

Evaluación de revestimiento para exteriores con propiedades autolimpiantes y descontaminantes con adición de dióxido de titanio*

Evaluation of an exterior coating with self-cleaning and decontaminating properties with the addition of titanium dioxide

Esp. Ing. Rosa Goncalves R.

<https://orcid.org/0009-0008-9538-0291>

Correo-e: rosagonc@yahoo.com

Recibido: 5-04-2024 | Aceptado: 5-05-2024

Resumen

Una investigación realizada en el marco del postgrado en Desarrollo Tecnológico de la Construcción en el IDEC, FAU-UCV, busca alternativas que depuren la contaminación en las ciudades. Se muestran los resultados de un experimento cuyo objetivo es verificar el efecto descontaminante de la adición de dióxido de titanio (TiO_2) en revestimientos, así como el porcentaje de adición más adecuado utilizando, como gas contaminante, dióxido de nitrógeno (NO_2). Se diseñó un procedimiento experimental elaborando probetas revestidas con un friso cuya proporción arena/cemento es de 3:1 añadiéndoles TiO_2 en porcentajes 5%; 7,5 % y 10%, respecto al peso total de los materiales. Las probetas son colocadas en cámaras transparentes, herméticas y expuestas al sol durante 7 días. Se inyecta gas NO_2 con una concentración aproximada de 0,30 mg/L, excediendo el límite máximo recomendado por la Organización Mundial de la Salud de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mediante espectrofotometría, se analizan las muestras midiendo la concentración del gas en cada cámara a los 1, 3 y 7 días. La prueba demuestra que el TiO_2 actúa como descontaminante mediante fotocátalisis y la concentración que se mostró más efectiva es 5%. También se observó que este químico tiene comportamiento hidrofílico, aportando capacidad autolimpiante y expandiendo hasta 2,5 veces la vida útil del revestimiento.

Descriptores

Descontaminación; friso descontaminante; espectrofotometría; fotocátalisis; dióxido de titanio.

Abstract

A research carried out within the framework of the Postgraduate course in Technological Development of the IDEC, FAU, UCV, seeks alternatives that purify pollution in cities, the results of an experiment are shown whose objective is to verify the decontaminating effect of the addition of titanium dioxide (TiO_2) in coatings, as well as the most appropriate addition percentage. Using nitrogen dioxide (NO_2) as a polluting gas, an experimental procedure was designed, making specimens covered with a frieze whose sand:cement ratio is 3:1, adding TiO_2 in percentages 5; 7.5 and 10%, with respect to the total weight of the materials. The test tubes are placed in transparent, airtight chambers and exposed to the sun for 7 days. NO_2 gas is injected with an approximate concentration of 0.30 mg/L, exceeding the World Health Organization's maximum limit of 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Using spectrophotometry, the samples are analyzed by measuring the gas concentration in each chamber at 1, 3 and 7 days. The test shows that TiO_2 acts as a decontaminant through photocatalysis and the most effective concentration is 5%. In addition, it was demonstrated that this chemical provides hydrophilic behavior, providing self-cleaning capacity and expanding up to 2.5 of the coating's lifespan.

Descriptors

Decontamination, spectrophotometry, photocatalysis, coating, titanium dioxide.

*Esta investigación es una síntesis de los resultados del Trabajo Especial de Grado realizado por su autora en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción-IDEC (FAU UCV), en el marco de la VII Especialización en Desarrollo Tecnológico de la Construcción, como parte de su programa de postgrado. Mi agradecimiento por el apoyo recibido del cuerpo profesoral de este instituto.

La contaminación es uno de los problemas más significativos de la actualidad que ocasionan problemas de diversa índole como la destrucción de ecosistemas enteros, afecciones graves a la salud de los seres humanos y deterioro de las estructuras. Todo por la exposición a distintos agentes contaminantes que están en la atmósfera.

S. P. Blöß (2008), indica que el problema de la contaminación en las grandes ciudades y otros conglomerados se debe a la presencia en el aire de óxidos de nitrógeno que en su mayoría provienen de los automóviles y de la combustión de combustibles fósiles en las centrales térmicas. Los seres humanos son los principales responsables de este problema ya que las actividades domésticas e industriales que realizan afectan enormemente el equilibrio de los gases que componen la atmósfera. Estos gases proveen las condiciones óptimas para el desarrollo normal y armónico de la vida en el planeta.

Dada esta problemática se han realizado numerosas investigaciones para encontrar métodos eficaces que disminuyan estas consecuencias. Entre ellas destacan las que buscan limpiar la atmósfera, pero generalmente se hacen en espacios controlados mediante aplicación de otros químicos.

En un espectro más amplio han surgido diversas investigaciones y lo más actual es utilizar químicos con propiedades fotocatalizadas (uso de luz ultravioleta). El más utilizado es el dióxido de titanio (TiO_2) el cual descompone compuestos de azufre, nitrógeno y carbono en moléculas inocuas para la salud. De aquí resulta una solución efectiva y económica que, además, puede ser utilizada en espacios abiertos.

El proceso de fotocatalisis resulta un método eficiente para la transformación de contaminantes en productos inofensivos para los seres humanos. A través del uso de la energía solar –como indica Blöß (2008)– se capturan los radicales libres generados por la absorción de la luz en la superficie semiconductora, para

usarlos en las reacciones de transferencia de electrones que generan, a su vez, transformaciones de los materiales.

Se ha usado el TiO_2 descontaminantes y autolimpiantes en superficies con distintos medios de soporte tales como pinturas, concretos, placas y hasta en lonas publicitarias. Un ejemplo de esto se dio en la Gran Vía de la ciudad de Madrid en 2015, donde se instaló una calle con una superficie de 1000 m². Los creadores aseguran que tiene un efecto descontaminante similar al producido por mil árboles o a reducir el tráfico en 50 coches (Vallés, 2015). Pero se genera la interrogante de si esto es suficiente para disminuir los valores reales que sobrepasan muchas veces los límites máximos permitidos por la Organización Mundial de la Salud de 40 $\mu\text{gNO}_2/\text{m}^3$ de aire.

Esta investigación principalmente explora cómo este químico, al ser utilizado en revestimientos exteriores, específicamente en frisos, puede disminuir los niveles de dióxido de nitrógeno (NO_2). El experimento se hizo en espacios controlados, pero sus resultados posteriormente pueden ser fácilmente replicados en condiciones típicas reales. Se utilizó una cantidad significativamente pequeña de adición de TiO_2 con respecto al peso total de los materiales a utilizar en la elaboración del revestimiento.

Este friso, además de limpiar el ambiente circundante a las edificaciones, también tiene el beneficio de autolimpiar la fachada de la suciedad que generan estos mismos contaminantes sobre ellas. Con esta acción se preserva la integridad de las edificaciones, salvando estructuras comunes y patrimonio artístico además de disminuir significativamente las labores de mantenimiento de las estructuras. El experimento aporta datos numéricos precisos acerca de los valores de descontaminación que se pueden lograr.

En Venezuela actualmente no hay ninguna línea de investigación que trate el tema. Los países más cercanos en la región que han trabajado con esta tecnología son Colombia y Chi-

le en el campo del concreto, mas no se consiguen referencias a revestimientos de este tipo.

Estos trabajos en Latinoamérica y otras partes del mundo, especialmente en Japón e Italia (Fujishima et al., 1972; De la Hoz, 2009; Aguilar, 2013; entre otros), han medido la degradación del NO_2 por distintas técnicas tales como: cromatografía de gases, quimioluminiscencia y espectrofotometría UV-visible. Son todos métodos químicos actualmente válidos para medir concentraciones y variaciones en gases.

En esta investigación se escogió el método de espectrofotometría debido a la accesibilidad a los equipos y reactivos en la Universidad Nacional Experimental del Transporte. El método se basa en experiencias normadas de Griess-Saltzman (ISO 6768, 2005. *Ambient air. Determination of mass concentration of nitrogen dioxide. Modified Griess-Saltzman method*). Estos investigadores diseñaron una metodología que genera una curva de calibración que sirve de patrón para mediciones de concentraciones de NO_2 emitiendo resultados de manera rápida y relativamente sencilla usando la Ley de Lambert-Beer.

Al ser el TiO_2 un reactivo relativamente económico, rendidor y fácil de conseguir, se puede hacer en posteriores trabajos una evaluación integral de su adición al revestimiento explorando su disponibilidad, costos y comercialización en Venezuela y eventualmente en otros países.

Este trabajo se limita a evaluar la adición de este químico para la disminución de la concentración de NO_2 y su comportamiento como un material descontaminante.

Técnicas experimentales

El programa de ensayos contempla: la caracterización de los materiales para la elaboración de los revestimientos de las probetas a ensayar con el descontaminante fotocatalítico TiO_2 , la generación del contaminante NO_2 y las mediciones de los niveles de contaminación mediante el método espectrofotometría o colorimetría. Adicionalmente se hace una medición cualitativa de Nitratos.

Para ello se realizan 4 probetas de medidas 25 cm x 40 cm x 2 cm. Una de las probetas no contiene TiO_2 , otra contiene un 5% de TiO_2 con respecto al peso de los materiales, una con 7,5% y otra con 10%. Luego se construye una cámara de vidrio con cuatro compartimentos separados para medir las concentraciones de dióxido de nitrógeno.

Se crea un patrón colorimétrico basado en las normas existentes para la medición de nitritos y nitratos

Los ensayos de laboratorio fueron realizados en la Universidad Nacional Experimental del Transporte, utilizando los métodos establecidos principalmente en las normas COVENIN y ASTM que son condiciones establecidas por estos laboratorios.

Materiales y equipos

Los materiales utilizados en la elaboración del revestimiento de las probetas fueron: cemento gris Portland Tipo CPCA2, arena amarilla Maracay, agua potable y TiO_2 (fase anatasa). Para la formación del gas contaminante se utilizó virutas de cobre metálico y ácido nítrico concentrado. Para la evaluación del efecto descontaminante se usaron los siguientes reactivos: nitrito de sodio, trietanolamina, sulfanilamida, n-(1-naftil) etilendiamina, agua oxigenada y agua destilada. Para las cámaras de experimentación se utilizaron láminas de vidrio de 5mm y silicona para su sellado.

Todas las medidas colorimétricas fueron realizadas en un espectrofotómetro marca Shimadzu, modelo 1240.

Caracterización de los materiales para el revestimiento

Dado que las normas COVENIN no contemplan análisis para la arena ni el cemento que van a ser usados en revestimientos tipo friso, se les caracterizó con los métodos establecidos para agregados a ser utilizados en concretos estructurales.

Caracterización de la arena

La arena se evalúa con las normas COVENIN 255:1998 “Agregados. Composición Granulométrica”, COVENIN 258-77 “Método de ensayo para la determinación por lavado del contenido de materiales más finos que el cedazo 74 micras en agregados minerales” y la COVENIN 268:1998 “Agregado fino. Determinación de la densidad y absorción”.

Caracterización del cemento

El cemento utilizado fue el denominado “MAESTRO PORTLAND Tipo CPCA2” de uso general. Se evaluó con las normas COVENIN 492:1994 “Cemento Portland. Determinación de la Densidad Real” y por la COVENIN 487:1993 “Determinación de la finura por medio del aparato de Blaine”.

Caracterización del dióxido de titanio

Al dióxido de titanio (TiO_2) se le realizó el ensayo ISO 13320-1 “Particle size analysis-laser diffraction methods” para conocer su distribución granulométrica y mediante el Método Holandés, también conocido como método del picnómetro, se estableció su peso específico.

Pruebas realizadas a las probetas

Elaboración de las probetas de estudio

Se construyen cuatro placas de concreto aligerado de medidas 25 x 40 x 2 cm, arrojando una superficie aproximada de 1000 cm^2 . Dichas medidas se escogen por la facilidad de comparación con otras medidas más comerciales y servirán de base para el revestimiento.

Una vez caracterizados los materiales y construidas las probetas, se usará la dosificación para enlucidos indicados por Pose y Castilla (1995), que establecen una combinación de arena, cemento y cal, en una relación 3:1:0,5. Para este experimento no se utiliza cal, se sustituye el aglomerante por dióxido de titanio en tres porcentajes distintos en relación a la suma de los otros componentes, como se refleja en el cuadro 1.

Construcción de Cámaras de experimentación

Se construyó una cámara de vidrio de 5mm de espesor que deja pasar alrededor de un 90% de la luz ultravioleta del sol y cuenta con 4 compartimientos con los volúmenes mostrados en el cuadro 2. Los mismos están completamente separados para asegurar que se puedan

Cuadro 1. Dosificaciones de los revestimientos descontaminantes

Descripción	Patrón	5%	7,5%	10%
Arena (g)	200,00	200,00	200,00	200,00
Cemento (g)	66,66	66,66	66,66	66,66
TiO_2 (g)	0,00	13,33	20,00	26,67
Agua (ml)	500,00	550,00	550,00	600,00

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 2. Volúmenes de los compartimientos de la Cámara de experimentación

Sección	% de Concentración de TiO_2	Volumen (cm^3)	Volumen (m^3)
1	0	43484,19	0,04348
2	5	43723,55	0,04372
3	7,5	43300,95	0,04330
4	10	43266,23	0,04327

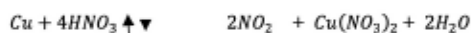
Fuente: Elaboración propia.

generar las concentraciones deseadas en cada una de ellas.

Cada cámara cuenta con una abertura de 5 mm de diámetro con un tapón hermético de sílicón transparente para poder extraer las muestras a ensayar mediante el uso de inyectoras.

Generación del contaminante

El contaminante ambiental escogido para este experimento fue de la familia de los óxidos de nitrógeno (NO_x), específicamente el dióxido de nitrógeno (NO_2), resultante de la combinación controlada de cobre metálico (Cu) y ácido nítrico concentrado (HNO_3), siguiendo la siguiente reacción:



Para alcanzar una concentración aproximada de 0,30 mg/L se usaron las cantidades mostradas en el cuadro 3. Esta concentración excede por mucho el máximo permitido por la Organización Mundial de la Salud para concentraciones en ambientes que serán frecuentados por seres humanos de $40 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$ de aire, pero se llevó a estos valores para garantizar una atmósfera realmente contaminada y por los niveles de detección de los equipos de medición.

Muestreo de los niveles de contaminación en las cámaras

El método seleccionado para extraer las muestras de las cámaras fue el pasivo (Ibarlu-

cía, 2016), que permite extraer las muestras con inyectoras. Se escoge este tipo de muestreo por no necesitar ningún sistema de bombeo ni energía eléctrica, ya que el aire puede ingresar al dispositivo de muestreo por difusión molecular y el periodo de muestreo puede ser corto (minutos u horas) como se necesita en este caso de estudio.

Análisis de las muestras

La medición y control de gases es un campo muy específico y difícil de controlar, uno de los más importantes. El método escogido, por espectrofotometría (Ibarlu-cía, 2016), mide la cantidad de energía radiante absorbida por las moléculas a longitudes de onda específicas. Cada compuesto tiene un patrón de absorción diferente que da origen a un espectro de identificación.

Se recurre al método colorimétrico que es altamente utilizado en el mundo de la química ya que aporta información cualitativa y cuantitativa sobre sustancias en disolución. Se envía un haz de luz paralelo monocromático a través de una muestra líquida que ha sido previamente tratada y se mide la intensidad del haz luminoso que emerge.

La cantidad de luz absorbida por la solución a una longitud de onda específica está relacionada con el paso óptico y con la concentración del absorbente.

El método colorimétrico para absorción de NO_2 escogido para esta investigación está re-

Cuadro 3. Dosificación para la generación de Dióxido de Nitrógeno

Generador	1	2	3	4
Concentración de TiO_2 (%)	0	5	7,5	10
Volumen (cm^3)	532,98	546,71	529,54	534,85
Cu (g)	0,1017	0,1007	0,1056	0,1032
HNO_3 (g)	0,6182	0,6339	0,6547	0,6122

Fuente: Elaboración propia.

gido por la Norma ISO 6768, 2005: *Ambient air. Determination of mass concentration of nitrogen dioxide. Modified Griess Saltzman method* (Modified Griess-Saltzman method).

Se preparan bajo este método las soluciones y cantidades necesarias para las todas las mediciones:

1. Se usa agua libre de nitritos.
2. Líquido absorbente: Se utilizan 15 g de trietanolamina (TEA) en 500 ml de agua destilada y se adicionan 3 ml de n-butanol, luego se diluye hasta 1000 ml con agua destilada. Se almacena en un recipiente oscuro.
3. Peróxido de hidrógeno: Se diluye 0,2 ml del H_2O_2 al 30% hasta 250 ml con agua destilada.
4. Solución de sulfanilamida: Se diluyen 10 g en 400ml de agua destilada, se adicionan 25 ml de ácido fosfórico concentrado hasta completar 500 ml.
5. N-(1-naftil)-etilendiamina: Se disuelve 0,1 g en 100 ml de agua destilada.
6. Patrón de Nitrito ($NaNO_2$): Se disuelve 0,135 g de nitrito de sodio en agua destilada y se completa hasta 1000 ml.

Se adicionan los reactivos en el orden mostrado en el cuadro 4, para la curva de calibración.

Medición de NO_2 en las cámaras de experimentación

Se colocaron las placas con las caras revestidas con el friso de TiO_2 en sentido Oeste, re-

plicando la orientación de una fachada de un edificio para tener la mayor cantidad de exposición a los rayos solares. Las placas se colocaron con una inclinación de 85 grados, casi vertical, para una mejor simulación de un friso típico.

La incidencia directa de los rayos solares en las placas o probetas fue continua a lo largo de los 7 días (168 horas) que duró el experimento. Para tal fin se escogió la azotea de la Universidad Nacional del Transporte, ubicada en la carretera Panamericana, kilómetro 8.

Se prepararon cuatro envases generadores de gas con similares concentraciones de NO_2 . Se tomaron las muestras por duplicado a las cero horas, para conocer la concentración inicial del gas, luego se colocaron y destaparon al mismo tiempo en cada compartimiento de la cámara y finalmente se colocó la tapa principal para sellar en su totalidad.

Posterior al montaje del experimento y asegurando que las cuatro probetas estuviesen en iguales condiciones climáticas, se tomaron las muestras de gases por duplicado en cada cámara a las 24, 72 y 168 horas.

Se extrajeron los gases con una jeringa de 3 ml, esperando dos minutos a que ocurriera la difusión molecular en las mismas como lo indica el método de Griess-Saltzman, y luego se inyecta a un envase sellado con una solución absorbente (disolución acuosa de trietanolamina).

Cuadro 4. Dosificación para la generación de Curva de Calibración para NO_2
Tiempo para desarrollar el color: 10 min. Longitud de onda: $\lambda = 542 \text{ nm}$

Soluciones	Cantidad	Unidad
Patrón de $NaNO_2$ (Nitrito de Sodio)	3	ml
Trietanolamina (Absorbente)	7	ml
H_2O_2 al 30% (Agua Oxigenada)	1	ml
Sulfanilamida	10	ml
1-Naftil-etilendiamina	1	ml

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se agregó a las muestras las mismas cantidades de reactivos que se señalan en el cuadro 4, pero sin la solución madre de nitrito de sodio (se sustituye por las muestras de NO_2 extraídas) y se midieron las concentraciones reales en el espectrofotómetro de igual manera que con las muestras de la curva patrón.

Medición cualitativa de Autolimpieza y de Nitratos

Para evaluar la efectividad de este aditivo en el revestimiento se diseñaron tres etapas del experimento, tanto para identificar la presencia de la descomposición de estos compuestos como la efectividad autolimpiante del TiO_2 .

Se realizan dos tandas de experimentación, las placas se exponen a los gases de combustión contaminantes expulsados de un automóvil que presentaba fallas mecánicas (hollín negro y aceite), y en la segunda se vuelve a ensuciar las superficies, pero esta vez con hollín (carbón triturado), esparciéndolos en estado seco y de forma manual con una malla y presionando los granos suavemente con un algodón para mayor adherencia.

Paralelamente al lavado realizado en la primera fase, fueron recolectadas las aguas por cada muestra, para hacer pruebas cualitativas de iones sulfatos y nitratos con la finalidad

principal de determinar la presencia de sulfatos y nitratos que evidencian los procesos de descontaminación y autolimpieza.

En primer lugar, se agregó cloruro de bario al agua recolectada de las tres placas, para verificar la presencia de sulfatos como lo explican Skoog et al. (1995) en sus experiencias. Se formó un precipitado blanco arrojando un resultado positivo.

Posteriormente se realizan las pruebas de detección de iones de nitratos, los cuales se identifican por la coloración rosa de la solución producto de la reacción química de los nitratos con la sulfanilamida.

Este ensayo es netamente cualitativo, no aporta datos numéricos, pero mediante patrones de color se puede reportar la presencia de nitratos en muestras de agua para uso agrícola, prueba totalmente válida según Cabrera et al. (2003) para utilizarlo en este experimento.

Los reactivos químicos utilizados fueron:

Sulfanilamida: 3 gotas.

Ácido Nítrico: 2 gotas.

Etilendiamina: 2 gotas.

La teoría de este patrón indica que se parte de un color rosa intenso, pasando a tonalidades de amarillo y luego ausencia de color, como se muestra el gráfico 1.

Gráfico 1. Patrón colorimétrico para medición de Nitratos en agua.



Fuente: Elaboración propia.

Resultados y discusión

Evaluación de los materiales

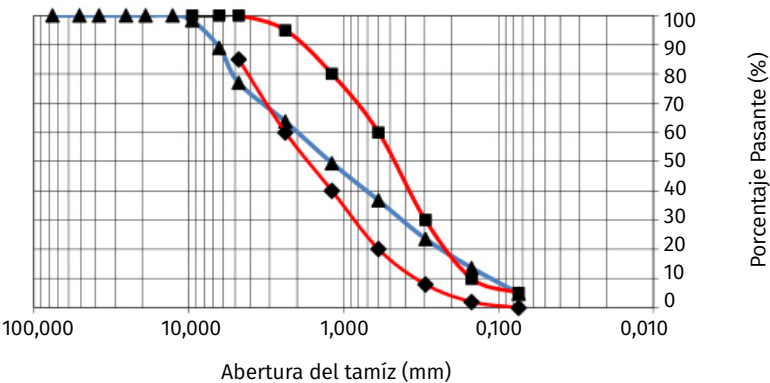
Al evaluar la arena se obtuvo un porcentaje de ultra finos de 4,90% con una distribución de partículas comprendida dentro de los límites normativos (gráfico 2) y con valores de pesos específicos similares a los normativos 2,62 g/cm³ junto con 9,91% de absorción, apreciando que cumple con las limitantes normativas.

Los análisis del Cemento Portland arrojaron como resultado de su caracterización una densidad de 2,99 g/cm³ y una superficie específica de 299,09 m²/kg, ambos valores entran dentro de los patrones normativos para este tipo de cemento.

Los resultados indicados en el cuadro 5, arrojan que la densidad promedio del dióxido de titanio es de 3,88 g/cm³, indicando que se encuentra en fase anatasa ya que sus valores característicos oscilan entre 3,8 y 3,9 g/cm³.

Al aplicar el ensayo de difracción láser se obtiene que el tamaño de partícula promedio es de

Gráfico 2. Granulometría de la arena



Fuente: Elaboración propia.

5,481 μm, arrojando que se está en el orden de micro partículas como se aprecia en el gráfico 3.

Muestreo y análisis de las probetas

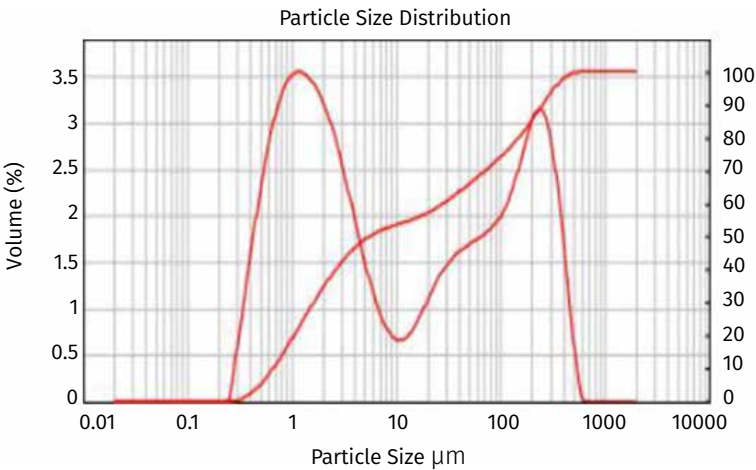
Una vez preparadas las muestras se llevaron al espectrofotómetro, midiendo la absorción de radiación electromagnética de las moléculas del compuesto un máximo de longitud de onda de 542 nm, valor asociado al NO₂.

Cuadro 5. Densidad de dióxido de titanio y valores característicos

Muestra	Masa (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
1	8,17	2,079	3,93
2	8,39	2,191	3,83
3	7,12	2,011	3,54
4	7,05	1,080	3,39
Desviación	0,0684	Densidad Promedio (g/cm ³)	3,88

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. Distribución granulométrica del Dióxido de Titanio. 2017



Fuente: Elaboración propia.

Se obtienen así los datos presentados en el cuadro 6, en los cuales se hacen correcciones por la pureza de la Solución Madre del nitrito de sodio la cual está al 99% de pureza, para generar la Curva de Calibración mostrada en el gráfico 4.

El ajuste de los datos de la gráfica genera la ecuación:

$$y = 0,0821x - 0,0097$$

Una vez obtenida la curva de calibración con su respectiva ecuación, se lleva a cabo el montaje experimental. Se presentan las mediciones

en el cuadro 7, de manera resumida, mostrando los niveles de degradación del NO_2 a las 0, 24, 72 y 168 horas.

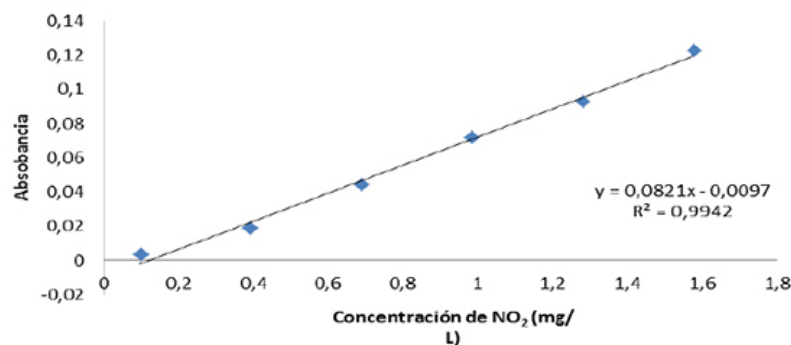
Al analizar los resultados obtenidos nos encontramos con un error de alrededor de 18% en la probeta patrón, error que se replica en las otras tres probetas, y se produce de manera aleatoria dado que el montaje y las mediciones no se hacen de manera automatizada sino de manera manual. A esto se le suman imprecisiones de pesaje, por apreciación de los instrumentos de medida y otros factores de tipo co-

Cuadro 6. Datos para la generación de la Curva de Calibración para NO_2

Punto	C (mg/L)	Corregida (mg/L)	Vc (ml)	Absorción
P1	0,10	0,0976	0,33	0,003
P2	0,40	0,03934	1,33	0,019
P3	0,70	0,6892	2,33	0,044
P4	1,00	0,9850	3,33	0,072
P5	1,30	1,2808	4,33	0,093
P6	1,60	1,5766	5,33	0,123

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4. Curva de Calibración para NO_2



Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 7. Concentraciones reales de NO_2

Tiempo (h)	C (prom) (mg/L) 0%	ΔC 0%	C (prom) (mg/L) 5%	ΔC 5%	C (prom) (mg/L) 7,5%	ΔC 7,5%	C (prom) (mg/L) 10%	ΔC 10%
0	0,2851	0,00	0,2719	0,00	0,2808	0,00	0,3403	0,00
24	0,2339	17,99	0,1486	45,34	0,1730	38,40	0,1486	56,33
72	0,2156	24,39	0,0000	100,00	0,0000	100,00	0,1486	56,33
168	0,2217	22,26	0,0000	100,00	0,0000	100,00	0,1486	56,33

Fuente: Elaboración propia (2019).

mún que incrementan la incertidumbre acerca del resultado de las mediciones.

La probeta patrón de concentración 0% de TiO_2 , arroja un porcentaje de descontaminación que ronda el 18% a las 24 horas. Luego se mantiene constante indicando que no hay descontaminación (ver gráfico 5).

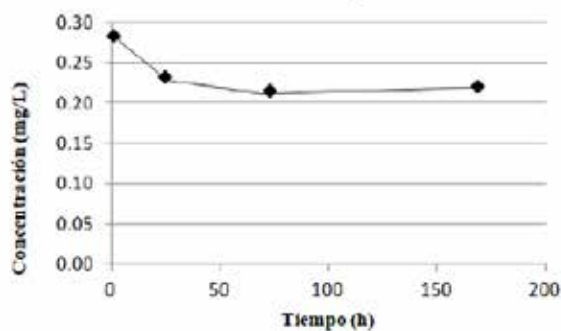
La segunda probeta, con 5% de adición de TiO_2 , a las 24 horas presenta un porcentaje de descontaminación de alrededor de 45%, y a las 72 horas una descontaminación del 100 % al llegar a una concentración cercana a cero (por debajo de los límites de detección del equipo), como se puede observar en el gráfico 6.

La tercera probeta con 7,5% de adición de TiO_2 , a las 24 horas presenta un porcentaje de descontaminación de 38% aproximadamente, y a las 72 horas una descontaminación de 100% ver el gráfico 7.

La cuarta probeta con un 10% de adición de TiO_2 , a las 24 horas reflejó 56% de descontaminación, pero se mantuvo de manera constante en ese valor a las 72 y 168 horas. No llegó al 100% de descontaminación (ver el gráfico 8).

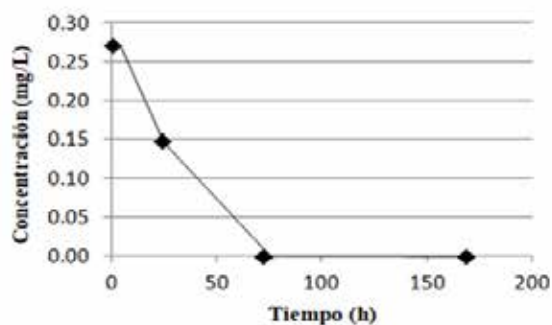
Se observa que aunque la probeta con mayor concentración de TiO_2 descontamina de manera más rápida en las primeras horas del experimento, se mantiene constante en el mismo valor de concentración hasta las 168h. Se infiere que esto es debido a la aglomeración de las partículas del TiO_2 lo que detiene el proceso de desorción de las moléculas de NO_2 por la

Gráfico 5. Medición de NO_2 al 0% de Adición de TiO_2



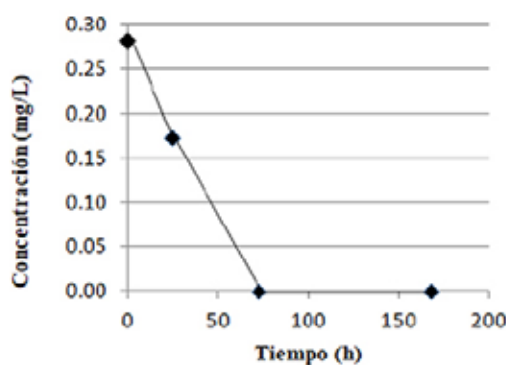
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6. Medición de NO_2 al 5% de Adición de TiO_2



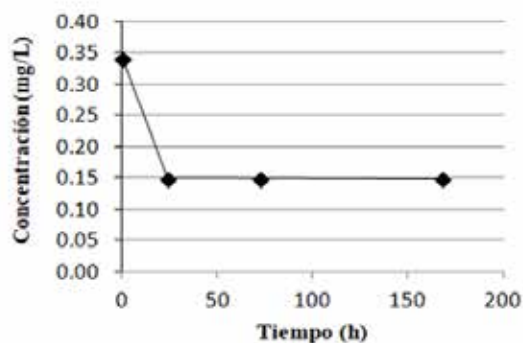
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 7. Medición de NO_2 al 7,5 de Adición de TiO_2



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8. Medición de NO_2 al 10% de Adición de TiO_2



Fuente: Elaboración propia.

disminución del área superficial específica. La probeta de 5% de adición de TiO_2 , presenta un porcentaje de descontaminación considerable a las 24 horas, incluso mayor que la de 7,5% de adición. A las 72 horas ya descompone en su totalidad al NO_2 .

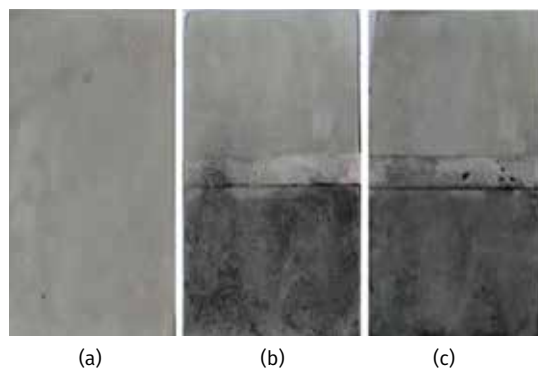
Corroboración del efecto autolimpiante

Para la corroboración de autolimpieza se elimina la probeta con 10% de adición de TiO_2 correspondiente al 10% de adición de TiO_2 , por los resultados obtenidos en los experimentos de descontaminación y por el costo de los reactivos químicos para realizar las pruebas posteriores.

Se rocían las placas previamente contaminadas con agua destilada completamente libre de nitritos y nitratos, se utiliza un frasco lavador para simular una lluvia de suave intensidad y poder recolectar el agua para pruebas posteriores. Los resultados cualitativos obtenidos en ambas etapas fueron muy similares:

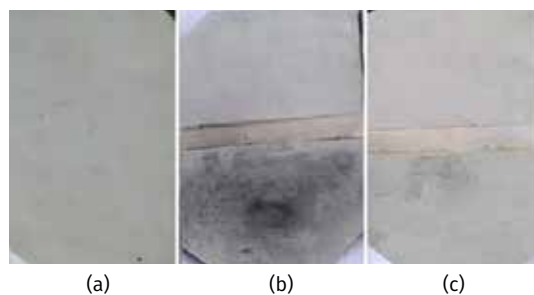
- La placa P0: Mantuvo en casi un 100% su nivel de suciedad. No hubo casi arrastre de partículas ni mejoría en su apariencia (ver gráfico 9).
- La placa P1: Presentó un arrastre aproximado de un 90%, arrastrando el material particulado en su totalidad, ante un rocío leve (ver gráfico 10).
- La placa P2: El material particulado y materia grasa se elimina en un porcentaje mayor al 95%, recuperando casi en su totalidad su apariencia original corroborando la capacidad hidrofílica foto inducida de la que hablara Cárdenas (2012), en su investigación (ver gráfico 11).

Gráfico 9. Proceso de contaminación y lavado de la muestra P0 = 0% de adición de TiO_2



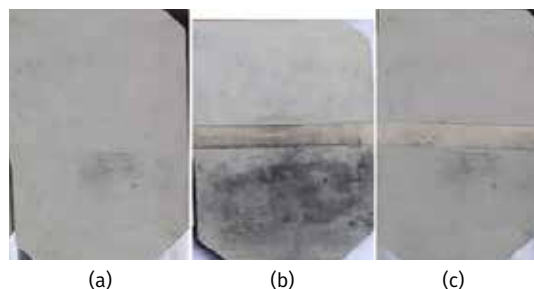
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10. Proceso de contaminación y lavado de la muestra P1 = 5% de adición de TiO_2



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11. Proceso de contaminación y lavado de la muestra P2 = 7,5% de adición de TiO_2



Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Luego de hacer el trabajo experimental se corroboró que la utilización de TiO_2 en fase anatasa es factible para usarse como adición a la mezcla de revestimientos comunes de exteriores de edificaciones para reducir eficientemente concentraciones de NO_2 .

El montaje experimental arroja un error inicial de medición de concentración que ronda un 18%, el cual podría ser reducido con un montaje automatizado con controles más costosos y rigurosos por tratarse de una medición de gases.

El porcentaje más efectivo, desde el punto de vista técnico y económico dentro de las opciones planteadas, es el de 5%. Desde el punto de vista técnico se pudo apreciar que, aunque es más lento en su acción descontaminante en las primeras 24 horas con respecto a las adiciones de 7,5% y 10%, a las 72 horas ya había descompuesto totalmente el NO_2 que se generó en la cámara de experimentación. Si tomamos en

cuenta la economía, la opción de 5% es la que requiere menos TiO_2 . Por lo que, en conjunto, resulta la mejor opción dentro de los parámetros considerados para este experimento.

La concentración en adición de TiO_2 menos efectiva fue la de 10%, ya que aunque a las 24 horas arrojó el mejor resultado en cuanto a porcentaje de descontaminación, a partir de ahí se quedó detenida la reacción. Esto se debe a que, en medianas y grandes concentraciones

del químico, los granos tienden a agruparse y se reduce su capacidad de absorción y desorción.

El dióxido de titanio aportó una cualidad hidrofílica al material, por lo que el material particulado proveniente de la contaminación vehicular y ambiental, que se adhiere a las superficies, es fácilmente arrastrado por una llovizna leve, lo que hace que el revestimiento sea autolimpiante y no requiera de mantenimiento periódico.

Referencias bibliográficas

- Aguilar, A (2013). Evaluación técnico ambiental del Dióxido de Titanio (TiO_2) en los morteros de cemento chileno (Tesis de Maestría). Universidad del Bio. Concepción.
- ASTM D-1607. Standar test method for nitrogen dioxide content of the atmosphere Griess-Saltzman reaction: <https://store.astm.org/d1607-91r18e01.html>
- Blöß, S.P. (2008). El Dióxido de Titanio disminuye la contaminación del aire. Recuperado el 20 de Julio de 2019, de <https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/25998-El-dioxido-de-titanio-disminuye-la-contaminacion-del-aire.html>. Kronos International, Inc., 14/11/2008.
- Cabrera, E.; Hernández, G.; Ruiz, H. y Cañizares, M. (2003). "Determinación de Nitritos y Nitratos en agua. Comparación de costos entre un método de flujo continuo y un método estándar", *Revista de la Sociedad Química de México*, nº 1: pp. 88-92.
- COVENIN 255-1998. Agregados. Composición granulométrica.
- COVENIN 258-1998 Agregado fino. Determinación de la densidad y absorción.
- COVENIN 487-1993. Determinación de la finura por medio del aparato de Blaine.
- COVENIN 492:1994 Cemento Portland. Determinación de la Densidad Real.
- COVENIN 494-1994. Determinación de consistencia normal
- De la Hoz, M. (2009). Desinfección de aguas de uso agrícola, mediante la utilización de un fotocatalizador inmovilizado en mortero de cemento y activado por la luz solar (Tesis de Doctorado). Universidad de Concepción. Chile.
- Fujishima, A. y Honda, K. (1972). "Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode". *Nature*, nº 38: pp. 37-38. <https://doi.org/10.1038/238037a0>
- Ibarlucia, D. (2016). Determinación de NO_2 (Dióxido de Nitrógeno) atmosférico en la ciudad de Tandil mediante muestreadores pasivos y una técnica espectrofotométrica (Trabajo final). Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- ISO 13320-1 *Particle size analysis-laser diffraction methods*.
- ISO 6768, 2005. *Ambient air. Determination of mass concentration of nitrogen dioxide. Modified Griess-Saltzman method*.
- OMS-Organización Mundial de la salud. *Calidad de aire ambiente (exterior) y salud*, 2017. Recuperado el 27 de enero de 2017: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.
- Porrero, J.; Ramos, C.; Grases, J.; Velazco, G. (2004). *Manual del concreto estructural*. Caracas. SIDETUR.
- Pose, M. y Castilla, E. (1995). "Evaluación de comportamiento de muros de mampostería estructural de bloques de concreto ante carga horizontal", *Boletín Técnico IMME*, Volumen 33, Número 1, marzo 1995. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales IMME, Universidad Central de Venezuela-UCV, pp. 17-22.
- Skoog, D.; West, D.; Holler, J. y Crouch, S. (1995). *Química Analítica*. 6ta Edición, Editorial McGraw-Hill: México: 227-234.
- Vallés, Hernán, (2015). Dióxido de titanio: el mineral que acaba con la contaminación. Recuperado el 23 de Julio de 2019, de <https://blogthinkbig.com/dioxido-de-titanio-el-mineral-que-acaba-con-la-contaminacion>.