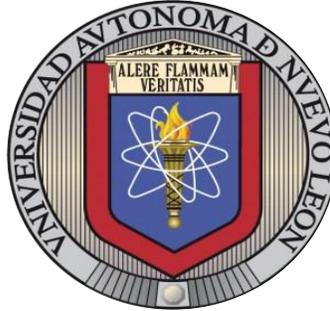


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**FUNCIONALIZACIÓN DE CEMENTANTES ALTERNATIVOS Y COMERCIALES
POR ADICIÓN DE SiC-TiO₂ Y SU EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA EN LA
DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA Y AIRE**

Por

ING. BIANCA GISELLE ESQUIVEL ALONSO

**Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS con orientación en Ingeniería Ambiental**

ABRIL 2021

**FUNCIONALIZACIÓN DE CEMENTANTES ALTERNATIVOS Y COMERCIALES
POR ADICIÓN DE SiC-TiO₂ Y SU EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA EN LA
DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA Y AIRE**

Aprobación de la Tesis

DR. ISAÍAS JUÁREZ RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. AZAEL MARTÍNEZ DE LA CRUZ

CODIRECTOR DE TESIS

DRA. MARÍA ELVIRA ZARAZÚA MORÍN

VOCAL

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2021/04/19

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

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

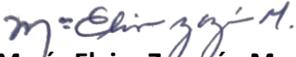
Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“FUNCIONALIZACIÓN DE CEMENTANTES ALTERNATIVOS Y COMERCIALES POR ADICIÓN DE SIC-TiO₂ Y SU EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA EN LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA Y AIRE”**, que presenta la **ING. BIANCA GISELLE ESQUIVEL ALONSO**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

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

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

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

Atentamente,


María Elvira Zarazúa Morín

Evaluador



EDUCACIÓN DE CALIDAD PARA TRANSFORMAR Y TRASCENDER EN BENEFICIO DE LA HUMANIDAD

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. (81) 14424400 ext. 6724 y 4447, 83294000 ext. 7216,7284
www.ingenieriacivil.uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

2021/04/20

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

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“FUNCIONALIZACIÓN DE CEMENTANTES ALTERNATIVOS Y COMERCIALES POR ADICIÓN DE SIC-TiO₂ Y SU EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA EN LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA Y AIRE”**, que presenta la **ING. BIANCA GISELLE ESQUIVEL ALONSO**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

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

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

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

Atentamente,

DR. ISAÍAS JUÁREZ RAMÍREZ

Evaluador





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

FECHA: 2021/15/04

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

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS** cuyo título es **“FUNCIONALIZACIÓN DE CEMENTANTES ALTERNATIVOS Y COMERCIALES POR ADICIÓN DE SiC-TiO₂ Y SU EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA EN LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA Y AIRE”**, que presenta la **ING. BIANCA GISELLE ESQUIVEL ALONSO**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

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

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

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

ATENTAMENTE
“ALERE FLAMMAM VERITATIS”

DR. AZAEL MARTINEZ DE LA CRUZ
Profesor Investigador





UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

2021/04/19

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

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

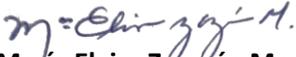
Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de **TESIS**, cuyo título es **“FUNCIONALIZACIÓN DE CEMENTANTES ALTERNATIVOS Y COMERCIALES POR ADICIÓN DE SIC-TiO₂ Y SU EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA EN LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA Y AIRE”**, que presenta la **ING. BIANCA GISELLE ESQUIVEL ALONSO**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**.

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

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

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

Atentamente,


María Elvira Zarazúa Morín

Evaluador



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

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. (81) 14424400 ext. 6724 y 4447, 83294000 ext. 7216,7284
www.ingenieriacivil.uanl.mx

RESUMEN

Hoy en día uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la humanidad es la contaminación ambiental y sus efectos. Una de las áreas que más contaminan es la industria de la construcción. Es por eso que en este trabajo se busca aprovechar el vidrio y la ceniza volante para la elaboración de cementantes alternativos, a los cuales se les agregará un fotocatalizador para conferirle propiedades de autolimpieza. Para la preparación de los cementantes comerciales se usó cemento Cemex blanco, Cemex gris, Crest, y Bexel, conforme a la norma ASTM C 109. En la preparación de los cementantes alternativos se realizó la sustitución parcial del cemento Cemex gris y blanco con Ceniza y Vidrio Sódico Cálculo. A las distintas mezclas de cementantes se les agregó TiO_2 y SiC-TiO_2 en 3% y 5% para activar sus propiedades fotocatalíticas, tanto en aire como agua. Una vez transcurrido el tiempo de fraguado se le realizaron pruebas de expansión térmica, DRX, resistencia mecánica y de medición de NO_x .

En cuanto a los resultados, la resistencia a compresión de los cementantes alternativos se obtuvo 108 kg/cm^2 por lo que, este tipo de materiales podrían emplearse para elementos que no requieran tanta capacidad estructural o recubrimientos. Por otro lado, en las pruebas fotocatalíticas de cementantes con 5% de fotocatalizador, el Cementante Portland Compuesto (CPC) blanco de la marca CEMEX con 5% fotocatalizador SiC-TiO_2 , tuvo mejores resultados en media hora con 17% de actividad en la conversión de NO_x , mientras que en las pruebas en donde se agregó el 3% de fotocatalizador, el Cementante Portland Compuesto (CPC) gris, de marca CEMEX con 3% de TiO_2 tuvo una mejor conversión de 35%. En el caso de la actividad fotocatalítica para la degradación de NO_x en los cementantes alternativos, que contienen ceniza volante y vidrio, fue muy baja, logrando sólo el 2 y 3% de actividad, sin embargo en las pruebas de degradación de colorante en medio acuoso, estos cementantes alternativos alcanzaron a degradar de un 50% a 80% de colorante índigo carmín, en general todos los

cementantes evaluados presentaron valores de degradación del colorante cercanos al 50%, comparables a los reportados en bibliografía.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que fue posible la elaboración de cementantes alternativos conteniendo ceniza volante y vidrio como sustituto parcial del cemento, los cuales presentaron resistencias mecánicas comparables a las de elementos estructurales donde no se requieran resistencias altas, como por ejemplo banquetas, blocks, morteros para recubrimiento, entre otras. Sin embargo, no podrían considerarse como elementos estructurales de alta resistencia, esto debido a que los alternativos presentaron parcialmente las fases principales del cemento. Asimismo, los resultados de las pruebas fotocatalíticas, tanto para la degradación de NO_x , como la degradación de colorantes en medio acuoso, corroboraron que la incorporación de TiO_2 y SiC-TiO_2 , permite la funcionalización de la gran mayoría de los materiales cementantes evaluados, mostrando actividad en la conversión de NO_x , pero también la actividad presentada puede estar influenciada principalmente por la naturaleza de su composición química, ya que en general presentaron valores similares de área superficial, diámetro de poro y adsorción. Lo anterior es una contribución al área de los materiales de construcción, ya que se podrán tener superficies que ayuden a la descontaminación del medio ambiente, tanto para la purificación del aire como del agua.

Dr. Isaías Juárez Ramírez
Director de Tesis

Contenido

CAPÍTULO 1	10
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	10
1.1 Aspectos generales.....	11
1.2 Contaminación provocada por la industria de la construcción.	14
1.3 Cementantes alternos.	15
1.3.1 Cenizas volantes en cementantes alternos.	15
1.3.2 Polvo de vidrio en cementantes alternos.	15
1.4 Tecnología de autolimpieza en cementantes: Fotocatálisis.	16
1.5 Aplicación de la fotocatalisis para edificaciones sustentables.	16
1.6 Discusión Bibliográfica.	17
1.6.1 Fotocatálisis.....	17
1.6.2 Cementantes alternativos	18
1.7 Hipótesis.	20
1.8 Objetivo general.	20
1.8.1 Objetivos específicos.....	20
1.9 Justificación.....	21
CAPÍTULO 2	22
MÉTODOS EXPERIMENTALES.....	22
2.1. Preparación de los materiales cementantes comerciales.	23
2.2. Preparación de los materiales cementantes alternativos.	24
2.3 Pruebas de resistencia mecánica.	25
2.4 Preparación de fotocatalizador.....	26

2.5 Preparación de cementantes con fotocatalizador.	26
2.6 Caracterización.	28
2.6.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB).	28
2.6.2 Difracción de rayos-X en polvos (DRX).	29
2.6.3 Espectros de reflectancia difusa para la determinación del E_g	29
2.6.4 Espectroscopía infrarroja, FTIR (Fourier Transform Infra-Red).	30
2.6.5 Área superficial (BET).	31
2.6.6 Expansión térmica.	32
2.7 Pruebas fotocatalíticas para la conversión de NO _x	32
2.8 Pruebas fotocatalíticas para la degradación de colorante.	33
CAPÍTULO 3	35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
3.1 Resistencia en cementantes alternativos.	36
3.2 Difracción de rayos-X de cementantes comerciales (DRX).	42
3.3 Espectroscopía de Energía Dispersada (EDS)	45
3.4 Microscopía electrónica de barrido (MEB) en nuestros cementantes.	48
3.5 Pruebas de medición de E_g	52
2.6 Espectroscopía infrarroja	54
3.7 Medición de porosidad y área superficial (BET)	57
3.8 Pruebas de Expansión Térmica.	58
3.9 Pruebas fotocatalíticas	62
3.9.1 Oxidación de NO _x	62
3.9.2 Degradación de IC en cementante bajo luz UV	66
3.9.2 OPTIMIZACIÓN DE FOTOCATALIZADOR	71
CAPÍTULO 4	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
4.1 Conclusiones	73
4.2 Recomendaciones	76

5. Referencias Bibliográficas	78
-------------------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Preparación de cementantes alternativos	23
Figura 2. Ensayos mecánicos de cementantes	25
Figura 3. Método de preparación del fotocatalizador.	26
Figura 4. Elaboración de cementantes con fotocatalizador	28
Figura 5. Sistema de cuantificación de NO _x	33
Figura 6. Degradación de colorante IC con pieza cementante.....	34
Figura 7. Resistencia de cementantes comerciales, a diferente relación agua-cemento.....	37
Figura 8. Resistencias obtenidas en cementantes comerciales	38
Figura 9, Resistencia de cementantes alternativos.	40
Figura 10. (a) DRX Cemex gris y blanco. (b) DRX Crest y Bexel.....	43
Figura 11. DRX Cementante alternativo.....	44
Figura 12. MEB de fotocatalizadores en polvo.	48
Figura 13. Materiales empleados como cementantes	49
Figura 14. Morfología de vidrio triturado empleado	49
Figura 15. Cementante alternativo con fotocatalizador vs comercial sin fotocatalizador	50
Figura 16. Cementante comercial con fotocatalizador	51
Figura 17. Espectros de reflectancia de SiC-TiO ₂ transformados con la función de Kubelka-Munk en función de la energía del fotón.	52
Figura 18. Espectros de reflectancia de SiC-TiO ₂ optimizado, transformados con la función de Kubelka-Munk en función de la energía del fotón.	53
Figura 19. Espectros de IR de los cementantes alternativos formados, graficas de 650-3650 cm ⁻¹ y 650-1650 cm ⁻¹	54
Figura 20. Espectro de IR de cementante comercia, Cemex Blanco.	55
Figura 21. Expansión térmica de cementantes sin fotocatalizador.....	58

Figura 22. Comportamiento de la expansión térmica en cementantes con fotocatalizador.....	59
Figura 23. Coeficiente de expansión térmica en cementantes	60
Figura 24. Expansión térmica en Cementante blanco con y sin fotocatalizador ...	61
Figura 25. Expansión térmica en Cementante gris con y sin fotocatalizador.	61
Figura 26. Conversión de NO _x en distintas fotocatalizador SiC-TiO ₂ en polvo. TiO ₂	62
Figura 27. Conversión de NO _x , en cementantes sin fotocatalizador	62
Figura 28. Conversión de NO _x en cementantes con 3% de fotocatalizador	63
Figura 29. Conversión de NO _x en cementantes con 5% de fotocatalizador	64
Figura 30. Conversión de NO _x en cementantes alternativos con 5% de fotocatalizador.....	65
Figura 31. Actividad fotocatalítica bajo luz U.V. para la conversión de NO _x en concreto celular empastado con cemento con 1% de fotocatalizador.....	65
Figura 32. Degradación de IC en cementantes alternativos comerciales.....	66
Figura 33. Degradación de IC en cementantes alternativos con fotocatalizador...	67
Figura 34. Resumen degradación de IC en cementantes alternativos, Bexel y Crest	68
Figura 35. Conversión de NO _x bajo luz U.V. para mezclas de fotocatalizador a diferentes moliendas y relaciones.	71
Figura 36. Figura 30. Conversión de NO _x bajo luz visible para mezclas de fotocatalizador a diferentes moliendas y relaciones.	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Proporcionamiento de cementantes alternos	24
Tabla 2. Proporcionamiento de cementantes fotocatalíticos	27
Tabla 3. Proporcionamiento y resistencia de cementante alternativo gris.....	39
Tabla 4. Proporcionamiento y resistencia de cementante alternativo blanco.....	39
Tabla 5. EDS cementantes.....	45
Tabla 6. EDS cementantes alternativos con fotocatalizador.	46
Tabla 7. Composición química Ceniza Nava.....	47
Tabla 8. Tabla 4. Bandas de absorción correspondiente a los espectros de infrarrojo de los cementantes.	56
Tabla 9. BET Comparativa cementante alternativo vs comercial alternativos con fotocatalizador.	57
Tabla 10. Actividad fotocatalítica Vs expansión térmica en cementantes alternativos.	70
Tabla 1. Proporcionamiento de cementantes alternos	92

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Aspectos generales.

Hoy en día uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la humanidad a nivel mundial es la contaminación ambiental y sus efectos tales como: el rápido incremento del calentamiento global y el desarrollo de enfermedades cancerígenas, respiratorias, dermatológicas, etc. Este fenómeno es generado por las grandes ciudades, pues estas son las principales promotoras de la contaminación, debido a la sobrepoblación que se concentra en ellas: por el uso de vehículos, consumo y desecho productos no degradables, la industrialización y la explotación de los recursos naturales en zonas cercanas a éstas. Todo esto contribuye a que el ser humano tenga cada vez una menor calidad de vida. De acuerdo con la ONU, el 54% de la población viven en ciudades y se espera que para 2050 este porcentaje aumente a 66% [1].

Las ciudades concentran tal cantidad de personas y actividades que se convierten en generadoras de los gases de efecto invernadero, por este motivo es importante generar un cambio en las ciudades que ayude a reducir la emisión de estos gases, así como la adaptación de medidas a los efectos del cambio climático [2].

La contaminación del aire se entiende como la presencia de sustancias nocivas en la atmósfera a ciertas concentraciones que pueden provocar daños a la salud y contribuir al calentamiento global. Los contaminantes del aire se clasifican según su origen, pueden ser primarios o secundarios, los primarios son emitidos directamente a la atmosfera como el monóxido de carbono (CO) dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y Partículas (PM10 y PM2.5) [3]; y los contaminantes secundarios son los que se forman en la atmosfera a partir de reacciones químicas como por ejemplo el ozono (O₃), formado por reacciones de contaminantes primarios (COVs y óxidos de nitrógeno (NO_x) [4] ácido nítrico (HNO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) [3].

La mayor parte de esta contaminación es causada por el uso excesivo de automóviles en la ciudad, producción de cemento, industria eléctrica y construcción [5]. Otro aspecto sumamente importante es el efecto que tiene la contaminación sobre la salud humana. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del aire en las ciudades produce en la actualidad cerca de un millón de muertes prematuras [6].

Los gases NO_x tiene un efecto negativo en el medio ambiente ya que producen lluvia ácida, formación de ozono troposférico, fotoquímicos, smog, efecto invernadero, entre otros. Además, afectan en la salud de los seres humanos y animales causando irritación de la piel, dificultad para respirar, puede causar náuseas, y se les ha asociado con el desarrollo de cáncer [7].

La exposición a este tipo sustancias a niveles elevados en el aire trae consecuencias negativas en la salud de la población, se estima que la contaminación del aire causa el 36% de las muertes por cáncer de pulmón, el 27% de los infartos al corazón, el 34% de los accidentes cerebrovasculares y el 35% de las muertes por insuficiencias respiratorias [8].

El área metropolitana de Monterrey es una de las zonas urbanas más contaminadas de América Latina, según la Organización Mundial de la Salud, se estima que el 60% de los días en un año se registran concentraciones de contaminantes por encima de las normas mexicanas [9]. Hay que considerar que solo en el año 2018 se tuvieron 204 de los 365 días en los que las estaciones reportaron mala calidad de aire con concentraciones arriba de las normas, ya sea por PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y O_3 . En cuanto a los NO_x se tuvo un aumento de 5% de emisiones a nivel nacional del 2015 a 2017 y en SO_x hubo un aumento del 50% en el mismo periodo de años, según el inventario del INEGyCEI [10].

En la actualidad existen varios estándares de calidad del aire en los países con el objetivo de proteger la salud [5]. En México, estos estándares se encuentran publicados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y son de observación obligatoria en todo el país. Las NOM señalan cuales son los límites permisibles para

los contaminantes. Estas normas están condicionadas a una revisión periódica para evaluar la información reciente sobre los efectos en la salud y la gestión de la calidad del aire [11].

Dadas estas problemáticas, el ser humano ha desarrollado tecnologías e innovaciones que ayudan a disminuir los índices de contaminación, sin embargo, estas medidas no se han usado aún en gran escala. Algunas de las innovaciones que se han implementado en ciertas partes del mundo son las siguientes:

- Aplicación de techos verdes; los cuales nos ayudan a reducir la cantidad de CO₂, aprovechando los espacios expuestos al ambiente [12].
- Aprovechar desechos de la industria para generar cementantes alternos: tales como cenizas volantes, Vidrio y residuos cerámicos [13].
- Empleo de energías renovables.
- Uso de vehículos híbridos, que ayudan a disminuir el uso de combustibles.
- Revestimientos fotocatalíticos en la construcción, empleados para la reducción de contaminantes.

1.2 Contaminación provocada por la industria de la construcción.

Se calcula que la construcción consume el 5.7% de energía a nivel global y aporta el 6.8% de los gases de efecto invernadero [14]. Esto debido a los procesos de obtención del cemento. Esta contaminación se genera en las ciudades más desarrolladas y pobladas, y aunque el problema inicia siendo puntual en determinada área, termina afectando a todo el planeta en general.

Alrededor de 7% de las emisiones totales de CO₂ del planeta son ocasionadas por los procesos de la industria concretera, se dice que por cada tonelada de cemento producido se arroja 1 tonelada de CO₂ a la atmósfera (incluyendo la transportación). La mayoría de las emisiones de CO₂ derivadas de la fabricación de cemento provienen de la descarbonatación de las calizas necesarias para su fabricación [15].

Otro factor que impacta gravemente es la extracción de materias primas, ya que esta industria consume el 60% de las materias primas extraídas de la tierra, en donde además libera emisiones de CO₂ y PM10 PM2.6, produce el 50% de residuos [16].

Por lo que con el tiempo el ser humano ha tratado de implementar cementantes alternos con procesos de elaboración o que utilizan materias primas diferentes para tratar de mitigar el daño que hace la producción del cemento Portland convencional. Aunado a esto, también ha desarrollado la aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación TAO's en los cementantes que ayudan a la purificación del aire, tanto en el interior como exterior de la construcción, además de tener propiedades de autolimpieza [17,18].

1.3 Cementantes alternos.

Son cementantes alternativos, aquellos en los cuales se sustituye total o parcialmente al cemento Portland, por materiales de residuos obtenidos en procesos industriales o productos no degradables [18].

Hoy en día existen algunos productos de cementantes alternativos, lanzados al mercado, que son de uso no estructural, son usados como adhesivos y resanadores.

1.3.1 Cenizas volantes en cementantes alternos.

La mayoría de estos materiales complementarios para la producción de cemento son residuos obtenidos de procesos industriales o productos no degradables. En el caso de la ceniza volante y las escorias de alto horno, se producen como residuos de las termoeléctricas, se estima que en el 2009 se obtuvieron 8.4 billones de toneladas de este residuo sólo en Corea [18], los cementantes elaborados con ceniza volante pueden alcanzar una resistencia de hasta 40 Mpa después de un curado en calor [19].

1.3.2 Polvo de vidrio en cementantes alternos.

Debido al aumento de las consecuencias económicas y medioambientales del relleno sanitario, el reciclaje de residuos de vidrio es de gran interés en todo el mundo al ser un material no biodegradable [20]. La industria del concreto se encuentra entre las opciones más adecuadas para reutilizar el vidrio de desecho como agregado en el concreto o como material cementoso complementario por contener los mismos componentes químicos que el cemento en diferentes proporciones.

Los beneficios ecológicos o ambientales del uso de la tecnología de geo polímeros para el reciclaje de vidrio de desecho incluyen: el mayor desvío de material de desecho de vertederos para aplicaciones útiles, la reducción en el uso de energía y emisiones de CO₂ atribuidas a la producción de cemento Portland y por último la conservación de los recursos naturales. [21]

1.4 Tecnología de autolimpieza en cementantes: Fotocatálisis.

La fotocatalisis a través de un semiconductor se considera parte de las tecnologías de oxidación avanzadas (TAO's), estos se basan en la formación de radicales hidroxilos (OH^*) como agente oxidante primario en la degradación de contaminantes [22].

El proceso de fotocatalisis se da cuando el semiconductor al recibir radiación de un determinado rango de longitud de onda genera pares electrón/hueco.

A causa de ello, los huecos fotogenerados, dan lugar en la superficie del semiconductor a las reacciones de fotooxidación y los electrones de la banda de conducción, dan lugar a las reacciones de foto-reducción [23]

Aplicar un semiconductor fotocatalítico a la superficie de los materiales trae beneficios a gran escala para reducir la contaminación del aire en áreas urbanas [24]

1.5 Aplicación de la fotocatalisis para edificaciones sustentables.

La fotocatalisis puede aplicarse en diversos campos de la ingeniería para mejorar las propiedades de los materiales en la industria de la construcción, este fenómeno se presenta usualmente al agregársele TiO_2 , CdS , Fe_2O_3 y WO_3 a materiales de construcción [11]. Permitiendo así desarrollar en estos materiales la propiedad de autolimpieza, purificación de aire [25] y capacidad antibacterial. Los materiales son comúnmente expuestos a los contaminantes atmosféricos, con la finalidad de proporcionar superficies que permiten que ocurran reacciones fotocatalíticas heterogéneas que atacan a los NO_x (NO y NO_2) provocados por los escapes de los vehículos y la industria [11].

Los contaminantes que son más comúnmente analizados para evaluar las propiedades de autolimpieza y descontaminación son colorantes naturales, compuestos inorgánicos (NO_x , SO_x , CO , entre otros), hidrocarburos, pesticidas y algunas bacterias, virus y hongos [23].

Hoy en día ya se puede utilizar esta tecnología en muros de block, muros de exterior, muros de túneles, pinturas, morteros, asfaltos, impermeabilizantes, acabados exteriores, entre otras [7].

1.6 Discusión Bibliográfica.

1.6.1 Fotocatálisis.

Dentro de las fuentes contaminantes se pueden mencionar las actividades industriales, el gran aforo del parque vehicular, y las actividades domésticas, entre otros. Esto expone a la población a enfermedades que se presentan comúnmente en las vías respiratorias a causa de la mala calidad del aire. Entre los contaminantes del aire que han recibido especial atención en los últimos años se encuentran los NO_x , ya que son causantes de problemas de salud que van desde irritación en el tracto respiratorio, náuseas, dolores de cabeza, incremento de asma en niños, así como enfermedades respiratorias y hasta enfermedades cancerígenas [7,8], y también de provocar la llamada lluvia ácida [9]. Por ello, es de gran importancia el llevar a cabo investigaciones que contribuyan con la limpieza del medio ambiente [7].

La presencia de los NO_x (comúnmente óxido nítrico, NO , y dióxido de nitrógeno, NO_2), es consecuencia principalmente de los gases liberados de la combustión de los combustibles fósiles empleados en los automóviles, y de algunas empresas dedicadas a la energía fósil [10,7]. Por lo que, se hace necesario buscar disminuir los niveles de contaminación de estos óxidos, y además provocar su conversión a productos menos dañinos.

Una de las tecnologías que se está utilizando con grandes expectativas es la fotocatálisis heterogénea, ya que mediante esta técnica es posible provocar la oxidación de los NO_x , para pasar de NO a NO_2 , o a NO_3^- , estos últimos llamados nitratos, los cuales pueden llegar a formar ácido nítrico (HNO_3) [7], un compuesto que puede ser empleado como fertilizante.

El fotocatalizador más empleado en esta tecnología es el dióxido de titanio (TiO_2) [7,10] el cual ha sido agregado en morteros, concretos, asfaltos, azulejos, etc., cuya actividad tiene la desventaja de ser activada con la luz U.V. y no aprovechar al 100% la luz solar [11]. Debido a esta limitante actualmente se trabaja mezclándolo con otros compuestos para mejorar su actividad fotocatalítica.

Entre los compuestos con los que se ha estado trabajado se encuentra el SiC, el cual tiene una energía de banda prohibida de 3.0 eV, muy parecida a la del TiO_2 de 3.2 eV, además tiene alta termoestabilidad, alta resistencia mecánica y una alta conductividad eléctrica [69]. También, ha sido probado para la degradación de rodamina B y azul de metileno alcanzando 70 y 77% de degradación, respectivamente [12,26], así como para la obtención de hidrógeno [27]. El SiC es de color oscuro, a diferencia del TiO_2 , lo cual nos ayudará a que el primero absorba la luz solar para después transferirla al TiO_2 de manera atenuada y así se pueda incrementar las reacciones de oxidación de los NO_x , evitando la recombinación de los huecos y electrones de nuestro semiconductor.

Algunos de los parámetros fisicoquímicos relacionados a la eficiencia del fotocatalizador son: el aumento de la irradiancia en el rango de la longitud de onda que será aplicada para el estudio, los valores de humedad relativa, la concentración de NO_x a la que estará expuesto, el tamaño de partícula y rugosidad del fotocatalizador, ya que a mayor área superficial mejora la actividad [28].

1.6.2 Cementantes alternativos

Aunado a lo anterior, el uso de los cementantes alternativos se plantea como una opción para la elaboración de cementantes alternos con propiedades fotocatalíticas y así contribuir a la disminución del uso del cemento ordinario y reutilizar residuos como la ceniza volante y el vidrio.

Existen algunos estudios que aseguran la viabilidad de los cementantes alternativos, que se pueden elaborar con materiales tales como: cenizas volantes [29], escoria de alto horno y polvo de vidrio [30] o ceniza volante y polvo de vidrio [29]. En la mayoría de estos trabajos se observa que utilizan como solución

activadora el hidróxido de sodio (NaOH) a diferentes concentraciones y los que usan las concentraciones más grandes obtienen mejores resistencias, de hasta 30 Mpa [21].

En los cementantes alternativos que contienen polvo de vidrio existe una discusión en cuanto a la cantidad de vidrio que se debe de agregar al cementante ya que mientras algunos autores nos dicen que la cantidad máxima de vidrio está limitada por 0.1 a 1.0% en porcentaje en peso del cemento [31], otros recomiendan usar entre el 15% [30] y 20% [20]. Estos últimos porcentajes no son recomendables, debido a que hay que tomar en cuenta que puede generar una corrosión álcali en el concreto, además de que se producen grandes cantidades de cemento y sería difícil cumplir con esos porcentajes de residuos de vidrio, por lo que en esta investigación usaremos del 5 al 10% de vidrio como materia prima.

Otro factor que hay que tomar en cuenta es el tamaño de partícula del vidrio, ya que se sugiere en un artículo que el tamaño debe de ser menor a 300 micras [32], mientras otro recomienda partículas menores a 150 micras [30]. Por lo que se puede deducir que a menor tamaño de partículas se tiene una mejor reacción alcalina, ya que incrementa el área superficial y las partículas se adhieren más entre ellas, además así evitar que se produzcan micro fisuras.

Por ello, en la presente investigación se promoverá el uso de residuos de vidrio y ceniza volante (ambos materiales de desecho) como materia prima para que, mezclados con cemento, puedan elaborarse cementantes alternativos de interés para la industria de la construcción. Este cementante alternativo será comparado con otros cementantes comerciales para evaluar su actividad para la conversión de los NO_x mediante la tecnología de fotocatalisis, donde se agregará el SiC-TiO₂ como material fotocatalítico. Este material será preparado por molienda mecánica e incorporado a la mezcla al momento de elaborar el material cementante.

1.7 Hipótesis.

Los materiales cementantes que contendrán residuos de vidrio y ceniza volante como materia prima mejorarán sus propiedades ópticas, fisicoquímicas, y fotocatalíticas al agregarles SiC-TiO₂, en comparación con algunos cementantes comerciales, lo que permitirá su uso de manera práctica y amigable con el medio ambiente.

1.8 Objetivo general.

Reutilizar residuos de vidrio y ceniza volante en la elaboración de materiales cementantes alternativos, sustituyendo parcialmente el cemento portland gris y blanco por estos residuos, para después funcionalizarlos y evaluar sus propiedades fotocatalíticas y fisicoquímicas al agregarles SiC-TiO₂ a la mezcla del cementante, y evaluar su actividad en procesos de degradación de sustancias contaminantes en agua y aire, para comparar su comportamiento con materiales cementantes comerciales.

1.8.1 Objetivos específicos.

- Desarrollar materiales cementantes alternativos a través del uso de residuos de vidrio sometidos a molienda mecánica y ceniza volante en diferentes proporciones.
- Comparar la resistencia mecánica de los materiales cementantes alternativos, con la resistencia de materiales cementantes comerciales (cemento gris y blanco, Bexel y Crest).
- Determinar las características estructurales y morfológicas de los nuevos materiales cementantes preparados, mediante diversas técnicas analíticas como difracción de rayos-X y microscopía electrónica de barrido. A fin de poder relacionar el comportamiento fotocatalítico con estas características.
- Conferir propiedades fotocatalíticas a los materiales cementantes alternativos, mediante la incorporación de SiC-TiO₂, para llevar a cabo pruebas de conversión de NO_x y degradación de colorantes, y comparar su actividad fotocatalítica con los cementantes comerciales.

- Relacionar las propiedades de los materiales preparados con la actividad fotocatalítica presentada en las reacciones de degradación de sustancias contaminantes en agua y aire.

1.9 Justificación.

- En este trabajo se busca aprovechar el vidrio y la ceniza volante para la elaboración de cementantes alternativos, a los cuales se les agregará un fotocatalizador (SiC-TiO₂) para conferirle propiedades de autolimpieza y llevar a cabo la degradación de colorantes en medio acuoso y de gases como el NO_x presentes en el aire. La actividad fotocatalítica de estos cementantes alternativos será comparada con la que presenten diversos cementantes comerciales (cemento tradicional blanco, cemento tradicional gris, Crest y Bexel), para conocer si nuestros materiales pueden presentar mejor comportamiento fisicoquímico y mecánico que éstos.

CAPÍTULO 2

MÉTODOS EXPERIMENTALES

2.1. Preparación de los materiales cementantes comerciales.

Para la preparación de los cementantes comerciales se optó por usar el cementante comercial Cemex blanco, Cemex gris, Crest y Bexel. Estos productos son inorgánicos, tienen la capacidad de fraguar y desarrollar altas resistencias a la compresión al endurecer.

Los morteros se prepararon conforme a la norma ASTM C-109, utilizando arena Sílica estándar, ya que es la recomendada en la norma y una relación agua/cemento de 0.485 [33].

Las mezclas fueron realizadas en una mezcladora tipo Hobart modelo N50 de 3 velocidades, en donde primeramente se colocaron los 245 mL de agua, enseguida 500 g del cementante y se mezcló a velocidad baja por 30 segundos, después se agregó lentamente la arena Sílica por 30 segundos. Se paró la mezcladora y por 15 segundos retiramos el mortero que quedó pegado en el tazón, después se tapó con una franela húmeda para que no perdiera humedad la mezcla y se le dejó reposando por 90 segundos. Finalmente, se volvió a mezclar por 60 segundos a una velocidad media.

Una vez preparada nuestra mezcla, se le hicieron pruebas de fluidez conforme a la norma ASTM C-109 y posteriormente se hizo el llenado de los moldes de 5 x 5 cm (figura 1) con compactaciones conforme nos marcan la norma ASTM C-109.



Figura 1. Preparación de cementantes alternativos

Al terminar dichas compactaciones, se dejaron fraguando durante 24 horas en el cuarto de muflas y una vez endurecidos y retirados de los moldes fueron llevados a un cuarto de curado con una temperatura controlada de 25°C, donde permanecieron para poder evaluar su resistencia a la compresión a los 7, 15 y 28 días.

2.2. Preparación de los materiales cementantes alternativos.

Para la elaboración de nuestros cementantes se realizó la sustitución parcial del cemento Cemex gris y blanco, en distintos porcentajes (tabla 1.) Como suplemento parcial se incorporó ceniza y vidrio sódico cálcico, este último se obtuvo al pulverizar diferentes tipos de botellas residuales fabricadas de este material.

Tabla 1. Proporcionamiento de cementantes alternos

CP	Proporcionamiento- cementante alternativo		
	Cementante	Vidrio	Ceniza volante
GRIS	(%)	(%)	(%)
E2-G	20	10	70
E3-G	30	10	60
E4-G	40	10	50
E5-G	50	10	40
E1-G	100	0	0
BLANCO			
E2-B	20	10	70
E3-B	30	10	60
E4-B	40	10	50
E5-B	50	10	40
E1-B	100	0	0

Para la activación alcalina, se utilizó hidróxido de sodio, en solución con concentración 4 molar. La preparación consistió en agregar un litro agua y, posteriormente, se añadió el NaOH en una cantidad que permitió tener una solución 4 M (160 gramos de NaOH por litro de solución).

La solución se mantuvo en agitación magnética constante, para ayudar a la disolución de las escamas del NaOH, hasta obtener un líquido cristalino el cual fue añadido a la mezcla para tener una relación solución/cementante = 0.45-0.6 hasta obtener una buena fluidez.

2.3 Pruebas de resistencia mecánica.

En estas pruebas se somete a los materiales a esfuerzos mediante la aplicación de cargas externas controladas que permiten conocer la capacidad de carga aplicada (compresión y la flexión). En la cual estos elementos sujetos a compresión y flexión sufren deformaciones hasta llegar a su punto de ruptura. La máquina funciona con un sistema hidráulico, que se utiliza para presionar al dispositivo y que aplique la carga.

El tamaño de los especímenes ensayados debe de ser de 5 x 5 x 5 cm, como se indica en la norma ASTM C-109 y fueron ensayados a los 7, 14 y 28 días de fraguado. Se debe de centrar el espécimen en la placa donde se hará la prueba cuidando que la superficie quede totalmente cubierta con la carga. Una vez realizada la prueba corroboramos si la falla que presentó el espécimen fue de manera diagonal parecida a un reloj de arena, esto nos corrobora que realizamos nuestro espécimen y ensayo de manera correcta [figura 2].

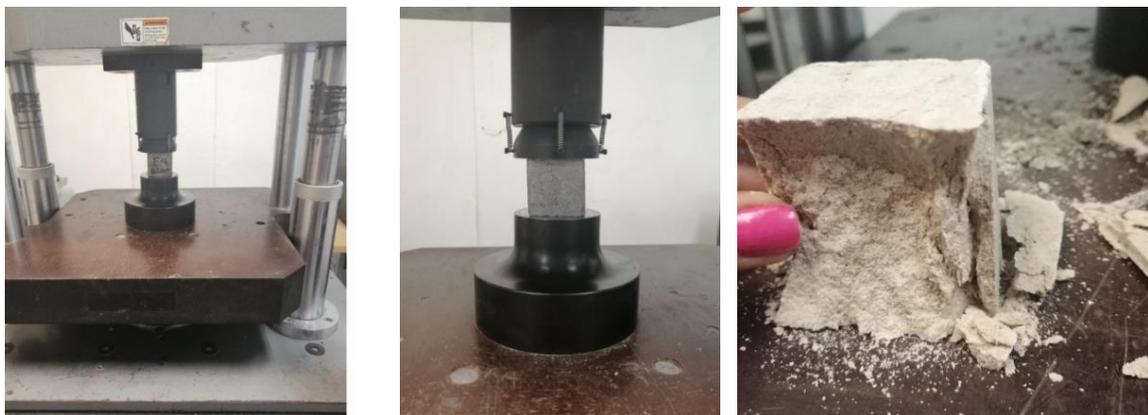


Figura 2. Ensayos mecánicos de cementantes

2.4 Preparación de fotocatalizador.

La preparación del fotocatalizador SiC-TiO₂ en diferentes proporciones se llevó a cabo mediante molienda mecánica utilizando un molino Pulverisette 7 fritsch, moliendo los materiales a 300 ± 10 rpm por 10 minutos, en relaciones en peso de 20-80%, 80-20% y 50-50% de SiC-TiO₂, respectivamente. En este caso, se usó el TiO₂ P-25 comercial, así como SiC comercial de la marca Sigma-Aldrich. Una vez preparadas estas mezclas fueron agregadas a la mezcla cementante en una proporción de 3 y 5% en peso.

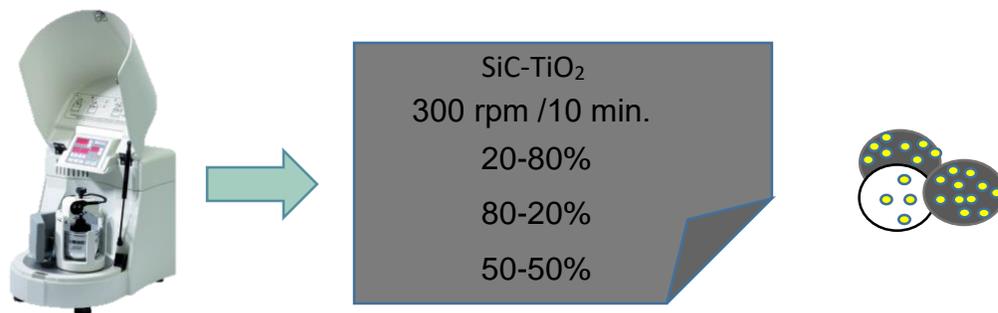


Figura 3. Método de preparación del fotocatalizador.

2.5 Preparación de cementantes con fotocatalizador.

La elaboración de los cementantes alternos con fotocatalizador se realizó conforme a los procedimientos estándares de la norma ASTM C-109 y moldes de medida 10 x 5 x 1.5 cm (figura 4), agregándole nuestro fotocatalizador TiO₂ y SiC-TiO₂ en proporciones de 3 y 5% en peso, según se muestra en la tabla 2.

De igual manera se prepararon los cementantes comerciales conforme a la norma ASTM C-109 (figura 3), agregándole nuestro fotocatalizador TiO₂ y SiC-TiO₂ en proporciones de 3 y 5% en peso.

Tabla 2. Proporcionamiento de cementantes fotocatalíticos

CEMENTANTE COMERCIAL CREST/BEXEL			
NOMBRE	Cementante	% Fotocatalizador	Fotocatalizador
Prisma 11	Crest	0	
Prisma E13	Crest	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-14	Crest	5	TiO ₂
Prisma 11	Bexel	0	
Prisma E-13	Bexel	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-14	Bexel	5	TiO ₂
CEMENTATE ALTERNATIVO			
NOMBRE	Cementante	% Fotocatalizador	Fotocatalizador
Prisma P-2	C. Alternativo Blanco	0	
Prisma E-10	C. Alternativo Blanco	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-14	C. Alternativo Blanco	5	TiO ₂
Prisma E-16	C. Alternativo Blanco	3	SiC - TiO ₂
Prisma E-20	C. Alternativo Blanco	3	TiO ₂
Prisma P-2	C. Alternativo Gris	0	
Prisma E-10	C. Alternativo Gris	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-14	C. Alternativo Gris	5	TiO ₂
Prisma E-16	C. Alternativo Gris	3	SiC - TiO ₂
Prisma E-20	C. Alternativo Gris	3	TiO ₂
CEMENTANTE COMERCIAL CEMEX BLANCO/GRIS			
NOMBRE	Cementante	% Fotocatalizador	Fotocatalizador
Prisma E-34	C. Comercial Blanco	3	SiC - TiO ₂
Prisma E-35	C. Comercial Blanco	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-31	C. Comercial Blanco	3	TiO ₂
Prisma E-32	C. Comercial Blanco	5	TiO ₂
Prisma E-34	C. Comercial Gris	3	SiC - TiO ₂
Prisma E-35	C. Comercial Gris	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-31	C. Comercial Gris	3	TiO ₂
Prisma E-32	C. Comercial Gris	5	TiO ₂

La relación de la mezcla de SiC-TiO₂ empleada tiene una proporción de 20-80%, 50-50%, y 80-20%, respectivamente.



Figura 4. Elaboración de cementantes con fotocatalizador

2.6 Caracterización.

Todos los materiales utilizados y los cementantes que se prepararon fueron caracterizados mediante diversas técnicas analíticas, tanto los materiales cementantes en polvo, así como la ceniza volante, vidrio molido y los materiales fotocatalizadores SiC, TiO₂ y SiC-TiO₂. Para el caso de los morteros ya preparados se tuvieron que cortar en piezas de 2.5 x 0.5 x 0.5 cm.

2.6.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB).

La técnica de microscopía electrónica de barrido es una técnica con la que podremos obtener imágenes de alta resolución de las superficies de nuestros materiales en escala nanométrica y micrométrica y la composición de estos.

Con este análisis podemos obtener información sobre la morfología, topografía, composición y estructura de la superficie de nuestros materiales en estado sólido. Esta técnica se basa en que, un haz de electrones incide sobre la muestra y realiza un barrido puntual (en el área colocada señalada) sobre la misma se puede magnificar hasta 2000 veces (2000X) el tamaño de un objeto y resolver detalles de hasta 0.2 μm [34].

Se empleó un equipo JEOL modelo JSM 6490LV, con un filamento de tungsteno, el cual está equipado con una sonda de microanálisis de dispersión de energía de rayos-X (EDS) que permite obtener la composición química de los materiales [35].

El análisis se llevó a cabo colocando los materiales cementantes en polvo, así como la ceniza volante, vidrio molido y nuestros fotocatalizadores SiC, TiO₂ y SiC-TiO₂. Mientras que, para el caso de los morteros ya preparados, se tuvieron que cortar en piezas de 2.5 x 0.5 x 0.5 cm, para poder colocarlas sobre la cinta de carbón. En todos los casos, las muestras se recubrieron con una capa fina de oro-paladio para su posterior análisis.

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

Esta técnica se basa en la interferencia constructiva de rayos-X monocromáticos y una muestra cristalina. Estos rayos-X son generados por un tubo de rayos catódicos, filtrados para producir radiación monocromática, colimados para concentrarse y así dirigirse hacia la muestra, esta técnica nos permite identificar las fases presentes en compuestos cristalinos y para determinar si es un material cristalino o amorfo. Podemos determinar los parámetros de celda de las estructuras cristalinas cuantificar la presencia de fases mediante las intensidades de las líneas de difracción [35].

Para los análisis, utilizamos solamente una pequeña cantidad de aproximadamente un gramo de nuestros materiales en polvo y en el caso de nuestros cementantes preparados se cortaron piezas de 2.5 x 0.5 x 0.5 cm, para poder colocarlas en el portamuestras.

2.6.3 Espectros de reflectancia difusa para la determinación del E_g .

La espectroscopía ultravioleta-visible (UV/Vis) consiste en la emisión de fotones, utiliza radiación electromagnética (luz) de las regiones visible, ultravioleta cercana (UV) e infrarroja cercana del espectro electromagnético en una longitud de onda entre 160 y 780 nm.

El espectro ultravioleta está formado por una gráfica de la longitud de onda en función de la intensidad de absorción. La absorción molecular en la región

ultravioleta y visible del espectro depende de la estructura electrónica de una molécula. La absorción de energía se cuantifica y da por resultado la elevación de los electrones desde orbitales en el estado básico a orbitales de mayor energía en un estado excitado [36].

Los datos frecuentemente se muestran en forma de gráfica o presentación tabular de la longitud de onda en función de la intensidad de absorción. Conocer el valor de banda prohibida de los materiales nos permitirá conocer su capacidad fotocatalítica para reaccionar más eficientemente bajo luz visible o luz UV.

La energía de banda prohibida se calculó empleando los espectros de absorción de UV-Vis con la ecuación de la energía:

$$\text{dónde: } E_g \text{ (eV)} = hc / \lambda = 1240 / \lambda$$

E_g es la energía de banda prohibida (eV), h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz (m/s) y λ es la longitud de onda expresada en nm.

2.6.4 Espectroscopía infrarroja, FTIR (Fourier Transform Infra-Red).

La espectroscopía infrarroja estudia la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. La radiación incidente sobre la materia es diferente a la saliente por efecto de la interacción. El resultado de la interacción proporciona información útil sobre la sustancia involucrada con relación a su estructura molecular. se fundamenta en la absorción de la radiación IR por las moléculas en vibración. Una molécula absorberá la energía de un haz de luz infrarroja cuando dicha energía incidente sea igual a la necesaria para que se de una transición vibracional de la molécula. Es decir, la molécula comienza a vibrar de una determinada manera gracias a la energía que se le suministra mediante luz infrarroja [37].

Las vibraciones en una molécula pueden hacerlo con ciertos valores de energía. La existencia de estos valores, para producir una vibración implica que sí se hace incidir fotones de energía adecuados (en el infrarrojo), éstos serán absorbidos solamente por aquellas uniones atómicas que posean un momento dipolar. Debido

a estos movimientos normales de vibración, cada molécula tiene una cierta energía de vibración, pero esta energía solamente puede variar absorbiéndose fotones de la región del infrarrojo. Cuando se absorbe energía la molécula se dice que pasa a un estado de vibración superior en el que los modos de vibración no varían, ni sus frecuencias, pero sí la amplitud de la vibración [38].

El espectro de infrarrojo es un dibujo compuesto por bandas o picos, en donde en el eje de las abscisas (o de las X) están representados todos los valores del intervalo de longitud de onda del infrarrojo medio, ya sea en número de onda (cm^{-1}) o de longitud de onda (nanómetros). Mientras que en el eje de las ordenadas (o de las Y) están representados los valores de la intensidad de absorción o transmisión.

En un espectro de infrarrojos se representa la frecuencia (en número de onda) frente al porcentaje de luz transmitida (transmitancia). El porcentaje de transmitancia se define como el cociente entre la intensidad de la luz transmitida a través de la muestra, IM, y la intensidad de la luz del haz de referencia IR multiplicado por 100 [37].

2.6.5 Área superficial (BET).

Para el análisis e interpretación de la porosidad y área superficial de los materiales, se tomaron en cuenta los resultados de las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno, gracias a esta técnica podemos obtener el valor del área superficial de nuestros materiales, expresado en la relación del área superficie total del catalizador y el peso de este (m^2/g). El área superficial se relaciona con la velocidad de disolución de un sólido y con otros fenómenos como la actividad de un catalizador, la dispersión de luz, la opacidad, las propiedades de sinterización, la cristalización, la retención de humedad, entre otras propiedades, que pueden influir en el comportamiento de polvos y sólidos porosos como lo son los materiales cerámicos [35]. Esta técnica usa el principio de la adsorción de un gas inerte (nitrógeno) para variar la relación entre la presión parcial de nitrógeno y presión de la temperatura del nitrógeno líquido.

El área superficial de las muestras preparadas fue determinada mediante la técnica BET (Brunauer Emmett Teller) en un equipo de fisisorción Bel JAPAN Modelo Belsorp Mini utilizando nitrógeno líquido como adsorbato. Las condiciones de análisis de las muestras fueron controladas por un software específico en el equipo.

2.6.6 Expansión térmica.

Básicamente, la expansión térmica es el incremento de volumen de un material a medida que aumenta la temperatura. Esta técnica nos permite medir los cambios dimensionales del material al ser sometido a calentamiento. Los materiales sólidos tienden a expandir al incrementarse la temperatura, incrementando su longitud o volumen, y a contraerse cuando es enfriado, siendo el coeficiente de expansión térmica (CET), el parámetro que representa la capacidad de expansión de un material al ser sometido a un proceso de calentamiento. La mayoría de los materiales al ser calentados presentan un CTE de expansión positiva y al enfriarse uno negativo. Es importante medir esta propiedad ya que, para algunas aplicaciones de los materiales cementantes, al estar expuestos a cambios de temperaturas puede afectar la estructura de estos [35].

Para poder realizar estas pruebas se cortaron piezas de 2.54 x 0.5 x 0.5 cm, de nuestros materiales cementantes fabricados. El equipo empleado para medir la expansión es un dilatómetro marca Orton 2010 C, y el intervalo de medición fue de 30 a 150°C, con una rampa de calentamiento de 5°C/min.

2.7 Pruebas fotocatalíticas para la conversión de NO_x.

La actividad fotocatalítica de los materiales cementantes preparados, se evaluó mediante la conversión de NO_x. En este caso, se utilizó un fotoreactor para la cuantificación de NO_x (Figura 5). El reactor está fabricado con acero inoxidable, un material que absorbe un gas de prueba mínimo y resiste la irradiación de la luz cercana a los rayos UV. Tiene un volumen de 4 L y cuenta con una ventana en la parte superior para permitir el paso de la radiación UV. Se utilizó la mezcla estándar de NO con aire sintético (20.5% en volumen de O₂ y 79.5% en volumen de N₂) y el flujo se ajustó a 1 L/min y una concentración de NO de 1000 ppb (1 ppm) [7]. La mezcla se hace pasar al analizador de NO_x, utilizando una llave de paso, hasta

estabilizar la concentración (1,000 ppb). Una vez estable se le da paso al reactor para establecer el equilibrio de adsorción del NO en el material fotocatalítico, hasta que se alcance y estabilice nuevamente la concentración de NO la cual, debido al proceso de adsorción de NO en el material puede estar en el intervalo de 900 a 1000 ppb, una vez estable la concentración se encendió la lámpara UV del reactor y a partir de ese momento, inicia la actividad fotocatalítica de la muestra. La pieza que se coloca en el reactor debe de medir 5 x 10 cm y debe de ser colocada a 5.0 mm de distancia del vidrio, la luz UV a emplear debe de tener una longitud de onda entre 300nm a 400 nm, en nuestro caso usamos una de 365 nm la prueba con luz se deja correr por media hora [39].



Figura 5. Sistema de cuantificación de NOx.

2.8 Pruebas fotocatalíticas para la degradación de colorante.

Las pruebas fotocatalíticas para evaluar la degradación de colorante fueron realizadas con una lámpara UV con una longitud de onda de 254 nm, se empleó el colorante índigo carmín a una concentración inicial de 15 ppm a temperatura ambiente. Para poder evaluar los materiales cementantes fabricados, se utilizaron las muestras de 2.5 x 0.5 x 0.5 cm, las cuales se introdujeron en un reactor de vidrio pyrex con 100 mL de nuestra solución con índigo carmín a 15 ppm (Figura 6). La reacción fue monitorizada una hora en oscuridad para poder medir la adsorción del material y posteriormente se tomaron muestras para determinar el grado de avance de la degradación mediante la técnica de espectroscopía UV-Vis, en probetas con

volumen de 1 mL, cada 30 minutos durante un lapso de 3 horas. Estas muestras se analizaron en un espectrómetro Ultravioleta-Visible Perkin Elmer Lambda 35.

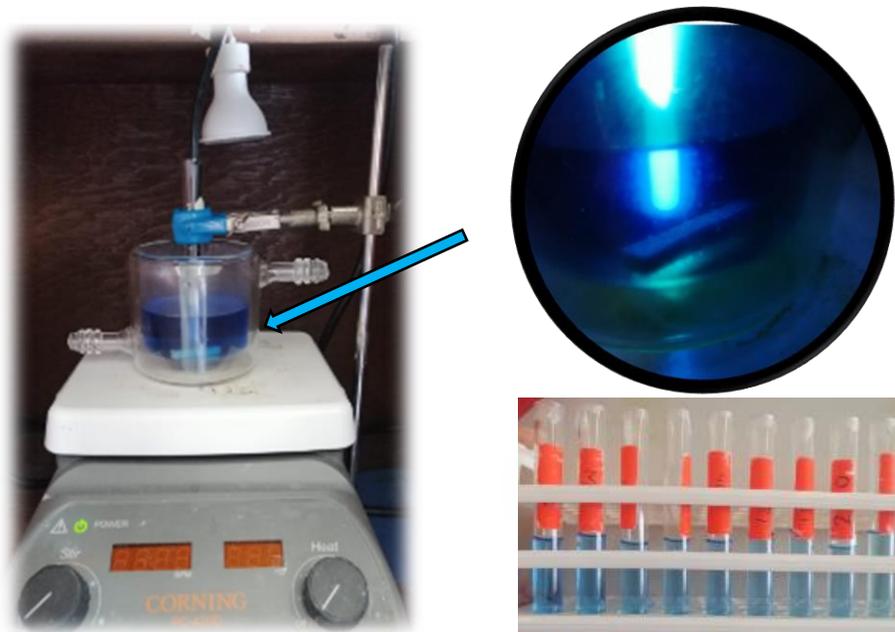


Figura 6. Degradación de colorante IC con pieza cementante.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos al evaluar nuestros especímenes elaborados con cementantes comerciales y alternativos funcionalizados por adición de SiC-TiO₂ y TiO₂, a los cuales se evaluó su actividad fotocatalítica para la degradación de contaminantes en medio acuoso y aire. Dichos especímenes fueron preparados conforme a la norma ASTM C-109, tuvieron un tiempo de curado de 28 días para posteriormente poder ser caracterizados mediante las técnicas de DRX, MEB, UV-Vis (E_g), análisis de expansión térmica, resistencia mecánica a la compresión. Por último, fueron evaluados en procesos fotocatalíticos de conversión de NO_x en aire y degradación del colorante índigo carmín en medio acuoso.

3.1 Resistencia en cementantes alternativos.

Los resultados de la prueba de resistencia mecánica a la compresión muestran que los cementantes comerciales preparados presentan valores de alrededor de 515 kg/cm² para las muestras con cemento blanco, en el caso del cemento gris fue 310 kg/cm², muy parecido al cementante Crest, 288 kg/cm² y Bexel, 270 kg/cm² (figura 8), estos últimos empleados como boquilla en juntas de piso azulejo. El concreto (mezcla de cemento + agua + arena + grava) es uno de los materiales utilizados para elaborar el sistema de carga estructural de ingeniería por sus buenas propiedades mecánicas (producto de su transformación en conglomerante hidráulico después de haber sido hidratado) [40].

La resistencia a compresión que logra el concreto está en función de la relación agua-cemento (o relación agua-materiales cementantes), del progreso de hidratación, del curado, de las condiciones ambientales y de la edad del concreto. En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos en un intervalo de resistencias de los cementantes convencionales en función de la relación agua/cemento (a/c). A medida que disminuye la relación a/c la resistencia aumenta, al tener una relación a/c de 0.5 [41], la resistencia alcanzada, según la figura 8, es de 310 kg/cm².

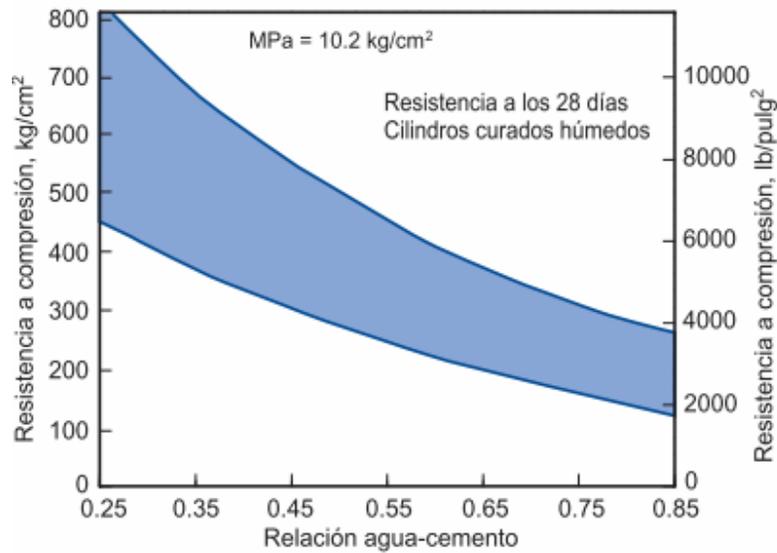


Figura 7. Resistencia de cementantes comerciales, a diferente relación agua-cemento.

En general, los cementantes comerciales que preparamos y el cemento blanco, nos arrojan resistencias que son comunes para este tipo de materiales y que quedan dentro del intervalo de la figura mostrada (Figura 8). En el caso del cemento Blanco se observa que tiene mayor resistencia, de 515 kg/cm^2 , esta es 40% mayor que la mostrada en el cemento gris (310 kg/cm^2). Generalmente el cemento blanco, tiene mayor resistencia los cementos grises, por ello puede tener los mismos usos estructurales [42]. La hidratación, el endurecimiento y la resistencia, en los cementantes blanco y gris, dependen del contenido de silicatos cálcicos, que aproximadamente es en ambos de un 75%. La diferencia entre los dos cementos es que el cemento gris contiene aproximadamente un 3% de óxido férrico, mientras que en el cemento blanco este contenido no excede un 0.5% [43].

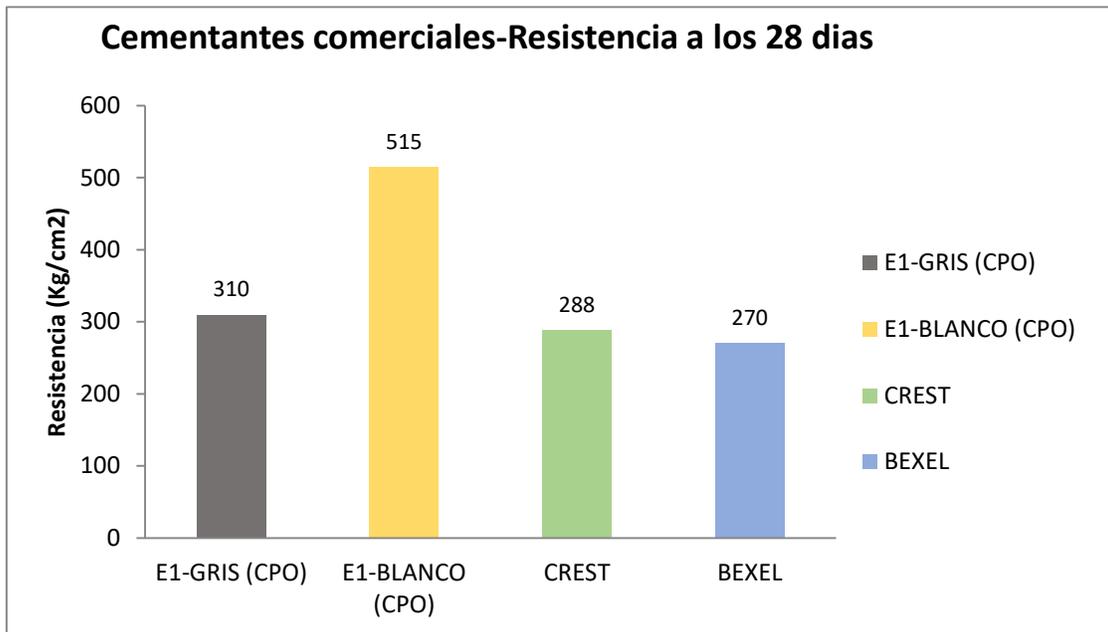


Figura 8. Resistencias obtenidas en cementantes comerciales

En el caso de los cementantes alternativos, se elaboraron los proporcionamientos mostrados en la tabla 3, variando la cantidad de ceniza volante, cemento, y fijamos 10% de vidrio. Yahya Jani, reportó algunos resultados obtenidos al agregar entre el 10 y 20% de vidrio borosilicato en sustitución del cemento, siendo el 10% de sustitución el porcentaje más recomendado [20]. Las principales propiedades de los cementantes alternativos son: desarrollo rápido de la resistencia a la compresión, baja permeabilidad, resistencia al ataque ácido, buena resistencia a ciclos de congelación-descongelación, y tendencia a disminuir drásticamente la movilidad de la mayoría de los iones de metales pesados contenidos en el cementante [44]. Tales propiedades los vuelven una opción para productos estructurales, como reemplazos de concreto comercial usado en diferentes elementos [42].

Los resultados de la resistencia a la compresión obtenidos se muestran en la tabla 3 y 4.

Tabla 3. Proporcionamiento y resistencia de cementante alternativo gris.

CP	Proporcionamiento para elaboración (%)			Resistencia a los 28 días (kg/cm ²)
	Cemento	Vidrio	C.V	CP-Gris
E1	100	0	0	310
E2	20	10	70	53
E3	30	10	60	79
E4	40	10	50	98
E5	50	10	40	99

Tabla 4. Proporcionamiento y resistencia de cementante alternativo blanco.

CP	Proporcionamiento para elaboración (%)			Resistencia a los 28 días (kg/cm ²)
	Cemento	Vidrio	C.V	CP-Blanco
E1	100	0	0	515
E2	20	10	70	104
E3	30	10	60	100
E4	40	10	50	101
E5	50	10	40	108

La resistencia del cementante alternativo disminuyó a casi un tercio en diferencia al cementante comercial. En nuestro caso el mejor resultado se obtuvo en el espécimen “E5” sustituyendo el 50% de cementante comercial, por la mezcla de ceniza volante (40%) y vidrio (10%).

El concreto fabricado con estos materiales puede alcanzar valores de resistencia a la compresión superiores a 40 MPA bajo condiciones de curado térmico [46], que este no fue el caso de estos cementantes elaborados.

Otra diferencia de los cementos elaborados con cenizas volantes es que presentan menos contracciones y una unión más fuerte entre la matriz y el acero de refuerzo [47]. Además, las cenizas volantes activadas son particularmente duraderas y altamente resistentes a los ácidos agresivos, la reacción álcali-agregado y el fuego, esta familia de materiales fija sustancias tóxicas y peligrosas de manera muy

efectiva [48]. La resistencia más alta alcanzada para el cementante gris fue de 99 kg/cm² mientras que usando el cementante blanco fue 108 kg/cm² (E-5), Véase la Figura 9. Estas resistencias alcanzadas pueden ser empleadas en elementos en donde no se requieran resistencias altas, como por ejemplo en banquetas, para la elaboración de blocks, morteros para recubrimiento, entre otras.

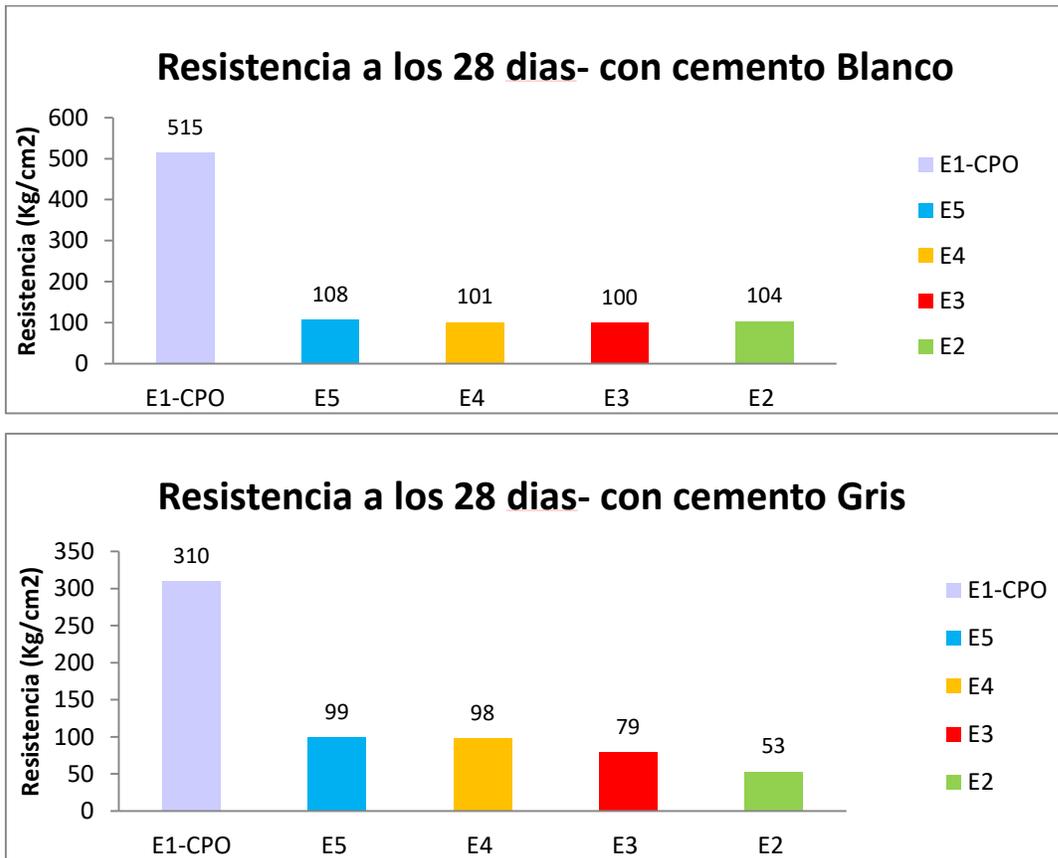


Figura 9, Resistencia de cementantes alternativos.

Los cementantes alternativos fabricados con cemento, ceniza volante y polvo de vidrio ya han sido muy estudiados. Sin embargo, nosotros buscamos conferirles propiedades fotocatalíticas por adición de los fotocatalizadores SiC-TiO₂ y TiO₂, este último ha sido el fotocatalizador más empleado en cementantes convencionales solos. Ria Julyana Manullang y colaboradores, elaboraron un cementante a base de 80% cemento, 15% polvo de vidrio y 5% yeso, obteniendo resistencias de hasta 229 kg/cm² a los 28 días [49]. Estas resistencias son muy

altas, pero hay que considerar que sustituyeron el 20% del cementante mientras que en nuestro caso sustituimos el 50% con ceniza volante y un 10% de vidrio, ya que se recomienda que se utilice menos del 20% de vidrio en el cementante [20].

Los resultados a compresión de los cementantes comerciales si quedan dentro del rango esperado reportado en bibliografía, mientras que la resistencia de los cementantes alternativos se ve disminuida drásticamente, esto debido a que en bibliografía la mayoría de los autores recomiendan un curado térmico para ayudar a la activación de la matriz cementante y estas condiciones no fueron seguidas en los especímenes aquí elaborados.

3.2 Difracción de rayos-X de cementantes comerciales (DRX).

Al analizar los materiales por difracción de rayos-X, se detectó la presencia de las fases que comúnmente se encuentran presentes en el cemento convencional al ser hidratadas sus fases iniciales (alita, belita, ferrita y Aluminato tricálcico), véase la Figura 10.

La hidratación de los componentes del cemento se da de la siguiente forma:

- Silicato tricálcico o Alita (C₃S): es de los componentes mas inestables, al reaccionar con agua se convierte en silicato de calcio hidratado (tobermorita) y en hidróxido de calcio (portlandita), según la reacción siguiente [50]:



- Silicato dicálcico o Belita (C₂S): esta fase al hidratarse también se convierte en tobermolita y en hidróxido de calcio, pero en menor medida se produce el hidróxido de calcio, este reacciona más lentamente según la siguiente reacción [50].



- Aluminato tricálcico o Celita (C₃A): esta se combina con yeso y forma ettringita. La reacción con el agua es muy rápida, tiene un gran poder para disolverse y da lugar a un endurecimiento rápido en la pasta, la reacción es la siguiente [50]:



Las fases características del cemento hidratado son las siguientes:

- Tobermorita gel (silicatos de calcio hidratados o CSH): esta fase es responsable de la unión interna de la pasta del cemento, la adherencia y la resistencia mecánica del conglomerado [51].
- Portlandita (hidróxido de calcio): Mantiene el pH de la pasta, protege al concreto de la corrosión electroquímica. Una desventaja es que es altamente lixiviable, reacciona con los sulfatos y cristaliza para formar la ettringita, sin

embargo, esto se puede controlar adicionando puzolanas (como la Ceniza volante) [51].

- Etringita (trisulfoaluminato de calcio): Sus cristales son de forma alargada que da al cemento mayor cohesión [51].

En este caso, se puede apreciar como el pico de la alita (C_3S) tiene mayor intensidad en el cementante comercial Cemex, Crest y Bexel a diferencia de nuestros cementantes alternativos, elaborados con ceniza volante y vidrio, los cuales tuvieron una menor resistencia.

La variación de intensidades en las fases de los distintos cementos son las que dan sus propiedades de resistencia a la compresión, ataque a los sulfuros y desarrollo del gel CASH durante el fraguado [52].

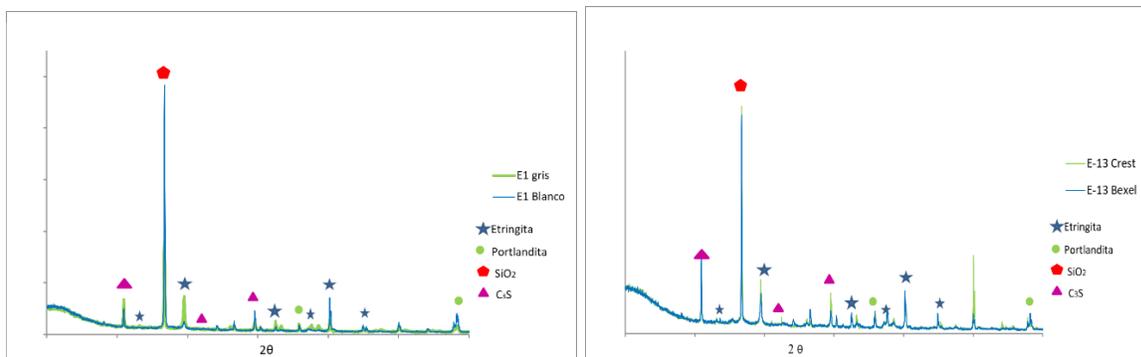


Figura 10. (a) DRX Cemex gris y blanco. (b) DRX Crest y Bexel

En la Figura 10(a) se puede observar cómo sobresale la intensidad de la fase C_3S del cemento Blanco, el cual tuvo una mayor resistencia a la compresión, en la figura 10(b) el cementante Crest fue el que muestra mayor intensidad en esta fase. En el caso del SiO_3 todos los materiales mostraron un pico con mayor intensidad en esta fase, debido a que este es uno de los compuestos principales de los cementantes.

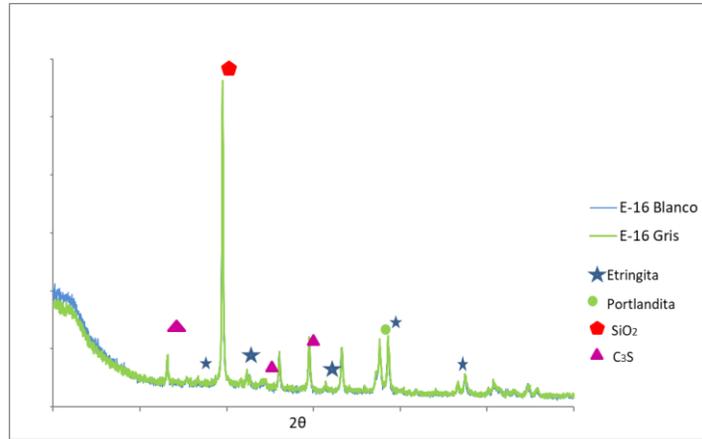


Figura 11. DRX Cementante alternativo

Mientras que en la Figura 11 en el difractograma de nuestros cementantes alternativos podemos observar cómo hay una disminución en la intensidad de los picos, respecto a los cementantes comerciales. Se aprecia que en el caso de la fase C₃S y etringita, el cementante alternativo blanco sobre sale un poco más que el gris. Y es que sus resistencias no variaron de manera considerable. Sin embargo, la intensidad de los picos en los cementantes comerciales es mayor a la de los alternativos.

3.3 Espectroscopía de Energía Dispersada (EDS)

El cemento Portland proviene de una mezcla inicial de caliza (CaCO_3) y arcilla (silicato de aluminio hidratado). Al reducir los granos a 150 micras de diámetro y llevándolos a una temperatura de 1400°C a 1650°C se obtiene una mezcla de silicato de calcio del 70-80% y aluminato de calcio del 20-30 %. A esta mezcla se le conoce como clinker [53].

Los resultados de EDS nos muestran la composición química de los materiales empleados, tabla 5, estos materiales están formados principalmente de Aluminio, Silice y Calcio, también se detectó que existe la presencia de Titanio, que en forma de óxidos se consideran como fotocatalíticos. En los cementantes comerciales (tabla 4), en el caso del cemento Cemex y del Bexel el porcentaje es muy bajo, mientras que en el cementante Crest se pudo detectar el 1.39% un porcentaje parecido al que se encontró en nuestros cementantes alternativos que contienen este fotocatalizador, sin embargo, no conocemos la fase del TiO_2 que se agregó a este cementante (Crest) y esto es un factor importante para la actividad fotocatalítica. Además, debido a el proceso de elaboración y la manera en que forman parte de la composición química, es probable que no presenten actividad catalítica. Pues los materiales tradicionales no presentan actividad catalítica por si solos [7].

Tabla 5. EDS cementantes.

Composición química elemental			
Compuesto	CEMEX CPO	CREST	BEXEL
	Peso %	Peso %	Peso %
O	48.98	51.05	54.06
Na	0.19	0.04	0.57
Mg	1.03	1.16	0.9
Al	2.47	1.71	0.86
Si	6.58	6.58	6.12
S	2.28	2.1	2.86
K	0.09	0.25	0.78
Ca	37.77	34.66	32.4
Ti	0.12	1.39	0.29
Mn	0.12	0	0
Fe	0.37	1.07	1.15

De igual manera, se analizó la composición química elemental de los cementantes alternativos a los que se les agregó SiC-TiO₂ y TiO₂, tabla 6. En los cementantes alternativos los resultados nos muestran que la presencia de Titanio se incrementó en todos los casos. En el caso de los cementantes E-35 gris y blanco la cantidad de Titanio es menor debido a que el fotocatalizador empleado es el SiC-TiO₂ en proporción 20:80.

Tabla 6. EDS cementantes alternativos con fotocatalizador.

Composición química elemental						
Elemento	E-12 GRIS (5% TiO ₂)	E-12 Blanco (5% TiO ₂)	E-32 Gris (5% TiO ₂)	E-32 Blanco (5% TiO ₂)	E-35 Gris (5% SiC-TiO ₂)	E-35 Blanco (5% SiC-TiO ₂)
	%	%	%	%	%	%
C	12.94	12.94	8.32	9.68	6.24	17.85
O	49.44	49.44	46.779	47.2	53.67	45.3
Na	0.56	0.56	-	-	-	-
Al	0.56	0.56	1.32	0.88	2.86	1.1
Si	2.35	2.35	4.11	10.41	4.83	6
Ca	32.6	32.6	34.46	30.64	31.27	36.14
Ti	1.01	1.01	1.75	1.2	0.32	0.65
Fe	0.54	0.54	1.1	-	1.8	-

Para la clasificación de la ceniza volante empleada en los cementantes alternativos nos basamos en la Norma ASTM C 618(AASHTO M 295) la cual define 3 tipos de cenizas volantes N, F y C. Las cenizas de clase C y F se emplean comúnmente como aditivos puzolánicos en el concreto [54]. La clase F son Cenizas con bajo contenido de calcio (menos del 10% de CaO). Las Cenizas de la Clase C normalmente presentan alto contenido de calcio (del 10% al 30% de CaO). La ceniza volante Clase F se usa normalmente como sustituto parcial en el cemento en una dosis del 15 al 25% de la masa del material cementante y la ceniza volante Clase C con una dosis del 15 al 40% de la masa del material cementante [41], además de eso la norma ASTM C 618 nos dice que la sumatoria de porcentajes de SiO₂+Al₂O₃+FeO₃ debe de ser mínimo 70% para clasificación F y 50% para clasificación C [54]. La ceniza empleada fue obtenida de la mina de Nava, Coahuila

(México) y su composición química se muestra en la Tabla 7. En donde según el criterio anterior la ceniza empleada puede clasificarse como clase F.

Tabla 7. Composición química Ceniza Nava.

Composición Química	
	%
SiO ₂	60.47
Al ₂ O ₃	25.52
CaO	1.86
Fe ₂ O ₃	5.08
K ₂ O	1.58
Na ₂ O	0.78
MgO	0.88
SO ₃	0.40
TiO ₂	1.1
BaO	0.15

3.4 Microscopía electrónica de barrido (MEB) en nuestros cementantes.

Los materiales fueron analizados por microscopía electrónica de barrido, donde se pudo apreciar la morfología que presenta cada muestra. En las primeras imágenes (figura 12) se muestra cómo se incorporó el TiO_2 con el SiC mediante la molienda mecánica, logrando una mezcla homogénea de aglomerados.

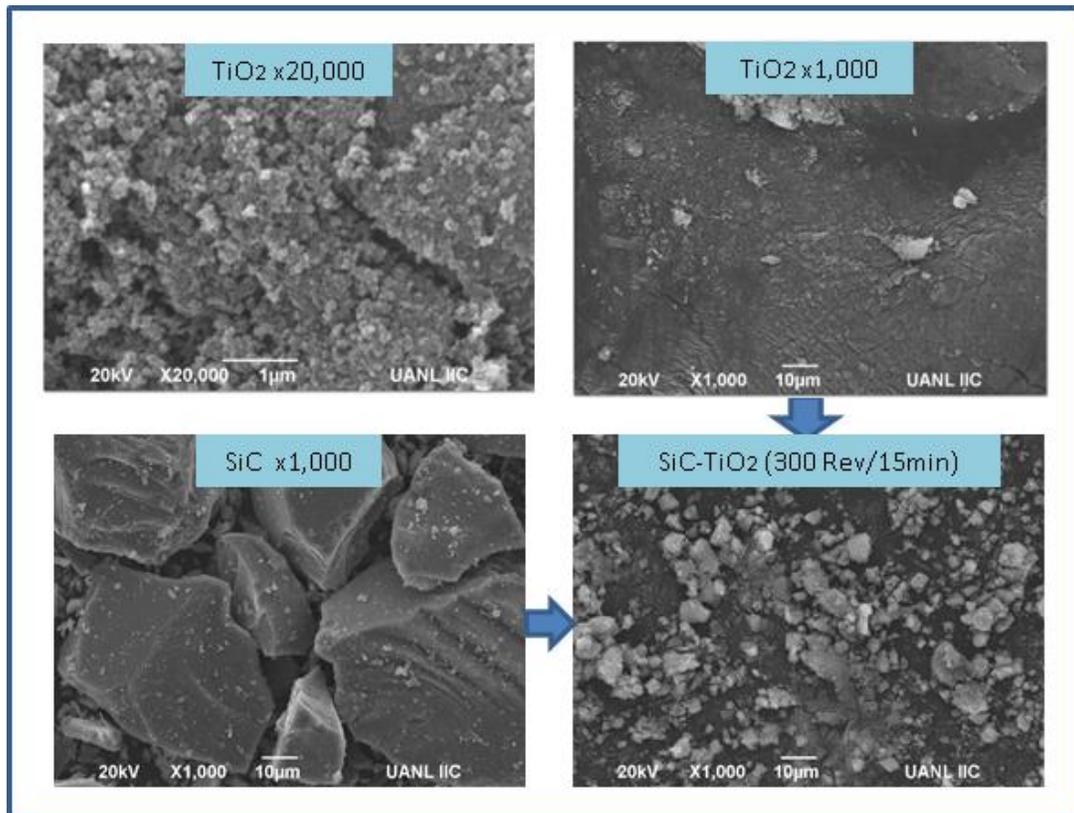


Figura 12. MEB de fotocatalizadores en polvo.

Los cementantes empleados por separado presentan distintos tamaños de partícula, en el caso del cemento Cemex de la figura 13 podemos apreciar contiene partículas más pequeñas que el cementante Crest y Bexel, lo que lo vuelve más reactivo. En el caso del vidrio podemos ver como son partículas muy angulares y de diversos tamaños, el tamaño recomendado para el uso de vidrio en cementantes es menor a 100 micras, debido a que mientras menores son las partículas facilitan la reacción álcali y a tamaños mayores de 100 micras es más fácil que se produzcan

las microgrietas [9], en la figura 14 se puede apreciar la distribución de tamaños de partículas de vidrio usadas para el cementante alternativo.

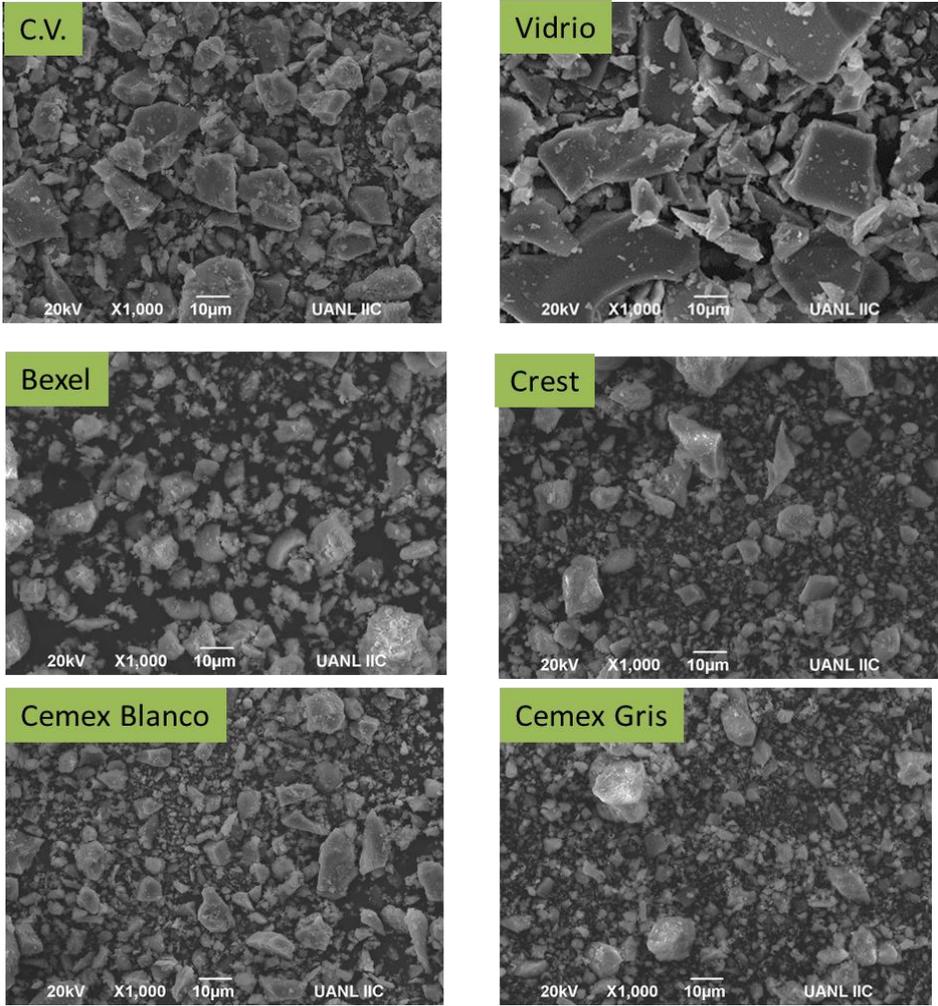


Figura 13. Materiales empleados como cementantes

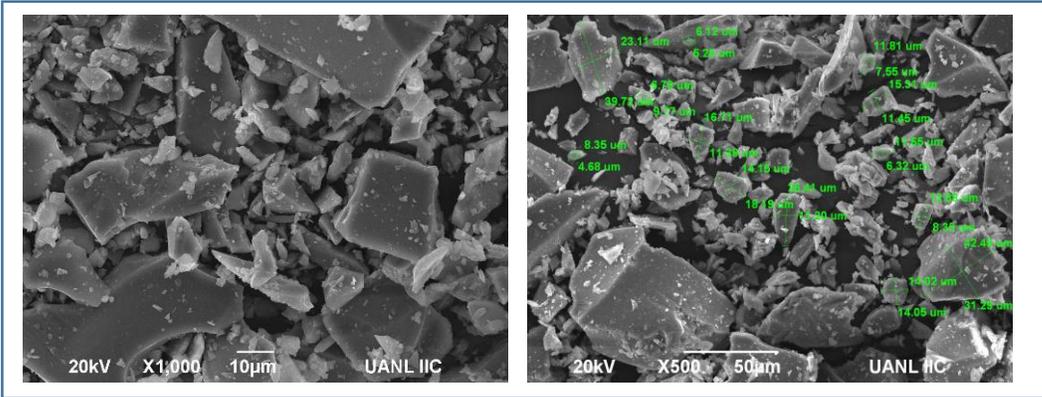


Figura 14. Morfología de vidrio triturado empleado

En la figura 15, la morfología de nuestro cementante alternativo (E-12) cambia al agregarle el fotocatalizador, las partículas más finas de este fotocatalizador se aglomeran en la superficie del cementante y las partículas se ven menos angulares, más redondas y definidas, sin embargo, no se aprecia lo mismo al agregarle el fotocatalizador al cemento comercial (E-30), pues no se aprecia ninguna morfología definida. Probablemente, las partículas de ceniza volante y vidrio emerjan a la superficie y debido a la presencia de estas la morfología cambia.

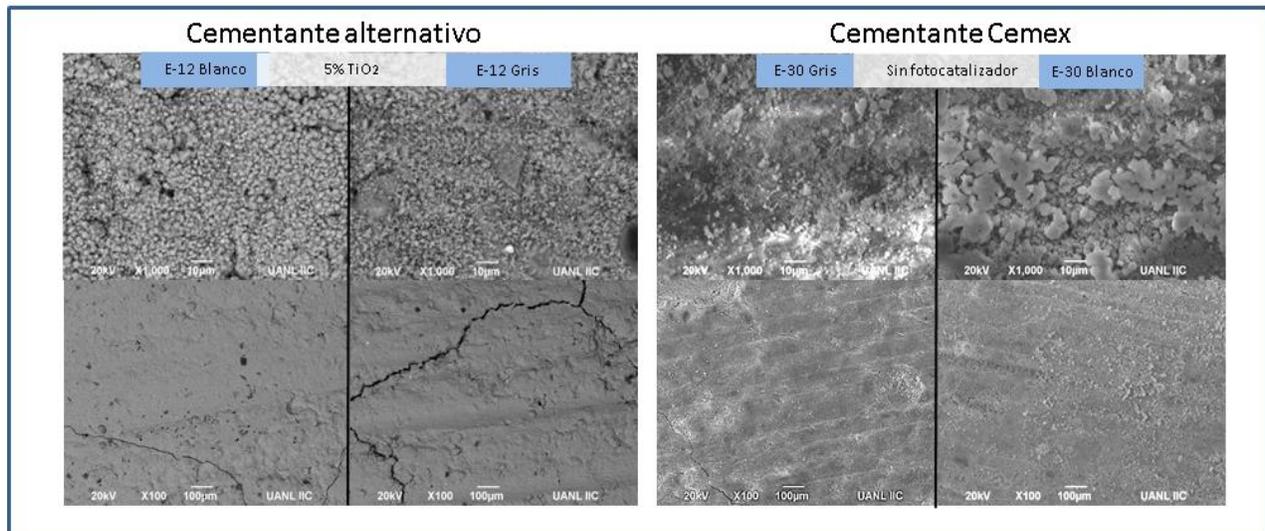


Figura 15. Cementante alternativo con fotocatalizador vs comercial sin fotocatalizador

En la figura 16 podemos observar que existe un cambio de morfología en el cementante Cemex al usar diferente fotocatalizador, en el caso del TiO_2 (lado izquierdo de la imagen) se aprecian grumos más pequeños en la superficie, como pequeñas partículas conglomeradas en la superficie, mientras que al emplear SiC-TiO_2 aparenta una morfología más rocosa en donde se ve más rugosidad pero adherida a la superficie ya que hay mucha variación en la intensidad de sombras de la imagen del polímero E-35 gris y blanco a escala x 1,000. Además de esto podemos apreciar la formación de grietas en la superficie de los cementantes elaborados con TiO_2 , a diferencia de los elaborados con SiC-TiO_2 , estos no presentaron estos agrietamientos.

Cementante Cemex con fotocatalizador

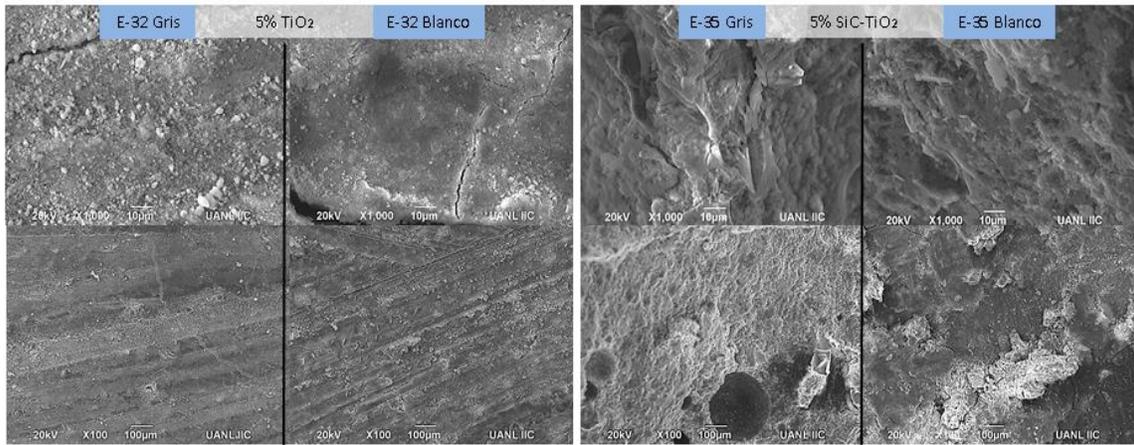


Figura 16. Cementante comercial con fotocatalizador

3.5 Pruebas de medición de Eg.

En la figura 17 se muestra el espectro de absorción obtenido en reflectancia difusa del TiO₂, SiC y la mezcla 20:80 SiC-TiO₂, el cual fue utilizado para determinar su ancho de banda eV. Podemos apreciar según esta figura que el SiC se encuentra en un valor aproximado de 2.5 eV, mientras el TiO₂ un valor aproximado de 3.2 eV. En el caso del SiC este valor nos permite una absorción aproximada a los 490 nm, dentro de la región del espectro visible a diferencia del TiO₂ que su ancho de banda nos permite una absorción aproximada de 380 nm, comprendida dentro del rango de la luz UV. Según lo reportado por Yang Li, los intervalos de banda del TiO₂ se estiman en 3.2 eV para la fase anatasa y 3.0 eV para la fase rutilo, mientras que para el SiC se estima en 2.47 eV [27,55], nuestros valores quedan dentro de este rango. Al momento de combinar el SiC con TiO₂ el ancho de banda obtenido es aproximado a los 2.9 eV. quedando entre los valores obtenidos de cada elemento por separado, este valor nos permite una absorción de luz aproximada a los 430 nm dentro de la región de la luz visible, de este modo el SiC-TiO₂ requerirá menor energía para activarse.

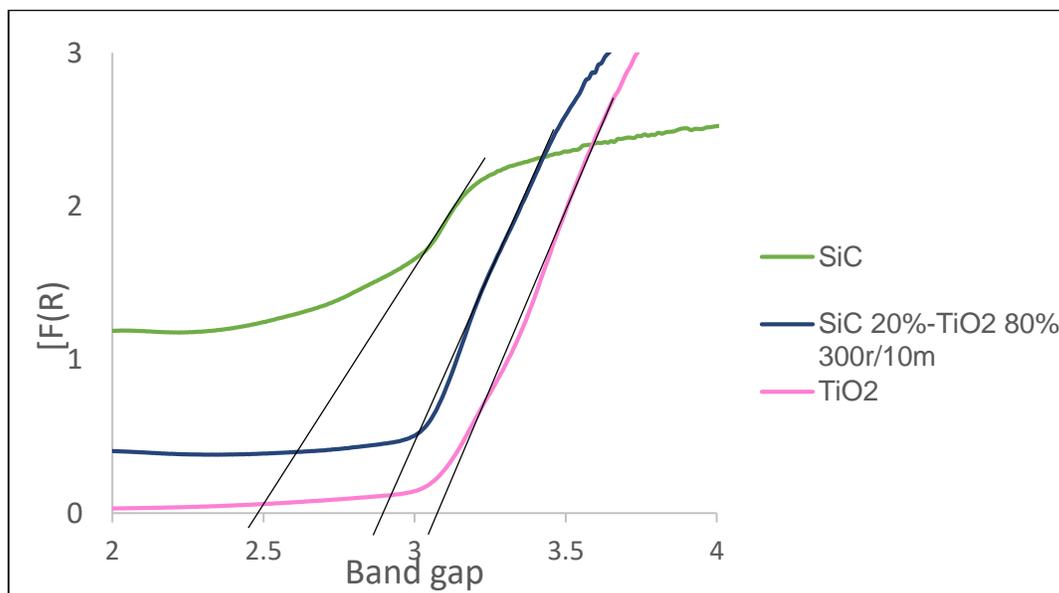


Figura 17. Espectros de reflectancia de SiC-TiO₂ transformados con la función de Kubelka-Munk en función de la energía del fotón.

Debido a los resultados obtenidos, al final de las pruebas se realizó una optimización del fotocatalizador para poder determinar la molienda mecánica, así como el porcentaje de SiC que permitiera ampliar el espectro de absorción a la luz visible. Se probó la mezcla SiC-TiO₂ en relaciones 5:95, 10:90 y 20:80, con moliendas mecánicas de 300 rpm por 10 minutos y 600 rpm por 50 minutos. En la figura 18 se puede observar cómo no hubo gran variación en los resultados de banda de energía, ya que de la mezcla original 20:80 300 rpm por 10 minutos obtuvimos un valor de 2.9 eV, mientras que las mezclas sometidas a 600 rpm por 50 minutos nos dieron 2.85 eV, este valor nos permite una absorción de 435 nm. Esta diferencia no es significativa con el valor del fotocatalizador SiC-TiO₂ 20:80 agregado a los cementantes.

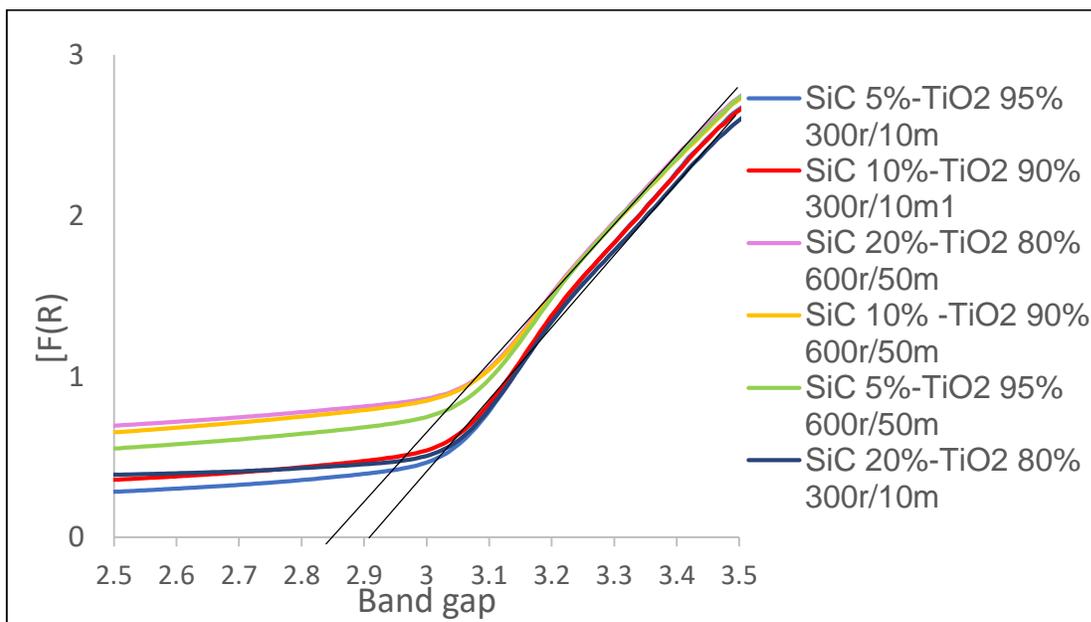


Figura 18. Espectros de reflectancia de SiC-TiO₂ optimizado, transformados con la función de Kubelka-Munk en función de la energía del fotón.

2.6 Espectroscopía infrarroja

Los cementantes alternativos se encuentran dentro de los cementos ecoeficientes, son cementos alcalinos (materiales activados alcalinamente), resultan de la interacción química de disoluciones alcalinas y aluminosilicatos en distintos porcentajes de composición, pero con alto contenido de Al-Si y presencia de CaO. Los cementantes activados alcalinamente son más estables en medios ácidos que el cemento Portland convencional [56]. Dentro de los cementantes alternativos elaborados con ceniza volante, el producto principal obtenido es el gel N-A-S-H. El gel N-A-S-H presenta dos bandas características en IR, una que aparece ente 1000 y 1100 cm^{-1} , asignada a la tensión asimétrica de los enlaces T-O (T = Si, Al) y otra banda que aparece cercana a 460 cm^{-1} , correspondiente a las vibraciones de deformación de los enlaces T-O-T [57].

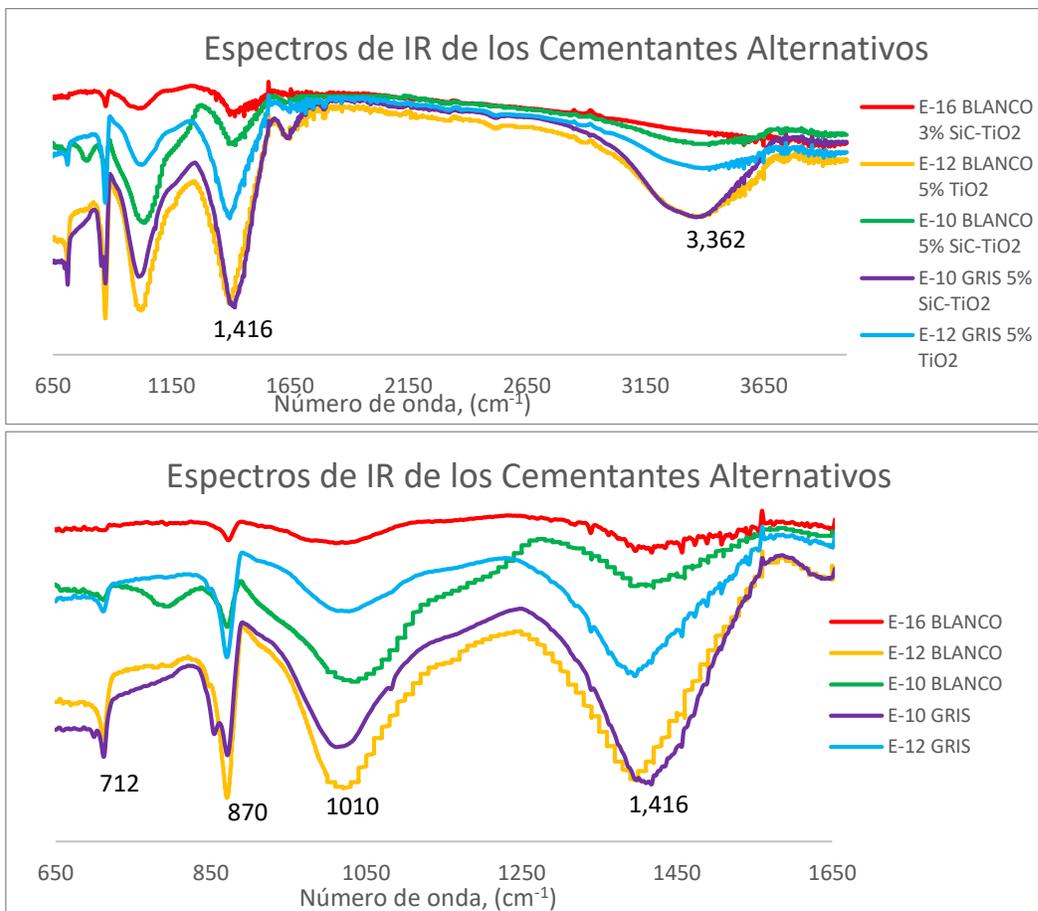


Figura 19. Espectros de IR de los cementantes alternativos formados, graficas de 650-3650 cm^{-1} y 650-1650 cm^{-1}

En el caso de nuestros Cementantes alternativos pudimos localizar esta banda cercana a la longitud de onda 1010 (figura 19) mientras que en el cementante comercial se encuentra cercana a 1026 (figura 20).

En los intervalos de 3900 a 3200 cm^{-1} se localizan las bandas de vibración del agua y de los grupos hidroxilo producto de la activación alcalina.

Dentro de los intervalos comprendidos entre 1600 a 600 cm^{-1} , se localizan las bandas de vibración correspondientes a los grupos que forman los cementantes alternativos. En el caso de los cementantes comerciales la banda de absorción cercana a 1420 , corresponde a la banda relacionada con el gel C-S-H [58].

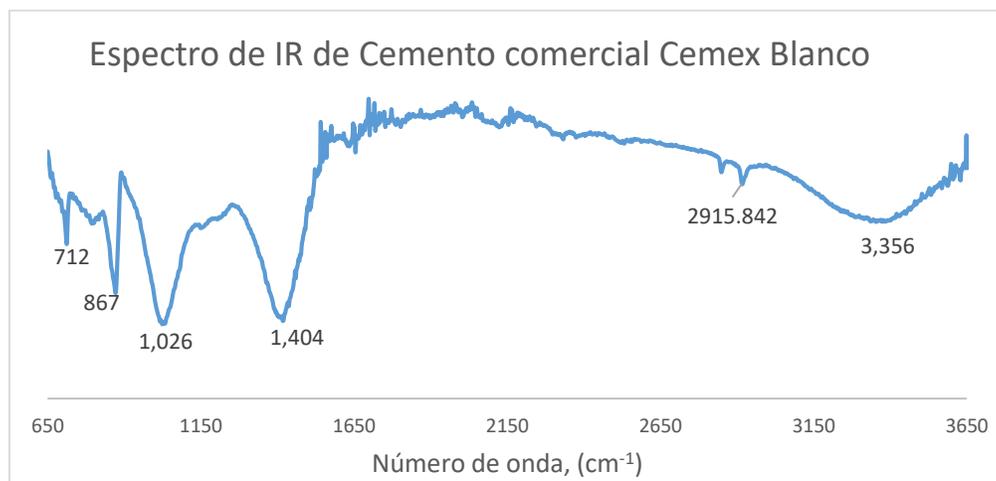


Figura 20. Espectro de IR de cementante comercia, Cemex Blanco.

Al analizarse los espectros pudimos localizar los picos característicos de los componentes principales de un cementante alternativo y comercial, se puede observar cómo coinciden en longitudes muy cercanas. Se presenta en la tabla 8 los valores de absorción más característicos de este tipo de cementantes. En donde pudimos localizar las siguientes bandas de la tabla 8 [57]:

- Banda 8 (Tensión asimétrica de los enlaces Si-O (Q)),
- Banda 7 y 4 (C-O),
- Banda 5 (Tensión asimétrica de los enlaces T-O (T=Si,Al))
- Banda 1 (Tensión asimétrica H_2O).

Tabla 8. Bandas de absorción correspondiente a los espectros de infrarrojo de los cementantes.

Número de banda	Número de Onda (cm-1)	Asignación
1	3400-3500	Tensión asimétrica H ₂ O
2	3000-2850	Deformación H ₂ O
3	1600-1650	Deformación H ₂ O
4	1410-1450	C-O
5	1000-1050	Tensión asimétrica de los enlaces T-O (T=Si,Al)
6	945-955	Tensión asimétrica Si-O ⁻
7	870-900	C-O
8	780-800	Tensión asimétrica de los enlaces Si-O (Q)
9	700	Tensión asimétrica de los enlaces Si-O (Q)
10	680-690	Deformación de los enlaces Si-O
11	460	Deformación de los enlaces -O-Si-O-

3.7 Medición de porosidad y área superficial (BET)

Por los resultados obtenidos en la conversión de NO_x con nuestro cementante alternativo, se realizó una comparativa (tabla 9) entre el cementante alternativo y el comercial con el mismo fotocatalizador, para conocer si había grandes diferencias entre su área superficial y el diámetro de poro, con los resultados apreciamos que la diferencia es muy poca por lo que no se le puede atribuir a ninguno de estos parámetros la diferencia de actividad fotocatalítica presentada.

Tabla 9. BET Comparativa cementante alternativo vs comercial alternativos con fotocatalizador.

Nom.	Cemento	Fotocatalizador (%)	Adsorción (%)	Conversión de NO_x en 30 min.	diámetro de poro (nm)	Área superficial (m^2/g)
E-12	A. Blanco	5 - TiO_2	8	2	17	8
	A. Gris	5 - TiO_2	8	1	20	10
E-32	C. Blanco	5 - TiO_2	12	8	21	11
	C. Gris	5 - TiO_2	11	11	29	13
E-35	C. Blanco	5 - SiC-TiO_2	10	17	19	13
	C. Gris	5 - SiC-TiO_2	11	4	12	10

3.8 Pruebas de Expansión Térmica.

Los materiales cementantes tienden a expandirse ligeramente a medida que aumenta la temperatura y se contraen a medida que disminuye. Los cambios de temperatura se pueden causar por condiciones ambientales o por la hidratación del cemento. El valor promedio de coeficiente de expansión térmica del concreto es cerca de 10 millonésimos por grado Celsius, estas expansiones y dilataciones del concreto pueden provocar fisuras en elementos que están restringidos por otros elementos estructurales o por fricción [41] por lo tanto es importante conocer cuál será el comportamiento al agregarle un fotocatalizador ya que estamos variando la composición química del cementante (véase Anexo 1 para más información sobre la expansión térmica).

En la Figura 21 se puede observar que el cemento gris comercial convencional tuvo una menor expansión al ser sometido a temperatura ($10.4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) a diferencia del cemento blanco comercial ($10.9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), además de esto, los cementantes alternativos (E-5) presentaron una contracción al llegar entre 100 y 150 $^\circ\text{C}$.

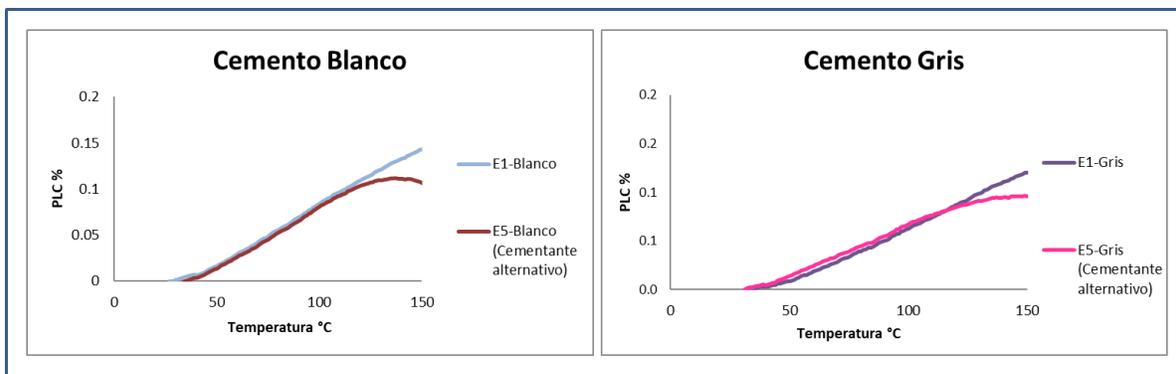


Figura 21. Expansión térmica de cementantes sin fotocatalizador.

Los resultados de expansión térmica de los cementantes alternativo al agregarle fotocatalizador variaron en comparación del cementante convencional, pues estos presentaron un comportamiento no lineal como el del cementante convencional, en especial el que tiene TiO_2 como fotocatalizador presenta expansión y contracción al aumentar la temperatura (figura 22), lo cual nos indica que el agregarle el TiO_2 se vuelve más inestable con este fotocatalizador por si solo, sin embargo los probados con SiC-TiO_2 es menos notoria esta inestabilidad.

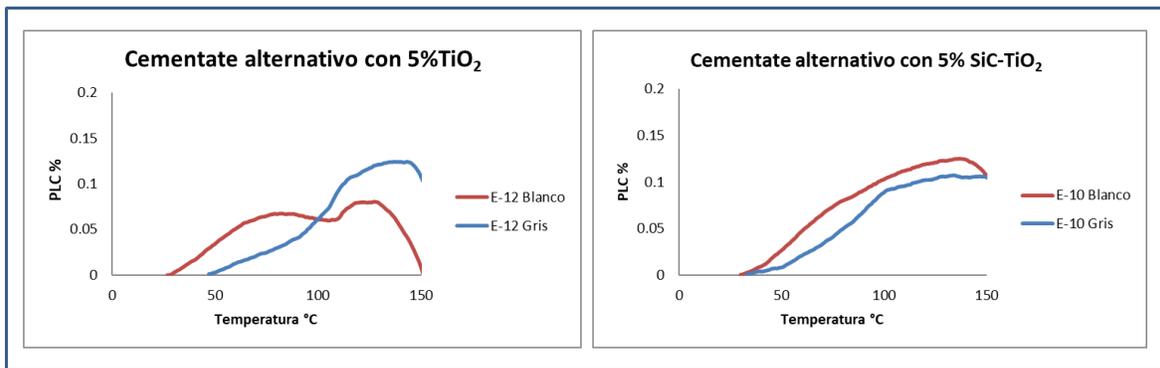


Figura 22. Comportamiento de la expansión térmica en cementantes con fotocatalizador.

En la figura 23 se observan los resultados de coeficiente de expansión térmica de los cementantes alternativos con y sin fotocatalizador así como la referencia de cementante comercial Cemex gris y blanco sin fotocatalizador, el cual tuvo un coeficiente de expansión de $10.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $10.9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, respectivamente, esto debido a que la composición química del cementante gris difiere un poco a la del cementante blanco, ya que los cementantes blancos se caracterizan por contener menos de 1% de Fe_2O_3 a diferencia del cementante gris que esta cantidad puede variar, lo cual hace que exista una pequeña variación en su expansión [52]. Los cementantes alternativos sin fotocatalizador presentan un coeficiente de expansión entre $7.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, sin embargo sigue comportándose de manera lineal hasta los 150°C (figura 19), este comportamiento lineal es parecido al del cementante convencional debido a que estos cementantes también contienen en su mayoría aluminio, sílice y calcio formando una red polimérica [18]. También podemos observar que el coeficiente de expansión del Crest y Bexel baja al agregarle el fotocatalizador, lo cual nos puede indicar que este puede estar reaccionando con algún compuesto de estos cementantes.

CTE EXP. TÉRMICA A 150°C

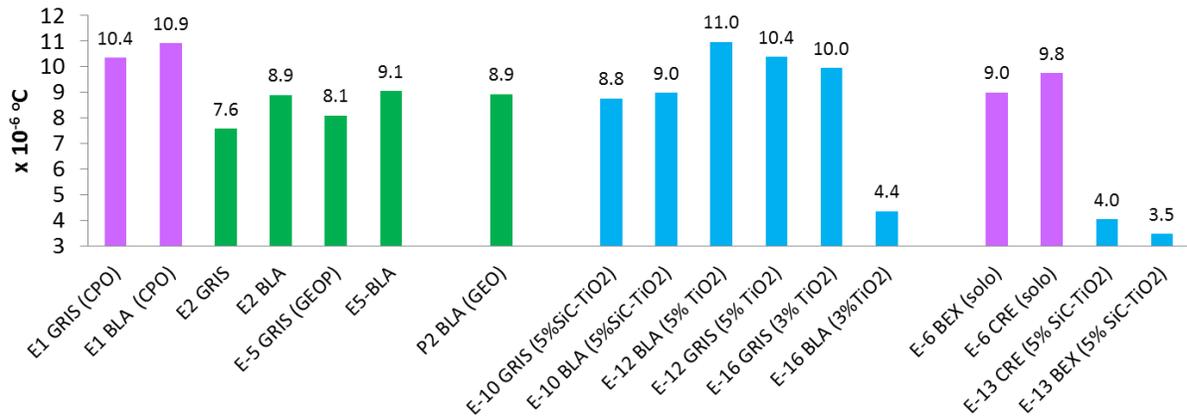


Figura 23. Coeficiente de expansión térmica en cementantes

Una vez agregado el fotocatalizador a los cementantes alternativos la expansión térmica deja de comportarse de manera lineal, en el caso del cementante blanco que contienen 5% de TiO₂ la pieza se dilata al llegar a los 90°C, lo cual hace al cementante menos estable al cambio de temperaturas.

Hay que considerar que, al agregarle otro elemento a nuestra mezcla, este presentará una conductividad distinta, así como una estructura distinta, mismas que puede influir en la transferencia de electrones.

En la Figura 24 se puede observar como la expansión térmica en los cementantes blancos no se ve tan afectada con la adición del fotocatalizador ya que su curva de comportamiento sigue siendo muy parecida sin embargo en el caso del cemento gris (figura 25) el comportamiento si se ve muy afectado, siendo la pieza con 5% de TiO₂ la que sufre mayor deformación.

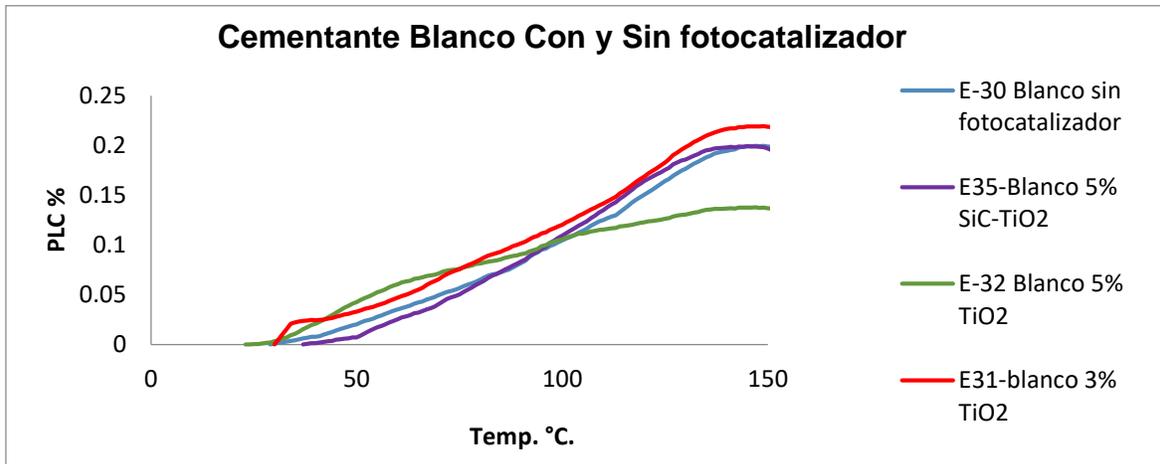


Figura 24. Expansión térmica en Cementante blanco con y sin fotocatalizador

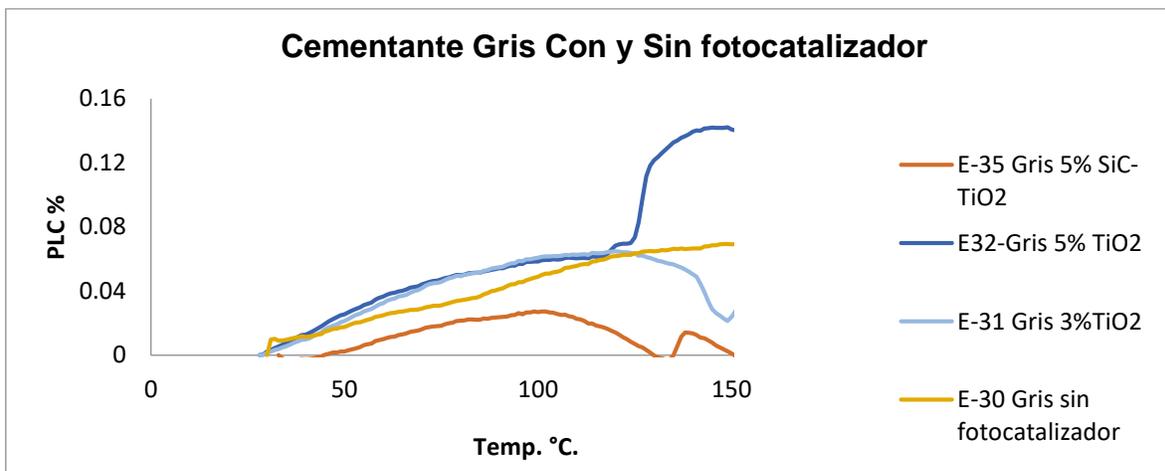


Figura 25. Expansión térmica en Cementante gris con y sin fotocatalizador.

3.9 Pruebas fotocatalíticas

3.9.1 Oxidación de NO_x

Inicialmente se realizaron las pruebas los fotocatalizadores en polvo solos cubriendo un vidrio que se usó de soporte en el reactor, esto para medir la actividad de los fotocatalizadores por sí solos. En la figura 26 se muestra como fueron variando los resultados de las mezclas 80:20, 20:80, 50:50 SiC-TiO₂ y el TiO₂. La relación del fotocatalizador SiC -TiO₂ que dio los mejores resultados fue la SiC-TiO₂ 20-80%. Por lo que se decidió usar primeramente esta relación para la elaboración de los cementantes fotocatalíticos.

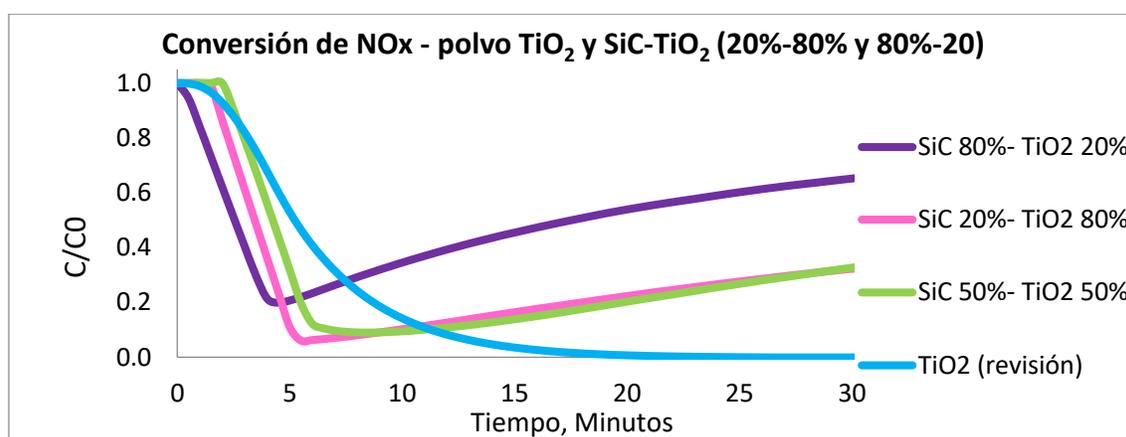


Figura 26. Conversión de NO_x en distintos fotocatalizador SiC-TiO₂ en polvo. TiO₂

En la figura 27 se puede apreciar que los cementantes que no contienen fotocatalizador no presentaron actividad de conversión de NO_x. Esto es típico de los materiales cementantes debido a que los óxidos que contiene al estar formando parte de la composición del material no presentan propiedades fotocatalíticas.

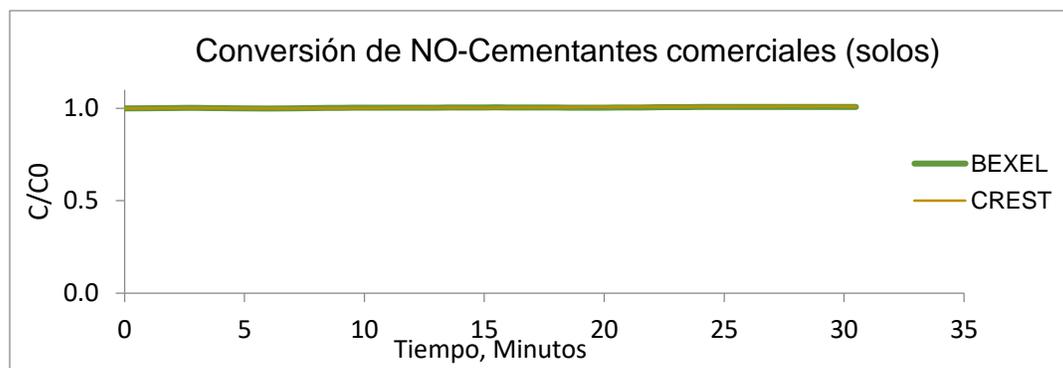


Figura 27. Conversión de NO_x, en cementantes sin fotocatalizador

Una vez seleccionada la mezcla SiC-TiO₂ 20-80% fue agregada en porcentajes de 3 y 5%, debido a que las cantidades más usadas de fotocatalizador en cementante van de 1 a 10% [59,60], tanto esta mezcla como en TiO₂ sólo esto para funcionalizar los cementantes comerciales y alternativos y conferirles propiedades catalíticas.

En el 2018 Ming-Zhi Guoa y colaboradores, fabricaron cementantes con metacaolín, cemento comercial y vidrio triturado, agregando el 2% en peso de TiO₂ y lograron convertir 5.8% de NO_x en 24 horas [11], por otro lado, Hipólito Luévano y colaboradores añadieron al estuco el 1% en peso de TiO₂ para después aplicarlo sobre un bloque obteniendo un 57% de conversión [29].

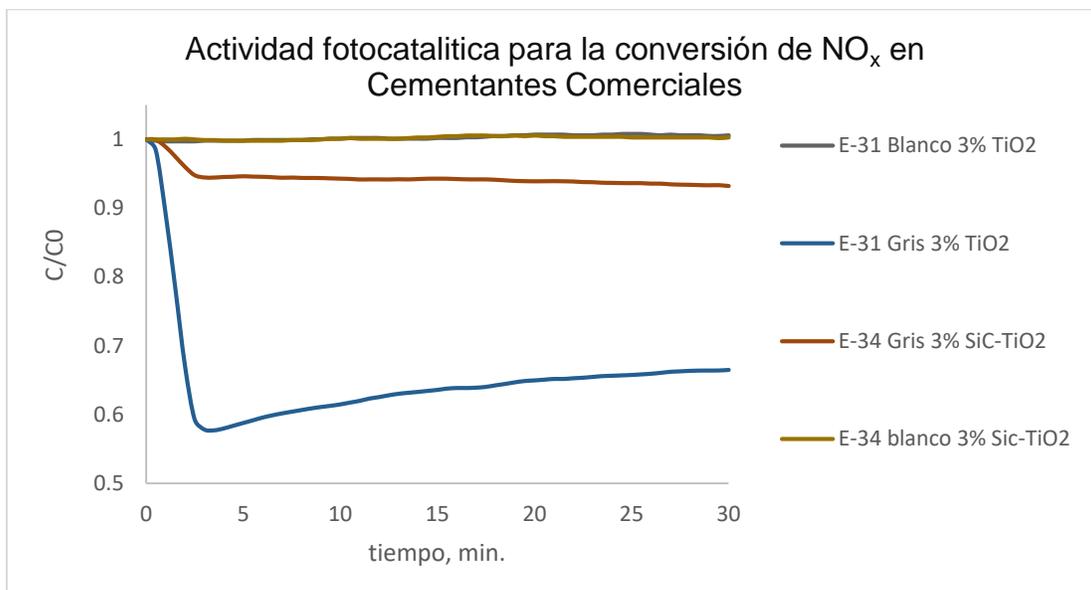


Figura 28. Conversión de NO_x en cementantes con 3% de fotocatalizador

En la figura 28 podemos apreciar la actividad presente en los cementantes comerciales que contienen 3% de fotocatalizador, en este caso el cementante comercial E-31 gris con 3% TiO₂, fue el que tuvo mejores resultados en media hora, logrando 35% de conversión de NO_x, sin embargo no se pudo estabilizar en media hora y su actividad fue disminuyendo lentamente, en el caso de los cementantes blancos tuvieron muy poca actividad de 1%, probablemente tuvieron un mal acomodo en el fraguado y el fotocatalizador no quedó expuesto en la superficie.

Por otro lado, en la figura 29 se muestra la actividad obtenida en los cementantes conteniendo un 5% de fotocatalizador, en este caso, el cementante E-35 gris que contiene 5% de SiC-TiO₂ fue el que dio mayor actividad logrando aproximadamente

17% de conversión de NO_x y su actividad tiende a aumentar muy lentamente, en otros estudios se ha comprobado que a mayor cantidad de TiO_2 mayor actividad catalítica, sin embargo en las capas el TiO_2 en ocasiones se aglomera y esto impide que la totalidad de las partículas del semiconductor queden expuestas [61], por lo tanto la distribución de las partículas en la superficie del cementante es un factor que contribuye en la actividad fotocatalítica.

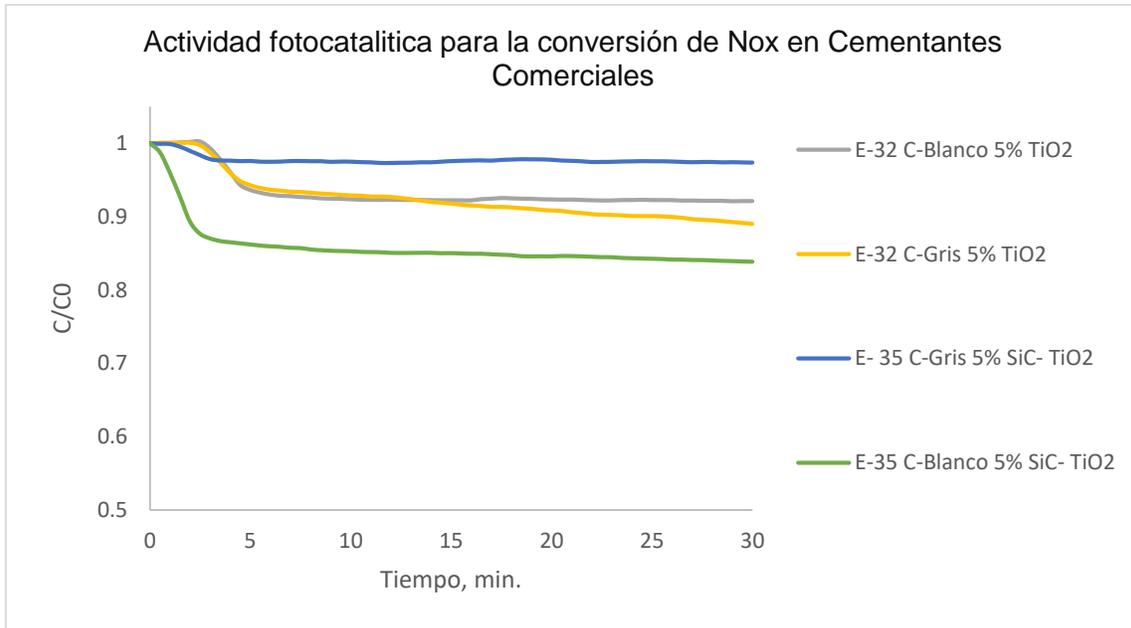


Figura 29. Conversión de NO_x en cementantes con 5% de fotocatalizador

Además de esto nos percatamos de que la actividad fotocatalítica presentada por los cementantes alternativos elaborados con ceniza volante y vidrio fue muy baja, en la figura 30 podemos observar que el espécimen E-12 elaborado con cemento blanco, vidrio y ceniza volante y 5% de TiO_2 logró sólo el 2 y 3% de actividad. En el caso del cementante Crest y Bexel (E-14) que sirven como boquilla en azulejo, también con 5% de TiO_2 , se obtuvo un 11% de actividad, el cementante Bexel tiende a aumentar su actividad, mientras que el Crest va perdiendo un poco de actividad en el transcurso de esa media hora, cabe resaltar que este tipo de cementantes no han sido reportados aún para la conversión de NO_x .

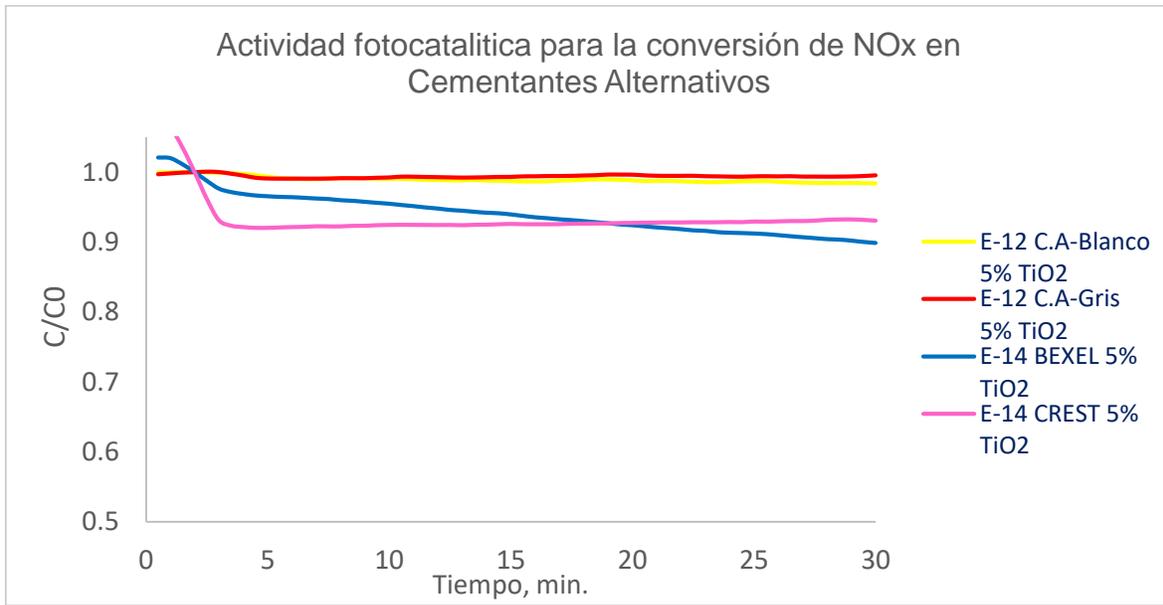


Figura 30. Conversión de NO_x en cementantes alternativos con 5% de fotocatalizador.

Adicional a esto se probó el cementante con 1% de fotocatalizador como empaste en un concreto celular (figura 31), en donde el concreto empastado con cemento blanco y 1% de SiC-TiO₂ tuvo el mejor resultado de aproximadamente 44% conversión de NO_x en media hora, y los morteros preparados con 1% de TiO₂ alcanzaron un 24% de conversión, aproximadamente, lo cual nos indica que con un 1% de fotocatalizador se logró un buen acoplamiento en la superficie del polímero, ya que se obtuvieron valores muy parecidos usando el 3 y 5 % de fotocatalizador.

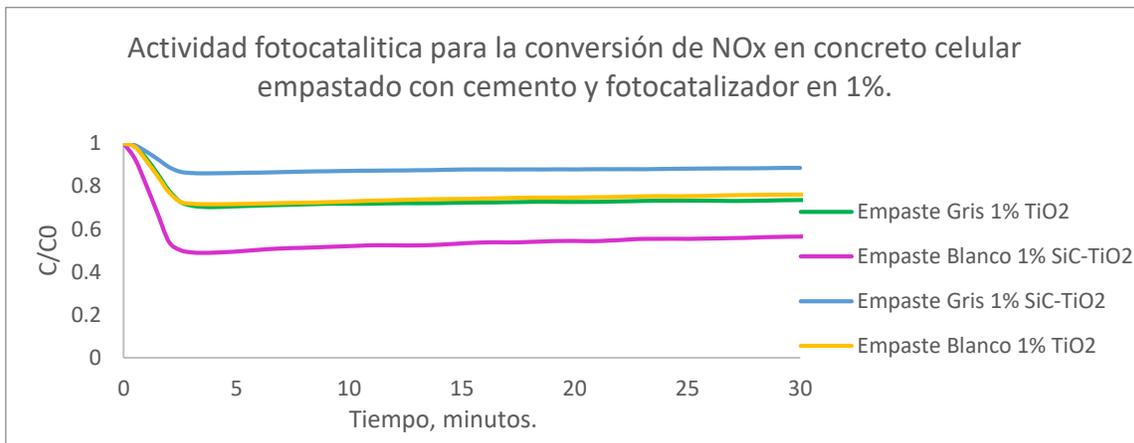


Figura 31. Actividad fotocatalítica bajo luz U.V. para la conversión de NO_x en concreto celular empastado con cemento con 1% de fotocatalizador.

3.9.2 Degradación de IC en cementante bajo luz UV

Debido a que los materiales presentaron resultados interesantes para la oxidación de NO_x se decidió probar estos materiales para la degradación de colorante IC bajo luz UV, logrando obtener en los cementantes alternativos comerciales (Crest-Bexel) hasta un 60 % de degradación de colorante en la mezcla SiC-TiO_2 agregada en 3% en peso al cementante E-18 comercial Bexel (figura 32), además estos materiales presentaron poca adsorción, entre 0 y 15%.

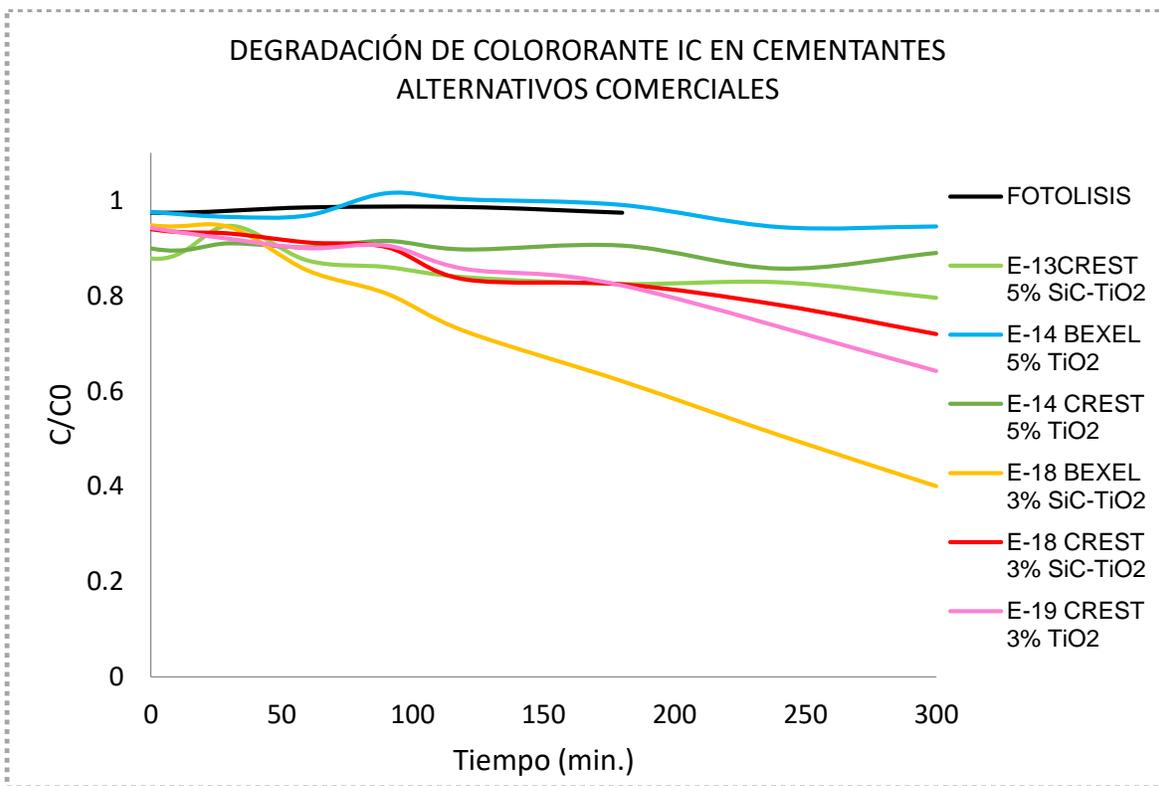


Figura 32. Degradación de IC en cementantes alternativos comerciales.

Se probaron de igual manera los cementantes alternativos (proporción E-5) con fotocatalizador SiC-TiO_2 y TiO_2 , logrando obtener hasta un 30% de degradación de colorante en la mezcla SiC-TiO_2 agregada en 3% en peso al cementante (figura 33) sin embargo estos materiales presentan una adsorción mayor, de hasta 35%. En este tipo de cementantes podemos observar que la mezcla de fotocatalizador SiC-TiO_2 , tuvo mejores resultados que los elaborados con el TiO_2 solo. Por lo que la

actividad depende mucho del acoplamiento que tiene el fotocatalizador con el cementante.

Algunos artículos reportan la degradación de rodamina B después de 60 minutos de reacción usando TiO_2 comercial alcanzando el 77% de degradación [69], mientras que otros usando SiC-TiO_2 obtuvieron 45% de actividad por 4 horas para la degradación de índigo carmín [26]. En el caso del P2 blanco no presenta ninguna actividad ya que es el cementante blanco sin fotocatalizador. El uso de TiO_2 se le atribuyen propiedades anti-bacteriales y de autolimpieza, por lo que estos polímeros al presentar actividad pudieron funcionalizarse para presentar estas propiedades.

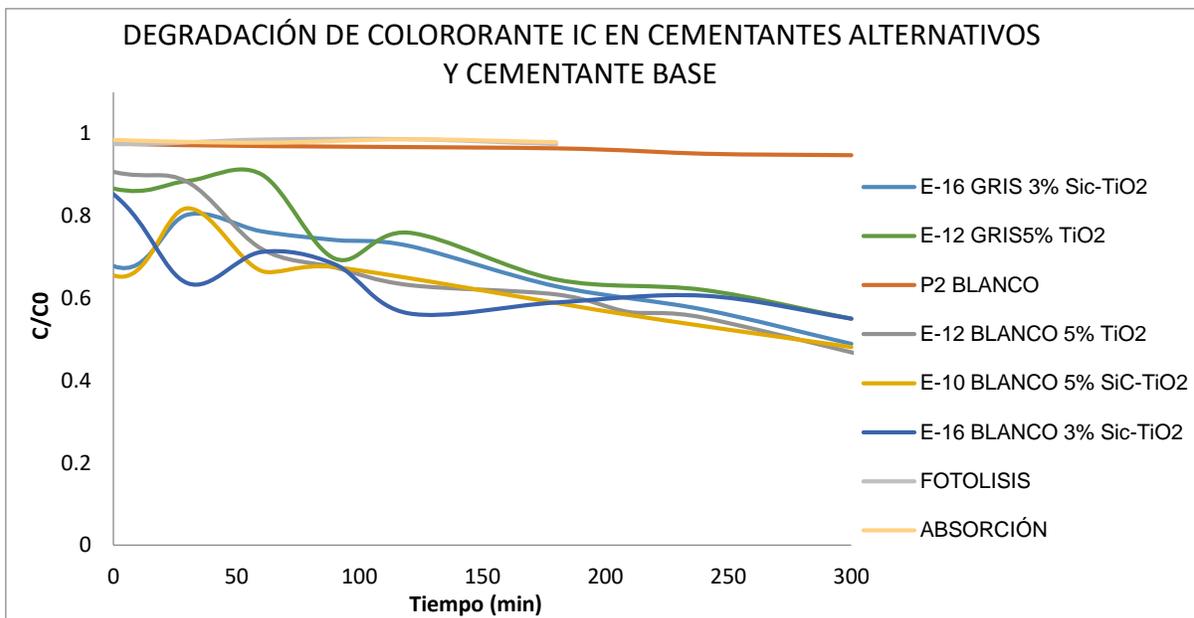


Figura 33. Degradación de IC en cementantes alternativos con fotocatalizador

En la figura 34 se puede observar un resumen de la actividad de los cementantes alternativos vs los cementantes Crest y Bexel con fotocatalizador, este tipo de cementantes tuvo menor adsorción que los cementantes convencionales, además de esto tuvieron tendencia a menor actividad catalítica a diferencia de los otros cementantes.

El cementante E-1 GRIS y E-1 BLANCO fueron elaborados con cemento Portland ordinario Cemex sin agregarle fotocatalizador, y la actividad que presentaron fue producto de la adsorción del colorante. Mientras que el cementante alternativo con

3% SiC-TiO₂ dio resultados muy parecidos a los cementantes alternativos con 5% TiO₂, es decir, con menor cantidad de fotocatalizador con la mezcla de SiC-TiO₂, se logró obtener casi la misma actividad, usando un porcentaje menor de fotocatalizador.

También se puede observar que la actividad en el cementante blanco tiende a ser mayor comparada con el cementante gris. Hay que recordar que la composición química del cementante blanco es distinta al gris ya que a éste se le agrega una cantidad menor a 1% de Fe₂O₃ [52] lo que podría influir en que ocurra una reacción exotérmica propia del proceso de hidratación del cemento durante el fraguado, con el FO₂O₃ y el fotocatalizador y que esto haga que disminuya la actividad en el caso de los cementantes de color gris. Algunos estudios indican que la porosidad del concreto ayuda a mejorar la actividad fotocatalítica y le da la función de purificación prometedora en la descontaminación del agua y tiene una buena perspectiva de aplicación de ingeniería [62].

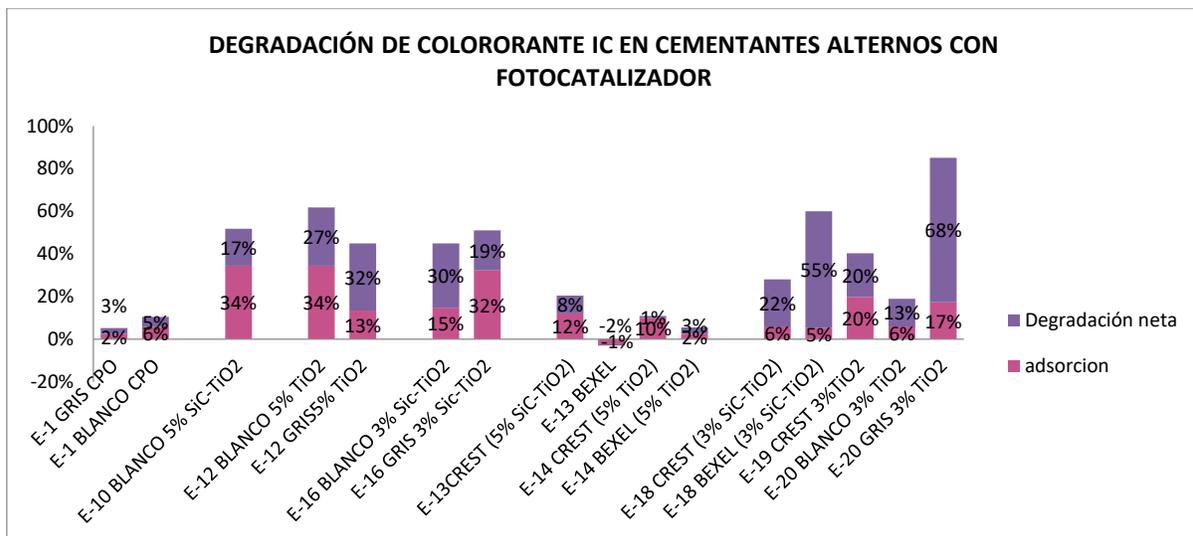


Figura 34. Resumen degradación de IC en cementantes alternativos, Bexel y Crest

Por otra parte, se buscó encontrar una relación entre la expansión térmica y la actividad fotocatalítica, los resultados se pueden apreciar mejor en la tabla 10, en esta tabla podemos observar que el cemento Crest sin fotocatalizador presentó un Coeficiente de expansión térmica de $9.8 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, mientras que al agregarle fotocatalizador su expansión disminuyó drásticamente, con la mezcla SiC-TiO₂ presentó un Coeficiente de expansión térmica de $4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ mientras que con TiO₂ tuvo un coeficiente de $2.48 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. además la mezcla SiC-TiO₂ que presentó mayor expansión dio una mayor actividad fotocatalítica. En el caso del cementante blanco sin fotocatalizador el coeficiente de expansión fue de $10.9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y al agregarle el fotocatalizador SiC-TiO₂ también hubo una ligera disminución de la expansión, con el 3 % de SiC-TiO₂ la expansión fue de $10 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ mientras que con el 5% de SiC-TiO₂ la expansión fue de $9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, sin embargo al agregarle el TiO₂ en 5% la expansión aumentó a $11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Para comparar la actividad fotocatalítica nos basaremos en los fabricados con 3 y 5% SiC-TiO₂, el que se elaboró con 3% SiC TiO₂ tuvo mayor expansión que el de 5% SiC-TiO₂, (10 vs 9), además de una mayor degradación (17 vs 30%). Por último en el caso del cementante gris la expansión térmica fue de $10.4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ sin fotocatalizador, al agregarle 5% TiO₂ la expansión dio el mismo resultado. Sin embargo, se comporta de una manera diferente, ya que sin el fotocatalizador la expansión tiene una tendencia continua a aumentar, mientras que con el fotocatalizador se expande muy rápidamente y al final comienza a sufrir una ligera contracción (figura 18), sin embargo en cuanto a la actividad catalítica podemos observar que nuevamente el cementante con fotocatalizador que presenta mayor expansión térmica (5% TiO₂) fue el que dio mayor degradación (32%).

Tabla 10. Actividad fotocatalítica Vs expansión térmica en cementantes alternativos.

NOMBRE	Cementante	Fotocatalizador (%)	Mezcla	Adsorción IC (%)	Degradación IC (%)	Expansión térmica (x10 -6 °C-1) de 35-150°C
Prisma 11	Crest	0%				9.8
Prisma E13	Crest	5%	SiC - TiO ₂	12%	8%	4
Prisma E-14	Crest	5%	TiO ₂	10%	1%	2.48
Prisma E13	Bexel	5%	SiC - TiO ₂	-2%	-1%	3.5
Prisma 2	C. Alternativo Blanco	0%		2%	3%	10.9
Prisma E-10	C. Alternativo Blanco	5%	SiC - TiO ₂	34%	17%	9
Prisma E-12	C. Alternativo Blanco	5%	TiO ₂	34%	27%	11
Prisma E-16	C. Alternativo Blanco	3%	SiC - TiO ₂	15%	30%	10
Prisma 2	C. Alternativo Gris	0%		6%	5%	10.4
Prisma E-12	C. Alternativo Gris	5%	TiO ₂	13%	32%	10.4
Prisma E-16	C. Alternativo Gris	3%	SiC - TiO ₂	32%	19%	9.9

3.9.2 OPTIMIZACIÓN DE FOTOCATALIZADOR

Con la finalidad de optimizar la actividad de los fotocatalizadores en polvo, se realizaron pruebas de conversión de NO_x , de estas mezclas probadas sobre un sustrato de vidrio. En este caso los polvos si mostraron variación en su comportamiento, en el caso de la conversión de NO_x bajo lámpara U.V. el fotocatalizador con relación 5:95 SiC-TiO₂ a 300 rpm/10 minutos, fue el que dio mejores resultados de hasta 95% de conversión (figura 35). Esta misma mezcla también dio el mejor resultado para la conversión de NO_x bajo luz solar simulada (figura 36) obteniendo aproximadamente un 35% de conversión en una hora.

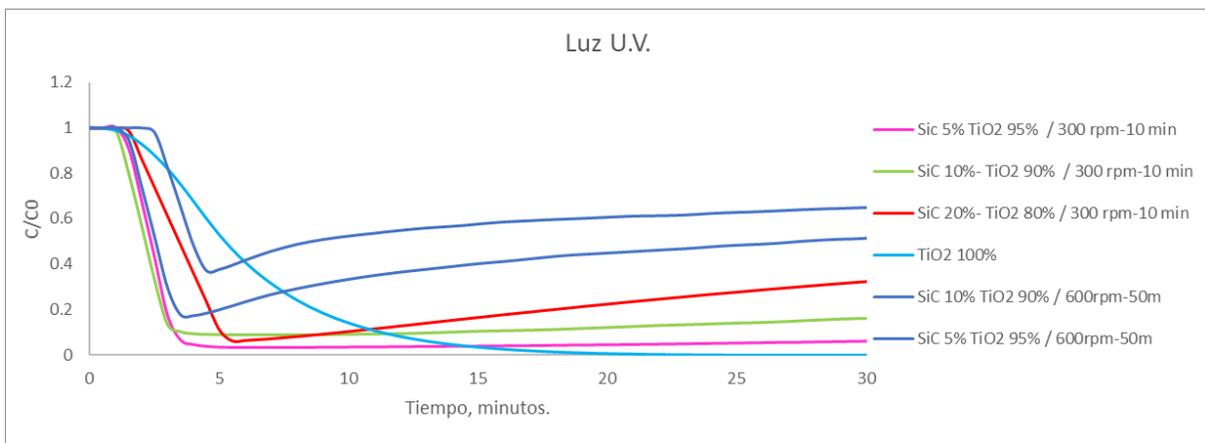


Figura 35. Conversión de NO_x bajo luz U.V. para mezclas de fotocatalizador a diferentes moliendas y relaciones.

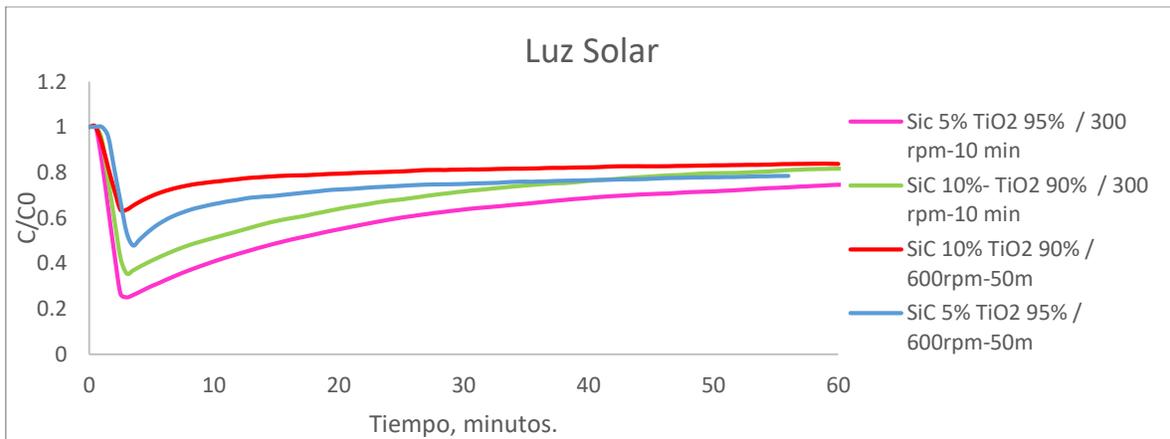


Figura 36. Conversión de NO_x bajo luz visible para mezclas de fotocatalizador a diferentes moliendas y relaciones.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Los cementantes alternativos comerciales (Crest y Bexel) y los cementantes alternativos preparados con ceniza volante y vidrio, presentaron una resistencia menor a los cementantes gris y blanco (Cemex), debido a que todos los alternativos presentaron parcialmente las fases principales del cemento relacionadas con las propiedades mecánicas. Sin embargo, las resistencias obtenidas en los cementantes alternativos pueden ser usadas para elementos no estructurales como lo son morteros de recubrimiento, blocks arquitectónicos, banquetas o cualquier pieza ornamental.
- Los resultados de las pruebas fotocatalíticas, tanto para la degradación de colorantes en agua, como la conversión de NO_x en aire, permitieron corroborar que los materiales fueron funcionalizados por la presencia de un fotocatalizador que les confirió actividad catalítica.
- Se encontró que al emplear la mezcla de SiC-TiO_2 en proporción 20-80%, como fotocatalizador favorece la funcionalización de los materiales cementantes, siendo esta nuestra mezcla mas optima al comparar la relación 80:20, 50:50 y 20:80 de SiC-TiO_2 , respectivamente.
- El cementante comercial blanco conteniendo 5% de TiO_2 o 5% de SiC-TiO_2 tuvo una mayor actividad para la degradación de colorante IC en comparación con el cementante comercial gris y los demás cementantes alternativos, bajo las mismas condiciones.
- De los cementantes comerciales con 3% de fotocatalizador, el cementante Cemex gris que contenía 3% de TiO_2 dio mejores resultados ya que logró convertir el 35% de los gases NO_x , mientras que en el caso de los cementantes con 5% de fotocatalizador, el cementante Cemex Blanco conteniendo 5% de SiC-TiO_2 tuvo la mejor actividad para la conversión de NO_x , alcanzando un 17% de conversión en media hora. Mientras que los demás cementantes evaluados presentaron actividades entre 3 y 10% de conversión. Esto puede

indicarnos que la actividad depende del acoplamiento que tenga el fotocatalizador con la composición química del cementante al momento de hacer las mezclas.

- Se determinó que la actividad fotocatalítica que presentan todos estos materiales puede estar influenciada principalmente por la naturaleza de su composición química, ya que en general presentaron valores similares de área superficial, diámetro de poro y adsorción.
- La morfología superficial del cementante cambia de manera muy notable al agregar el fotocatalizador, ya que se aprecia una distribución más homogénea y partículas menos angulares con el fotocatalizador en la mezcla.
- En cuanto a la expansión térmica el comportamiento de los cementantes alternativos se ve afectado al agregarle el fotocatalizador, debido a que la expansión térmica de estos materiales fue menor a la expansión mostrada por los cementantes comerciales, y en el comportamiento se aprecia como se contrae cercano a los 100° y después vuelve a expandirse, esto puede provocar agrietamientos considerables en el cementante.
- Después de utilizar la mezcla de SiC-TiO₂ en proporción 20-80%, como fotocatalizador, se realizó una optimización disminuyendo la cantidad de Carburo de Silicio y se encontraron mejores resultados para la combinación 5%-95% SiC-TiO₂.
- Adicionalmente se hicieron pruebas de empaste con 1% de fotocatalizador sobre un concreto celular, en donde el concreto cubierto con cemento blanco y 1% de SiC-TiO₂ tuvo el mejor resultado de conversión de NO_x, aproximadamente de 44% conversión en media hora, y los morteros preparados con 1% de TiO₂ alcanzaron un 24% de conversión. Esto nos indica que hubo un buen acoplamiento en la superficie del polímero.

- Se encontró que el fotocatalizador SiC-TiO₂ al estar combinado tiene potencial para activarse bajo luz visible, logrando una conversión de NO_x de 40% en media hora con el fotocatalizador SiC-TiO₂ 5:95 preparado a 300rpm/10min.
- En general, los materiales cementantes estudiados, tanto comerciales como alternativos, lograron ser funcionalizados por la adición de TiO₂ y SiC-TiO₂, ya que éstos por sí solos no presentan actividad fotocatalítica. Lo anterior es una contribución al área de los materiales de construcción, ya que se podrán tener superficies que ayuden a la descontaminación del medio ambiente, tanto para la purificación del aire como del agua. Asimismo, estos resultados nos permiten sugerir que la optimización de las proporciones de la mezcla del fotocatalizador, así como la cantidad incorporada a la mezcla cementantes, permitirán una mejora considerable en las propiedades de autolimpieza.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda hacer más pruebas con los mejores resultados y buscar la optimización del fotocatalizador, en cuanto a porcentajes de SiC-TiO₂, así como la molienda mecánica.
- Buscar un método de acoplamiento del fotocatalizador con el cementante, debido a que es importante que no se aglomere en un sólo punto del polímero y quede bien distribuido en la superficie del cementante.
- Realizar más pruebas bajo luz visible y que duren más tiempo, para poder corroborar la estabilidad del fotocatalizador y poder comparar la actividad del TiO₂ y SiC-TiO₂ expuestos bajo este tipo de luz.
- Realizar pruebas de adherencia en los cementantes, con fotocatalizador, utilizados para la boquilla (Bexel y Crest), debido a que esta propiedad es necesaria en este tipo de cementantes.

ANEXO 1

Expansión térmica

Como se mencionó anteriormente, la expansión térmica es la tendencia de los materiales a variar su volumen conforme presentan un cambio de temperatura, generalmente cuando un material se calienta, sus partículas tienden a moverse más y esto genera una separación entre ellas, esto hace que el material se expanda. Aunque existen algunos materiales inusuales que se contraen con el aumento de la temperatura, no es el caso de los materiales cementantes aquí utilizados [64]

El concreto se logra expande al incrementarse la temperatura y se contrae con su disminución, el coeficiente de dilatación es la variación unitaria de longitud o volumen de un sólido, por cada grado que cambie su temperatura [64], en el caso del concreto, el coeficiente de expansión térmica varía con la calidad y edad del concreto [65]. El coeficiente de expansión térmica o específicamente de dilatación α característico del concreto hidráulico es $0.000009 \text{ mm/mm/}^\circ\text{C}$ ($9\text{E-}06 \text{ mm/mm/}^\circ\text{C}$) [66]

Durante el fraguado y endurecimiento del concreto ocurre un proceso químico, el cual libera calor, el cual es conocido como calor de hidratación. Al momento de fraguarse grandes masas de concreto, como en estructuras de una presa, este calor se disipa muy lentamente, esto conlleva a una expansión e incremento de temperatura lenta, seguido de un enfriamiento que ocasiona contracciones, esto puede repercutir en agrietamientos [65]. Los efectos de estos cambios de volumen pueden ocasionar agrietamientos considerables, dañando la estructura, en especial cuando ocurre la retracción de fraguado. El coeficiente de expansión y contracción térmica varía en el concreto (cemento + agregado + agua) relativamente dependiendo de los tipos de agregados y la calidad de la mezcla [67].

5. Referencias Bibliográficas

[1] Chris Barrow, Environmental management for sustainable development: Second edition, ISBN 9780415365352, Published 2006 by Routledge.

[2] Programa de Gestión para mejorar LA CALIDAD DEL AIRE del estado de Nuevo León (ProAire 2016-2025). [3] Joana Ângelo et al., "An overview of photocatalysis phenomena applied to NO_x abatement", Journal of Environmental Management, Vol. 129, 2013, pp. 523 -528.

[3] Edith Luévano Hipólito, "Purificación de aire mediante oxidación fotocatalítica de gases contaminantes NO_x: estudio de los fotocatalizadores TiO₂ y ZnO". Nuevo León, Tesis Doctorado. FIME-UANL, 2015.

[4] Carlos Urbilla et al., "Contaminación atmosférica, efectos en la salud respiratoria", Revista Médica Clínica Las Condes, vol 28, 2017, pp. 111-118.

[5] Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, "Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Nuevo León", Pro Aire 2015-2025.

[6] Maldonado, Juan. "Ciudades y contaminación ambiental", Revista de Ingeniería, 2009, pp. 66-71, ISSN: 0121-4993.

[7] Luévano Hedith, Martínez de la Cruz, "Photocatalytic stucco for NO_x removal under artificial and by real Weatherism", Construction and Building Materials, vol. 174, 2018, pp. 302-309.

[8] World Health Organization (WHO), "Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease", Switzerland, 2016

[9] Ângelo, Joana, Andrade, et al. "An overview of photocatalysis phenomena applied to NO_x abatement", Environmental Management, vol. 102, 2013, pp. 29-40.

[10] Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 19 de noviembre

de 2020 <https://www.gob.mx/inecc/documentos/investigaciones-2018-2013-en-materia-de-mitigacion-del-cambio-climatico>.

[11] Gobierno del estado de México, Normatividad en calidad de aire, <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Yw>

[12] Gernol Minke. “Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos”, Avances en hidrología urbana, Editorial Fin de Siglo pp. 63-102.

[13] Caijun Shi et al. “New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement”- Cement and Concrete Research, vol. 41, 2011, pp. 750-763.

[14] Y.L. Lia, M.Y. Hanb, et al., “Energy consumption and greenhouse gas emissions by buildings: A multiscale, Perspective”, Building and Environment, Volume 151, 2019, pp. 240-250.

[15] Caijun Shi et al., “New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement”, Cement and Concrete Research, vol. 41, 2011, pp. 750-763.

[16] Md. Uzzal Hossain et al., “Global warming potential and energy consumption of temporary works in building construction: A case study in Hong Kong”, Building and Environment, Volume 142, 2018, pp. 171-179

[17] G.L. Guerrini et al., “White cement and photocatalysis, Fundamentals”. Arab International Conference and Exhibition on The Uses of White Cement, Vol. 1., 2008,

[18] Ryu, Gum Sung et al. “The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete”, Construction and Building Materials, vol 47, 2013, pp. 109-418.

[19] Angel Palomo et al. “Alkaline activation, procedure for transforming fly ash into new materials”, World of coal conference, 2011

[20] Yahya Jani and William Hogland. “Waste glass in the production of cement and concrete” – A review, Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 2, 2014. pp. 1767-1775

[21] Vafaei, Mostafa et al. "High strength geopolymer binder based on waste-glass powder", *Advanced Powder Technology*, vol. 28, 2017, pp. 215-222.

[22] C. Augusto Casagrande et al. "Effect of environmental conditions on degradation of NO_x gases by photocatalytic nanotitania-based cement mortars after long-term hydration", *Cleaner Production*, vol. 274, pp.1236

[23] Eric Sánchez Díaz, "Elaboración de materiales base cemento autolimpiantes y con baja expansión térmica a temperatura ambiente", Nuevo León: Tesis Maestria, FiC-UANL, 2013.

[24] "Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment", Shihui Shen, Maria Burton, *Construction and Building Material*, Vol 35, pp871-883, 2012.

[25] N. N. Vershinin et al, "Nanocatalysts for photocatalytic air purification systems", *Russian Chemical Bulletin, International Edition*, 2017, Vol. 66, No. 4, pp. 648—651.

[26] Mónica Vazquez, "Empleo de la eucryptita (LiAlSiO₄) para el control de la expansión térmica de geopolímeros fabricados a partir de residuos vítreos y ceniza volante, para ser utilizados como soporte de películas de fotocatalizadores". Nuevo León: Tesis Maest. FiC-UANL, 2018.

[27] Yang Li et al., "Enhancing the activity of a SiCeTiO₂ composite catalyst for photo-stimulated catalytic water splitting", *Hydrogen energy*, vol .38, 2013, pp. 3898-3904.

[28] G. Husken et al., "Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification", *Building and Environment*, Vol. 44 2009, pp. 2463-2474.

[29] Raffaele Vinaia, Marios Soutsosa, "Production of sodium silicate powder from waste glass cullet for alkali", *Concrete Research*, vol. 116, 2018, pp. 45-56.

- [30] Shizhe Zhanga, Arno Keulenb,c, Kamel Arbia, Guang Yea. "Waste glass as partial mineral precursor in alkali-activated slag/fly ash system", *Cement and Concrete Research*, vol. 102, 2017, pp. 29-40.
- [31] Viktor Shevchenko, et al. "Prospective of glass powder as active additive to Portland cement", *Chemistry & Chemical Technology*, vol. 9, 2015, pp. 231-235.
- [32] Bignozzi, "Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition", *Cement and Concrete Composites*, vol 55, 2015, pp. 45-52.
- [33] Norma ASTM C-109 "Método Normalizado de Ensayo de Resistencia a Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Utilizando Especímenes Cúbicos de 2 in".
- [34] Miguel Ipohorski y Patricia B. Bozzano, "Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales". *Ciencia e investigación*, Vol 63, 2013.
- [35] Magaly Yajaira Nava, "Cerámica Tradicional con tecnología de autolimpieza". Nuevo León: Tesis Maestría FiC-UANL, 2015.
- [36] Ma. Magdalena García Fabila "Apuntes para Espectrometría de Radiación Ultravioleta Visible (UV/VIS)" Universidad Autónoma del estado de México, Facultad de química, Toluca México, Octubre 2016.
- [37] José Luis Serrano Martínez, "Espectroscopía Infrarroja, Fundamentos". Curso: Instrumentación y métodos de análisis químico.
- [38] Sofia Alejandra Avalos "Determinación de polímeros en juguetes mordedores infantiles", Universidad de el salvador, Facultad de Química y Farmacia. Tesis para grado en Lic. Química. Septiembre 2019.
- [39] International Standard ISO 22197-1 "Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials", First edition 2007-09-01

- [40] Ester Galicia Aldama, "Influencia de la composición mineralógica del cemento en la difusión de especies químicas", Universidad Autónoma del estado de México, Tesis para obtener el grado de maestría, Toluca - enero,2015.
- [41] Kosmatka, Steven H. Kerkhoff William. et al, "Diseño y control de mezclas de Concreto" PCA, Journal of Experimental Botany, Vol. 1, 2004
- [42] Ramón Isaí Montelalvan "Estudio aplicación y normativa en la fabricación de cemento", INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL, Tesis, México D.F. 2010.
- [43] Jassna Elizabeth Chiguay, "Análisis razón Agua/cemento con mortero blanco" Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela Ingeniería en Construcción, Tesis 2007.
- [44] J.G.S. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer, L. Lorenzen, The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals. Part I. Theory and applications, Miner. Eng. 10 (1997) 659–669.
- [45] E. A´lvarez-Ayuso a, X. Querol a, F. Plana, et al., "Environmental, physical and structural characterisation of geopolymer matrixes synthesised from coal (co-) combustion fly ashes" Journal of Hazardous Materials, Vol. 154 (2008), pp. 175–183.
- [46] Fernandez Jimenez A., et al. "Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers" Ind. End. Chem. Res. Vol. 38. Pp 3932-3941.
- [47] Sofi M., Van Deventer et al. "Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCc)". Cem. Concrete Research, vol. 37, 2007, pp- 251-257.
- [48] Angel Palomo, et al. "Alkali Activation, procedure for transforming fly ash into new materials. Part 1: Applications". World of coal ash conference, May. 9-12-2011, Serrano Galvache N° 4, 28033 Madrid, Spain.
- [49] Ria Julyana Manullang, Tjokorde et al, "Formulation of portland composite cement using waste glass as a supplementary cementitious material", AIP Conference Proceedings, vol.1887, 29 September 2017

[50] Fernández Paris, J. M. “La razón de ser de los conglomerantes”. *Materiales De Construcción*, 28(171), 1987, pp-35–48.

[51] Giraldo M, et al. “Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación”. *Dyna*. 2006;73(148):69-81, ISSN: 0012-7353.

[52] Claude Pierre. “Binders for Durable and Sustainable Concrete”, *Modern Concrete Technology*, Taylor & Francis, Vol. 1, 2018.

[53] Norma Mexicana del Cemento. NMX-C-414 1999 ONNCCE 2004. Consultada en abril de 2014. <http://www.onncce.org.mx/pdf/NMX-C-141-ONNCCE-20045.pdf>.

[54] Norma ASTM C-618 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”

[55] Xu, T., Song, C., Liu, Y., & Han, G. “Band structures of TiO₂ doped with N, C and B”. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 7(4), 2006, pp,299–303

[56] Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A “Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator”, *Cem. Con. Res*, 2005, nº 35, pp. 1984-1992.

[57] A. F. J. Angel Palomo, “Alkali Activation of fly ashes: Mecanismos of reaction. Part I. Applications”, de *2nd Inter. Symposium NOon-Traditional Cement & Concret*, Czech Republic, 2005.

[58] Composition and microestructure of alkali activated fly ash binder: effect of activator, A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo, *Cement and concrete Research*, vol. 35, 2005, pp. 1984-1992

[59] M.J. Hanus, A.T. Harris, “Nanotechnology innovations for the construction industry”, *Nanotechnology innovations for the construction industry*, Vol. 58, 2013, pp. 1056–1102.

[60] Yang Lu et al, "Photocatalytic concrete for NO_x abatement: Supported TiO₂ efficiencies and impacts", Cement and Concrete Research, Vol. 116, 2018, pp. 57-64.

[61] Yang, Lu et al., "Photocatalyst efficiencies in concrete technology: The effect of photocatalyst placement", CATALYSIS, vol. 222, 2018, pp. 200-208.

[62] Xiao Liang et al. "Removal effect on stormwater runoff pollution of porous concrete treated with nanometer titanium dioxide", Transportation Research, 2019, vol. 73, pp. 34-45.

[63] Ming-Zhi Guoa et al. "Pathways of conversion of nitrogen oxides by nano TiO₂ incorporated in cement-based materials", Building and Environment, vol. 144, 2018, pp. 412-418.

[64] Myriam Rocío Pallares "Análisis por temperatura de losas de concreto hidráulico para pavimentos por el método de los elementos finitos", Programa de Ingeniería Civil, Universidad Surcolombiana Neiva, Huila 410001, Colombia, Memorias de la Décima Sexta Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática, 2017.

[65] Teodoro E. Harmsen. "Diseño de estructuras de concreto armado", PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATLICA DEL PERÚ FONDO EDITORIAL, 2002.

[66] Yang H. Huang, "Pavement analysis and design". 2nd Edition, University of Kentucky, Prentice hall, 2004.

[67] Arthur H. Nilson, "Diseño de estructuras de concreto" Professor Emeritus . Structural Engineering Cornell University, McGRAW-HILL, 2001

[68] E. Luévano-Hipólito and A. Martínez-de la Cruz. "Enhanced Photocatalytic Activity of TiO₂ Rutile by Coupling with Fly-Ashes for the Removal of NO Gases", I&EC Research, vol. 55, 2016, pp. 11512-11519.

[69] Isaias Juarez et al. "Short time deposition of TiO₂ nanoparticles on SiC as photocatalysts for the degradation of organic dyes", *Research on Chemical Intermediates*, vol.39, 2013, pp.1523–1531.

LOGROS O PRODUCTO DE LA TESIS

Participaciones en congresos y seminarios:



-Presentación Oral en el IX CONGRESO ALCONPAT MÉXICO 2020.



-Seminario de Investigación, FIC-UANL

-1er. Encuentro de ciencia y tecnología de estudiantes de posgrado, FIC-UANL.



-9° Congreso Red OTT México, la Innovación Disruptiva en la Industria 4.0



-Presentación de cartel en congreso por el día del Agua, UAEM-IITCA

Participación en diplomado:



Participación en el Diplomado de emprendimiento Científico UANL

Artículos:



-Artículo en Revisión para la revista ALCONPAT (Anexo)



UAC
Universidad Autónoma
de Campeche
"Del enigma sin albas a triángulos de luz"



IX Congreso Nacional ALCONPAT México,

ISBN: XXX-XXX-XXX-XX

Francisco de Campeche, Campeches, México,



Editado por Dr. Tezozomoc Pérez López

FUNCIONALIZACIÓN DE CEMENTANTES ALTERNATIVOS Y COMERCIALES POR ADICIÓN DE SiC-TiO₂ Y SU EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA EN LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA Y AIRE

Esquivel-Alonso, Bianca Giselle¹, Juárez-Ramírez, Isaías^{1*}, and Martínez-de la Cruz Azael²

bianca.esquivelaln@uanl.edu.mx / isaias.juarezrm@uanl.edu.mx / azael70@yahoo.com.mx

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Eco-materiales y Energía, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66455, México.

²Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66455, México

* Corresponding Author

RESUMEN

Hoy en día uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la humanidad es la contaminación ambiental y sus efectos. Una de las industrias que más contaminan es la industria de la construcción. Es por eso Por lo que, en este trabajo se busca aprovechar el vidrio y la ceniza volante para la elaboración de cementantes alternativos, a los cuales se les agregará un fotocatalizador para conferirles propiedades fotocatalíticas para llevar a cabo la conversión de NO_x en beneficio de la purificación del aire y degradación de sustancias orgánicas en medio acuoso. Para los cementantes alternativos se realizó la sustitución parcial del cemento Cemex gris y blanco con Ceniza y Vidrio Sódico Cálculo. A las distintas mezclas de cementantes se les agregó TiO₂ y SiC-TiO₂ en 3 y 5% para activar sus propiedades fotocatalíticas. Una vez transcurrido el tiempo de fraguado se le realizaron pruebas de resistencia mecánica y Difracción de Rayos-X. Además, estos materiales fueron evaluados en pruebas de degradación de NO_x y degradación del colorante Índigo Carmín en medio acuoso.

En cuanto a los resultados, la resistencia a compresión de los cementantes alternativos se obtuvo 108 kg/cm² esta podría emplearse para elementos que no requieran tanta capacidad estructural o recubrimientos. Por otro lado, en las pruebas fotocatalíticas, el cementante CEMEX blanco con fotocatalizador SiC-TiO₂, tuvo mejores resultados en media hora con 17% de actividad, mientras que la actividad fotocatalítica de los cementantes alternativos fue de 3%. Mientras que en la degradación del colorante IC, se alcanzó hasta un 85% de eficiencia. Además, como conclusión, se encontró que al emplear la mezcla de SiC-TiO₂ en proporción 20-80%, como fotocatalizador favorece la funcionalización de los materiales cementantes para la degradación de NO_x y la degradación de contaminantes orgánicos en medio acuoso.

Palabras clave: Fotocatálisis; Cementante alternativo; NO_x.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Hoy en día uno de los grandes problemas a los que se enfrenta la humanidad a nivel mundial es la contaminación ambiental y sus efectos tales como: el rápido incremento del calentamiento global y el desarrollo de enfermedades cancerígenas, respiratorias, dermatológicas, etc. Este fenómeno es generado por las grandes ciudades, debido a la sobrepoblación que se concentra en ellas, por la industrialización y la explotación de los recursos naturales en zonas cercanas a estas.

La contaminación del aire se entiende como la presencia de sustancias nocivas en la atmósfera a ciertas concentraciones que pueden provocar daños a la salud y contribuir al calentamiento global. Los contaminantes del aire se clasifican según su origen, pueden ser primarios o secundarios, los primarios son emitidos directamente a la atmósfera como el monóxido de carbono (CO) dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y Partículas (PM10 y PM2.5) [1]; y los contaminantes secundarios son los que se forman en la atmósfera a partir de reacciones químicas como por ejemplo el ozono (O₃), formado por reacciones de contaminantes primarios (COVs y óxidos de nitrógeno (NO_x) [1] ácido nítrico (HNO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) [1].

Los gases NO_x tiene un efecto negativo en el medio ambiente ya que producen lluvia ácida, formación de ozono troposférico, fotoquímicos. Smog, efecto invernadero, entre otros. Además, afectan en la salud de los seres humanos y animales causando, irritación de la piel, dificultad para respirar, puede causar náuseas, y se les ha asociado con el desarrollo de cáncer [2].

En la actualidad existen varios estándares de calidad del aire en los países con el objetivo de proteger la salud [3]. En México, estos estándares se encuentran publicados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y son de observación obligatoria en todo el país. Las NOM señalan cuales son los límites permisibles para los contaminantes. Estas normas están condicionadas a una revisión periódica para evaluar la información reciente sobre los efectos en la salud y la gestión de la calidad del aire [4].

1.2 Contaminación provocada por la industria de la construcción

Se calcula que la construcción consume el 5.7% de energía a nivel global y aporta el 6.8% de los gases de efecto invernadero [5], debido a los procesos de obtención del cemento. Esta contaminación se genera en las ciudades más desarrolladas y pobladas, y aunque el problema inicia siendo puntual en determinada área, termina afectando a todo el planeta en general.

Alrededor de 7% de las emisiones totales de CO₂ del planeta son por los procesos de la industria concretara, se dice que por cada ton de cemento producido se arroja 1 tonelada de CO₂ a la atmosfera (incluyendo la transportación) [6].

Otro factor que impacta gravemente es la extracción de materias primas, ya que esta industria consume el 60% de las materias primas que se extraen de la tierra, en donde además libera emisiones de CO₂ y PM10 PM2.6, produce el 50% de residuos [7].

Por lo que con el tiempo el ser humano ha desarrollado la aplicación de tecnologías avanzadas de oxidación TAO's en los cementantes que ayudan a la purificación del aire, tanto en el interior como exterior de la construcción, además de tener propiedades de autolimpieza [8,13].

1.3 Tecnología de autolimpieza en cementantes: Fotocatálisis

El proceso de fotocatálisis se da cuando el semiconductor al recibir radiación de un determinado rango de longitud de onda genera pares electrón/hueco.

A causa de ello, los huecos fotogenerados, dan lugar en la superficie del semiconductor a las reacciones de fotooxidación y los electrones de la banda de conducción, dan lugar a las reacciones de foto-reducción [9].

1.4 Aplicación de la fotocatálisis para edificaciones sustentables

La fotocatálisis puede aplicarse en diferentes zonas de una construcción, usualmente al agregársele TiO₂, CdS, Fe₂O₂ y WO₃ a materiales de construcción [10]. Permitiendo así desarrollar en propiedades de autolimpieza, purificación de aire y capacidad antibacterial. Los materiales son comúnmente expuestos a los

contaminantes atmosféricos, con la finalidad de proporcionar superficies que permiten que ocurran reacciones fotocatalíticas heterogéneas que atacan a los NO_x (NO y NO₂) provocados por los escapes de los vehículos y la industria [10].

Los contaminantes que son más comúnmente analizados para evaluar las propiedades de auto limpieza y descontaminación son colorantes naturales, compuestos inorgánicos (NO_x, SO_x, CO, entre otros), hidrocarburos, pesticidas y algunas bacterias, virus y hongos [9]. Además, hoy en día ya se puede utilizar esta tecnología en muros de block, muros de exterior, muros de túneles, pinturas, morteros, asfaltos, impermeabilizantes, acabados exteriores, entre otras [2].

1.5 Discusión Bibliográfica

Dentro de las fuentes contaminantes se pueden mencionar las actividades industriales, el gran aforo del parque vehicular, y las actividades domésticas, entre otros. Esto expone a la población enfermedades, uno de los contaminantes del aire que han recibido especial atención en los últimos años se encuentran los NO_x, ya que son causantes de problemas de salud que van desde irritación en el tracto respiratorio, náuseas, dolores de cabeza, incremento de asma en niños respiratorias hasta enfermedades cancerígenas [2,17], y también de provocar la llamada lluvia ácida [12]. Por ello, es de gran importancia el llevar a cabo investigaciones que contribuyan con la limpieza del medio ambiente [2].

La presencia de los NO_x (comúnmente óxido nítrico, NO, y dióxido de nitrógeno, NO₂), es consecuencia principalmente de los gases liberados de la combustión de los combustibles fósiles empleados en los automóviles, y de algunas empresas dedicadas a la generación de energía fósil [13,14]. Por lo que, se hace necesario buscar disminuir los niveles de contaminación de estos óxidos, y además provocar su conversión a productos menos dañinos.

Una de las tecnologías que se está utilizando con grandes expectativas es la fotocatalisis heterogénea, ya que mediante esta técnica es posible provocar la oxidación de los NO_x, para pasar de NO a NO₂, o a NO₃⁻, estos últimos llamados nitratos, los cuales pueden llegar a formar ácido nítrico (HNO₃) [14], un compuesto que puede ser empleado como fertilizante.

El fotocatalizador más empleado en esta tecnología es el dióxido de titanio (TiO₂) [13,14] el cual ha sido agregado en morteros, concretos, asfaltos, azulejos, etc., cuya actividad tiene la desventaja de ser limitada al ser irradiado con luz UV y luz solar [10]. Debido a esta limitante actualmente se trabaja mezclándolo con otros compuestos para mejorar su actividad fotocatalítica.

Entre los compuestos con los que se ha estado trabajado se encuentra el SiC, el cual tiene una banda de Band-Gap de 3.0 eV, muy parecida a la del TiO₂ de 3.2 eV, además tiene alta termoestabilidad, alta resistencia mecánica y una alta conductividad eléctrica [15] además de haber sido probado para la degradación de rodamina B y azul de metileno alcanzando el 70 y 77% de degradación [15,16]. El SiC es de color oscuro a diferencia del TiO₂ lo cual nos ayudará a que el primero absorba la luz solar para después transferirla al TiO₂ de manera atenuada y así se pueda incrementar las reacciones de oxidación de los NO_x, evitando la recombinación de los huecos y electrones de nuestro semiconductor.

2. PROCEDIMIENTO

2.1 Preparación de los materiales cementantes comerciales

Se utilizaron cementantes comerciales de la marca Cemex blanco, Cemex gris, Crest y Bexel y se elaboraron morteros conforme a la norma (ASTM C 109). Se empleó Arena Silica estándar, ya que es la recomendada en la norma y una relación agua/cemento de 0.485. Una vez preparada nuestra mezcla, se vertieron en moldes de 5x5 cm con compactaciones conforme nos marcan la norma ASTM-C-109. Al terminar dichas compactaciones, se dejaron fraguando durante 24 horas, después fueron llevados a un cuarto de curado con una temperatura controlada de 25°C, donde permanecieron para poder evaluar su resistencia a la compresión a los 7, 15 y 28 días. Adicionalmente, se les realizaron pruebas de resistencia mecánica, DRX y SEM.

2.2 Preparación de los materiales cementantes alternativos

Para la elaboración de nuestros cementantes se realizó la sustitución parcial del cemento Cemex gris y Blanco, en distintos porcentajes (tabla 1). Como suplemento parcial se incorporó Ceniza y Vidrio Sódico Cálculo, este último se obtuvo al pulverizar diferentes tipos de botellas residuales fabricadas de este material. Para la activación alcalina, se utilizó hidróxido de sodio, en solución con concentración 4 Molar.

2.4 Preparación de fotocatalizador

La preparación del fotocatalizador SiC-TiO₂ en diferentes proporciones se llevó a cabo mediante molienda mecánica de la mezcla de ambos materiales a 300 revoluciones por 10 minutos, en relaciones en peso de 20-80%, 80-20% y 50-50% de SiC-TiO₂, respectivamente. En este caso, se usó el TiO₂ P-25 comercial, así como SiC comercial de la marca Sigma-Aldrich. A cada uno de los morteros se les agregó TiO₂ y SiC-TiO₂ en proporciones de 3 y 5% para funcionalizarlos y evaluarlos fotocatalíticamente en pruebas de conversión de NO_x. Para estos cementantes, se utilizaron moldes de 5x10x2 cm para poder ser usados en el reactor.

2.7 Pruebas fotocatalíticas para la conversión de NO_x

La actividad fotocatalítica de los materiales cementantes preparados, se evaluó mediante la conversión de NO_x. Las pruebas se hicieron conforme a la norma ISO 22197-1 [19], usando una lámpara de luz UV con una longitud de onda de 365 nm.

2.8 Pruebas fotocatalíticas para la degradación de colorante.

Las pruebas fotocatalíticas para medir la degradación de colorante fueron realizadas con una lámpara UV con una longitud de onda de 254 nm se empleó el colorante Índigo Carmín con una concentración inicial de 15 ppm.

3. ECUACIONES

No aplica.

4. TABLAS Y FIGURAS

Tabla 11. Proporcionamiento de cementantes alternos

CP			
	CEMENTANTE	VIDRIO	C.V
Gris	(%)	(%)	(%)
E2-G	20	10	70
E3-G	30	10	60
E4-G	40	10	50
E5-G	50	10	40
E1-G	100	0	0
Blanco			
E2-B	20	10	70
E3-B	30	10	60
E4-B	40	10	50
E5-B	50	10	40
E1-B	100	0	0
Crest			
E3 Crest	100	0	0
Bexel			
E-4 Bexel	100	0	0

Tabla 2. Proporcionamiento de cementantes fotocatalíticos.

Nombre	Cementante	% Fotocatalizador	Fotocatalizador
Prisma P-2	C. Alternativo Blanco	0	
Prisma E-10	C. Alternativo Blanco	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-12	C. Alternativo Blanco	5	TiO ₂

Prisma P-2	C. Alternativo Gris	0	TiO ₂
Prisma E-10	C. Alternativo Gris	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-12	C. Alternativo Gris	5	TiO ₂
Prisma E-35	C. Comercial Blanco	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-32	C. Comercial Blanco	5	TiO ₂
Prisma E-35	C. Comercial Gris	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-32	C. Comercial Gris	5	TiO ₂
Prisma 11	Crest	0	
Prisma E13	Crest	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-14	Crest	5	TiO ₂
Prisma 11	Bexel	0	
Prisma E-13	Bexel	5	SiC - TiO ₂
Prisma E-14	Bexel	5	TiO ₂

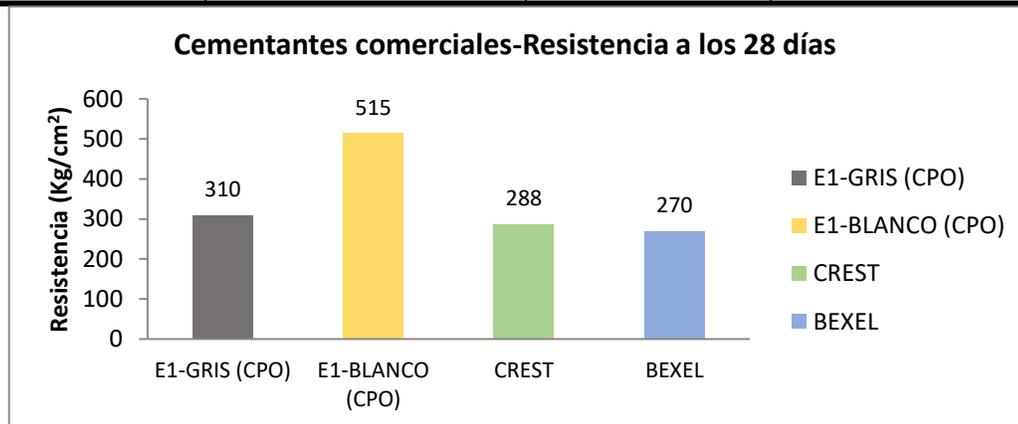
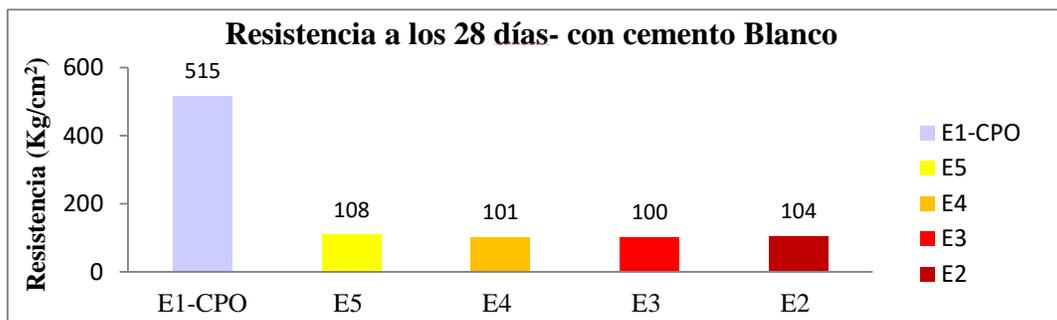


Figura 1. Resistencia de cementantes comerciales



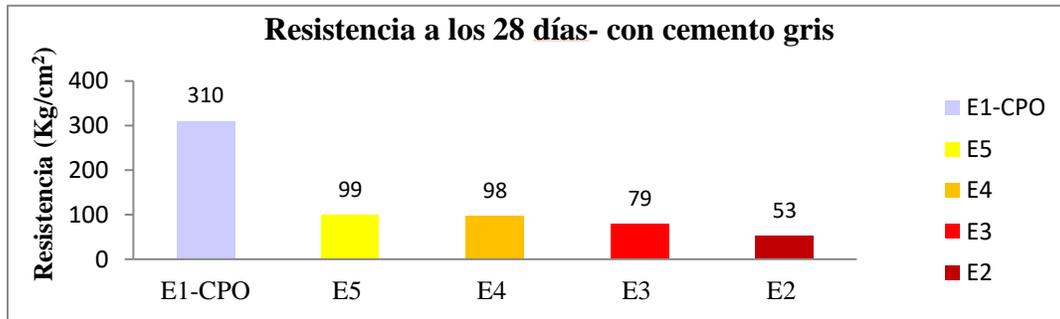
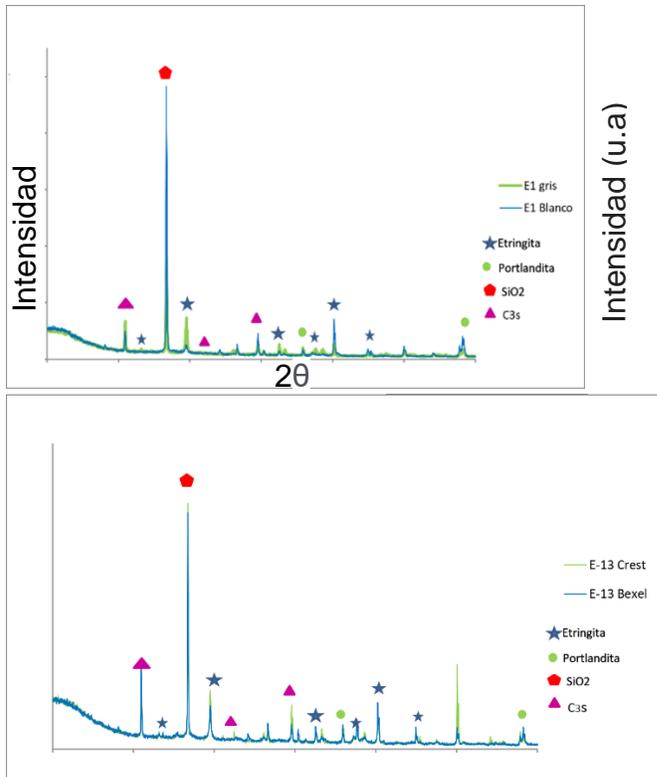


Figura 2. Resistencia de cementantes alternativos empleando cemento gris y cemento blanco para su elaboración



20

Figura 3. (a) DRX Cemex gris y blanco. (b) DRX Crest y Bexel.

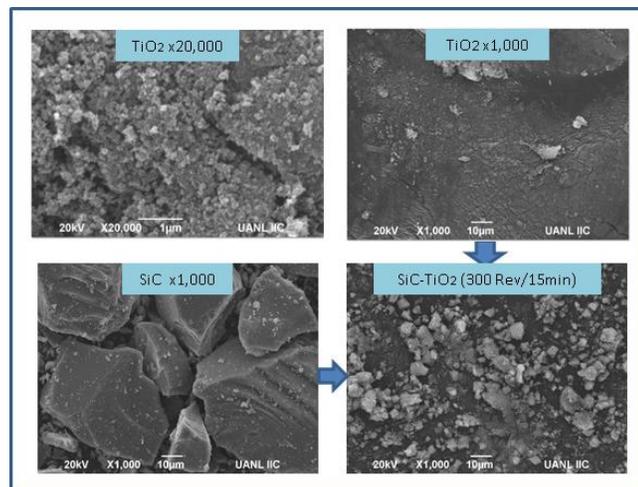


Figura 4. MEB de fotocatalizadores SiC, TiO₂ y SiC-TiO₂ en polvo.

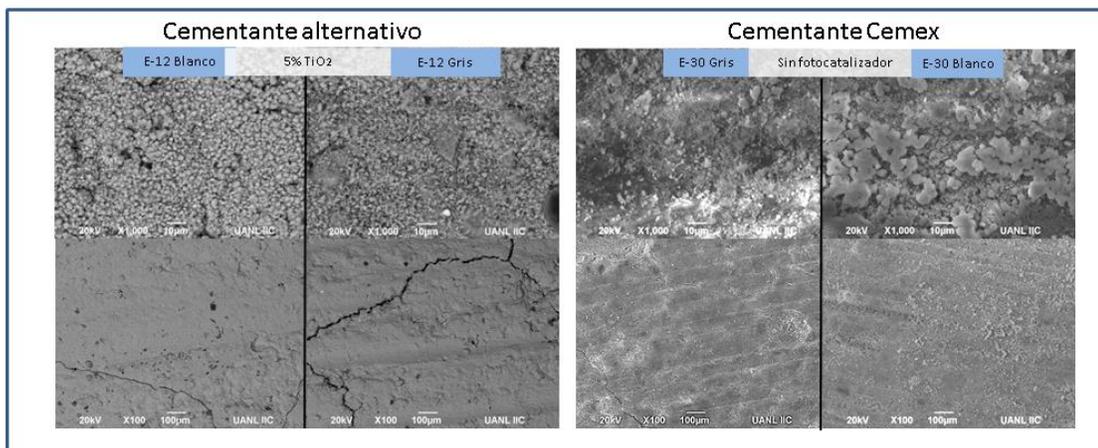
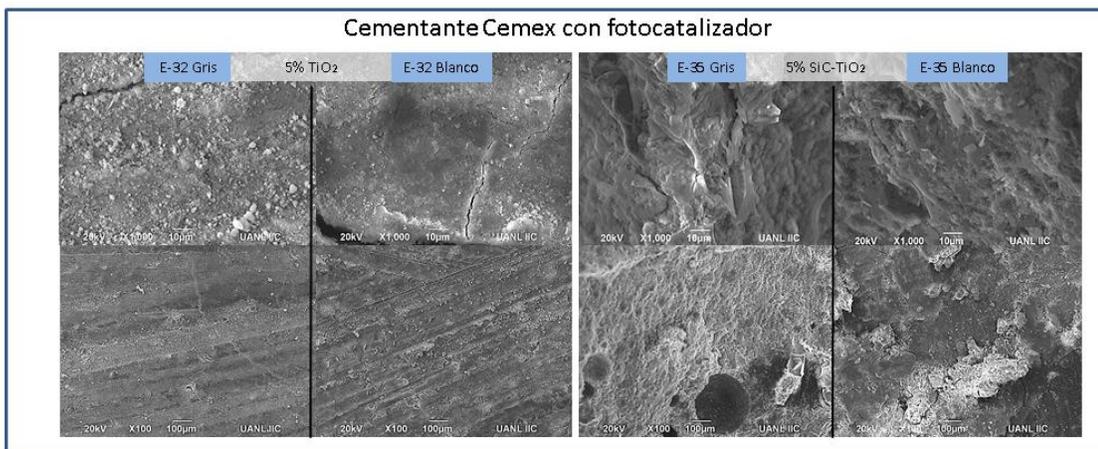


Figura 5. Cementante alternativo con fotocatalizador vs comercial sin



fotocatalizador.

Figura 6. Cementante alternativo con fotocatalizador vs cementante comercial sin fotocatalizador.

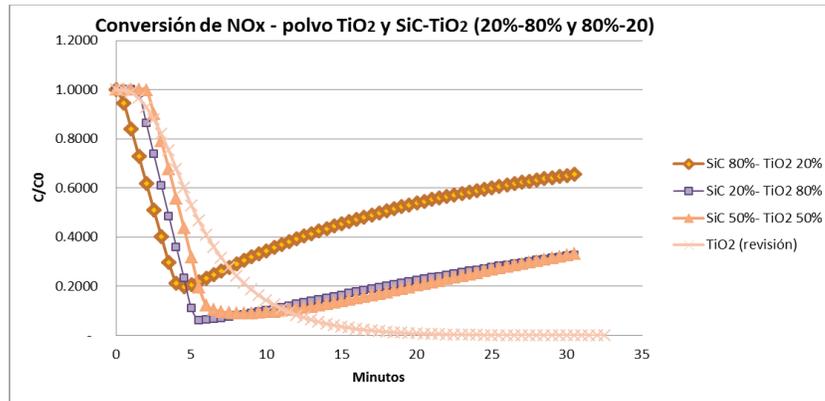


Figura 7. Conversión de NO_x en distintos fotocatalizador SiC-TiO₂ en polvo y TiO₂.

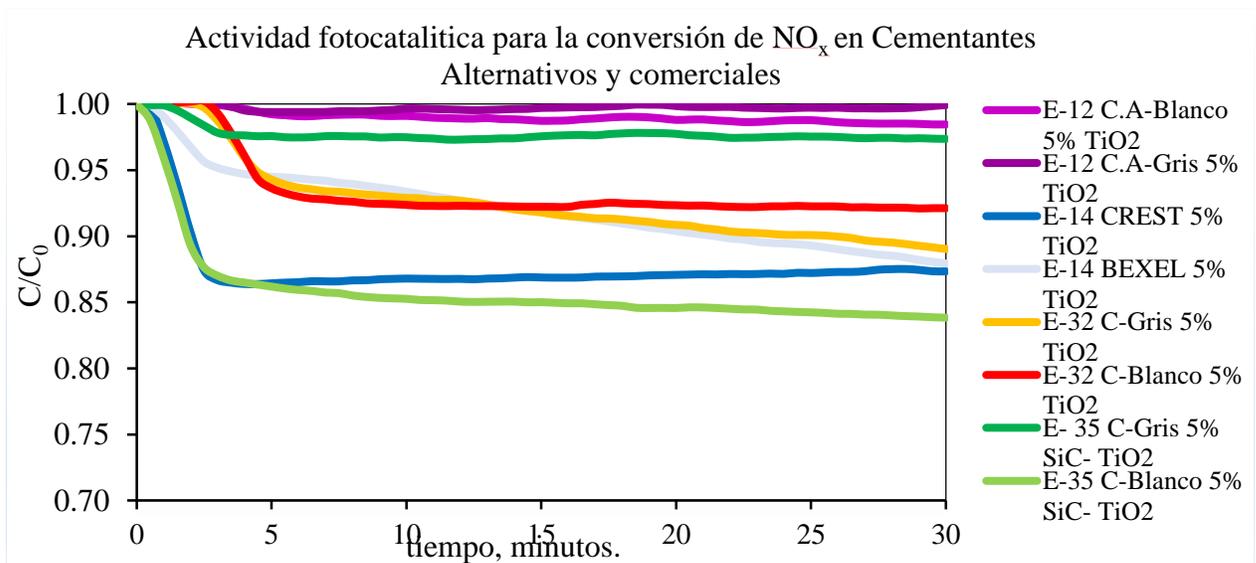


Figura 8. Conversión de NO_x en cementantes con 5% de fotocatalizador

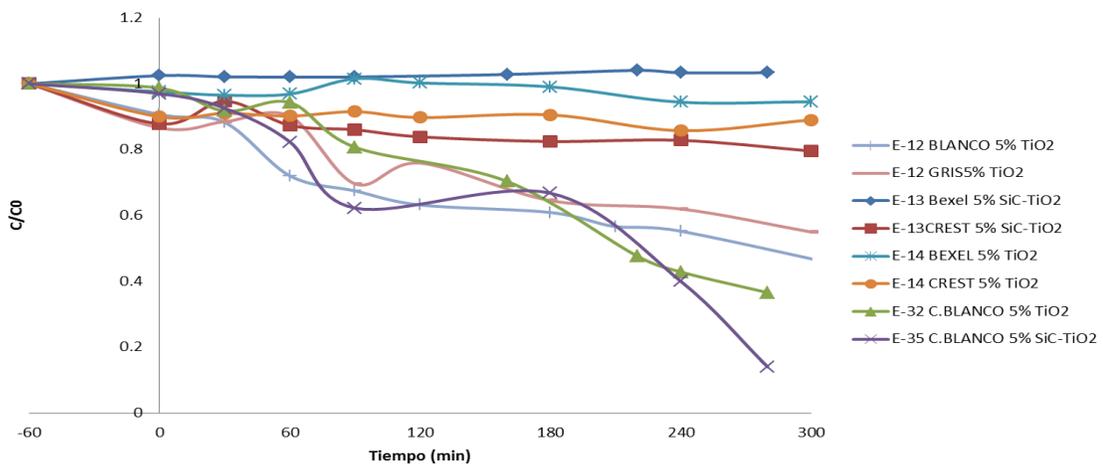


Figura 9. Degradación de IC en cementantes con fotocatalizador

5. UNIDADES

Las unidades de medición utilizadas son las del Sistema Internacional.

6. USO DE MARCAS REGISTRADAS

- Cemex
- Bexel
- Crest

7. ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS

kg/cm² - Kilogramos por centímetro cuadrado.

PM10 - Material particulado menor a 10 micras.

PM2.5- Material particulado menor a 2.5 micras.

COVs- Compuestos orgánicos volátiles.

DRX - Difracción de rayos X.

SEM- Microscopio electrónico de barrido.

8. RESULTADOS

8.1 Resistencia en cementantes alternativos

Los resultados de la prueba de resistencia mecánica muestran que los cementantes comerciales preparados presentan valores de alrededor de 500 kg/cm² para las muestras con cemento blanco, 300 kg/cm², muy parecido al cementante Crest, 288 kg/cm² y Bexel, 270 kg/cm², tal y como se muestra en la figura 1, estos últimos empleados como boquilla en juntas de piso-azulejo.

Por otro lado, en el caso de los cementantes alternativos, se elaboraron los proporcionamientos mostrados en la tabla 2, donde se modificó la cantidad de ceniza volante, cemento, y fijamos en 10% la cantidad de ceniza Volante. Lo anterior, en concordancia con el trabajo de Yahya Jani, quien comparó algunos resultados obtenidos al agregar entre el 10 y 20% de vidrio borosilicato en sustitución del cemento, siendo el 10% de sustitución el porcentaje más

recomendado [11]. Los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión se muestran en la figura 2.

Como se puede apreciar, la resistencia del cementante alternativo disminuyó a casi un tercio en comparación a la presentada por el cementante comercial. En este caso, la resistencia más alta alcanzada para el cementante alternativo conteniendo cemento gris fue de 99 kg/cm^2 mientras que el cementante alternativo elaborado con el cementante blanco fue de 108 kg/cm^2 (E-5). De acuerdo con estos resultados, se puede decir que estos cementantes alternativos podrían tener uso en elementos en donde no se requieran resistencias altas, como por ejemplo en banquetas, para la elaboración de blocks, morteros para recubrimiento, entre otras. Sin embargo, no podrían considerarse como elementos estructurales de alta resistencia.

8.2 Difracción de rayos-X Cementantes Comerciales (DRX)

Al analizar los materiales por Difracción de rayos-X, se detectó la presencia de fases presentes en el cemento convencional al ser hidratadas sus fases iniciales (alita, belita, ferrita y aluminato tricálcico), en este caso se puede apreciar como el pico de la alita (C3S) tiene mayor intensidad en los cementantes comerciales Cemex, Crest y Bexel, a diferencia de los cementantes alternativos, elaborados con ceniza volante y vidrio. Este resultado, corrobora el resultado de la baja resistencia presentada por los cementantes alternativos en comparación a los cementantes comerciales. Lo anterior, debido a que la variación de intensidades en las fases de los distintos cementos son las que le dan sus propiedades de resistencia a la compresión, ataque a los sulfuros y desarrollo del gel CASH durante el fraguado [18].

En la figura 3 se puede observar claramente la intensidad de la fase C_3S del cemento Blanco, el cual tuvo una mayor resistencia a la compresión.

8.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB) en nuestros cementantes

Los materiales fueron analizados por microscopía electrónica de barrido, donde se pudo apreciar la morfología que presenta cada muestra. En las imágenes de la figura 4, se muestra cómo se incorporó el TiO_2 con el SiC mediante la molienda mecánica.

En las figuras 5 y 6, se muestra la comparación del cementante alternativo y el cementante comercial conteniendo el fotocatalizador. De acuerdo con lo observado, la morfología de nuestro cementante alternativo (E-12) cambia al agregarle el fotocatalizador, las partículas más finas de este fotocatalizador se aglomeran en la superficie del cementante y las partículas se ven menos angulares, más redondas y definidas. Sin embargo, no se aprecia lo mismo al agregarle el fotocatalizador al cemento comercial (E-30), pues no se aprecia ninguna morfología definida. Probablemente, las partículas de ceniza volante y vidrio estén también en la superficie y debido a la presencia de éstas la morfología cambia.

Por otro lado, podemos observar que existe un cambio de morfología en el cementante Cemex al utilizar TiO_2 y SiC-TiO_2 , donde se aprecia que al emplear SiC-TiO_2 se tiene una topografía más rocosa en donde se ve más rugosidad en la superficie ya que hay mucha variación en la intensidad de sombras de la imagen de la muestra E-35 gris y blanco.

8.4 Oxidación de NO_x

Inicialmente, se realizaron las pruebas en nuestros fotocatalizadores en polvo cubriendo un vidrio que se usó de soporte en el reactor, esto para medir la eficiencia de nuestros fotocatalizadores por sí solos. En la figura 7 se muestran los resultados de las mezclas de fotocatalizadores en diferentes proporciones: 80:20, 20:80, 50:50 SiC-TiO_2 y el TiO_2 por sí solo. La relación del fotocatalizador SiC-TiO_2 que dio los mejores resultados fue la mezcla de SiC-TiO_2 20-80%. Por lo que se decidió continuar con esta relación para la elaboración de los cementantes fotocatalíticos.

Una vez seleccionada la mezcla SiC-TiO_2 20-80%, ésta fue agregada en porcentajes de 3 y 5%, debido a que las cantidades más usadas de fotocatalizador en cementante van de 1% a 10% [20,21].

En la figura 8 se muestran las gráficas de conversión de NO_x , donde se aprecia que el mortero elaborado con cemento Cemex blanco y conteniendo SiC-TiO_2 , presentó un mayor grado de conversión (17%) en 30 minutos, en comparación con los otros cementantes utilizados. Incluso, este valor está por encima de algunos reportes encontrados en literatura para cementantes conteniendo TiO_2 como fotocatalizador, donde mencionan conversiones de NO_x de 5.8% en 24 horas [10]. Mientras que, en otro trabajo se reporta que la adición de 1% en peso de TiO_2 en estuco aplicado sobre un bloque presentó un 57% de conversión [14]. Sin embargo, en nuestro caso,

el fotocatalizador está incorporado directamente en la mezcla cementante, mientras que en la mayoría de los reportes se encuentra expuesto en la superficie como una pasta o recubrimiento, lo que provoca su fácil remoción, o daño físico. En este caso, los resultados muestran que en general, todos los materiales cementantes evaluados, comerciales y alternativos, lograron presentar actividad para la conversión de NO_x , por la presencia de los fotocatalizadores agregados, SiC y TiO_2 .

8.5 Degradación de IC en cementante bajo luz UV

Debido a que los materiales presentaron resultados interesantes para la degradación de NO_x y debido a que la degradación de colorantes también puede ser llevada a cabo mediante un proceso fotinducido, se decidió probar estos materiales para la degradación de colorante IC bajo luz UV. De acuerdo con los resultados obtenidos y que son mostrados en la figura 9, se logró obtener hasta un 85% de degradación del colorante al utilizar el cementante comercial Cemex Blanco conteniendo 5% de SiC- TiO_2 como fotocatalizador. También, puede apreciarse que en estas pruebas nuestro cementante alternativo presentó buena actividad, llegando a degradar hasta en un 50% al colorante IC. Nuestros resultados son comparables a los obtenidos por otros autores, quienes reportan la degradación de rodamina B después de 60 minutos de reacción usando TiO_2 comercial alcanzando el 77% de degradación [15], mientras que otros usando SiC- TiO_2 obtuvieron 45% de actividad después de 4 horas de reacción para la degradación de IC [16].

En general, los materiales cementantes estudiados, tanto comerciales como alternativos, lograron ser funcionalizados por la adición de TiO_2 y SiC- TiO_2 , ya que éstos por sí solos no presentan actividad fotocatalítica. Lo anterior es una contribución al área de los materiales de construcción, ya que se podrán tener superficies autolimpiantes, y a la vez coadyuvar a la descontaminación del medio ambiente, tanto para la purificación del aire como del agua. Asimismo, estos resultados nos permiten sugerir que la optimización de las proporciones de la mezcla del fotocatalizador, así como la cantidad incorporada a la mezcla cementantes, permitirán una mejora considerable en las propiedades de autolimpieza.

9. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que fue posible la elaboración de cementantes alternativos conteniendo ceniza volante y vidrio como sustituto parcial del cemento, los cuales presentaron resistencias mecánicas comparables a las de elementos estructurales donde no se requieran resistencias altas, como por ejemplo banquetas, blocks, morteros para recubrimiento, entre otras. Sin embargo, no podrían considerarse como elementos estructurales de alta resistencia, esto debido a que los alternativos presentaron parcialmente las fases principales del cemento. Asimismo, los resultados de las pruebas fotocatalíticas, tanto para la degradación de NO_x , como la degradación de colorantes en medio acuoso, corroboraron que la incorporación de TiO_2 y SiC-TiO_2 , permite la funcionalización de la gran mayoría de los materiales cementantes evaluados, mostrando actividad en la conversión de NO_x . En particular, el cementante Cemex blanco con 5% de SiC-TiO_2 incorporado, presentó la mayor actividad (17%). Mientras que en la degradación del colorante IC, se alcanzó hasta un 85%, aunque en general todos los cementantes evaluados presentaron valores de degradación del colorante cercanos al 50%, comparables a los reportados en bibliografía. Lo anterior es una contribución al área de los materiales de construcción, ya que se podrán tener superficies autolimpiantes, y a la vez coadyuvar a la descontaminación del medio ambiente, tanto para la purificación del aire como del agua.

10. AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Nuevo León (PAICYT IT1347-20), al CONACYT (PDCPN-2015-01-105, Fronteras de la Ciencias FC-1725, e infraestructura IT- 301307), a la SEP por el apoyo a través del proyecto P/PROFEXCE-2020-19MSU00, y por el apoyo al becario CVU 957479. A la Dra. Juana María Montoya y a la MC. Karen Reyna del laboratorio del CIIDIT-UANL, por el apoyo en las pruebas de degradación de NO_x , así como al Sr. Gumaro Tovar del laboratorio de Investigación en Materiales de Construcción (LIMC-FIC-UANL), por el apoyo en la elaboración de los morteros, y a todo el personal técnico del Departamento de Ecomateriales y Energía de la FIC-UANL, por el apoyo en los análisis de caracterización de DRX y SEM.

11. REFERENCIAS

- [1] Dr. Carlos Urbilla et al., “Contaminación atmosférica, efectos en la salud respiratoria”, Revista Médica Clínica Las Condes, vol 28, 2017, pp. 111-118.
- [2] Luévano H. Edith and Dr. Martínez de la Cruz, “Photocatalytic stucco for NO_x removal under artificial and by real Weatherism”, Construction and Building Materials, vol. 174, 2018, pp. 302-309.
- [3] Secretaría de Desarrollo Sustentable del Estado de Nuevo León, “Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Nuevo León”, Pro Aire 2015-2025.
- [4] Gobierno del estado de México, Normatividad en calidad de aire, <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnmI=&dc=%27Yw>

- [5] Y.L. Lia, M.Y. Hanb, et al., “Energy consumption and greenhouse gas emissions by buildings: A multiscale, Perspective”, *Building and Environment*, Volume 151, 2019, pp. 240-250.
- [6] Caijun Shi et al., “New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement”, *Cement and Concrete Research*, vol. 41, 2011, pp. 750-763.
- [7] Md. Uzzal Hossain et al., “Global warming potential and energy consumption of temporary works in building construction: A case study in Hong Kong”, *Building and Environment*, Volume 142, 2018, pp. 171-179
- [8] G.L. Guerrini et al., “White cement and photocatalysis, Fundamentals”. Arab International Conference and Exhibition on The Uses of White Cement, Vol. 1., 2008,
- [9] Ing. Eric Sánchez Díaz, “Elaboración de materiales base cemento auto-limpiantes y con baja expansión térmica a temperatura ambiente”, Nuevo León: Tesis Maest. FiC-UANL, 2013.
- [10] Ming-Zhi Guoa et al. “Pathways of conversion of nitrogen oxides by nano TiO₂ incorporated in cement-based materials”, *Building and Environment*, vol. 144, 2018, pp. 412-418.
- [11] Yahya Jani and William Hogland. “Waste glass in the production of cement and concrete” – A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 2, 2014. pp. 1767-1775
- [12] Ângelo, Joana, Andrade, et al. “An overview of photocatalysis phenomena applied to NO_x abatement”, *Environmental Management*, vol. 102, 2013, pp. 29-40.
- [13] E. Luévano-Hipólito and A. Martínez-de la Cruz. “Enhanced Photocatalytic Activity of TiO₂ Rutile by Coupling with Fly-Ashes for the Removal of NO Gases”, *I&EC Research*, vol. 55, 2016, pp. 11512-11519.
- [14] Luévano-Hipólito and A. Martínez. “Photocatalytic stucco for NO_x removal under artificial and by real weatherism”, *Construction and Building Materials*, vol. 174, 2018, pp. 302-309
- [15] Isaías Juárez et al. “Short time deposition of TiO₂ nanoparticles on SiC as photocatalysts for the degradation of organic dyes”, *Torres Research on Chemical Intermediates*, vol.39, 2013, pp.1523–1531.
- [16] Mónica Vazquez, “Empleo de la eucryptita (LiAlSiO₄) para el control de la expansión térmica de geopolímeros fabricados a partir de residuos vítreos y ceniza volante, para ser utilizados como soporte de películas de fotocatalizadores”. Nuevo León: Tesis Maest. FiC-UANL, 2018.

[17] Edith Luévano Hipólito, “Purificación de aire mediante oxidación fotocatalítica de gases contaminantes NO_x: estudio de los fotocatalizadores TiO₂ y ZnO”. Nuevo León, Tesis Doctorado. FFIME-UANL, 2015.

[18] Claude Pierre. “Binders for Durable and Sustainable Concrete”, modern concrete technology, Taylor & Francis, Vol. 1, 2018.

[19] International Standard ISO 22197-1 “Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) — Test method for air-purification performance of semiconducting photocatalytic materials”, First edition 2007-09-01

[20] M.J. Hanus, A.T. Harris, “Nanotechnology innovations for the construction industry”, Nanotechnology innovations for the construction industry, Vol. 58, 2013, pp. 1056–1102.

[21] Yang Lu et al, “Photocatalytic concrete for NO_x abatement: Supported TiO₂ efficiencies and impacts”, Cement and Concrete Research, Vol. 116, 2018, pp. 57-64.

FUNCIONALIZACIÓN DE CEMENTANTES ALTERNATIVOS Y COMERCIALES POR ADICIÓN DE SiC-TiO₂ Y SU EVALUACIÓN FOTOCATALÍTICA EN LA DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUA

Ing. Bianca Giselle Esquivel Alonso – Dr. Isaías Juárez Ramírez
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil.

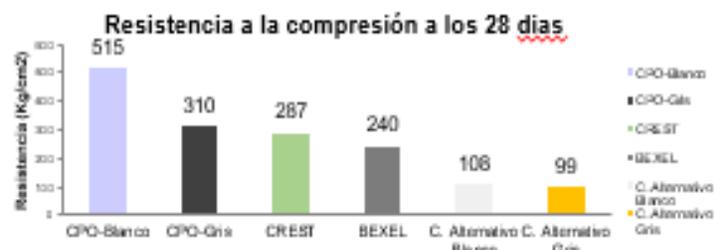
INTRODUCCIÓN

La industria textil, es la segunda industria que mas contamina, debido a sus procesos. En el 2015 el consumo textil percapita fue de 13.1 $kg/Hab/año$ (1). Para crear estas prendas se usan colorantes y esta industria es la principal fuente de emisión. (2) Al año se producen alrededor de 700,000 toneladas de tintes y se estima que un 50% utilizados en la industria textil terminan en las aguas residuales descargadas (3). Debido a sus características de solubilidad y estabilidad, los métodos tradicionales de floculación, sedimentación o adsorción no son útiles en la remoción de estos compuestos. Por lo que se ha estudiado diferentes procesos avanzados de oxidación como la fotocatalisis heterogénea(4).

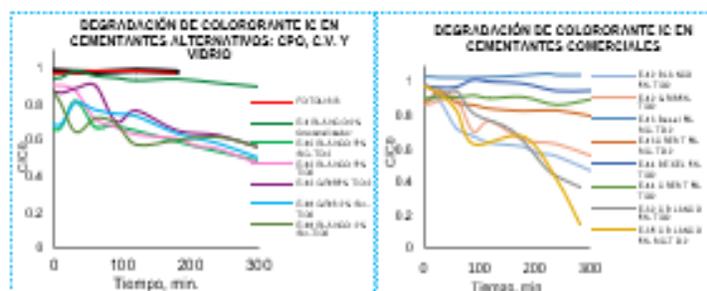
METODOLOGÍA

Se utilizaron cementantes comerciales de la marca Cemex blanco, Cemex gris, Crest y Bexel y se elaboraron morteros conforme a la norma (ASTM C 109), además se elaboraron cementantes alternativos con C.V (40%), , vidrio (10%) y cemento Portland (50%) . A estos diferentes tipos de cementantes se les agrego TiO₂ y SiC-TiO₂ en proporciones de 3% para funcionalizarlos y evaluarlos fotocatalíticamente en pruebas de degradación de IC (20ppm) con luz U.V. . Adicionalmente, se les realizaron pruebas de resistencia mecánica

RESULTADOS



Degradación de IC en cementante bajo luz UV



CONCLUSIONES

La resistencia a la compresión de los cementantes alternativos no dio tan alta como la del cemento convencional, por lo que su uso no sería estructural. De acuerdo con los resultados obtenidos y que son mostrados en la figura se logró obtener hasta un 50% de degradación del colorante IC al utilizar el fotocatalizador SiC-TiO₂ y TiO₂ en el cementante alternativo. En el caso de los cementantes comerciales, el cementante blanco que contiene 5%SiC-TiO₂, dio un 95% de degradación. Los materiales cementantes Alternativos conteniendo 3% y 5% de la mezcla SiC-TiO₂ en proporción 20:80 presentan buena actividad fotocatalitica para la degradación de IC.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Marco Brañez, "Contaminación de los ambientes acuáticos generados por la industria textil", *CAMPUS XXX* 2020, Vol. 23, Núm. 26 (2018).
- (2) A Cortez et al., "Biotechnology applied to the degradation of textile industry dyes", *Universidad y ciencia* vol.28 no.2, 2012.
- (3) Pablo Zamora et al., "Textile Industrial Dyes and optimal wastewater effluents treatment: A short review", *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas* • ISSN: 1390-1869, 2018.
- (4) Juan Matías Chacón et al., "TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE FOTOCATALISIS SOLAR". XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS: CONACYT [FC-2016-1725]. Beca CONACYT-CVU 957479. Universidad Autónoma de Nuevo León [PAICYT-UANL IT1347-20,