



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestro en Artes en Energía y Ambiente

**DISEÑO DE UN REVESTIMIENTO FOTOCATALÍTICO PARA LA MEJORA DE CALIDAD
DEL AIRE EN ESPACIOS INTERIORES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Ing. Javier Antonio García Alarcón

Asesorado por la MSc. Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, febrero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN REVESTIMIENTO FOTOCATALÍTICO PARA LA MEJORA DE CALIDAD
DEL AIRE EN ESPACIOS INTERIORES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JAVIER ANTONIO GARCÍA ALARCÓN

ASESORADO POR LA MSC. INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, FEBRERO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN DE
DEFENSA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i.)
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Marvin Eduardo Mérida Cano
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADORA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE UN REVESTIMIENTO FOTOCATALÍTICO PARA LA MEJORA DE CALIDAD DEL AIRE EN ESPACIOS INTERIORES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 15 de octubre de 2022.

Ing. Javier Antonio García Alarcón

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.110.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN REVESTIMIENTO FOTOCATALÍTICO PARA LA MEJORA DE CALIDAD DEL AIRE EN ESPACIOS INTERIORES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por: **Ing. Javier Antonio García Alarcón**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

Guatemala, febrero de 2024

JFGR/gaoc



Guatemala, febrero de 2024

LNG.EEP.OI.110.2024

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“DISEÑO DE UN REVESTIMIENTO FOTOCATALÍTICO PARA LA MEJORA DE CALIDAD DEL AIRE EN ESPACIOS INTERIORES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA”

presentado por **Ing. Javier Antonio García Alarcón** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y ambiente** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 23 de octubre de 2023

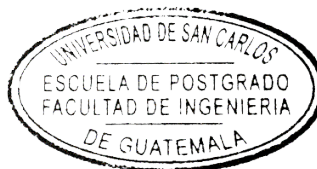
M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el **INFORME FINAL y ARTÍCULO CIENTÍFICO** titulado: **DISEÑO DE UN REVESTIMIENTO FOTOCATALÍTICO PARA LA MEJORA DE CALIDAD DEL AIRE EN ESPACIOS INTERIORES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA** del estudiante **Javier Antonio Garcia Alarcón** quien se identifica con número de carné **201701097** del programa de Maestria En Energía Y Ambiente .

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el **Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014**. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador
Maestria En Energía Y Ambiente
Escuela de Estudios de Postgrado

Oficina Virtual



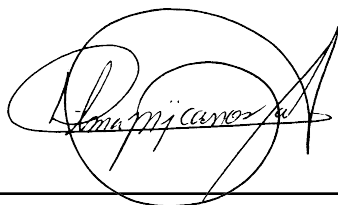
Guatemala, 23 de octubre de 2023

M.A. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimada M.A. Inga. Cordova Estrada

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"DISEÑO DE UN REVESTIMIENTO FOTOCATALÍTICO PARA LA MEJORA DE CALIDAD DEL AIRE EN ESPACIOS INTERIORES EN LA CIUDAD DE GUATEMALA"** de el/la estudiante **Javier Antonio Garcia Alarcón** del programa de **Maestría En Energía Y Ambiente** identificado(a) con número de carné 201701097.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



Mtra. Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Colegiado No. 5947
Asesora de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por darme la salud, fortaleza y sabiduría para llegar a este punto de mi carrera, culminar una meta tan importante en la vida.
Mi madre	Miriam Alarcón, por el amor incondicional, compañía, el consejo, el cariño, la moral, los valores inculcados y por sobre todo enseñarme la bondad.
Mi padre	Calvin García, por el apoyo en momento difíciles, los valores inculcados y el cariño.
Mis hermanos	Luis, Wilber y Mario Alarcón por su consejo, guía y apoyo en todo momento, por darme un norte cuando lo necesito.
Mi tía	Corina García, por el cariño, el amor y el consejo como una segunda madre en mi vida.
Mi novia	Andrea Blanco, por el amor sincero e incondicional, el cariño, el consejo, guía y el apoyo en el tiempo compartido.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante influencia en mi carrera, por ser pública y de acceso a toda la población.
Facultad de Ingeniería	Por ser facultad que apoya al estudiante, y darme los conocimientos necesarios para salir adelante.
Dios	Primero, porque sin él nada de esto podría estar sucediendo.
Mi familia	Por siempre estar cuando más lo necesito, por el apoyo porque sin ellos, esta meta no sería posible.
Mis amigos de universidad	Pablo Rubio, Rodrigo Merck y Javier Cerón, por la guía, la diversión y los momentos de alegría.
Mi asesora	Ingeniera Dilma Janet Mejicanos, por ser un apoyo y guía en todo mi recorrido profesional educativo.

ÍNDICE GENERAL

1

2.2.2.2.	Estado endurecido	12
2.3.	Fotocatálisis	16
2.3.1.	Fotocatálisis heterogénea	17
2.3.2.	Obtención de dióxido de titanio	17
2.4.	Diseño y desarrollo.....	18
2.4.1.	Planificación del diseño y desarrollo	19
2.4.2.	Verificación del diseño y desarrollo	19
2.4.3.	Validación del diseño y desarrollo	20
2.4.4.	Control de cambios del diseño y desarrollo.....	20
3.	RESULTADOS.....	21
3.1.	Datos iniciales tabulados.....	21
3.2.	Resultados de medición tabulados	22
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	27
4.1.	Verificación de resultados	27
4.2.	Comparación con normativas.....	28
4.3.	Factibilidad del producto según resultados	29
	CONCLUSIONES.....	31
	RECOMENDACIONES	33
	REFERENCIAS	35
	APÉNDICE	37

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Tamaño de partículas PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀	6
Figura 2.	Gráfico de calidad de aire sin revestimiento fotocatalítico	22
Figura 3.	Gráfico de CO ₂ con revestimiento fotocatalítico	23
Figura 4.	Gráfico de PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ con revestimiento fotocatalítico	24
Figura 5.	Gráfico de VOCs con revestimiento fotocatalítico.....	24

TABLAS

Tabla 1.	Componentes de calidad del aire	4
Tabla 2.	Usos y proporciones de morteros de cementantes.....	8
Tabla 3.	Los requerimientos para especificar proporciones	9
Tabla 4.	Promedio de datos sin revestimiento fotocatalítico	21
Tabla 5.	Promedio de datos con revestimiento fotocatalítico.....	23
Tabla 6.	Remoción promedio de datos con revestimiento fotocatalítico	25
Tabla 7.	Dosificación de mezcla de revestimiento fotocatalítico	25
Tabla 8.	Comparación niveles de calidad de aire con normativa.....	28

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
EPA	Agencia de Protección Ambiental
VOCs	Compuestos orgánicos volátiles
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₂ O	Formaldehídos
°C	Grados centígrados
h	Horas
ICA/IAQ	Índice de calidad de aire (<i>air quality index</i>)
PA/AQ	Índice de calidad de aire 0-100 (<i>monitor airthinx</i>)
PM	Material particulado
µg	Microgramos
CO	Monóxido de carbono
ppm	Partes por millón
PM ₁	Partículas de menos de 1 micra de tamaño
PM ₁₀	Partículas de menos de 10 micra de tamaño
PM _{2.5}	Partículas de menos de 2.5 micra de tamaño

GLOSARIO

Absorción	Es la cantidad de agua que penetra en los poros de la unidad o espécimen, expresada en unidades de masa/volumen (Aa) o como un % de la masa (peso) seca de la unidad o espécimen (Aa%).
Adición	Material mineral que es incorporado al cemento o al concreto en diferentes proporciones a fin de mejorar o transformar algunas de las propiedades.
ASHRAE	Siglas en inglés de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado es una asociación profesional estadounidense que busca avanzar en el diseño y la construcción de sistemas de calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración.
ASTM	Siglas en inglés de la Sociedad Americana para el ensayo e inspección de los materiales (American Society for Testing and Materials).
Calidad del aire	Está definida como la medida de la condición del aire con respecto a los requerimientos de una o más especies bióticas o cualquier necesidad o propósito humano.

COGUANOR	Siglas de la Comisión Guatemalteca de Normas.
Contaminante	El compuesto molecular del que se está tratando y es considerado como contaminante del aire, este puede ser: CO, NO ₂ , O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , PM ₁ , COV, entre otros.
Control de calidad	Acciones que toma un productor o constructor para asegurar un control sobre lo que se está ejecutando y lo que se está suministrando, para asegurar que se están cumpliendo con las especificaciones y normas de aplicación y con las prácticas correctas de ejecución.
Densidad	Relación entre el volumen bruto y la masa de una unidad o espécimen.
Fraguado	Es la reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de una mezcla de cemento y agua, la cual puede ser un concreto o mortero.
Índice de calidad del aire	El índice de calidad del aire (ICA) es un índice para reportar la calidad de aire diaria, indica que tan limpio o insalubre se encuentra el aire y que efectos a la salud están asociados al asunto.
Insivumeh	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. Organismo adscrito al

Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y
Vivienda de la República de Guatemala.

Material particulado	Pequeñas piezas de material sólido o líquido, tal es el caso de partículas de hollín, polvo, gases, neblina y aerosoles. Las características físicas de las partículas, y cómo se combinan con otras partículas son parte del mecanismo de realimentación de la atmósfera.
Partes por billón	Número de partes de químico encontrado en un billón de partes de un gas, líquido o mezcla de sólidos en particular.
Partes por millón	Número de partes de un químico encontrado en un millón de partes de un gas, líquido o sólido en particular.

RESUMEN

Esta investigación surge como respuesta a una creciente preocupación por la calidad del aire en los espacios interiores de la ciudad de Guatemala, donde la falta de soluciones efectivas para combatir la contaminación del aire plantea un desafío significativo.

La importancia de esta problemática genera la necesidad de explorar nuevas alternativas, y es en este contexto que surge la pregunta fundamental: ¿Puede un revestimiento fotocatalítico tipo mortero ser una solución viable para mejorar la calidad del aire en interiores?

El objetivo principal de este estudio es desarrollar y evaluar un revestimiento fotocatalítico tipo mortero con el fin de abordar las deficiencias actuales en la calidad del aire en los espacios interiores de la ciudad.

La metodología abarca diversas fases, desde el diseño inicial, donde se formulan las proporciones y fórmulas adecuadas del revestimiento, hasta la preparación de especímenes de mampostería con la aplicación del revestimiento y, finalmente, la evaluación exhaustiva de los resultados obtenidos.

Los resultados preliminares indican un avance positivo, evidenciado por una reducción significativa de 28.6 ppm en los niveles de dióxido de carbono (CO₂) en el aire interior.

Este logro inicial sugiere que el revestimiento está demostrando su capacidad para catalizar la conversión de este gas, uno de los principales contaminantes atmosféricos, en compuestos menos perjudiciales. Sin embargo, es importante destacar que la remoción de material particulado no arrojó resultados concluyentes, y la evaluación de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) resultó inconclusa debido a la ausencia de VOCs en las condiciones iniciales.

Ante este panorama, se formulan recomendaciones específicas para perfeccionar la formulación del revestimiento. Se sugiere continuar la investigación y optimizar la fórmula, considerando ajustes en la proporción de ingredientes y explorando nuevos catalizadores que podrían potenciar aún más la eficacia del revestimiento.

Además, se plantea la necesidad de investigar a fondo la capacidad del revestimiento para degradar VOCs y abordar la problemática asociada al material particulado. Estas recomendaciones buscan proporcionar una base sólida para futuras investigaciones, garantizando el desarrollo de un revestimiento fotocatalítico tipo mortero que no solo mejore la calidad del aire interior, sino que también sea eficiente y sostenible a largo plazo.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En esta parte se desarrolla el planteamiento del problema debido a la importancia que tiene el mismo y la correlación entre la parte ambiental y de obra civil.

- Descripción del problema

Según los datos de la oficina Nacional de Estadísticas las enfermedades respiratorias neumonía y bronconeumonía ocuparon el primer lugar entre las diez principales causas de muerte, incluso más que la cantidad de muertes causadas por ataques con armas de fuego.

Los datos de un informe realizado por medios de comunicación en conjunto con una empresa especializada en monitoreo de Calidad del aire, en los meses de febrero y marzo del 2021 (Prensa Libre y Guatevisión), determinó que, la contaminación del aire en espacios interiores se ve muy afectada por la concentración de CO₂, y que es un parámetro indirecto de la buena ventilación que hay dentro de los espacios interiores. Y por compuestos orgánicos volátiles (TVOCs) en el ambiente derivados del uso excesivo de productos para desinfección de áreas como (Gel antibacterial, desinfectantes, aerosoles desinfectantes, entre otros)

La calidad del aire en Guatemala es un tema que ha tenido mucha incidencia en la muerte de muchas personas, y la ingeniería civil no ha proporcionado soluciones para esta problemática, por lo que se aborda como un tema innovador en la ingeniería civil.

Para mejorar la salud de los guatemaltecos y su calidad de vida, con lo que se reducirán los índices de morbilidad de enfermedades respiratorias, y se mejorará la preparación si surgiera una pandemia con efectos en la salud derivada de problemas respiratorios como el COVID-19.

En Guatemala no existen revestimiento para mejorar la calidad del aire, por lo tanto, es necesaria la investigación con estudios que apoyen esta causa.

Debido a que los efectos a la salud y el medio ambiente de los TVOC se resume en: efectos a la salud; que se producen principalmente por inhalación, alergias, náuseas e irritación de ojos y vías respiratorias, falta de memoria, dificultad de concentración, irritabilidad, dolor de cabeza, fatiga. lesiones al hígado, pulmones, riñones y sistema nervioso central. Algunos COV han sido calificados cancerígenos como el benceno o el formaldehído.

- Delimitación del problema

El problema se encuentra delimitado para la ciudad de Guatemala en espacios interiores, con condiciones de temperatura promedio, entre 15 °C y 30 °C, y condiciones de humedad entre 20-90 %.

- Formulación del problema

En Guatemala no existen revestimiento para mejorar la calidad del aire, por lo tanto, es necesaria la investigación con estudios que apoyen esta causa.

- Pregunta central

¿Cómo debe de desarrollarse un revestimiento para mejorar las condiciones de calidad de aire en espacios interiores en Guatemala?

- Preguntas auxiliares

- ¿Cuál es la remoción de un CO_2 con un revestimiento aplicado en interiores en la ciudad de Guatemala?
- ¿Cuál es la remoción de un material particulado (PM) con un revestimiento aplicado en interiores en la ciudad de Guatemala?
- ¿Cuál es la remoción de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en la calidad del aire con el revestimiento tipo mortero?
- ¿Cuál es la proporción exacta del elemento absorbente para la buena disminución de contaminantes en el aire?

OBJETIVOS

General

Desarrollar un revestimiento tipo mortero que mejore las condiciones de calidad de aire interior al ser aplicado en paredes de espacios interiores en la ciudad de Guatemala.

Específicos

1. Calcular la remoción de dióxido de carbono (CO_2) en la calidad del aire en el revestimiento tipo mortero.
2. Estimar la remoción de material particulado (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_1) en la calidad del aire en el revestimiento tipo mortero.
3. Calcular la remoción de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en la calidad del aire con el revestimiento tipo mortero.
4. Determinar la proporción del aditivo absorbente con la mezcla del mortero.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

En el resumen de marco metodológico de esta investigación que servirá como apoyo ambiental para la mejora de la calidad del aire deben tomarse las consideraciones indicadas, a continuación, se describen los pasos clave de la metodología utilizada:

- Diseño del revestimiento

Se desarrolló la fórmula del revestimiento fotocatalítico tipo mortero, definiendo las proporciones adecuadas de los ingredientes, que incluyen cemento, cal y dióxido de titanio (TiO_2). Esta fase de diseño aseguró que el revestimiento tuviera las propiedades necesarias para catalizar la reducción de contaminantes atmosféricos.

- Preparación de espécimen

Se llevó a cabo la preparación del espécimen de mampostería con dimensiones de 1 m x 1 m x 1 m, los cuales simulaban condiciones de espacios interiores. Este espécimen se seleccionó para representar de manera precisa las condiciones reales de aplicación del revestimiento.

- Evaluación de resultados

Se efectuaron mediciones en los especímenes de mampostería antes y después de la aplicación del revestimiento. Estas mediciones abarcaron la concentración de dióxido de carbono (CO_2), partículas de diferentes tamaños (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en el aire interior.

- Comparación de resultados

Se llevaron a cabo comparaciones entre los niveles de contaminantes atmosféricos antes y después de la aplicación del revestimiento, con el propósito de evaluar la efectividad del mismo en la mejora de la calidad del aire interior. Estos resultados fueron contrastados con las normativas establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para determinar si los niveles de contaminantes cumplían con los estándares internacionales de calidad del aire.

- Validación de resultados

Los datos recopilados se sometieron a un proceso de validación para garantizar la precisión y consistencia de los resultados.

- Determinación de Proporción Óptima

Se efectuó un análisis adicional para identificar la proporción óptima del aditivo absorbente (TiO_2) en la mezcla del mortero, con el objetivo de maximizar la eficacia del revestimiento.

- Enfoque de la investigación

El tipo de investigación que se llevó a cabo es un estudio experimental con un enfoque cuantitativo. En este proyecto, se realizó la evaluación de un revestimiento fotocatalítico tipo mortero y su capacidad para mejorar la calidad del aire en espacios interiores de la Ciudad de Guatemala.

El enfoque experimental implicó la aplicación del revestimiento en un espécimen de mampostería en el que se realizaron las mediciones antes y después de la aplicación para evaluar su impacto en la calidad del aire. Este enfoque cuantitativo permitió obtener datos precisos y medibles que respaldaron las conclusiones.

El trabajo encaja perfectamente en la línea de investigación del área ambiental, específicamente en la gestión y el manejo ambiental, con un enfoque en la mitigación de impactos en sistemas atmosféricos.

- Operacionalización de variables

- Variable dependiente

- Parámetros de calidad del aire

- Variable independiente

- Mortero

- Procedimiento de mezcla y aplicación de revestimiento

- En este revestimiento se tomaron en cuenta los materiales siguientes:
 - 1 par de guantes para construcción
 - 1 cuchara de 6" para construcción
 - 24 blocks de (0.15x0.40x0.10) m
 - 1 saco de levantamuro Mixto Listo
 - 1 saco de cemento UGC
 - 1 bolsa de cal
 - 1 kg de dióxido de titanio en polvo
 - 3 litros de agua potable
 - 1 monitor de calidad del aire Airthinx IAQ
- Recursos y materiales

Con el apoyo de dos personas auxiliares para el proyecto se llevó a cabo como recurso humano para la elaboración del espécimen de prueba y seguimiento.

Se realizó la medición con el apoyo de equipos de medición portátil llamados Airthinx IAQ, de la marca Airthinx Inc, de la empresa Guatemalteca Boreal GT S.A. Se utiliza las técnicas de medición de monitoreo remoto y en tiempo real, enfocados en la industria 4.0.

- Método y técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se hizo con el apoyo de equipos Airthinx de monitoreo de calidad de aire interior para comprobación de datos en tiempo real de las características que brinda el mortero aplicado en los espacios interiores.

Estos equipos son brindados y proporcionados por empresas privadas que tienen el servicio de monitoreo de alquiler. Las universidades cuentan con laboratorios de medición de calidad de aire, sin embargo, son equipos estacionarios que no pueden hacer una medición en un punto móvil.

Se utilizó las técnicas de medición de monitoreo remoto y en tiempo real, enfocados en la industria 4.0, como en la figura 8.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, como en muchos países latinoamericanos, el deterioro de la calidad del aire es de las consecuencias indeseables provenientes de diversos factores, entre los que es necesario mencionar: el aumento de la actividad industrial, el crecimiento de la industria de automóviles, sistema de transporte público ineficiente (unidades muy antiguas que emiten contaminantes cantidades a la atmósfera) (Oliva, 2008).

La industria de la construcción se mantiene en constante transformación debido a las nuevas tendencias, buscando siempre la resistencia, durabilidad y estética de cualquier producto a utilizar. Entre la amplia gama de productos, se encuentra la línea de repellos, revestimientos, los cuales son pastas de grano fino compuestas por cemento, cal, carbonato de calcio y compuestos químicos, los cuales se utilizan para enlucir paredes y techos. (Guerrero, 2012, p. XV)

Los revestimientos son el material más importante dentro de un espacio interior porque crean condiciones de confort dentro de la vivienda y son la última capa hacia dentro, después de las pinturas.

Las pinturas convencionales que se aplican en la mayoría de las viviendas con ciertas condiciones de humedad y temperatura empiezan a liberar compuestos orgánicos volátiles (TVOCs) al ambiente y que son dañinos para la

salud arriba de ciertos rangos normados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Sustituyendo el revestimiento convencional y utilizando uno con las mismas propiedades mecánicas y físicas, pero con un agregado que es capaz de mejorar las condiciones ambientales y que actúe contra las pinturas que se aplican en los interiores, se mejoran las condiciones de salud dentro de los espacios interiores a causa de la reducción de contaminación interior, una solución de la ingeniería civil a las personas.

1. ANTECEDENTES

En el trabajo realizado por Segura y Camelo (2019), se evalúa de manera cualitativa y cuantitativa el uso de los materiales de construcción que tienen propiedades foto catalíticas, como lo es el caso del concreto hecho con cemento, agregados de desechos cantera y adicionado con diferentes proporciones de dióxido de titanio TiO_2 , se elaboraron muestras que permiten medir la capacidad de resistencia a la compresión del concreto y la capacidad de degradación de contaminantes encontrados en la atmósfera, de esta forma se logró determinar qué proporción de dióxido de titanio actúa mejor para obtener resultados ideales del diseño de mezcla y lograr ser útil para las obras de infraestructura.

Un grupo de ingenieros mexicanos de la Universidad Nacional Autónoma de México crearon un concreto que purifica el aire, fotocatalítico. “Desarrollamos un sistema constructivo con materiales sustentables que hoy permite brindar vivienda sustentable, asequible y de gran calidad a un bajo costo” (Escamilla, 2021, p. 1).

De acuerdo con la licenciada Ana Mercedes Heredia, un estudio conjunto entre el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso y la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), dirigido en ese momento por la Dra. Pamela Pennington, de la Universidad del Valle de Guatemala, aisló e identificó bacterias del suelo de la planta San Miguel en Sanarate el Progreso, que tienen la capacidad de producir carbonato de calcio (mineral de la piedra caliza). Con esta investigación se determinó que pueden utilizarse formulaciones nutricionales para estos microorganismos a base de desechos industriales.

Según Peralta en la realización de su tesis del Mortero fotocatalítico con TiO_2 para la reducción de la contaminación del aire por emisiones procedentes de vehículos, pretende de alguna manera mejorar la calidad del aire con la aplicación de TiO_2 para la reducción de los contaminantes en el mismo, de tal manera que pueda haber una mejor calidad de vida en el país de aplicación de investigación.

La investigación sobre la fotocatalisis ha aumentado de forma considerable en la última década, como una respuesta a la necesaria solución de los contaminantes atmosféricos, así como los residuos industriales de complejo tratamiento. Del mismo modo, la investigación de su aplicación sobre el hormigón sufre el mismo aumento debido a que las mayores problemáticas con los contaminantes atmosféricos se concentran en las grandes urbes, en muchos casos, causantes de problemas respiratorios y alergias.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se destacan los puntos clave del estudio de investigación.

2.1. Calidad del aire

De acuerdo con Colop (1989) los procesos de la naturaleza que producen contaminantes son clasificados como fuentes biogénicas, las cuales son actividades del hombre que producen contaminantes en el aire se denominan fuentes antropogénicas.

La calidad del aire es un parámetro de cuánto el aire está exento de polución atmosférica y, por lo tanto, qué tan apto para ser respirado, esto depende de la concentración de contaminantes que son dañinos a la salud humana y se encuentran diluidos en un área determinada, a esto se le llama inmisiones. (Colop, 1989, p. 6)

De acuerdo con Colop (1989) la expulsión, a la atmósfera, de sustancias líquidas, sólidas o gaseosas procedentes de fuentes fijas o móviles producto de la combustión o del proceso de una producción se le llama emisión, los contaminantes o componentes que pueden afectar la salud humana, los cuales, al estar altos en determinadas concentraciones, estos son:

- Partículas menores a 10 micras (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1)
- Formaldehidos (CH_2O)

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Compuesto orgánicos volátiles (VOCs)
- Temperatura
- Humedad.

2.1.1. Componentes del aire

El aire atmosférico es una mezcla de gases que, al parecer, ha evolucionado durante varios miles de millones de años hasta llegar a la composición actual. Sus componentes naturales son nitrógeno, oxígeno y algunos gases inertes o nobles. Otros componentes como el dióxido de carbono y el vapor de agua son variables, según el lugar y el tiempo. (Colop, 1989, p. 5)

Tabla 1.

Componentes de calidad del aire

Componente	Volumen %	Peso %
Nitrógeno (N ₂)	78.03	75.58
Oxígeno (O ₂)	20.99	23.08
Argón (Ar)	0.94	1.28
Dióxido de carbono (CO ₂)	0.035	0.053
Neón (Ne)	0.0024	0.0017
Otros gases inertes	0.0024	0.0017
Hidrógeno (H ₂)	0.00005	0.000004

Nota. Tabla de componentes de calidad del aire. Obtenido de M. Colop (1989). *Determinación de los índices de contaminación del aire por la industria en la ciudad Tecún Umán, San Marcos, Guatemala.* (p. 5).

2.1.1.1. Dióxido de carbono

La Organización Panamericana de la Salud señaló que la contaminación del aire en interiores es el segundo factor de riesgo ambiental más significativo que impacta la salud ocupacional. En naciones de economías emergentes y en desarrollo, se atribuyen aproximadamente 3,8 millones de fallecimientos a este problema en el año 2016.

2.1.1.2. Compuestos orgánicos volátiles

Las moléculas que contienen carbono se denominan compuestos orgánicos, y están presentes en todos los organismos vivos. Estos compuestos, cuando son volátiles (denominados COV), tienen la capacidad de transformarse en gases o vapores. Además del carbono, los COV incluyen elementos como hidrógeno, oxígeno, cloro, flúor, bromo, azufre y nitrógeno. Estos compuestos se emiten al quemar combustibles tales como madera, gasolina, carbón y gas natural. Asimismo, se desprenden de productos como disolventes y pinturas, que se suelen usar y guardar tanto en hogares como en lugares de trabajo.

2.1.1.3. Material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁)

Se refiere a las partículas presentes en el aire, ya sean sólidas o líquidas, que permanecen suspendidas. La mayoría de estas pueden representar un riesgo para la salud humana.

Para investigación cuantitativa: según la EPA, (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). No certifica equipos para medición de calidad del aire. Sin embargo, recomienda equipos de medición de calidad de aire en tiempo real porque lo que se debe saber es la tendencia del alza de contaminantes en

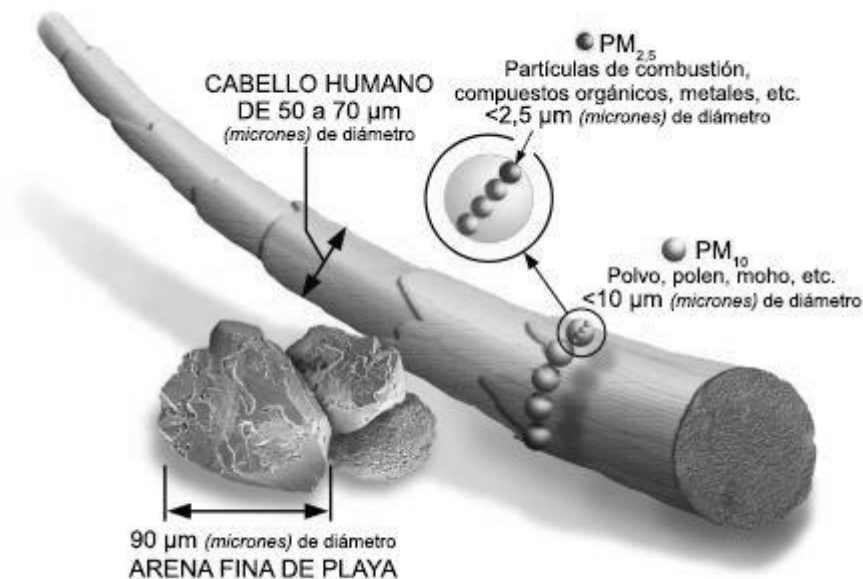
el ambiente. Según los datos medidos se realiza un análisis correlacional entre las variables que intervienen para determinar si el revestimiento tipo mortero mejora las condiciones de calidad de aire para las que esta diseñado.

2.1.1.4. PM_1 (material particulado)

Las partículas más habituales en el aire son: PM_1 : partículas de tamaño $<1\ \mu m$. Ejemplos: polvo ultrafino, partículas de combustión, bacterias y virus.

Figura 1.

Tamaño de partículas PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10}



Nota. El gráfico muestra los distintos tamaños de material particulado. Obtenido de EPA en español (2021). *Tamaño de material particulado.* (<https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>), consultado el 14 de agosto de 2023. De dominio público.

2.1.1.5. PM_{2.5} (material particulado)

El material particulado o también llamado PM_{2.5}, son partículas muy pequeñas en el aire que tiene un diámetro de 2.5 micrómetros (aproximadamente 1 diezmilésimo de pulgada) o menos de diámetro. Si comparamos este tamaño es menos que el grosor de un cabello humano.

2.1.1.6. PM₁₀ (material particulado)

Se les denomina PM₁₀ a pequeñas partículas sólidas o líquidas de polvo que pueden ser en ciertas cantidades distinguibles, cenizas, hollín, partículas metálicas en el aire, cemento o el polen, que se encuentran dispersas en la atmósfera, y que su diámetro aerodinámico es menor que 10 µm.

2.2. Morteros

Pueden definirse como una mezcla de material aglomerante (cemento Portland), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, con propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y son ampliamente utilizados para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros o para recubrirlos, en cuyo caso se le conoce como recubrimiento, repello o revestimiento. (Sabá, 2006, p. 125)

2.2.1. Tipos y usos

Éstos pueden dividirse de la siguiente manera:

“Los aéreos, los cuales endurecen bajo influencia del aire al perder agua y fraguan lentamente por un proceso de carbonatación” (Gudiel, 2009, p. 9).

“Los hidráulicos que endurecen bajo efecto del agua, ya que poseen en su composición elementos que se obtienen por calcinación de calizas no purificadas con sílice y alúmina que les permiten desarrollar resistencias iniciales relativamente altas” (Gudiel, 2009, p. 9).

Tabla 2.

Usos y proporciones de morteros de cementantes

Proporción	Usos
1:1	Mortero muy rico para impermeabilizaciones. Rellenos
1:2	Para la impermeabilización y muros de tanques subterráneos. Rellénelos
1:3	Impermeabilizaciones menores. Pisos
1:4	Pega de ladrillos y bloques en muros. Muros finos
1:5	Muros exteriores: pega de ladrillos, bloques, baldosas y mampostería en general. Muros no muy finos.
1:6 y 1:7	Muros interiores: pega de ladrillos, bloques, baldosas y mampostería en general. Muros no muy finos.
1:8	Pega para construcciones que se demolerán pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones.

Nota. Tabla de proporciones de morteros cementantes. Obtenido de J. Guerrero (2012). *Diseño y evaluación de un mortero fino tipo repello con acabado alisado y propiedades de hidrofobicidad para una empresa de acabados de la construcción.* (http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1263_Q.pdf), consultado el 13 de agosto de 2023. De dominio público.

Tabla 3.*Los requerimientos para especificar proporciones*

Mortero	Tipo	Proporciones por Volumen (materiales comandantes)								Proporción de agregado
		Cemento hidráulico	Cemento para mortero de pega			Cemento de mampostería			Cal hidratada o cal pasta	
			M	S	N	M	S	N		
Cemento-cal	M	1	...	...	...	...	...	...	Más de ¼	
	S	1	...	...	...	...	...	...	Más de ¼ a ½	
	N	1	...	...	...	...	...	...	Más de ½ a 1 ¼	
	O	1	...	...	...	...	...	...	Mas de 1 ¼ a 2 ½	
Cemento para mortero de pega	M	1	...	...	1	...	...	...	...	No menos de 2 ¼ y no más que 3 veces la suma de los volúmenes separados de materiales cementantes
	M	...	1	...	...	...	...	...	...	
	S	½	...	...	1	...	...	...	...	
	S	...	...	1	...	...	...	...	...	
	N	...	...	...	1	...	...	...	...	
	O	...	...	...	1	...	...	...	...	
Cemento de mampostería	M	1	...	...	...	...	...	1	...	
	M	...	...	...	...	1	...	...	...	
	S	½	...	...	...	...	...	1	...	
	S	...	...	...	...	...	1	...	...	
	N	...	...	...	...	...	...	1	...	
	O	...	...	...	...	...	...	1	...	

Nota. Tabla de requerimiento para proporción de morteros. Obtenido de Norma NTG 41050 (2012). *Mortero de pega para unidades de mampostería.* (https://conred.gob.gt/normas/NRD3/6morteros/norma_ntg_41050_astm_c270.pdf), consultado el 13 de agosto de 2023. De dominio público.

2.2.2. Las propiedades de los morteros

El análisis de las características de los morteros puede ser visto como un método para garantizar la calidad. Por lo regular se toman en cuenta propiedades en estado plástico y en estado endurecido. “Si un mortero cumple con dichas

características, fraguará y endurecerá dentro del tiempo y resistencia esperados.”
(Sabá, 2006, p. 127)

2.2.2.1. Estado plástico

El mortero es un material plástico que está compuesto de una mezcla de aglomerante, agua y arena. Este material fue utilizado incluso en las civilizaciones más antiguas. También llamada mezcla plástica.

- **Manejabilidad**

Es una medida de la facilidad de colocación de la mezcla, en las unidades de mampostería o en revestimientos. Está relacionada con la consistencia, la cual se refiere al estado de fluidez del mortero, es decir; qué tan dura (seca) o blanda (fluida) es la mezcla cuando se encuentra en estado plástico, la consistencia del mortero debe cambiar en virtud de las condiciones climáticas en el lugar del proyecto. (Gudiel, 2009, p. 14)

Según Gudiel, en general, se acepta como medida de la manejabilidad, el valor de fluidez de la mezcla obtenido en la mesa de flujo de acuerdo con la Norma NTG 41011 (Especificación estándar de la mesa de flujo para el uso en ensayos de cemento hidráulico). Dentro de los parámetros que disminuyen la consistencia y por tanto la trabajabilidad, están:

- Granulometría y forma de las partículas del agregado fino
- Cantidad de cemento utilizado
- Cantidad de cal utilizado

- Porcentaje de aire
 - Relación agua/cemento
 - El uso de aditivos
 - El tiempo de mezcla
- Retención de agua

Es una medida de la habilidad del mortero para mantener su plasticidad cuando queda en contacto con una superficie absorbente (como una unidad de mampostería). Esto permite que las unidades puedan ser acomodadas, alineadas y niveladas, por lo que resulta ser uno de los factores de mayor incidencia en la adherencia entre morteros y unidades. (Gudiel, 2009, p. 15)

De acuerdo con Gudiel (2009), la retención de agua incide en la velocidad de endurecimiento y la resistencia a la compresión del mortero, ya que afecta la hidratación del cemento, adquiere mayor importancia en el caso de que las unidades utilizadas presenten una alta absorción (las unidades deben de tener un contenido de humedad adecuado, húmedas no mojadas). Puede ser mejorada mediante la adición de cal, dada su capacidad plastificante, aunque hoy en día se tienen otras alternativas igualmente satisfactorias como el uso de aditivos plastificantes y agentes incorporadores de aire.

- Velocidad de endurecimiento

Los tiempos de fraguado inicial y final del mortero deben estar entre límites adecuados. Sin embargo, éstos dependen de diversos factores tales

como: las condiciones del clima, la composición de la mezcla o la mano de obra, hoy en día son fácilmente controlables con el uso de aditivos. La Norma NTG 41017 h12 (Método de ensayo estándar para el tiempo de fraguado de mezclas de concreto por la resistencia a la penetración), indica el procedimiento para este ensayo. (Gudiel, 2009, p.16)

- Contenido de aire en mezcla

De acuerdo a las definiciones realizadas por Gudiel (2009), es una propiedad de gran importancia que afecta su comportamiento en estado fresco y endurecido, puede producirse por efectos mecánicos o de manera intencional por medio de aditivos inclusores de aire. La adherencia disminuye cuando aumenta el contenido de aire.

2.2.2.2. Estado endurecido

Estado que tras el proceso de hidratación ha pasado del estado plástico al estado rígido. Proceso por el cual el concreto gana resistencia y se endurece. Este se divide en varias propiedades, éstas son algunas de ellas:

- Retracción

Es la pérdida de volumen del mortero y se debe principalmente a reacciones químicas de hidratación de la pasta, sobre todo en aquellas con una alta relación agua-cemento. El agregado soluciona el problema en parte, especialmente si es de textura rugosa, ya que forma un esqueleto

que evita los cambios de volumen y el peligro de agrietamiento. En zonas calurosas y de mucho viento el agua de mezclado tiende a evaporarse produciendo tensiones internas en el mortero, que se expresan en la formación de visibles grietas, lo mismo ocurre si la base es muy absorbente. Aparentemente la retracción es proporcional al espesor de la capa de mortero y a la composición química del cemento. (Gudiel, 2009, p. 18)

Podemos encontrar 3 variaciones distintas de volumen que afectan al mortero:

- La retracción hidráulica que se da por humedad.
- La retracción térmica que se da por temperatura.
- La retracción por carbonatación por la composición atmosférica.

“Para evitar la retracción es conveniente usar cementos de baja retracción al secado (puzolánicos o con adición inerte) y agregados de buena granulometría con pocos finos” (Gudiel, 2009, p. 53).

- Adherencia

De acuerdo con los datos de Gudiel (2009), la propiedad más importante del mortero es su habilidad para adherirse a las piezas de mampostería o acero. En general, la adherencia es la capacidad que tiene el mortero de absorber tensiones normales y tangenciales a la superficie que lo une con la estructura. Es de gran importancia, ya que a ella se debe el hecho de que un mortero pueda resistir pandeo, cargas transversales y excéntricas, dándole resistencia a la

estructura. La adhesión tiene un impacto significativo en la resistencia a la flexión y la permeabilidad. En mampostería, para lograr una adhesión óptima, es esencial que la superficie del bloque tenga la máxima rugosidad, facilitando la unión mecánica con el mortero, y que mantenga un nivel de absorción en concordancia con la capacidad de retención de agua del mortero.

Los morteros plásticos, de buena adherencia, buena capacidad de retención de agua y que no requieran de superficies húmedas para su colocación, son los más adaptables y de mayor utilización en mampostería, ya que permiten una íntima unión entre las piezas. Sin curado húmedo, los morteros con el contenido de humedad mayor logran un curado mejor y alcanzan mayor resistencia a la adherencia. Los ensayos en especímenes almacenados al aire favorecen a los morteros que contienen cal porque ésta retiene mayor cantidad de agua. (Gudiel, 2009, p. 19)

- Durabilidad

Según Gudiel (2009), es la resistencia a los agentes externos como las bajas temperaturas, la penetración del agua, desgaste por abrasión, retracción al secado, eflorescencias, agentes corrosivos, o choques térmicos, entre otros, sin deterioro de sus condiciones fisicoquímicas con el tiempo. En general, se cree que morteros de alta resistencia a la compresión tienen buena durabilidad, sin embargo, el uso de agentes inclusores de aire es de particular importancia en ambientes húmedos, ambientes marinos y en general en condiciones de ambiente agresivo.

Los principales factores que influyen en la durabilidad son:

- Congelación
 - Permeabilidad
 - Eflorescencia
- Permeabilidad

Es el proceso de dejar filtrar ya sea agua o aire. Los morteros que son trabajables y uniformes pueden hacer que la mampostería sea mucho más resistente a la penetración del agua. Si un mortero no es trabajable, los albañiles deben golpear suavemente las piezas de mampostería para colocarlas en su lugar. Teniendo como resultado que la junta de mortero no es tan buena, y que pueden producirse grietas que permitan alguna filtración”, esto según Gudiel (2009). El agua es capaz de incorporarse a la mezcla por medio de dos procesos diferentes:

- Por presión hidrostática
- Por capilaridad

“Debido a las características de los morteros estos son casi impermeables en comparación con algunos tipos de unidades y en la interfaz de estos con el mortero, por esta razón esta propiedad debe estudiarse dentro del conjunto cemento-mortero-unidad de mampostería” (Gudiel, 2009, p. 21).

- Eflorescencia

Según Gudiel (2009), es la cristalización de las sales solubles y es causada por el movimiento de agua de adentro hacia fuera de la pared. Ya que

todos los materiales de mampostería contienen sales solubles en agua, que, al contacto con ella, se cristalizan, la cal hace al mortero menos permeable y así evita la eflorescencia.

- **Apariencia**

Es una característica de suma importancia en el mortero debido a que su apariencia, especialmente en mampostería está expuesta. La plasticidad de la mezcla, la dosificación y la selección adecuada de cada uno de sus componentes son de suma importancia en la colocación y el acabado de superficies. La textura y el color son capaces de mejorar con aditivos especiales o con colorantes inorgánicos.

2.3. Fotocatálisis

Se basa en la aplicación de las propiedades fotocatalíticas que se le han agregado al diseño de mezcla de mortero, es importante relacionar esta propiedad con la fotosíntesis, ya que esta utiliza la energía solar como un activador para iniciar el proceso auto limpiante y descontaminante combatiendo así los principales contaminantes encontrados en la atmósfera, dióxido de carbono (CO_2), compuestos orgánicos volátiles (COVs), material particulado (PM)) convirtiéndolos en compuestos inocuos que no afectan a la salud. La fotocátalisis es un proceso que aumenta la velocidad de reacción de la oxidación natural de los compuestos orgánicos a sustancias inofensivas para el ser humano. (Segura y Camelo, 2019, p. 17)

2.3.1. Fotocatálisis heterogénea

De acuerdo con Segura y Camelo (2019), este proceso avanzado de oxidación está definido como la aceleración de una fotorreacción mediante la presencia de un catalizador, el cual, al ser activado por la absorción de la luz, acelera el proceso e interacciona con la sustancia contaminante a través de un estado excitado (C^*) o bien mediante la aparición de pares de electrón-hueco. Los electrones excitados son transferidos hacia la especie reducible, a medida que el catalizador acepta electrones de la especie oxidable que ocuparán los huecos ($e^- - h^+$); de esta manera, el flujo neto de los electrones será nulo y el catalizador permanecerá inalterado, y generará reacciones de óxido-reducción que provocan la degradación y la mineralización de la sustancia tratada.

La fotocatálisis heterogénea con el catalizador TiO_2 causa una total mineralización de una amplia gama de compuestos orgánicos (alcanos, alquenos, alcohol, pesticidas).

2.3.2. Obtención de dióxido de titanio

Según Segura y Camelo (2019) el dióxido de titanio es el pigmento inorgánico más importante en la industria. Se puede encontrar en la naturaleza como; brookita, rutilo y anatasa. Estos dos últimos se elaboran industrialmente en enormes cantidades. El dióxido de titanio es una de las sustancias más blancas existentes. Es seguro, barato y abundante en la Tierra. Casi siempre es utilizado en procesos de oxidación avanzada fotocatalizada, también en la industria cosmética y en la industria alimentaria. Este elemento/compuesto fue identificado por primera vez en el año 1791.

Segura y Camelo (2019), en su investigación menciona que el dióxido de titanio es un compuesto que puede ser extraído de manera industrial de algunos minerales como lo son el rutilo y la anatasa, se lleva a cabo a través de un proceso químico, que es capaz de eliminar las impurezas hasta obtener un polvo de tes blanco que es el dióxido de titanio.

De acuerdo con Segura y Camelo (2019), al momento de ser extraído de la naturaleza, se encuentra demasiado impuro como para poder comercializarse, es por eso por lo que se somete a un proceso de purificación. Este producto es un semiconductor sensible a la luz que absorbe radiación electromagnética cerca de la región UV. Es anfotérico y muy estable químicamente, no es inflamable y puede causar irritación si no es manipulado con cuidado. Se puede diluir en ácido sulfúrico concentrado y en ácido hidrofúrico, su fórmula química corresponde a TiO_2 .

2.4. Diseño y desarrollo

“El diseño y desarrollo de nuevos productos es crucial para la supervivencia de la mayoría de las industrias” (Guerrero, 2012, p. 7). Aunque existen algunas que experimentan muy poco cambio en sus productos, la mayoría de las industrias deben revisarlas en forma constante.

Según Guerrero (2012) las industrias que cambian con rapidez, la introducción de nuevos productos es una forma de vida y se han desarrollado enfoques muy sofisticados para presentar nuevos productos. En 2021 es indispensable pensar en la innovación de los productos hacia una industria verde, enfocada en mejorar las condiciones de vida y las condiciones ambientales de las personas.

El diseño del producto es un prerequisite para la producción. El resultado de la decisión del diseño del producto se transmite a operaciones en forma de especificaciones del producto. En estas especificaciones se indican las características que se desea tenga el producto y así se permite que se proceda con la producción. (Guerrero, 2012, p. 7)

2.4.1. Planificación del diseño y desarrollo

Se planifica y controla el diseño y desarrollo del producto. Durante la planificación del diseño y desarrollo, se debe determinar:

- Las etapas del diseño y desarrollo.
- La revisión, verificación y validación, apropiadas.
- Las responsabilidades y autoridades para el diseño y desarrollo.

Se gestionan las interfaces entre los diferentes grupos involucrados en el diseño y desarrollo para asegurarse de una comunicación eficaz y una clara asignación de responsabilidades. Los resultados de la planificación deben actualizarse, según sea apropiado, a medida que progresa el diseño y desarrollo (Guerrero, 2012).

2.4.2. Verificación del diseño y desarrollo

Se debe realizar, de acuerdo con lo planificado, para asegurarse que los resultados del diseño y desarrollo cumplen los requisitos de los elementos de entrada del diseño y desarrollo. Deben mantenerse registros de los

resultados de la verificación y de cualquier acción que sea necesaria.

(Guerrero, 2012, p. 10)

La verificación se realizó a través de la data recolectada por los equipos de monitoreo remoto Airthinx IAQ, que almacenan datos en la nube, y son descargables en archivos .csv. Esto con la finalidad de hacer una verificación de resultados confiable y se puedan cumplir los objetivos del desarrollo del revestimiento.

2.4.3. Validación del diseño y desarrollo

Se realizó la validación del diseño y desarrollo de acuerdo con lo planificado para asegurarse de que el producto resultante es capaz de satisfacer los requisitos para su aplicación especificada o uso previsto, cuando sea conocido. Siempre que sea factible, la validación debe complementarse antes de la entrega o implementación del producto.

“Deben mantenerse registros de los resultados de la validación y de cualquier acción que sea necesaria” (Guerrero, 2012, p. 10).

2.4.4. Control de cambios del diseño y desarrollo

Según la sección 8 de la normativa ISO 9001:2015, los cambios del diseño y desarrollo deben identificarse y mantenerse registros. Los cambios deben revisarse, verificarse y validarse, según sea apropiado y aprobarse antes de su implementación. La revisión de los cambios del diseño y desarrollo deben incluir la evaluación del efecto de los cambios en las partes constitutivas y en el producto ya entregado. Deben mantenerse registros de los resultados de la revisión de los cambios y de cualquier acción que sea necesaria.

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados que abarcan tanto el estado inicial como el posterior a la aplicación del revestimiento fotocatalítico. Estos resultados permiten observar de manera tangible la transformación lograda en la calidad del aire.

3.1. Datos iniciales tabulados

Los datos tabulados, son datos iniciales/base de calidad del aire interior en condiciones de temperatura y humedad similares a las condiciones que se somete el revestimiento fotocatalítico tipo mortero.

Tabla 4.

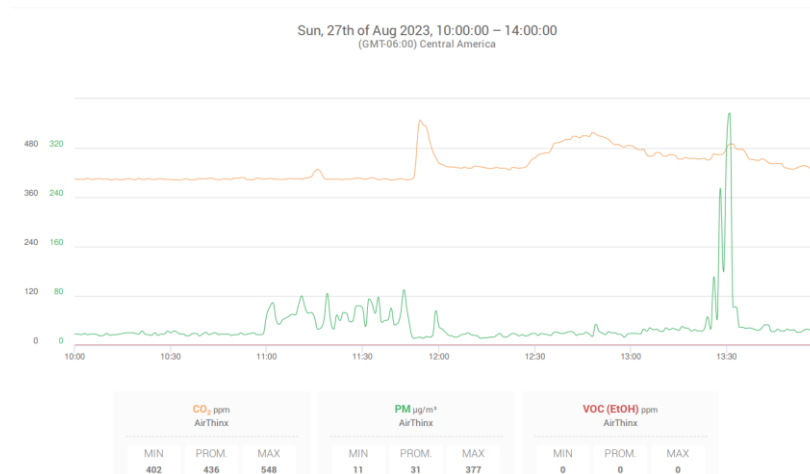
Promedio de datos sin revestimiento fotocatalítico

Timestamp (Guatemala)	CO ₂ (ppm)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	PM1 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	VOC (EtOH) (ppm)	VOC (Isobutylene) (ppm)
28/8/2023								
10:00- 14:00:00	435.8	27.8	59.4	12.9	19.5	22.2	0	0

Nota. Detalle de datos de calidad de aire sin haber aplicado el revestimiento. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 2.

Gráfico de calidad de aire sin revestimiento fotocatalítico



Nota. El gráfico muestra la calidad del aire sin revestimiento. Elaboración propia, realizado con Airthinx.

3.2. Resultados de medición tabulados

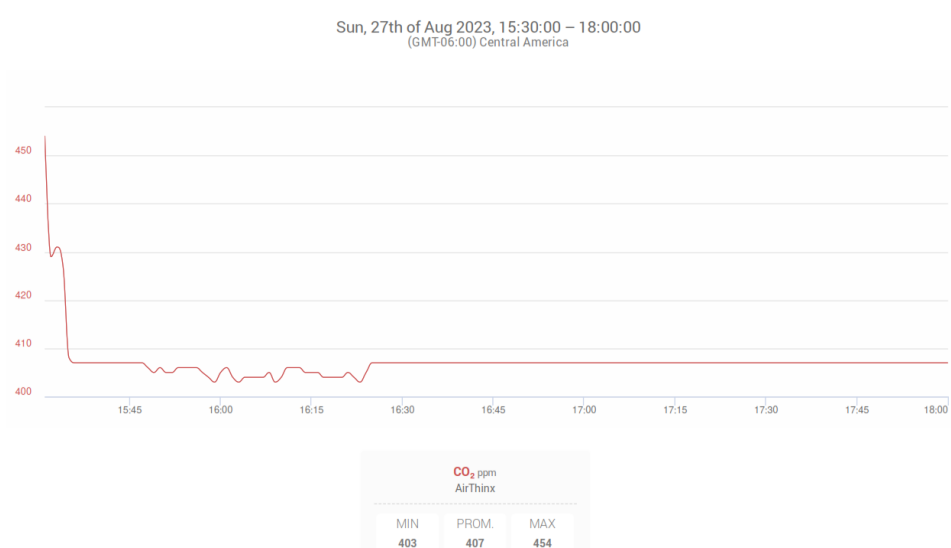
Los datos tabulados, son datos de calidad del aire interior en condiciones de temperatura y humedad similares a las condiciones iniciales que se midieron luego de aplicar el revestimiento fotocatalítico tipo mortero en las paredes interiores del espécimen de mampostería.

Tabla 5.
Promedio de datos con revestimiento fotocatalítico

Timestamp (Guatemala)	CO ₂ (ppm)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	PM1 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	VOC (EtOH) (ppm)	VOC (Isobutylene) (ppm)
28/8/2023								
15:30- 18:00:00	407.20	24.96	88.93	15.23	22.18	23.45	0.00	0.00

Nota. Detalle de datos con revestimiento aplicado. Elaboración propia, realizado con Excel.

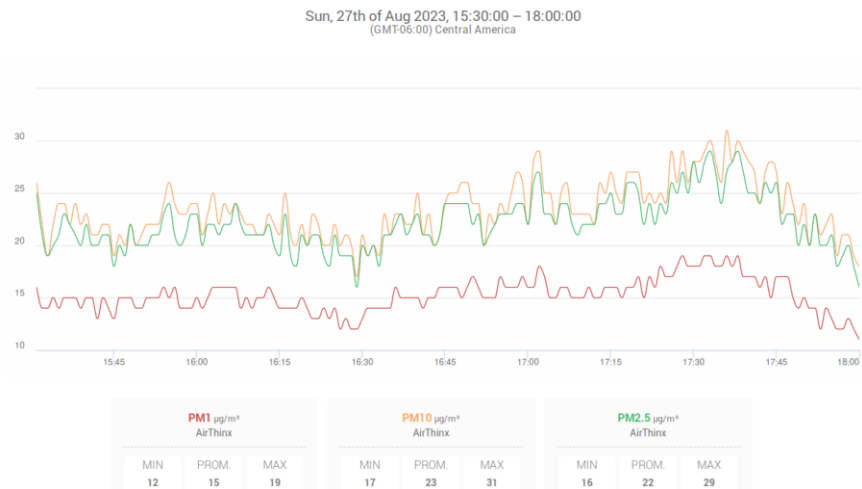
Figura 1.
Gráfico de CO₂ con revestimiento fotocatalítico



Nota. Se muestra el gráfico de CO₂ con revestimiento aplicado. Elaboración propia, realizado con Airthinx.

Figura 2.

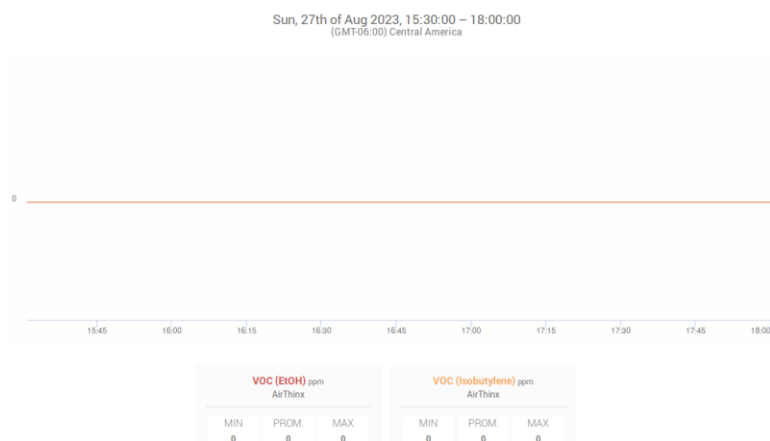
Gráfico de PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 con revestimiento fotocatalítico



Nota. Se muestra gráfico de material particulado de distintos tamaños con el revestimiento. Elaboración propia, realizado con Airthinx.

Figura 3.

Gráfico de VOCs con revestimiento fotocatalítico



Nota. Se muestran los VOCs con revestimiento aplicado. Elaboración propia, realizado con Airthinx.

Tabla 6.*Remoción promedio de datos con revestimiento fotocatalítico*

Timestamp (Guatemala)	CO ₂ (ppm)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	PM1 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	VOC (EtOH) (ppm)	VOC (Isobutylene) (ppm)
% de remoción	7.02 %	11.38 %	-33.20 %	-15.30 %	-12.1 %	-5.30 %	0 %	0 %
Resultado	Mejoró	Mejoró	No Mejoró	No Mejoró	No Mejoró	No Mejoró	Igual	Igual

Nota. Detalle del promedio de remoción de parámetros de IAQ. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 7.*Dosificación de mezcla de revestimiento fotocatalítico*

Material	Cemento	Cal	TiO ₂
Relación	1	4	1/4

Nota. Detalle de dosificación de mezcla para mortero. Elaboración propia, realizado con Excel.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la sección siguiente, se comparó la eficacia demostrada por el revestimiento fotocatalítico en relación con la mejora de la calidad del aire. Un análisis de los datos presentados en la sección anterior reveló los cambios observados en los niveles de contaminantes evaluados. Además, se examinaron cómo estos resultados se alinearon con las expectativas iniciales y cómo podrían haber impactado en la resolución de problemas relacionados con la polución y la salud pública. Esta discusión proporciona un marco interpretativo esencial para comprender el significado y el alcance de los hallazgos obtenidos.

Se evaluó su idoneidad para aplicarse en espacios interiores en la ciudad de Guatemala, así como la factibilidad del producto basada en los costos en comparación con la efectividad del revestimiento en espacios interiores.

4.1. Verificación de resultados

Los datos relevantes sobre el revestimiento fotocatalítico para la optimización de la calidad del aire ayudan a crear ambientes saludables para quienes habitan o utilizan dichos espacios.

El revestimiento tipo mortero aplicado en las paredes del espécimen de mampostería mostró una reducción significativa en los niveles de dióxido de carbono. Este hallazgo identificó que el dióxido de carbono es uno de los principales contaminantes atmosféricos con efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente. La disminución observada sugiere que el revestimiento fotocatalítico demostró su capacidad para catalizar la conversión

de este gas en compuestos menos perjudiciales. Sin embargo, es importante destacar que se requiere un análisis más detallado para comprender completamente los mecanismos subyacentes y asegurar que esta reducción sea sostenible en el tiempo.

4.2. Comparación con normativas

Además de evaluar la eficacia del recubrimiento en la mejora de la calidad del aire, se compararon los resultados con las normativas internacionales actuales. Esta investigación buscó verificar la conveniencia de usar dicho recubrimiento en espacios internos de la ciudad de Guatemala, asegurando que los niveles de polución estuvieran dentro de los límites permitidos.

Tabla 8.

Comparación niveles de calidad de aire con normativa

Día / Hora	CO ₂ (ppm)	PM1 (µg/m³)	PM2.5 (µg/m³)	PM10 (µg/m³)	VOC (EtOH) (ppm)	VOC (Isobutylene) (ppm)
28/8/2023 15:30-18:00:00	407.20	15.23	22.18	23.45	0.00	0.00
Límite máximo según OMS	800.00	20.00	37.00	50.00	6.00	0.70
¿CUMPLE?	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Nota. Detalle comparativo de normativa vs los resultados obtenidos. Elaboración propia, realizado con Excel.

La comparación con las normativas internacionales, representada en la tabla 8, proporciona una evaluación objetiva de los resultados. Los niveles de

CO₂, material particulado (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀), y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) se contrastan con los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los resultados muestran un cumplimiento satisfactorio con todas las normativas, lo que respalda la idoneidad del revestimiento para su aplicación en espacios interiores en la ciudad de Guatemala.

Los parámetros clave evaluados incluyen el dióxido de carbono (CO₂), material particulado de diferentes tamaños (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Los resultados se contrastan con los límites establecidos por organismos reguladores a nivel internacional para asegurar que los niveles de estos contaminantes estén dentro de rangos aceptables para la salud humana en entornos interiores. Esta comparación no solo garantiza la seguridad y el bienestar de los ocupantes de los espacios interiores, sino que también contribuye a la evaluación de la factibilidad del producto.

Se consideran tanto los beneficios proporcionados por el revestimiento en términos de mejora de la calidad del aire como los costos adicionales asociados con su implementación.

4.3. Factibilidad del producto según resultados

Se analizó no solo que los resultados en cuanto a la reducción de calidad del aire fueron satisfactorios, sino también que podía ser costeable en una obra de construcción.

El costo de aplicación más los materiales de un mortero convencional por metro cuadrado es de Q 30.00, mientras que el costo de aplicación de un mortero fotocatalítico fue de Q 40.00 por metro cuadrado.

A pesar de que el mortero fotocatalítico arrojó un precio inicial más alto, su capacidad para optimizar la calidad del aire y favorecer un ambiente más saludable puede justificar ese aumento en el costo. Era esencial analizar cuidadosamente estos costos adicionales en relación con los beneficios tangibles para la salud pública y el medio ambiente. Además, se debía considerar la posible disminución de costos asociados con la salud y la mitigación de los efectos negativos de la contaminación. Este análisis económico, junto con los resultados de calidad del aire, proporcionó una base sólida para evaluar la viabilidad integral de la implementación del mortero fotocatalítico en proyectos de construcción futuros.

CONCLUSIONES

1. La implementación del revestimiento tipo mortero logró una reducción significativa de 28.6 ppm en los niveles de dióxido de carbono (CO_2), demostrando su capacidad para mejorar la calidad del aire en espacios interiores.
2. Aunque no se alcanzó la remoción total de material particulado (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}), se observó que el revestimiento mantuvo las condiciones de calidad del aire interior de manera consistente con las condiciones iniciales. Esto resalta su eficacia para conservar la calidad del aire exterior al ingresar al ambiente interior, fundamental para la salud y el bienestar de los ocupantes.
3. Respecto a la remoción de compuestos orgánicos volátiles (VOCs), se evidenció que tanto en las condiciones iniciales como con el revestimiento fotocatalítico, los niveles de VOCs se mantuvieron en 0 ppm. Esto indica que la presencia de VOCs no fue detectada en este estudio específico, limitando la evaluación de la capacidad del revestimiento para eliminar estos compuestos.
4. La proporción identificada del aditivo absorbente (TiO_2) en la mezcla del revestimiento fotocatalítico tipo mortero, establecida en 1:4:1/4 = Cemento/Cal/ TiO_2 , proporciona una base sólida para investigaciones futuras y ajustes en la formulación del revestimiento, con el potencial de influir en su eficacia y durabilidad.

RECOMENDACIONES

1. Considerar los resultados positivos en la remoción de dióxido de carbono (CO_2), se sugiere persistir en la investigación y optimización de la formulación del revestimiento. Explorar ajustes en la proporción de los ingredientes o la introducción de nuevos catalizadores podría potenciar aún más su eficacia en la captura de CO_2 .
2. Evaluar la viabilidad de modificar la composición del revestimiento para abordar de manera más efectiva la problemática del material particulado. La incorporación de materiales con propiedades de filtración podría ofrecer mejoras significativas en la capacidad del revestimiento para retener partículas contaminantes del aire.
3. Explorar la aplicación del revestimiento en entornos donde la presencia de VOCs sea más pronunciada debido a que en la evaluación de la remoción de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) no fue posible en las condiciones iniciales. Realizar pruebas en ambientes con fuentes conocidas de VOCs permitiría una mejor comprensión de la capacidad del revestimiento para degradar estos compuestos.
4. Llevar a cabo investigaciones adicionales para determinar si ajustes en la proporción del aditivo absorbente (TiO_2) podrían influir en la eficacia y durabilidad del revestimiento fotocatalítico. La realización de pruebas comparativas con diferentes relaciones de ingredientes podría proporcionar información valiosa para alcanzar la combinación óptima. Además, se recomienda realizar análisis en condiciones de horario

similares para definir si hay una reducción significativa, debido a que la prueba actual se realizó el mismo día de la aplicación del revestimiento.

REFERENCIAS

- Colop, M. (1989). *Determinación de los índices de contaminación del aire por la industria en la ciudad Tecún Umán, San Marcos, Guatemala*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1478_Q.pdf
- Escamilla, V. (2021). *Ingenia Concretos, casas sin contaminación que no cuestan más*. Forbes México. <https://www.forbes.com.mx/30-promesas-2021-emprendedores-ingenia-concretos-casas-contaminacion-unam-aragon/>
- Gudiel, F. (2009). *Evaluación de la incidencia del contenido de cemento del mortero en el comportamiento del conjunto cemento-mortero-unidad de mampostería, por medio del ensayo de prismas a compresión, corte y adherencia*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2987_C.pdf
- Guerrero, J. (2012). *Diseño y evaluación de un mortero fino tipo repello con acabado alisado y propiedades de hidrofobicidad para una empresa de acabados de la construcción*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1263_Q.pdf
- Norma Técnica Guatemalteca NTG 41050 (2012). *Mortero de pega para unidades de mampostería*.

https://conred.gob.gt/normas/NRD3/6morteros/norma_ntg_41050_astm_c270.pdf

Oliva S. (2008) *Calidad del aire en Guatemala compilación de la información existente*. [Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/07/07_2007.pdf

Sabá M., (2006) *Evaluación de la incidencia de la cal en las propiedades físico-mecánicas de tres tipos de mortero de albañilería*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2619_C.pdf

Segura M., y Camelo M. (2019) *Evaluación de las propiedades fotocatalíticas de prefabricados para obras de infraestructura vial en concreto adicionado con dióxido de titanio (tio₂)*. [Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia]. Archivo digital <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5759>

APÉNDICE

Apéndice 1.

Matriz de coherencia y conceptualización

Problema	Objetivo general	Marco teórico	Hipótesis	Variables	Indicadores
Mala calidad del aire en espacios interiores en la ciudad de Guatemala	Desarrollar un revestimiento tipo mortero que mejore las condiciones de calidad de aire interior al ser aplicado en paredes de espacios interiores en la ciudad de Guatemala.	Calidad del aire y sus componentes	La calidad de aire en espacios interiores es de 2 a 5 veces peor que la que existe en exteriores.	Calidad del aire	Cantidad de CO ₂ en el aire
Pregunta principal	Objetivos específicos				Material particulado en espacio interior
¿Se tiene una mala calidad de aire en espacios interiores en Guatemala?	Estimar la remoción de material particulado (PM10, PM2.5 y PM1) en la calidad del aire en el revestimiento tipo mortero.	Morteros y sus usos			Cantidad de VOCs en el aire
Preguntas secundarias				Mortero	
¿Existe creación de gases en procesos productivos en el área industrial del país?	Determinar la cantidad de dióxido de carbono (CO ₂) que reduce el revestimiento tipo mortero.	Fotocatalis			Porcentaje de aditivo absorbente
¿Las actividades cotidianas del ser humano dañan la calidad del aire?					

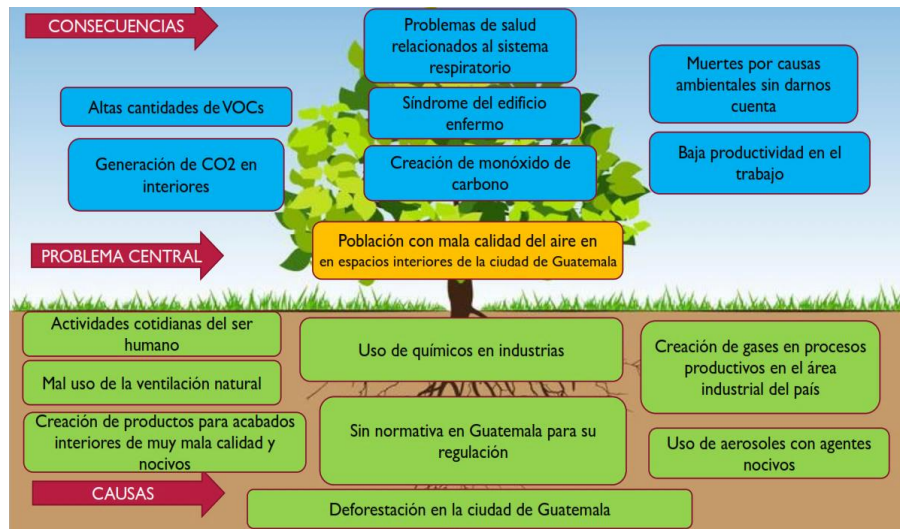
Continuación del apéndice 1.

Problema	Objetivo general	Marco teórico	Hipótesis	Variables	Indicadores
Preguntas secundarias	Objetivos específicos				
¿Los productos en el mercado para acabados interiores son de muy mala calidad y nocivos?	Determinar la cantidad de compuestos orgánicos volátiles (TVOCs) que reduce el revestimiento tipo mortero. Determinar la proporción del aditivo absorbente con la mezcla del mortero.				

Nota. Detalle de matriz de coherencia y conceptualización. Elaboración propia.

Apéndice 2.

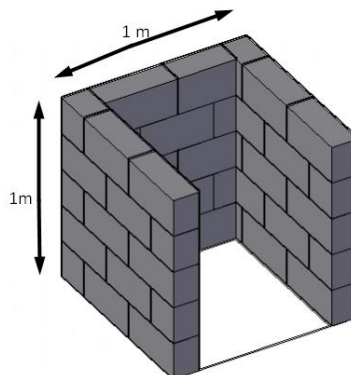
Árbol del problema



Nota. Detalle de árbol de problemas. Elaboración propia.

Apéndice 3.

Especimen para realización de pruebas a revestimiento



Nota. Detalle de espécimen de block para pruebas de tesis. Elaboración propia, realizado con AutoCAD 3D.

Apéndice 4.

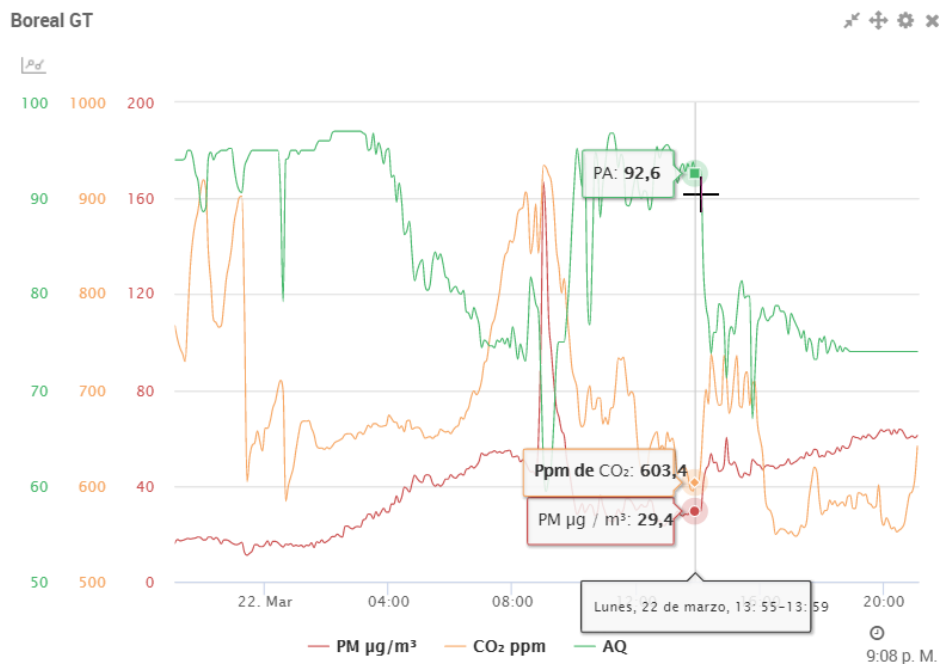
Variables y dimensiones

Variables	Dimensiones
Calidad del aire	CO ₂ , PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , VOCs.
Mortero	Revestimiento fotocatalítico

Nota. Detalle de variables y dimensiones de trabajo de graduación. Elaboración propia.

Apéndice 5.

Calidad del aire en tiempo real



Nota. Se muestra la medición de calidad de calidad de aire en tiempo real, para demostración de tecnología de monitor de calidad de aire Airthinx IAQ. Elaboración propia, realizado con Airthinx.