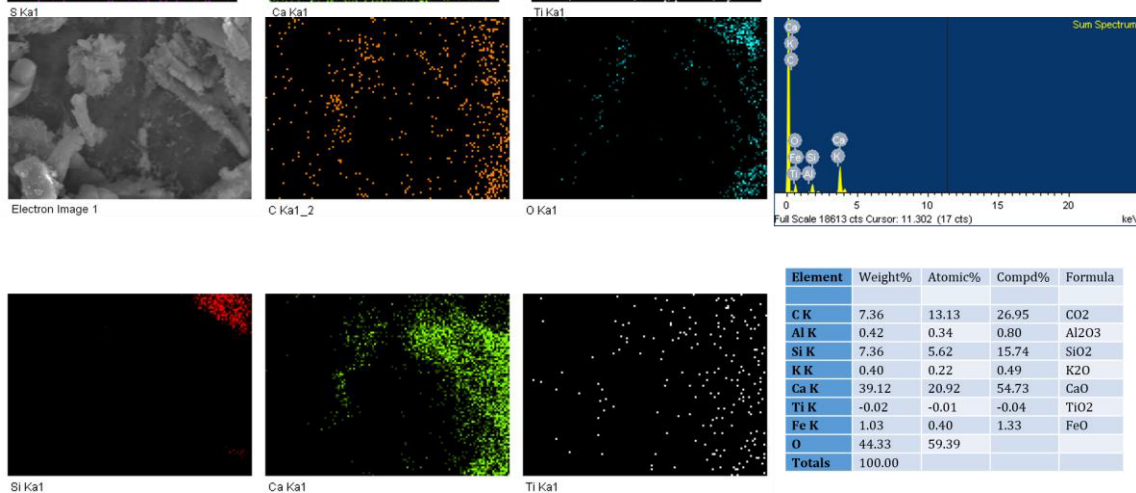
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	11.73	19.06	42.98	CO ₂
Al K	1.03	0.75	1.95	Al ₂ O ₃
Si K	4.38	3.05	9.38	SiO ₂
S K	0.22	0.14	0.56	SO ₃
K K	0.58	0.29	0.70	K ₂ O
Ca K	31.03	15.11	43.42	CaO
Ti K	0.17	0.07	0.28	TiO ₂
Fe K	0.56	0.20	0.72	FeO
O	50.28	61.34		
Totals	100.00			



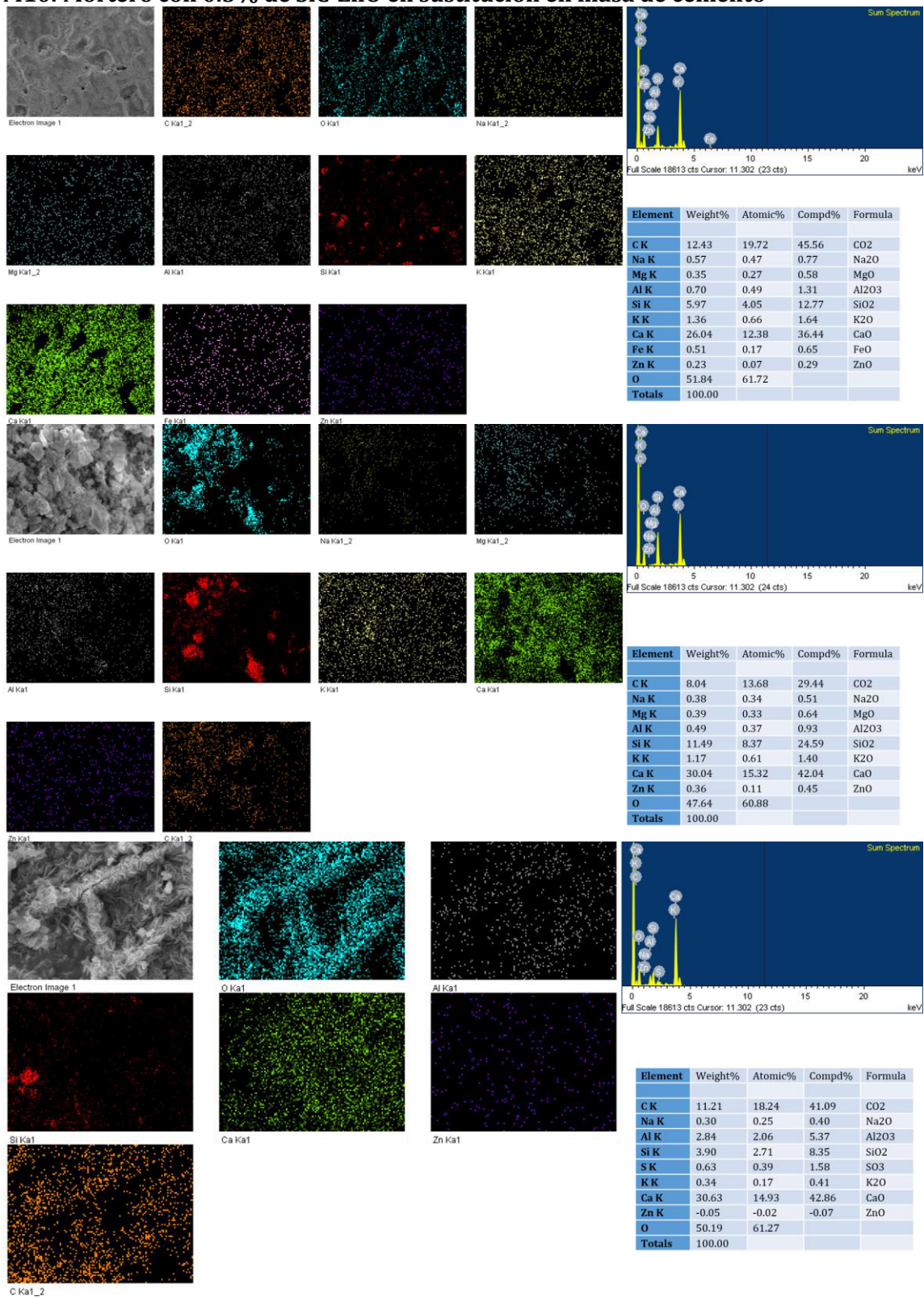
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	12.37	19.65	45.34	CO ₂
Na K	0.37	0.31	0.50	Na ₂ O
Mg K	0.33	0.26	0.55	MgO
Al K	0.78	0.55	1.46	Al ₂ O ₃
Si K	5.29	3.59	11.32	SiO ₂
S K	0.58	0.34	1.44	SO ₃
Ca K	27.01	12.85	37.79	CaO
Ti K	0.18	0.07	0.30	TiO ₂
Fe K	0.40	0.14	0.51	FeO
Cu K	0.62	0.19	0.78	CuO
O	52.07	62.06		
Totals	100.00			



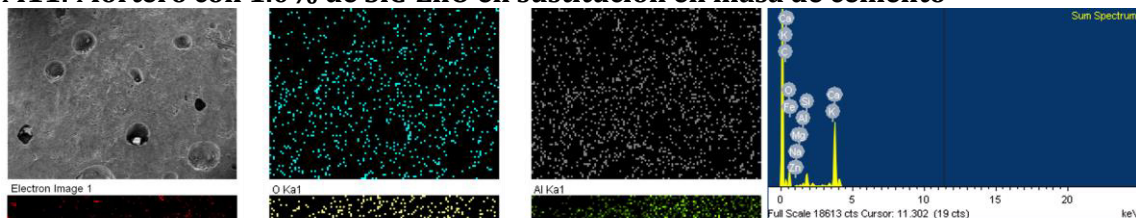
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	7.36	13.13	26.95	CO ₂
Al K	0.42	0.34	0.80	Al ₂ O ₃
Si K	7.36	5.62	15.74	SiO ₂
K K	0.40	0.22	0.49	K ₂ O
Ca K	39.12	20.92	54.73	CaO
Ti K	-0.02	-0.01	-0.04	TiO ₂
Fe K	1.03	0.40	1.33	FeO
O	44.33	59.39		
Totals	100.00			



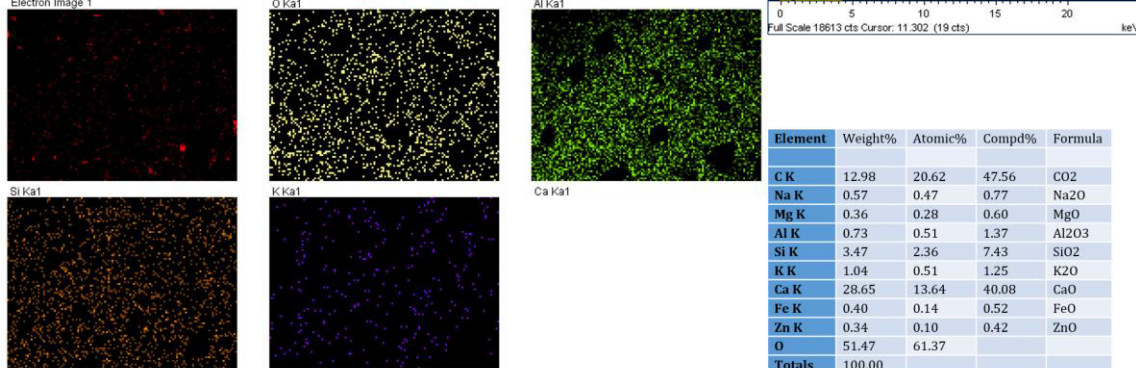
M10: Mortero con 0.5% de SiC-ZnO en sustitución en masa de cemento



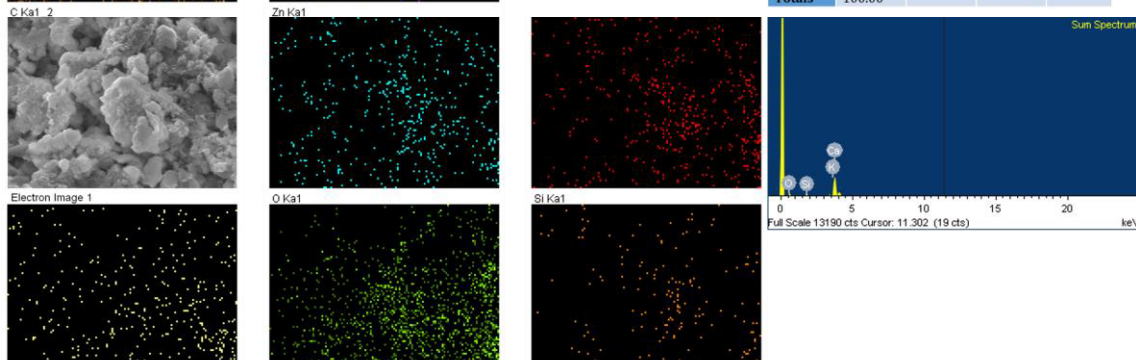
M11: Mortero con 1.0% de SiC-ZnO en sustitución en masa de cemento



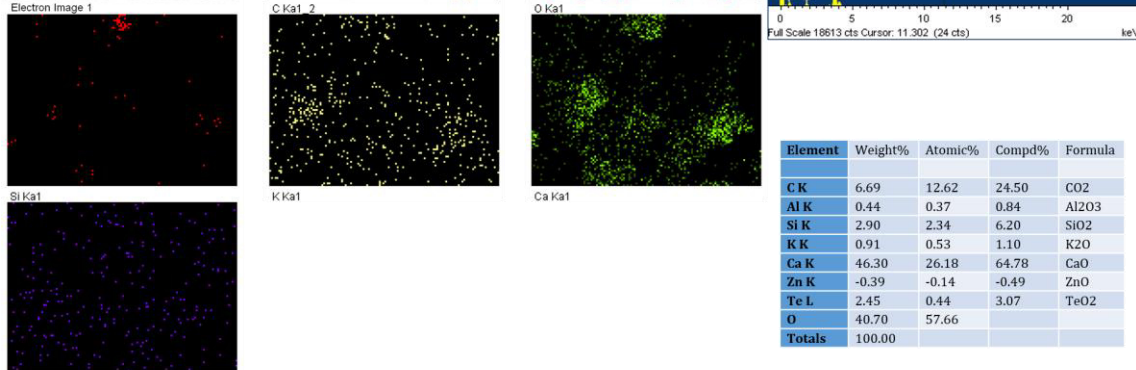
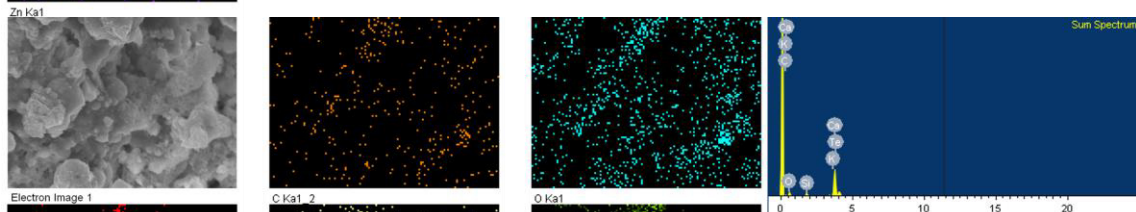
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	12.98	20.62	47.56	CO2
Na K	0.57	0.47	0.77	Na2O
Mg K	0.36	0.28	0.60	MgO
Al K	0.73	0.51	1.37	Al2O3
Si K	3.47	2.36	7.43	SiO2
K K	1.04	0.51	1.25	K2O
Ca K	28.65	13.64	40.08	CaO
Fe K	0.40	0.14	0.52	FeO
Zn K	0.34	0.10	0.42	ZnO
O	51.47	61.37		
Totals	100.00			



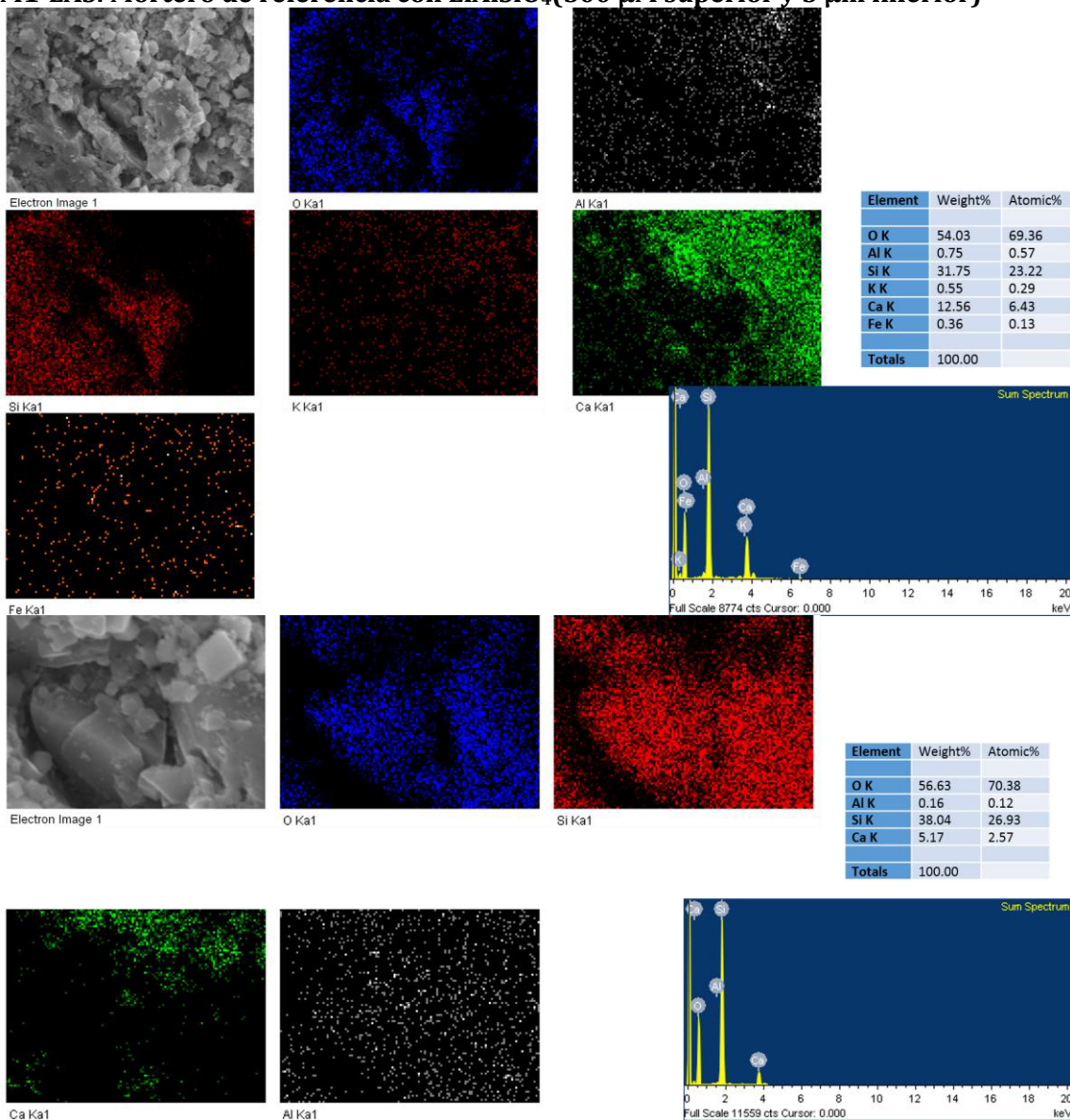
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	5.14	10.11	18.84	CO2
Si K	2.81	2.36	6.01	SiO2
K K	1.70	1.02	2.04	K2O
Ca K	50.90	29.98	71.22	CaO
Zn K	1.52	0.55	1.89	ZnO
O	37.93	55.98		
Totals	100.00			



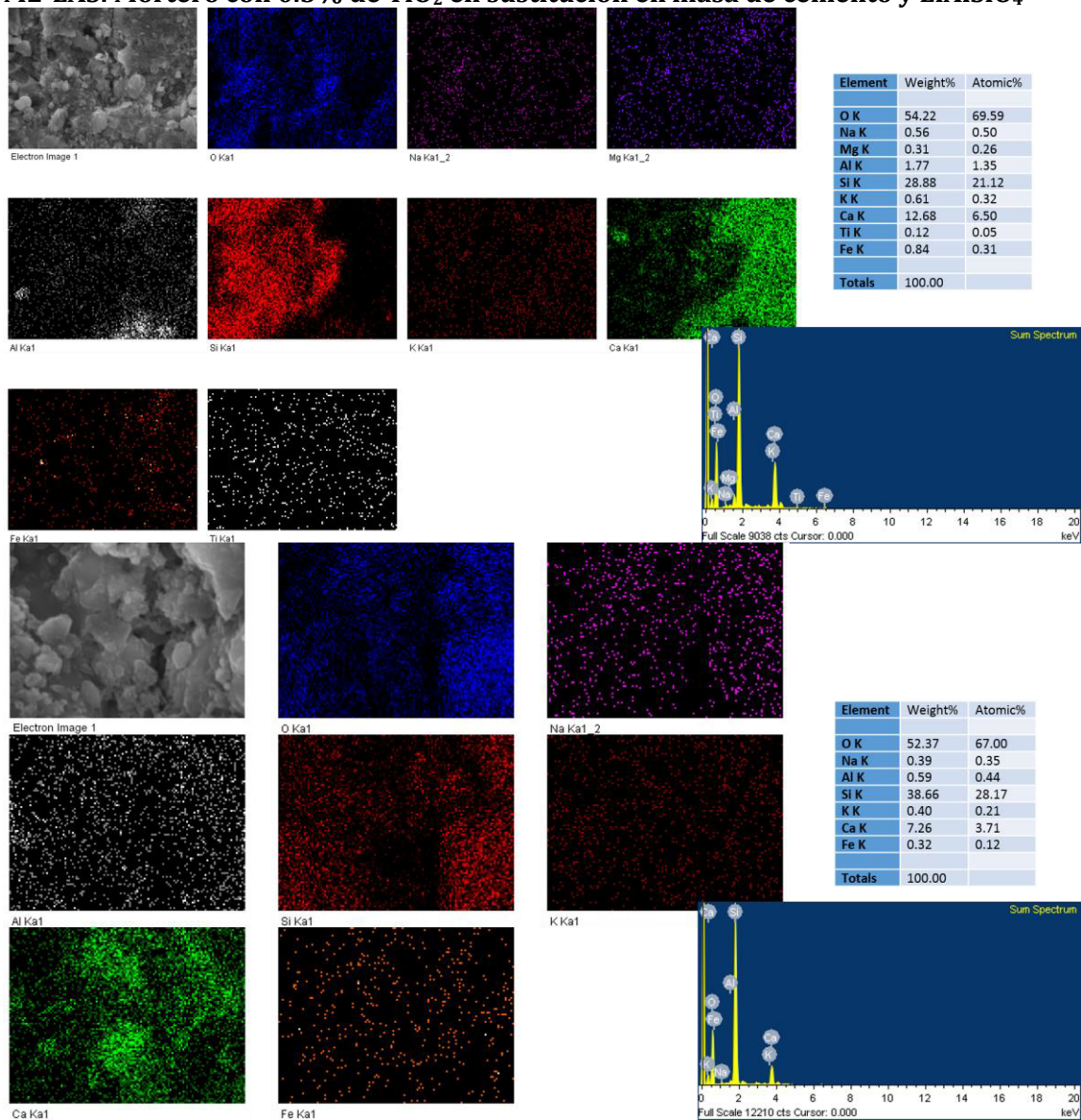
Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
C K	6.69	12.62	24.50	CO2
Al K	0.44	0.37	0.84	Al2O3
Si K	2.90	2.34	6.20	SiO2
K K	0.91	0.53	1.10	K2O
Ca K	46.30	26.18	64.78	CaO
Zn K	-0.39	-0.14	-0.49	ZnO
Te L	2.45	0.44	3.07	TeO2
O	40.70	57.66		
Totals	100.00			



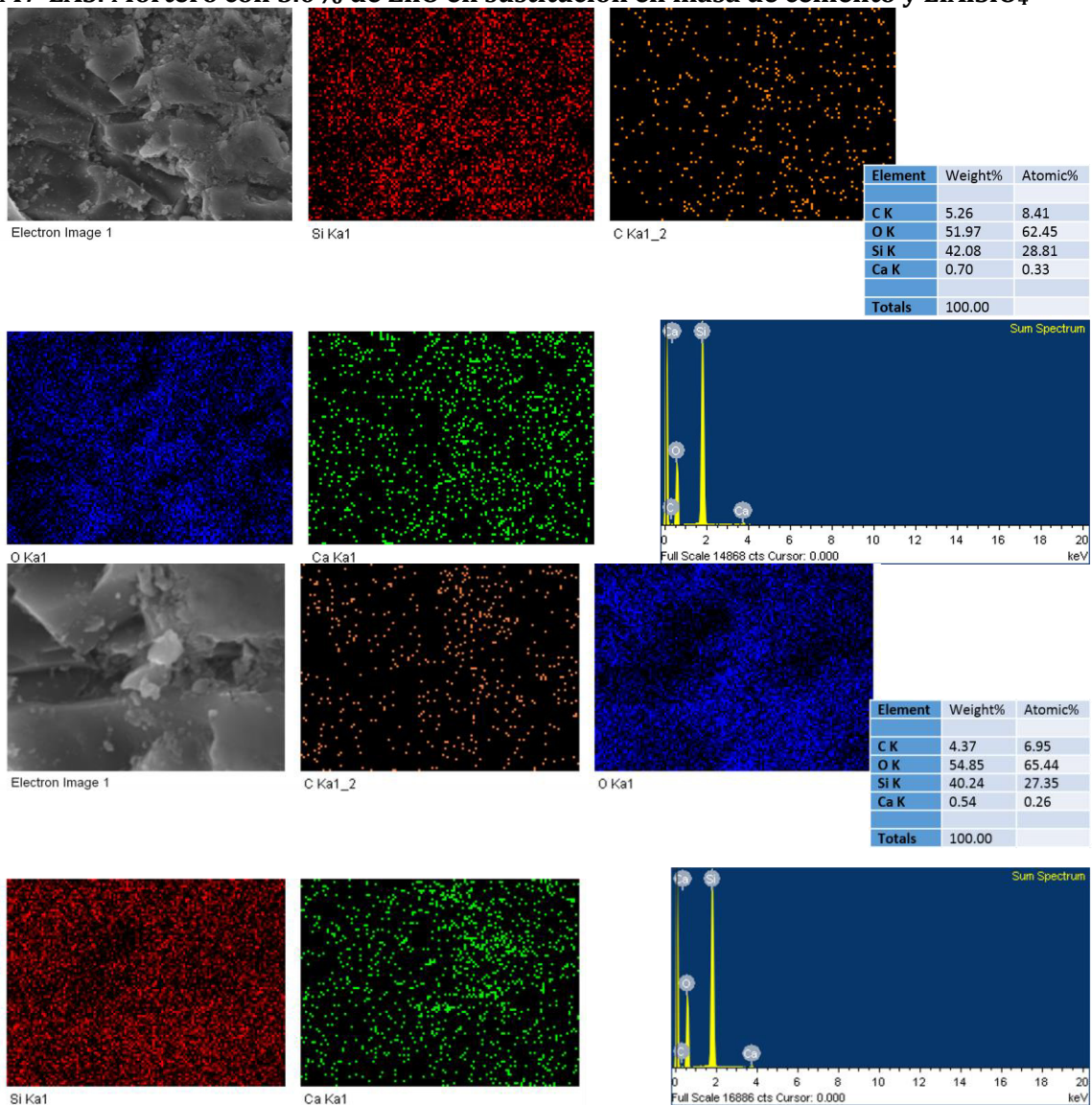
M1-LAS: Mortero de referencia con LiAlSiO₄(500 μM superior y 5 μm inferior)



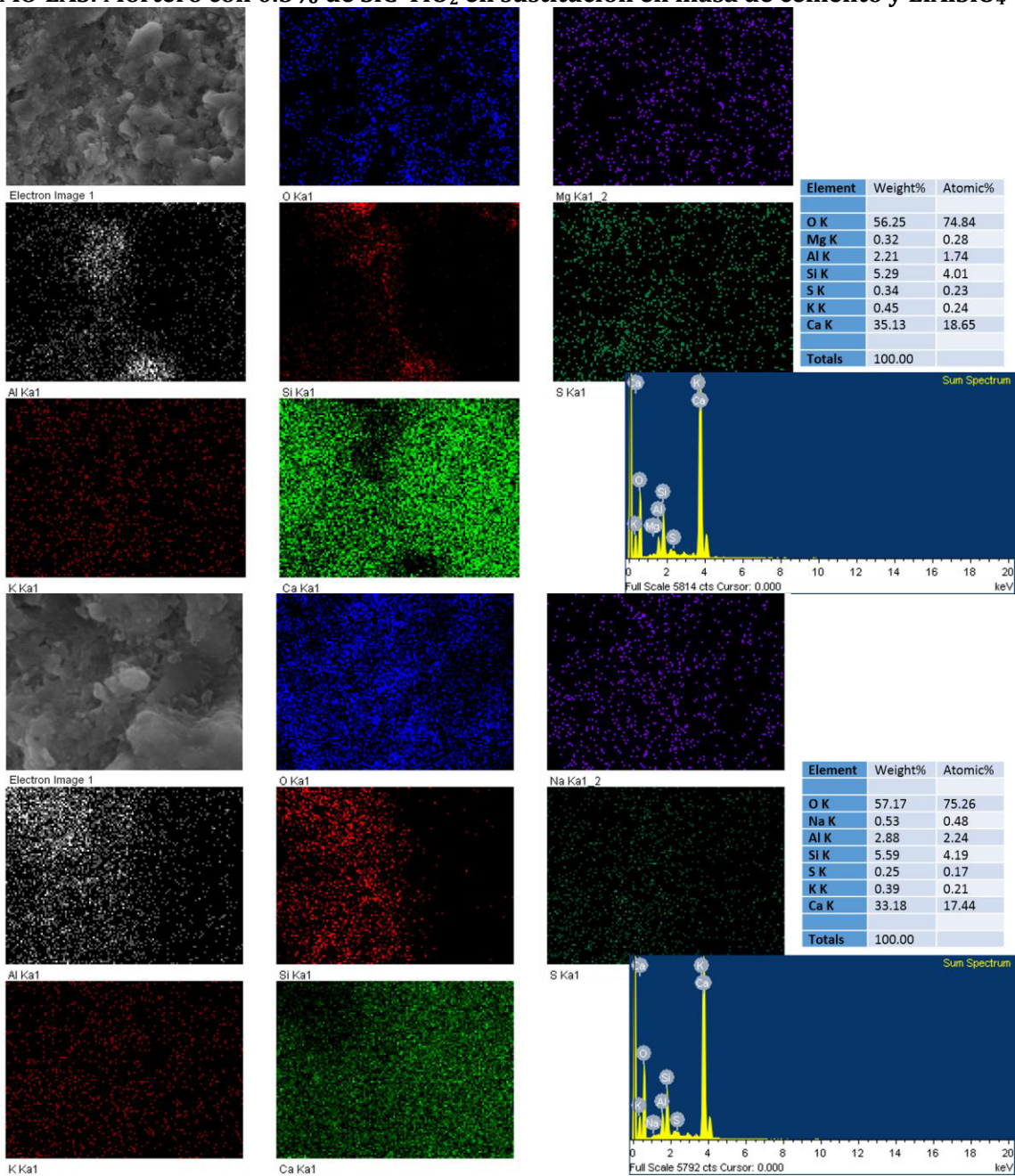
M2-LAS: Mortero con 0.5% de TiO₂ en sustitución en masa de cemento y LiAlSiO₄



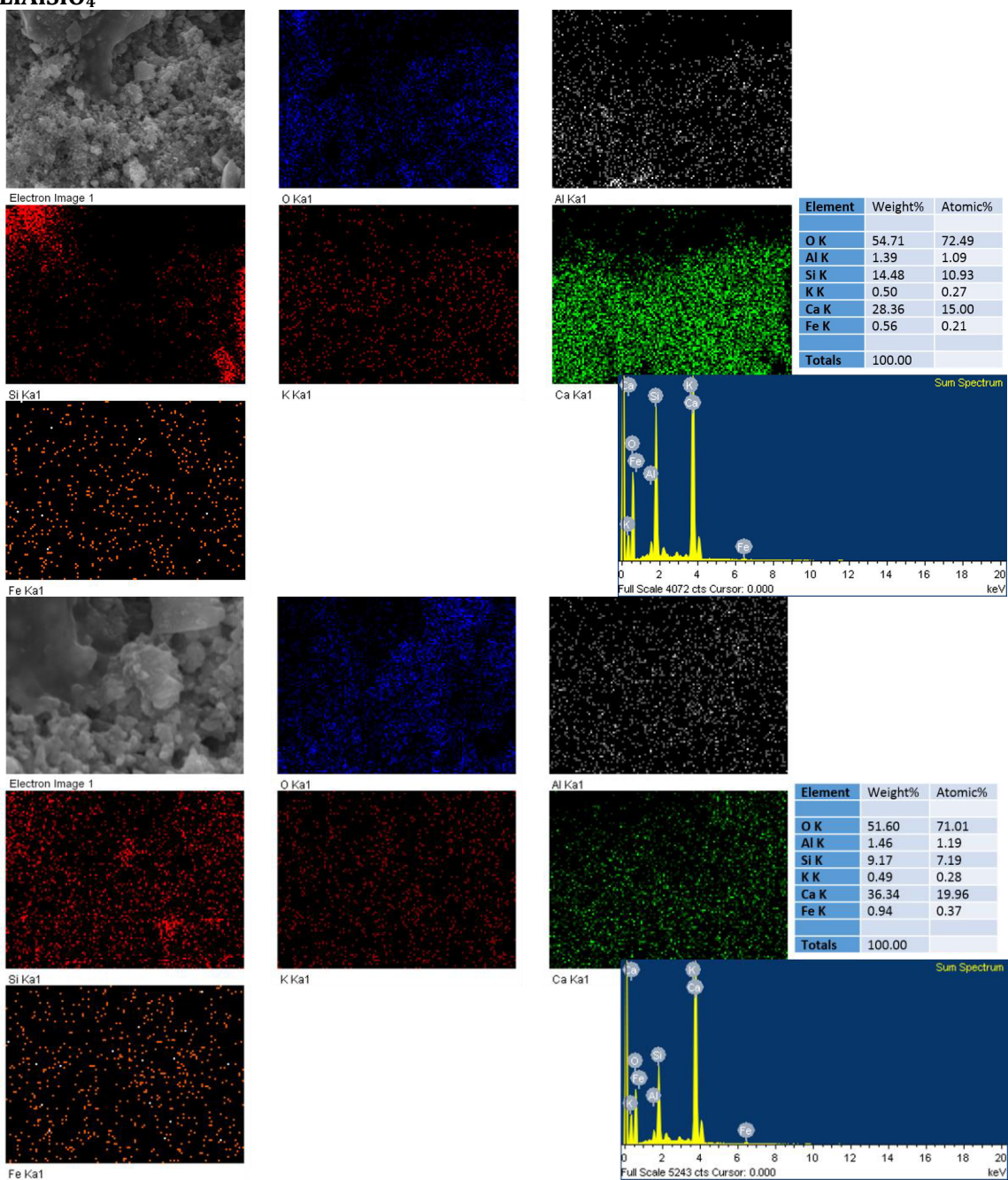
M7-LAS: Mortero con 5.0% de ZnO en sustitución en masa de cemento y LiAlSiO₄



M8-LAS: Mortero con 0.5% de SiC-TiO₂ en sustitución en masa de cemento y LiAlSiO₄

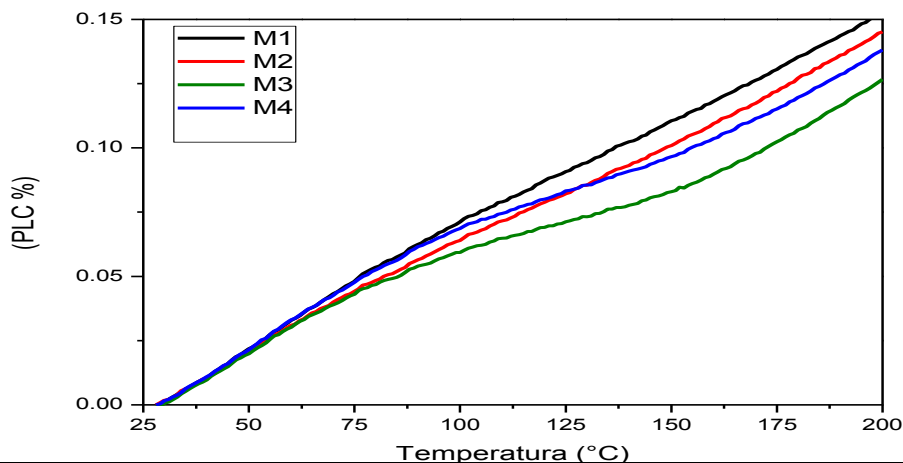


M11-LAS: Mortero con 1.0% de SiC-ZnO en sustitución en masa de cemento y LiAlSiO_4

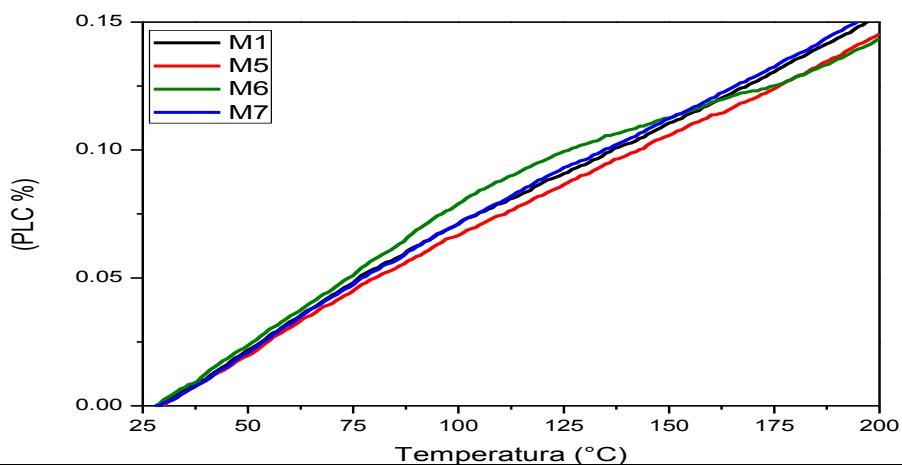


Apéndice II

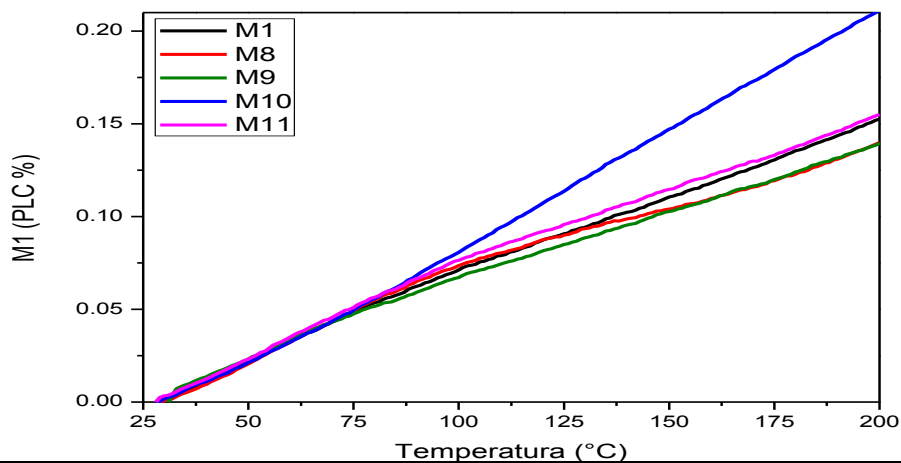
Curvas de comportamiento dilatométrico de los morteros auto-limpiantes y con baja expansión térmica, secado a 110°C



Muestra	Coeficiente de expansión térmica ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)				
	28 a 100 °C	101 a 130 °C	131 a 170 °C	171 a 200 °C	28 °C a 200 °C
M1	10.0	7.48	7.99	8.56	8.92
M2	8.89	7.0	7.92	8.95	8.44
M3	8.23	4.49	6.23	9.46	7.37
M4	9.53	5.51	6.62	8.70	8.03



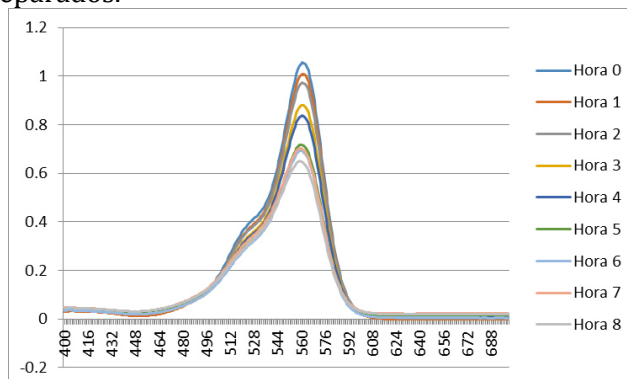
Muestra	Coeficiente de expansión térmica ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)				
	28 a 100 °C	101 a 130 °C	131 a 170 °C	171 a 200 °C	28 °C a 200 °C
M1	10.0	7.48	7.99	8.56	8.92
M5	9.51	7.87	7.48	8.21	8.55
M6	11.0	7.70	5.24	6.84	8.35
M7	9.85	8.24	8.08	8.48	8.99



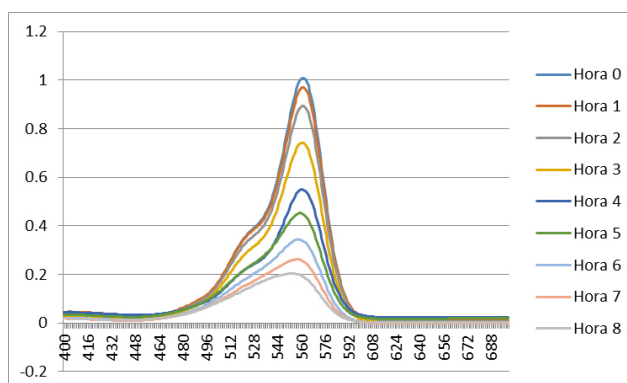
Muestra	Coeficiente de expansión térmica ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)				
	28 a 100 °C	101 a 130 °C	131 a 170 °C	171 a 200 °C	28 °C a 200 °C
M1	10.0	7.48	7.99	8.56	8.92
M8	10.4	6.57	5.63	7.86	8.18
M9	9.73	6.95	7.08	7.55	8.26
M10	11.2	13.3	13.0	12.4	12.3
M11	10.6	7.40	7.71	8.40	9.02

Apéndice III

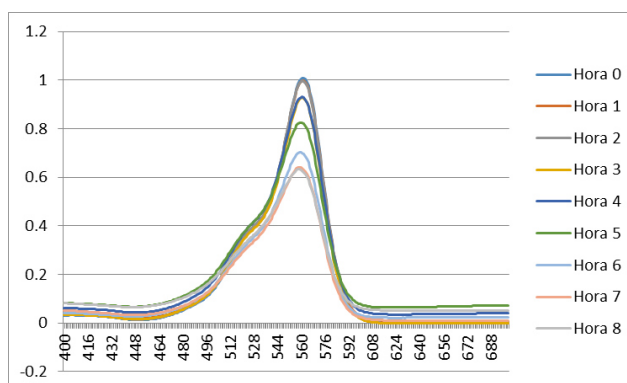
A continuación se muestran los espectros de decoloración para el colorante rodamina B con los morteros preparados.



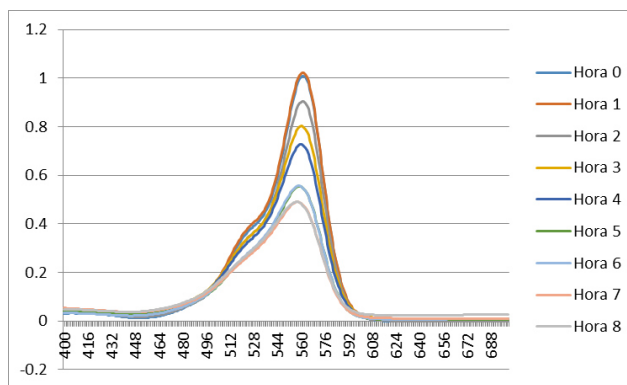
Decoloración de Rodamina B con mortero M1



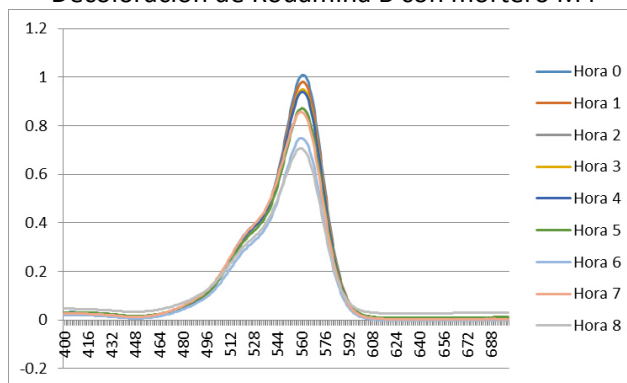
Decoloración de Rodamina B con mortero M2



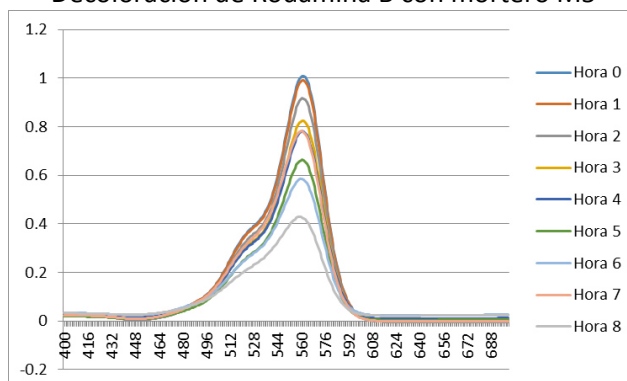
Decoloración de Rodamina B con mortero M3



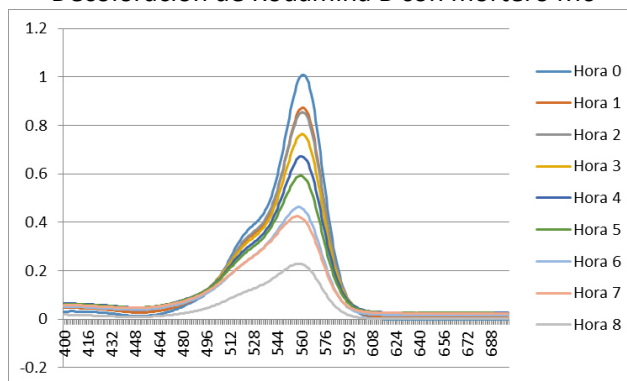
Decoloración de Rodamina B con mortero M4



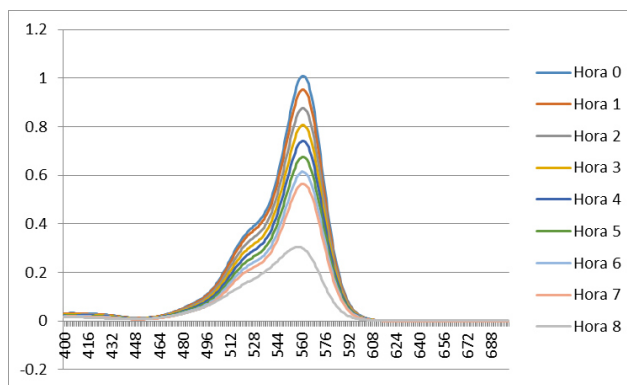
Decoloración de Rodamina B con mortero M5



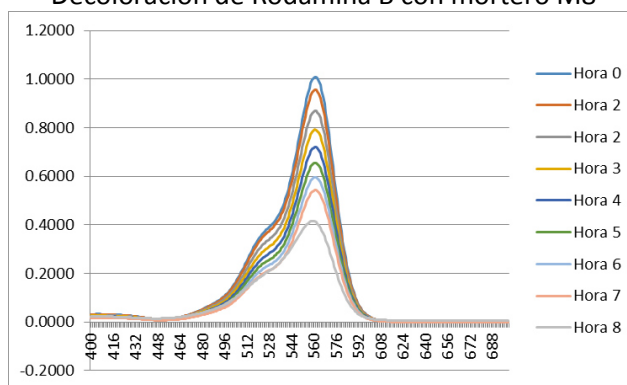
Decoloración de Rodamina B con mortero M6



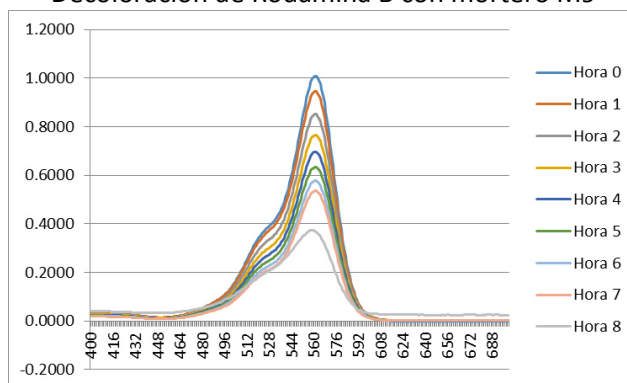
Decoloración de Rodamina B con mortero M7



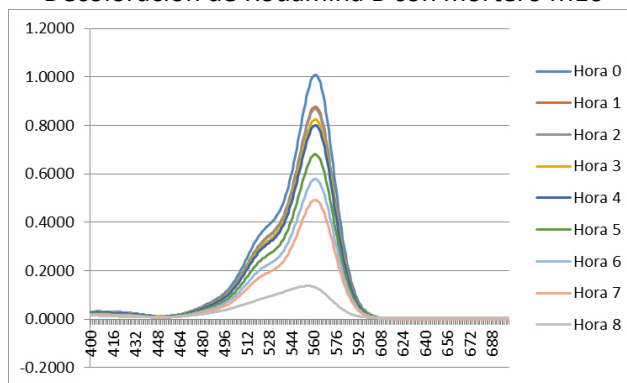
Decoloración de Rodamina B con mortero M8



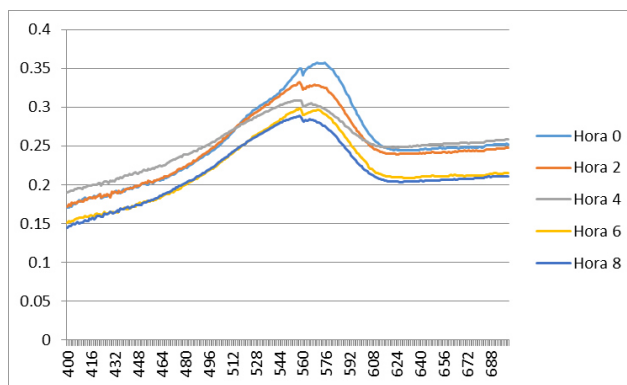
Decoloración de Rodamina B con mortero M9



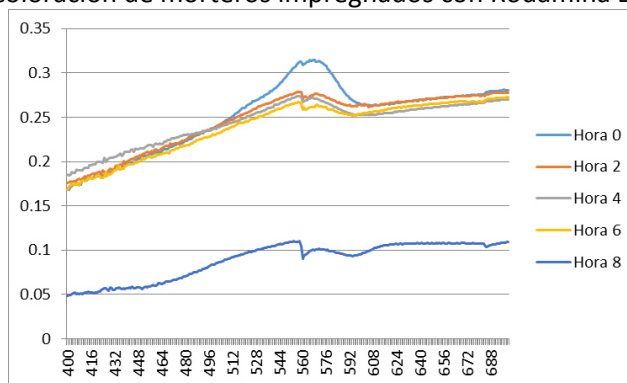
Decoloración de Rodamina B con mortero M10



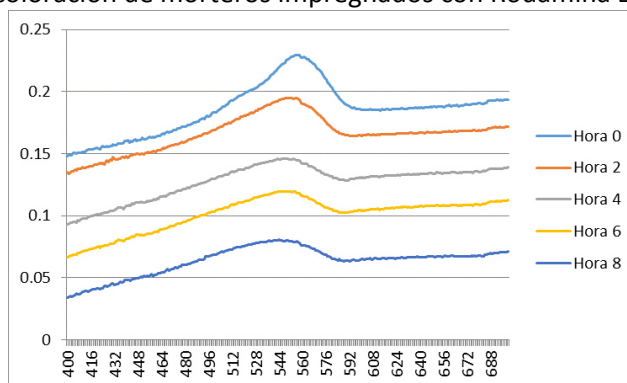
Decoloración de Rodamina B con mortero M11



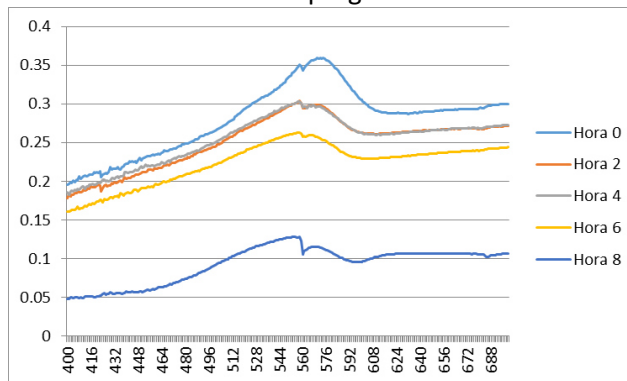
Decoloración de morteros impregnados con Rodamina B, M1



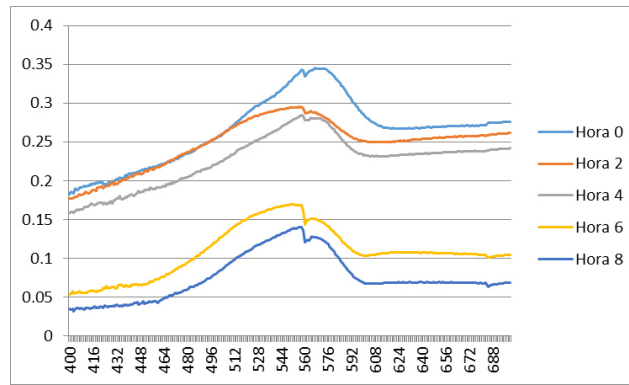
Decoloración de morteros impregnados con Rodamina B, M2



Decoloración de morteros impregnados con Rodamina B, M7



Decoloración de morteros impregnados con Rodamina B, M8



Decoloración de morteros impregnados con Rodamina B, M8

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Eric Enrique Sánchez Díaz

Candidato para el Grado de

Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción

Tesis: **Elaboración de materiales base cemento auto-limpiantes y con baja expansión térmica a temperatura ambiente**

Campo de Estudio: Materiales de Construcción

Biografía:

Datos Personales: Nacido en Villahermosa Tabasco el 5 de junio de 1989, hijo de Alcides Sánchez García y Manuela Díaz Frías.

Formación académica

2011 – 2013	Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción Instituto de Ingeniería Civil – FIC Universidad Autónoma de Nuevo León
2006 – 2011	Licenciatura en Arquitectura Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Capacitación complementaria

- Prácticas profesionales en Secretaria de Administración y Obras Públicas del estado de Tabasco
- Servicio social en División académica de Ingeniería y Arquitectura, UJAT
- Verano de investigación científica en el Centro Universitario de Arte Arquitectura y Diseño, UDEG
- Participación en congresos relacionados con la ciencia de los materiales.