Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar
Septiembre-Octubre, 2023, Volumen 7, Número 5
https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.7911

Influencia Del Dióxido De Titanio En El Concreto Permeable Con Efecto Fotocatalizador

Jenisse del Rocío Fernández Mantilla[1]
jfernández@uns.edu.pe
https://orcid.org/0000-0003-3336-4786
Universidad Nacional del Santa
Perú

RESUMEN

El objetivo es determinar la influencia del dióxido de titanio en el concreto permeable con efecto fotocatalizador. La población fue de 63 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm y 42 probetas de 9.5 x 15 cm de concreto; teniendo como muestra probetas con diseño convencional (sin adición de titanio), y por los diseños de mezcla utilizando dióxido de titanio, considerando el estado de dióxido de titanio y el porcentaje de este sobre el concreto. Se determinó que los especímenes con 1,5% de TiO2 en fase anatasa presentaron buenos índice de coeficiente de permeabilidad en relación de la muestra patrón, la mayor resistencia a la compresión se presenta en la muestra con 1.5% de TiO2 en fase rutilo, siendo seguidos por los especímenes con 5,5% de TiO2 en fase rutilo y 1.5% en la fase anatasa que también presentaron buenos índice de resistencia a la compresión; la mayor propiedad fotocatalíticas se presentaron en los especímenes con 1,5% de TiO2 en fase anatasa. Se concluyó: la dosificación de 1.5% en la fase anatasa es la más recomendable dado que muestra buen índice de permeabilidad, así como mejoras significativas en la resistencia a la compresión del concreto y en la propiedad fotocatalítica.

Palabras clave: *dióxido de titanio; concreto permeable; efecto fotocatalizador; resistencia a la compresión; permeabilidad.*

[1] Autor principal
Correspondencia: jfernández@uns.edu.pe

Influence of titanium dioxide on pervious concrete with a photocatalytic effect

ABSTRACT

The objective is to determine the influence of titanium dioxide in pervious concrete with a photocatalytic effect. The population consisted of 63 cylindrical specimens of 15 x 30 cm and 42 specimens of 9.5 x 15 cm of concrete; taking as a sample test tubes with conventional design (without titanium addition), and by the mix designs using titanium dioxide, considering the state of titanium dioxide and its percentage on the concrete. It was determined that the specimens with 1.5% TiO2 in the anatase phase presented good permeability coefficient index in relation to the standard sample, the highest compressive strength is presented in the sample with 1.5% TiO2 in the rutile phase, being followed by the specimens with 5.5% TiO2 in the rutile phase and 1.5% in the anatase phase, which also presented good compressive strength index; the highest photocatalytic properties occurred in the specimens with 1.5% TiO2 in the anatase phase. It was concluded: the dosage of 1.5% in the anatase phase is the most recommended since it shows a good permeability index, as well as significant improvements in the compressive strength of the concrete and in the photocatalytic property.

Keywords: *titanium dioxide; pervious concrete; photocatalytic effect; compressive strength; permeability.*

Artículo recibido 16 Agosto 2023

Aceptado para publicación: 25 Septiembre 2023

INTRODUCCIÓN

Esta investigación se enfoca en examinar cómo la incorporación de TiO2 afecta las características del concreto permeable, específicamente su resistencia a la compresión, permeabilidad y capacidad fotocatalítica. Se llevó a cabo mediante la adición de TiO2 en diferentes concentraciones, incluyendo un 1.5%, 3.5% y 5.5%, tanto en su forma de fase rutilo como anatasa.

A lo largo de la historia, los materiales y compuestos basados en cemento han sido fundamentales en la ingeniería civil y la construcción de estructuras. Sin embargo, en la actualidad, su uso se ha diversificado, ya que no solo se utilizan con propósitos estructurales, sino también como componentes funcionales en la creación de estructuras inteligentes. Estos materiales inteligentes tienen la capacidad de responder de manera beneficiosa a estímulos externos.

La fotocatálisis ha ganado gran relevancia desde el descubrimiento de la división foto catalítica del agua utilizando óxido de titanio (TiO2) en ánodos fotoquímicos por Fujishima y Honda, así como por Wrighton y otros en décadas pasadas. Esta tecnología ha atraído atención a nivel mundial debido a sus aplicaciones prometedoras en campos como la energía solar, la química verde y la remediación ambiental. La fotocatálisis ha demostrado su eficacia en la eliminación de contaminantes atmosféricos, lo que contribuye significativamente a mejorar la calidad de vida.

El TiO2, especialmente en su forma nanoescalar, se ha convertido en un componente esencial en materiales de construcción con propiedades fotocatalíticas. Este semiconductor es compatible con materiales convencionales de construcción, como el cemento, sin comprometer sus características. El TiO2 ha demostrado su capacidad para reducir diversos contaminantes del aire, como los óxidos de nitrógeno, compuestos aromáticos, amoníaco y aldehídos.

La incorporación de TiO2 en el concreto puede realizarse tanto como un componente integral del concreto como mediante la aplicación de recubrimientos superficiales. Esta combinación de materiales estructurales y funcionales comenzó en la década de 1990, y diversas empresas han patentado productos como adoquines y revestimientos fotocatalíticos basados en aglomerantes hidráulicos.

Las múltiples funciones del TiO2 lo han convertido en un material versátil en aplicaciones de construcción, tanto en interiores como exteriores. Se utiliza en morteros de cemento, adoquines y

traviesas exteriores para crear edificios inteligentes con propiedades autolimpiantes, antimicrobianas y purificadoras de aire. Esto es especialmente relevante en contextos como el Perú, donde las preocupaciones ambientales en la construcción están en consonancia con estándares internacionales.

Para abordar los desafíos del concreto, se emplean diversos aditivos en el mercado peruano. Estos aditivos, que se disuelven en agua y se incorporan en la mezcla de cemento, buscan mejorar las propiedades del concreto en estado fresco y durante su uso. Aunque estos productos químicos ofrecen ventajas, también presentan desventajas en la búsqueda de concreto de alta calidad.

En el Perú, se han comenzado a utilizar componentes químicos como nanopartículas en el concreto para mejorar su hidratación, resistencia, porosidad y reducir la fisuración. Ejemplos incluyen el óxido de silicio (SiO2), óxido de titanio (TiO2), óxido de hierro (Fe2O3) y óxido de aluminio (Al2O3). El dióxido de titanio, en particular, ha destacado por sus propiedades fotocatalíticas beneficiosas para el medio ambiente.

En este contexto, el TiO2 se ha investigado como un aditivo en la fabricación de concreto para potenciar sus propiedades fotocatalíticas, permitiendo que el concreto tenga la capacidad de purificar el aire y autolimpiarse. A pesar de la creciente atención a esta tecnología, su implementación a gran escala aún enfrenta desafíos, y existe incertidumbre sobre su efecto en las propiedades mecánicas y físicas del concreto.

En resumen, esta investigación se centra en el uso de TiO2 en el concreto permeable para evaluar su resistencia a la compresión, permeabilidad y efecto fotocatalizador. El TiO2 se ha convertido en un componente clave en la construcción de estructuras inteligentes con beneficios ambientales significativos, aunque su implementación a gran escala todavía requiere un mayor impulso y comprensión.

Es por lo descrito en párrafos anteriores que surge el interés de determinar la influencia del dióxido de titanio en el concreto permeable con efecto fotocatalizador. Por lo tanto, la presente investigación corresponde a generar conocimientos y aportes teóricos que corresponden a mejorar una mezcla a emplearse en concretos permeables, lo antes mencionado por medio de la adición de dióxido de titanio para mejorar las propiedades mecánicas del material, basándose en una

optimización de una mezcla aportando buen flujo y alta estabilidad; adicionalmente, se debe verificar que la mezcla cumpla con las especificaciones de las distintas normas técnicas peruana, sumado a los beneficios económicos y ambientales. Asimismo, muestra una alternativa de realización del material de dióxido de titanio, lo que refiere una disminución de impacto ambiental. Por último, con esta investigación se aportará al conocimiento del área de nuevas tendencias en concretos y geotecnias por lo que plantea la caracterización de un concreto con mejores propiedades mecánicas a través de la adición de un componente a la mezcla de diseño de un concreto.

Las variables de estudio se definen conceptualmente así: Concreto permeable con efecto fotocatalizador se refiere a la mezcla de cemento, conocido como auto limpiante, cuyas propiedades únicas son los componentes foto catalíticos que utilizan la energía de los rayos ultravioleta para oxidar compuestos orgánicos y algunos inorgánicos (Yang et al., 2015). Dióxido de titanio: es un mineral muy abundante en la tierra: también es el noveno elemento químico más abundante en la corteza terrestre. Se puede utilizar en cosmética como filtro UV o como colorante blanco (Cassar et al., 2007). Operacionalmente, concreto permeable con efecto fotocatalizador: análisis de las propiedades del concreto, específicamente resistencia a la compresión, permeabilidad y efecto fotocatalizador, a partir de la adición de TiO2 en porcentajes de 1.5%, 3.5% y 5.5% en fase rutilo y fase anatasa. Dióxido de titanio: adición de TiO2 en porcentajes de 1.5%, 3.5% y 5.5% en fase rutilo y fase anatasa, para la evaluación de las propiedades del concreto permeable, específicamente resistencia a la compresión, permeabilidad y efecto fotocatalizador.

Teoricamente describiendo la variable concreto permeable con efecto fotocatalizador,

Las propiedades mecánicas de los materiales cementosos que incorporan TiO2 están influenciadas en gran medida por los productos de hidratación y la microestructura de los compuestos de cemento (Fujishima & Honda, 1972). Se ha comprobado que en condiciones específicas, como un alto pH, la presencia de electrolitos no neutros como el Ca2+ y una elevada actividad iónica, que son características comunes en la pasta de cemento, las partículas de TiO2 de tamaño nano y micro tienden a aglomerarse debido a fenómenos de correlación ion-ion (Wang, et al., 2018; Hoffmann et al., 1995; Addamo et al., 2008), que son similares a lo que ocurre con

las partículas de hidrato de silicato de calcio (CSH) presentes en el cemento (Navarrete & Peñafiel, 2019; Segura & Camelo, 2019).

En lo que respecta al dióxido de titanio, que es un fotocatalizador, es un compuesto que facilita reacciones químicas tras absorber luz y desencadenar un proceso químico posterior (Banerjee et al., 2015; Bogue, 2014). Varios óxidos de metales de transición exhiben actividad fotocatalítica, lo que significa que actúan como fotocatalizadores y promueven reacciones de oxidación y reducción cuando se exponen a radiación electromagnética (Chen & Cao, 2006).

Las especies reactivas de oxígeno tienen la capacidad de descomponer microorganismos en CO2 y H2O (Teoh et al., 2012; Hanus & Harris, 2013; Bogue, 2014). La eficiencia del proceso fotoquímico depende de diversos factores, siendo los cinco más influyentes los siguientes: (1) absorción efectiva de la luz solar, (2) separación rápida de carga después de la absorción de luz para evitar la recombinación de huecos de electrones, (3) separación del producto de la superficie del fotocatalizador, (4) compatibilidad entre los potenciales redox del hueco de la banda de valencia y el electrón de la banda de conducción con los de las especies donadoras y aceptadoras, respectivamente, y (5) la estabilidad a largo plazo del fotocatalizador (Banerjee et al., 2015; Kurihara & Maruyama, 2016) (Han et al., 2017; Loh et al., 2018; Jalvo et al., 2017).

Dentro de los óxidos de metales de transición, el TiO2 es el fotocatalizador más estudiado para la creación de materiales cementosos auto limpiantes, debido a su bajo costo, estabilidad química, seguridad para la salud humana, no toxicidad y eficiencia en la actividad fotocatalítica (Kurihara & Maruyama, 2016; Salman et al., 2016; Li et al., 2017). En condiciones ambientales, el TiO2 adopta tres estructuras cristalinas principales, que son la anatasa (con una estructura cristalina tetragonal distorsionada), el rutilo (también de estructura cristalina tetragonal) y la brookita (que posee una estructura cristalina ortorrómbica), siendo solamente el rutilo y la anatasa las que resultan atractivas para aplicaciones prácticas, debido a que son semiconductores con una amplia brecha de energía (Haque & Chen, 2019; Navarrete Angulo & Peñafiel Carpio, 2019; Loh et al., 2018; Etxeberria et al., 2017).

De manera general, se ha observado que la anatasa es más eficaz en la degradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos en fase vapor o líquida (Kabadi, 2020; Segura Montoya

& Camelo Manzanares, 2019). Por otro lado, las fases de rutilo y brookita encuentran aplicación en la oxidación selectiva de síntesis orgánicas (Trujillo & Ossa, 2019; Rhee et al., 2018; Hamidi & Aslani, 2019a). No obstante, la combinación de las fases de anatasa y rutilo incrementa significativamente la actividad fotocatalítica en comparación con cada componente de forma individual (Bogue, 2014).

En las industrias de la cerámica y la construcción, existe un creciente interés en el efecto antimicrobiano inducido por el TiO2, particularmente en entornos donde la presencia de microorganismos puede ser un problema, como en instalaciones médicas. Estudios relevantes (Chen & Mao, 2007; Rhee et al., 2018) han demostrado que la instalación de baldosas con propiedades fotocatalíticas en interiores no solo reduce la cantidad de bacterias en las superficies de las paredes a niveles insignificantes, sino que también disminuye considerablemente la concentración de bacterias en el aire.

La contaminación del aire causada por óxidos de nitrógeno (NOx) es un problema de gran relevancia que contribuye a empeorar la calidad de vida, especialmente en áreas urbanas de gran tamaño (Hamidi & Aslani, 2019b; Chen & Poon, 2009; Loh et al., 2018). Los NOx, junto con los óxidos de azufre (SOx), son los principales compuestos químicos responsables de la lluvia ácida y el smog fotoquímico (Jalvo et al., 2017; Herrmann, 2005).

Entre todos estos contaminantes, los NOx presentan los mayores desafíos. El NO se considera el contaminante primario, ya que se introduce en la atmósfera principalmente a partir de la combustión a alta temperatura en el transporte y las actividades industriales, mientras que el NO2 se clasifica como un contaminante secundario, ya que se forma principalmente en la atmósfera debido a la interacción entre el NO y el O2 u O3, así como a la exposición a la luz solar (Rhee et al., 2018). Los fotocatalizadores tienen la capacidad de descomponer diversos óxidos y compuestos orgánicos contaminantes que plantean problemas tanto para la salud como para el medio ambiente.

El mecanismo de descomposición que rige este proceso implica la generación de radicales debido a la irradiación del fotocatalizador, seguida de la conversión de los contaminantes en compuestos inocuos (Loh et al., 2018; Haque & Chen, 2019). El NO_3^-, por ejemplo, es inofensivo en

pequeñas cantidades y puede ser eliminado mediante la acción de gotas de agua. El primer informe sobre la descomposición fotoquímica de contaminantes utilizando TiO2 se publicó en 1977, y demostró la capacidad de este proceso para transformar el cianuro presente en aguas residuales en un producto inofensivo (Bogue, 2014).

En los últimos años, la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos del aire mediante procesos fotoquímicos ha sido ampliamente explorada debido al potencial de los fotocatalizadores para purificar el aire en entornos como oficinas, edificios, hogares, escuelas, etc. (Ibrahim et al., 2019). La degradación fotoquímica de los NOx se ha convertido en una alternativa viable entre las tecnologías utilizadas para la remediación de estos contaminantes (Haque & Chen, 2019; Han et al., 2017), respaldada por una cantidad significativa de investigaciones científicas (Hanus & Harris, 2013; Zhong & Haghighat, 2015; Li et al., 2017; Navarrete & Peñafiel, 2019) y por el continuo crecimiento de productos comerciales disponibles en el mercado, en su mayoría cementos y pinturas que contienen TiO2 (Loh et al., 2018; Wang, et al., 2018).

Todas estas investigaciones descritas nos ayudan con la nueva investigación para responder a la interrogantes principal: ¿Cuál es la influencia del dióxido de titanio en el concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote?; y las interrogantes específicas: 1) ¿Cuál es la influencia del dióxido de titanio en la permeabilidad del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote?; 2) ¿Cuál es la influencia del dióxido de titanio en la resistencia a la compresión del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote?; 3) ¿Cuál es la influencia del dióxido de titanio en las propiedades foto catalíticas del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote?. Se espera que exista diferencia significativa del dióxido de titanio en el concreto permeable con efecto fotocatalizador.

Todas estas investigaciones descritas nos ayudan con la nueva investigación para responder a la interrogantes principal: ¿Cuál es la influencia del dióxido de titanio en el concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote?; y las interrogantes específicas: 1) ¿Cuál es la influencia del dióxido de titanio en la permeabilidad del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote?; 2) ¿Cuál es la influencia del dióxido de titanio en la resistencia a la compresión del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo

Chimbote?; 3) ¿Cuál es la influencia del dióxido de titanio en las propiedades foto catalíticas del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote?. Se espera que exista diferencia significativa del dióxido de titanio en el concreto permeable con efecto fotocatalizador.

METODOLOGÍA

Se emplearon métodos experimentales y preexperimentales para analizar el impacto del dióxido de titanio en el concreto permeable con efecto fotocatalizador. Esto incluyó mediciones previas de la variable dependiente (pretest), la introducción de la variable independiente (dióxido de titanio) en las muestras y mediciones posteriores de la variable dependiente (post test). La población de estudio consistió en 63 probetas cilíndricas de 15 x 30 cm y 42 probetas de 9.5 x 15 cm de concreto permeable. Se realizaron tres réplicas para cada diseño, considerando diferentes niveles de dióxido de titanio y su estado en el concreto.

Tabla 1. Muestra

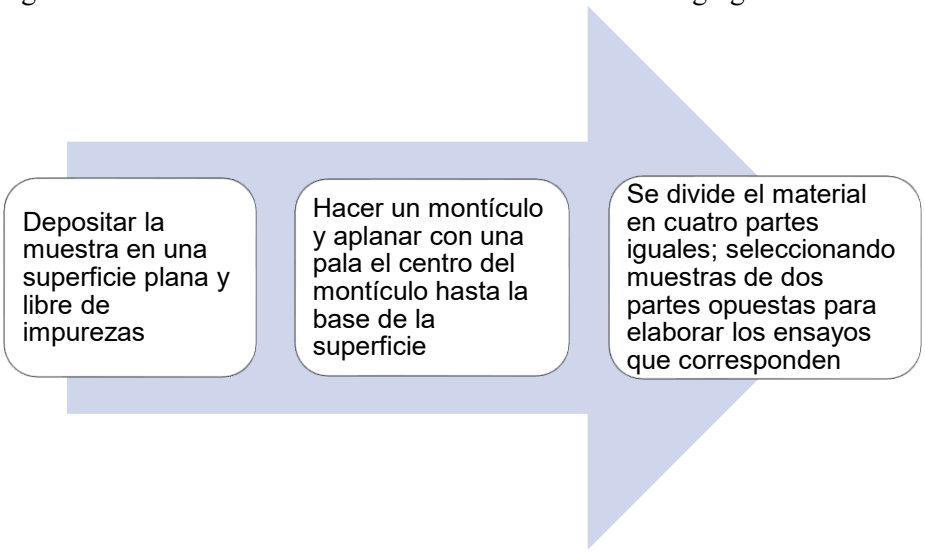
Diseño	Estado del TiO_2	Dióxido de titanio en %	Réplicas	Variables de Respuesta
1	Sin TiO_2	Patrón	9	Resistencia a la compresión, permeabilidad y efecto fotocatalizador
2	TiO_2 en fase rutilo	1.5	9	
3		3.5	9	
4		5.5	9	
6	TiO_2 en fase Anatasa	1.5	9	
7		3.5	9	
8		5.5	9	

Para poder recolectar información se requirieron procedimientos experimentales que permitieron obtener datos reales y fiables prestos a ser analizados, tales como: método Marshall, límite líquido, límite e índice plástico, análisis granulométrico por tamizado, absorción del agregado y peso específico grueso, equivalente de arena, absorción del agregado y peso específico fino, porcentaje de caras fracturadas, contenido de sales solubles agregados, abrasión de los ángeles al riego de liga de los agregados y porcentaje de partículas chatas y alargadas. Lo anterior de acuerdo con las siguientes actividades:

Extracción y Preparación de Muestras (ASTM D 75 / NTP 400.010): Esto se hace con el objetivo de obtener muestras que indiquen la naturaleza y las condiciones del material que representan. La investigación preliminar y el muestreo de las posibles canteras de áridos es muy importante, ya que determina la conveniencia de su uso.

Reducción de las Muestras de Agregado a Tamaño de Ensayo (ASTM C 702/ NTP 400.043): proporciona los procedimientos necesarios para reducir la gran muestra de campo, tanto de áridos gruesos como de finos, para poder realizar las pruebas de caracterización y clasificación de los materiales de forma que la pequeña muestra sea representativa de la muestra total.

Figura 1. Procedimiento de reducción de las Muestras de Agregado a Tamaño de Ensayo



Se utilizaron varios métodos de ensayo y normas para evaluar diferentes propiedades del concreto y los agregados:

Contenido de Humedad Total Evaporable de Agregados por Secado (ASTM C 566 / NTP 339.185): Este procedimiento tiene como objetivo determinar la humedad total que se puede evaporar de los agregados en su estado natural, sin importar el tipo de mineral.

Determinación del Contenido de Aire en la Mezcla de Concreto por Presión (ASTM C 231 / NTP 339.083): Para medir el contenido de aire en la mezcla de concreto, se utilizó un método de presión. Se llenó un recipiente con concreto en capas, eliminando las burbujas de aire mediante golpes suaves con un mazo de goma.

Determinación de la Granulometría de los Agregados Fino, Grueso y Global (ASTM C 136 / NTP 400.012): Este ensayo identifica y clasifica las partículas de los agregados según su tamaño. Los resultados se utilizan para el diseño y control de las mezclas de concreto.

Determinación de la Capacidad de Retención de Partículas Contaminantes: Este ensayo implicó la creación de un ambiente controlado donde se agregó óxido de nitrógeno a las muestras experimentales para evaluar su capacidad de retener partículas contaminantes, comparándolas con muestras patrón.

Determinación de la Densidad, Rendimiento y Contenido de Aire del Concreto por Método Gravimétrico (ASTM C 138 / NTP 339.046): Este método establece los pasos para calcular la densidad del concreto fresco por metro cúbico de masa de concreto mediante dosificación de la mezcla.

Determinación de la Propiedad Autolimpiante: Se evaluó la capacidad de las muestras de concreto experimental para eliminar contaminantes, como el óxido de nitrógeno, mediante la exposición a la luz solar y se comparó con las muestras patrón.

Determinación de la Resistencia a la Compresión del Concreto en Muestras Cilíndricas (ASTM C 39 / NTP 339.034): Las muestras de concreto se retiraron de la zona de curado y se sometieron a pruebas de resistencia a la compresión a los 28 días de edad.

Determinación de la Temperatura de las Mezclas de Concreto (ASTM C 1064 / NTP 339.184): Se midió la temperatura de las muestras de concreto utilizando un medidor de temperatura.

Determinación de Materiales que Pasan por el Tamiz de 75 um (ASTM C 117 / NTP 400.018): Se secaron y pesaron los materiales que pasaron por el tamiz de 75 um (N.º 200) después de un proceso de lavado.

Determinación del Asentamiento del Concreto de Cemento Portland (ASTM C 143 / NTP 339.035): Se midió el asentamiento de las mezclas de concreto utilizando el ensayo de cono de Abrams.

. Determinación del Nivel de Decoloración Mediante Aplicación de Rodamina: En este ensayo, se aplicó rodamina a las probetas de concreto y se expusieron a la luz solar para evaluar si desarrollaban un proceso fotocatalítico, comparándolo con las muestras patrón.

Determinación del Tiempo de Fraguado de Mezclas por Medio de la Resistencia a la Penetración (ASTM C 403 / NTP 339.082): Se obtuvo una muestra de mortero y se midió su resistencia a la penetración utilizando agujas estándar de diferentes tamaños.

Determinación de la Masa por Unidad de Volumen o Densidad de los Agregados (ASTM C 29 / NTP 400.017): Este ensayo proporciona pautas para obtener el peso unitario en estado suelto y compactado de los agregados.

Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Campo (ASTM C 31 / NTP 339.033): Se detallan los procedimientos para preparar y curar especímenes cilíndricos de concreto en campo.

. Muestreo de Concreto Recién Mezclado (ASTM C 172 / NTP 339.036): Esta norma establece que las muestras de concreto para determinar la resistencia deben ser de al menos 28 litros mediante el muestreo en dos o más porciones.

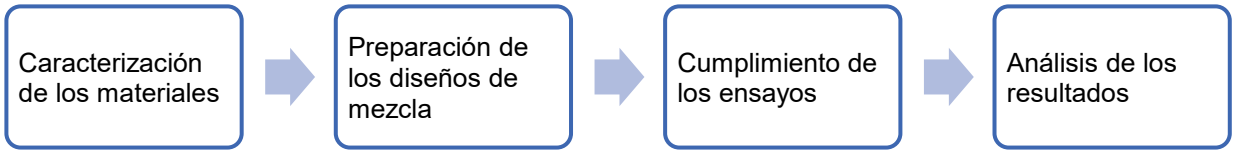
. Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso (ASTM C 127 / NTP 400.021): Este ensayo mide el peso específico y la absorción del agregado grueso después de que este se haya empapado durante al menos 24 horas.

. Refrentado de Testigos Cilíndricos de Concreto (ASTM C 617 / NTP 339.037): Se prepararon y acondicionaron las muestras que se ensayarían posteriormente mediante un procedimiento que involucra el uso de azufre.

. Para facilitar el análisis de datos, se emplearon programas especializados como SPSS, que permiten la recolección y el análisis de datos para resolver problemas de investigación, como el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey para evaluar las diferencias significativas entre grupos. Estos análisis se realizaron con un nivel de significancia del 95%.

La misma se cumplió de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Figura 2. Procedimiento de investigación



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia del dióxido de titanio en la permeabilidad del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote.

Tabla 2.
Diseños de mezcla

	Relación A/C	Contenido de vacíos	Humedad	Absorción	P.E (kg/m^3)	Volumen (m^3)	Diseño seco (kg)	Diseño húmedo (kg)
patrón	0.27	20%	0.2%	0.6%	2850	0.55	1568	1571
1.5% rutilo	0.27	20%	0.2%	0.6%	2850	0.56	1568	1571
3.5% rutilo	0.27	20%	0.2%	0.6%	2850	0.57	1568	1571
5.5% rutilo	0.27	20%	0.2%	0.6%	2850	0.58	1568	1571
1.5% anatasa	0.27	20%	0.2%	0.6%	2850	0.59	1568	1571
3.5% anatasa	0.27	20%	0.2%	0.6%	2850	0.60	1568	1571
5.5% anatasa	0.27	20%	0.2%	0.6%	2850	0.61	1568	1571

La relación agua/cemento (a/c) no sólo afecta a la resistencia a la compresión del concreto y el mortero, sino también a su permeabilidad (Di Paola et al., 2012). Pequeños cambios en esta relación (a/c) pueden representar diferencias significativas en la permeabilidad, por lo que a menor a/c menor permeabilidad. La relación agua/cemento (a/c) se define como el peso de agua presente por unidad de peso de cemento (Kawahara et al., 2002).

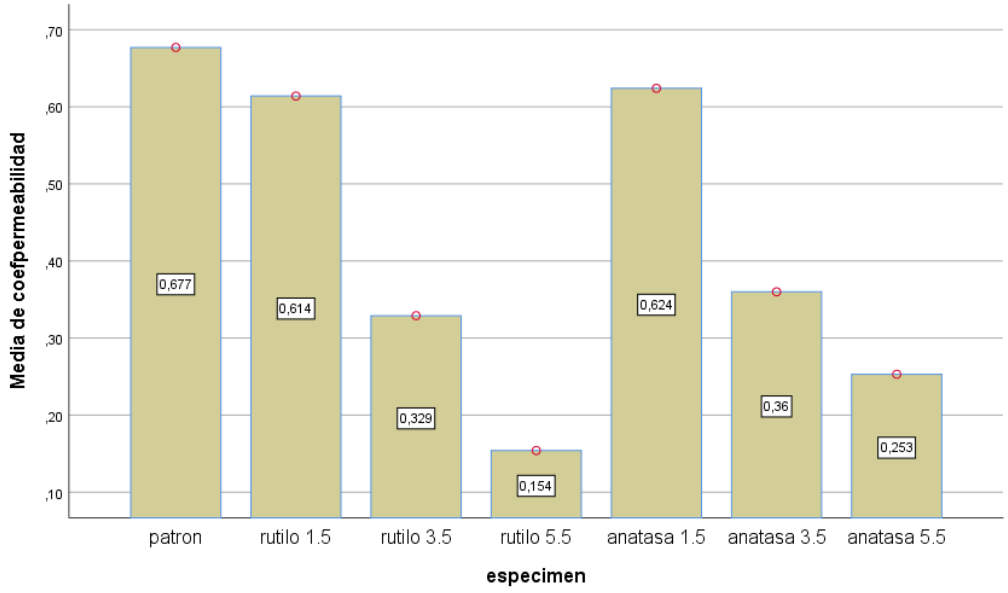
Tabla 3.Permeabilidad del concreto permeable

	Longitud de probeta	Carga hidráulica	Tiempo	Altura de descarga	Volumen de descarga	Coeficiente de permeabilidad
patrón	12,48	16,85	15,95	11,75	779,40	6,77E-01
1,5% rutilo	15,47	14,05	17,03	9,50	630,15	6,14E-01
3,5% rutilo	15,47	12,00	39,42	10,05	666,63	3,29E-01
5,5% rutilo	15,48	12,50	84,30	10,50	696,48	1,54E-01
1,5% anatasa	15,46	12,00	20,64	10,00	663,32	6,24E-01

	Longitud de probeta	Carga hidráulica	Tiempo	Altura de descarga	Volumen de descarga	Coeficiente de permeabilidad
3,5% anatasa	15,47	12,00	35,81	10,00	663,32	3,60E-01
5,5% anatasa	15,48	12,00	51,01	10,00	663,32	2,53E-01

La muestra patrón presenta el mayor coeficiente de permeabilidad, mientras que en los porcentajes de adición de TiO_2 (1,5%; 3,5% y 5,5% respectivamente) no se observa ningún cambio importante en los resultados del paso del agua, con relación a las fases de anatasa y rutilo. Teniendo en cuenta que el TiO_2 es un material que absorbe naturalmente la humedad, este pigmento no mejora ni empeora su permeabilidad (Jalvo et al., 2017). Aunque hubo un aumento de la penetración de agua conforme el porcentaje de adición de TiO_2, las mediciones no difirieron significativamente.

Figura 3.Media de coeficiente de permeabilidad vs los especímenes ensayados



Se puede observar que el mayor coeficiente de permeabilidad lo presento la muestra patrón, sin embargo, los especímenes con 1,5% de TiO_2 en fase anatasa presentaron buenos índice de coeficiente de permeabilidad.

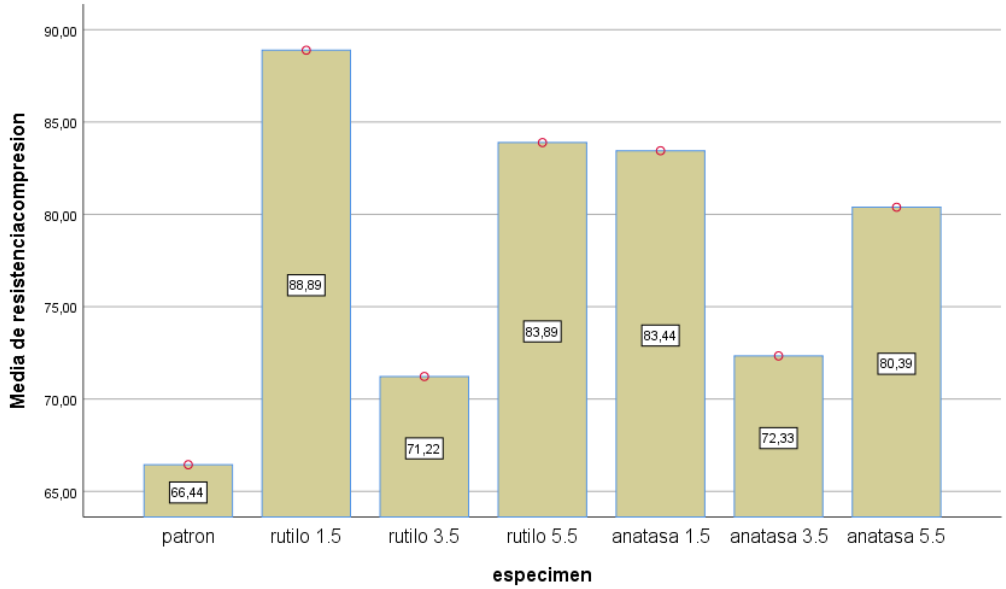
Influencia del dióxido de titanio en la resistencia a la compresión del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote.

Tabla 4. Resistencia a la compresión

	patrón			1.5% rutilo			3.5% rutilo			5.5% rutilo			1.5% anatasa			3.5% anatasa			5.5% anatasa		
edad	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Carga máxima (kN)	122	130	138	101	104	113	102	126	100	218	167	155	113	103	146	140	194	164	171	186	121
	119	99	129	84	111	97	209	131	139	151	202	156	165	131	140	119	162	174	135	176	152
	130	138	116	82	88	78	94	57	149	201	229	156	137	101	161	153	123	184	87	173	146
Resistencia a la compresión (kg/cm2)	72	74	80	57	59	68	58	71	59	125	96	89	65	59	82	80	112	92	99	106	69
	70	57	74	48	63	55	62	74	78	87	115	90	95	76	78	68	94	98	76	101	88
	79	79	68	45	50	44	57	33	83	115	130	94	79	58	90	87	71	104	50	100	83

La adición de dióxido de titanio al concreto afecta a la resistencia, ya que su proporción aumenta, pero debido a los ensayos realizados, se observa que en el rango de adición del 1,5% al 3,5% de TiO_2 en fase rutilo y 1,5% en fase anatasa, el diseño de la resistencia a la compresión de la mezcla la reduce, sin embargo, el diseño cumple con los requisitos de resistencia según la NTP. Además, se sabe que, en los primeros días de fraguado, el concreto adicionado con TiO_2 acelera el endurecimiento del concreto y le permite alcanzar un mayor nivel de resistencia. Al respecto, una gran cantidad de TiO_2 puede afectar a la hidratación del cemento y, por tanto, a la resistencia a la compresión (Amagua Sangoquiza, 2021). Por lo tanto, debe establecerse el equilibrio de la cantidad estándar de TiO_2, que garantiza los aspectos positivos de las propiedades mecánicas (Kabadi, 2020).

Figura 4. Media de resistencia a la compresión vs los especímenes ensayados



Se puede observar que la mayor resistencia a la compresión lo presento la muestra con 1.5% de TiO_2 en fase rutilo, sin embargo, los especímenes con 5,5% de TiO_2 en fase rutilo presentaron buenos índice de resistencia a la compresión.

Influencia del dióxido de titanio en las propiedades foto catalíticas del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote.

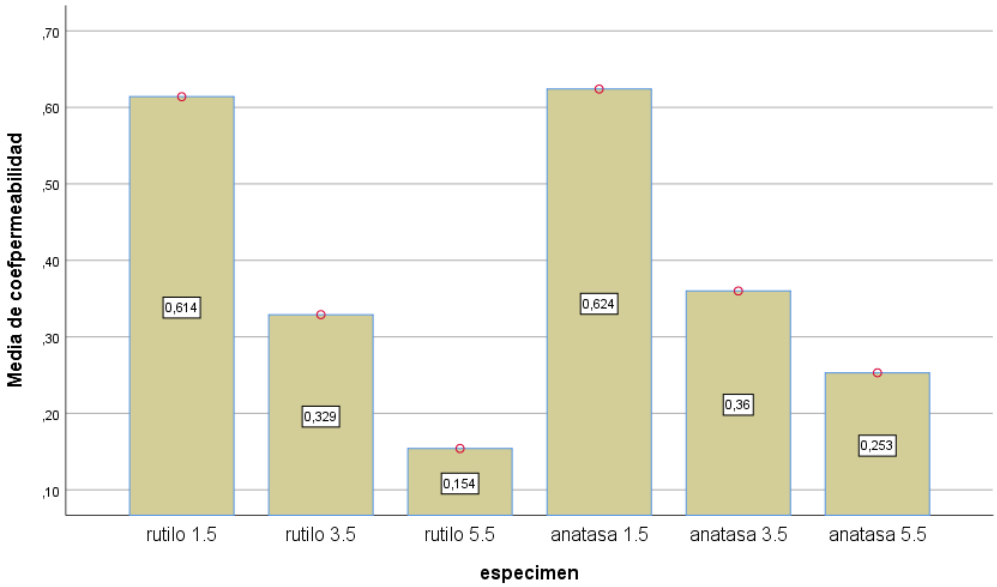
Tabla 5 Propiedades foto catalíticas (% de degradación vs tiempo)

Tiempo (horas)	Anatasa 1.5%	Rutilio 1.5%	Anatasa 3.5%	Rutilio 3.5%	Anatasa 5.5%	Rutilio 5.5%
0	4	4	4	4	4	4
1	4	4	4	4	4	4
2	3,5	3,5	3,5	3,5	3	3
3	3	3	3	3	3	3
4	2,5	2,5	2,5	2,5	2	2
5	2	2	2	2	2	2
6	1,5	1,5	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0

el valor 4 significa el color más intenso de rodamina por eso todas las probetas inician con ese valor, al pasar del tiempo se va degradando, ya que esta se ve afectada también con el tiempo, a mayor tiempo menor degradación, asimismo, a medida que aumenta el porcentaje de dióxido de titanio en el concreto, aumentan sus propiedades foto catalíticas, y las muestras con un 3,5% de adición muestran una mayor degradación del color. Los concretos con propiedades foto catalíticas

deben añadirse con dióxido de titanio TiO_2, preferiblemente un 3,5% en la fase de rutilo, ya que es más comercial y más fácil, esta proporción permite que el concreto alcance la resistencia requerida (Bellardita et al., 2018).

Figura 5. Media de propiedades foto catalíticas vs los especímenes ensayados



Se puede observar que la mayor propiedades foto catalíticas lo presentaron los especímenes con 1,5% de TiO_2 en fase anatasa poseyendo buenos índice de coeficiente de permeabilidad.

Contrastación de hipótesis

Para la evaluación estadística se utilizó ± (DS) desviación estándar (ANOVA), cuyo análisis de varianza se trabajó con 0,05% de significancia; al encontrar diferencia significativa (p <0,05) se procedió a realizar la prueba de comparación de medias de Tukey, todas las muestras individualmente (n=3) se analizaron por triplicado.

Tabla 6. Prueba homogeneidad de varianzas

		Sig.
Coef permeabilidad	Se basa en la media	1,000
Resistencia compresión	Se basa en la media	,027
Foto catalíticas	Se basa en la media	,061

Para resistencia a la compresión Como p< 0,05 no hay homogeneidad de varianza, por lo tanto, se interpreta Wells

Para propiedades foto catalíticas Como p> 0,05 hay homogeneidad de varianza, por lo tanto, se interpreta ANOVA

Para coeficiente de permeabilidad Como p> 0,05 hay homogeneidad de varianza, por lo tanto, se interpreta ANOVA

Tabla 7.ANOVA

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Coef permeabilidad	Entre grupos	,765	6	,128	1275,534	,000
resistencia compresión	Entre grupos	1200,465	6	200,078	5,892	,003
foto catalíticas	Entre grupos	12,792	6	2,132	119,389	,000

Como cuando sig. < 0,05 significa que hay diferencia entre los grupos, es decir los grupos no se comportan igual.

Por lo tanto: Existe diferencia significativa del dióxido de titanio en la permeabilidad del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote.

Existe diferencia significativa del dióxido de titanio en la resistencia compresión del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote.

Por lo tanto: Existe diferencia significativa del dióxido de titanio en las propiedades foto catalíticas del concreto permeable con efecto fotocatalizador, distrito de nuevo Chimbote

CONCLUSIONES

Se determinó que los especímenes que contenían un 1,5% de TiO2 en fase anatasa exhibieron una mejora significativa en el coeficiente de permeabilidad en comparación con la muestra estándar. Además, se observó que la mayor resistencia a la compresión se encontraba en la muestra con un 1,5% de TiO2 en fase rutilo, seguida de cerca por los especímenes con un 5,5% de TiO2 en fase rutilo y un 1,5% en fase anatasa, que también mostraron una buena resistencia a la compresión.

Asimismo, se determinó que los especímenos con un 1,5% de TiO2 en fase anatasa exhibieron las propiedades fotocatalíticas más destacadas.

En conclusión, se recomienda una dosificación del 1,5% de TiO2 en fase anatasa, ya que proporciona un coeficiente de permeabilidad satisfactorio, mejoras notables en la resistencia a la compresión del concreto y propiedades fotocatalíticas sobresalientes. Además, se estableció que existe una diferencia significativa en la permeabilidad, resistencia a la compresión y propiedades fotocatalíticas del concreto permeable con efecto fotocatalizador en el distrito de Nuevo Chimbote. Esto sugiere que los grupos de muestras no se comportan de la misma manera y que la probabilidad de que no haya una diferencia significativa es prácticamente nula en todos los casos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Addamo, M., Augugliaro, V., Bellardita, M., Di Paola, A., Loddo, V., Palmisano, G., Palmisano, L., & Yurdakal, S. (2008). Environmentally Friendly Photocatalytic Oxidation of Aromatic Alcohol to Aldehyde in Aqueous Suspension of Brookite TiO2. Catalysis Letters, 126(1), 58-62. https://doi.org/10.1007/s10562-008-9596-0

Amagua Sangoquiza, J. A. (2021). Diseño de un pavimento asfáltico drenante basado en un material de protección ambiental de dióxido de titanio (TiO2), aplicado en el corredor vial de alto tráfico, sector El Trébol, cantón Quito. http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/24119

Banerjee, S., Dionysiou, D. D., & Pillai, S. C. (2015). Self-cleaning applications of TiO2 by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis. Applied Catalysis B: Environmental, 176-177, 396-428. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.03.058

Bellardita, M., Di Paola, A., Megna, B., & Palmisano, L. (2018). Determination of the crystallinity of TiO2 photocatalysts. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 367, 312-320. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.08.042

Bogue, R. (2014). Smart materials: A review of capabilities and applications. Assembly Automation, 34(1), 16-22. https://doi.org/10.1108/AA-10-2013-094

Cassar, L., Beeldens, A., Pimpinelli, N., & Guerrini, G. L. (2007). Photocatalysis of cementitious materials. International RILEM Symposium on Photocatalysis, Environment and

Construction Materials, 131-145.

Cassar, L., Pepe, C., Tognon, G., Guerrini, G. L., & Amadelli, R. (2003). White cement for architectural concrete, possessing photocatalytic properties.

Chen, J., & Poon, C. (2009). Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. Building and Environment, 44(9), 1899-1906. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.002

Chen, S., & Cao, G. (2006). Study on the photocatalytic oxidation of NO2– ions using TiO2 beads as a photocatalyst. Desalination, 194(1), 127-134. https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.11.006

Chen, X., & Mao, S. S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: Synthesis, properties, modifications, and applications. Chemical Reviews, 107(7), 2891-2959. https://doi.org/10.1021/cr0500535

Chung, D. D. L. (2000). Cement-matrix composites for smart structures. Smart Materials and Structures, 9(4), 389-401. https://doi.org/10.1088/0964-1726/9/4/302

Chung, D. D. L. (2002). Composites get smart. Materials Today, 5(1), 30-35. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(02)05140-4

Di Paola, A., García-López, E., Marcì, G., & Palmisano, L. (2012). A survey of photocatalytic materials for environmental remediation. Journal of Hazardous Materials, 211-212, 3-29. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.050

Etxeberria, M., Guo, M.-Z., Maury-Ramírez, A., & Poon, C. S. (2017). Influence of Dust and Oil Accumulation on Effectiveness of Photocatalytic Concrete Surfaces. Journal of Environmental Engineering, 143(9), 04017040. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001239

Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. Nature, 238(5358), 37-38. https://doi.org/10.1038/238037a0

Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 1(1), 1-21. https://doi.org/10.1016/S1389-5567(00)00002-2

Hamidi, F., & Aslani, F. (2019a). Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges. Construction and Building Materials, 218, 582-609. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.140

Hamidi, F., & Aslani, F. (2019b). TiO2-based Photocatalytic Cementitious Composites: Materials, Properties, Influential Parameters, and Assessment Techniques. Nanomaterials, 9(10), 1444. https://doi.org/10.3390/nano9101444

Han, B., Li, Z., Zhang, L., Zeng, S., Yu, X., Han, B., & Ou, J. (2017). Reactive powder concrete reinforced with nano SiO2-coated TiO2. Construction and Building Materials, 148, 104-112. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.065

Hanus, M. J., & Harris, A. T. (2013). Nanotechnology innovations for the construction industry. Progress in Materials Science, 58(7), 1056-1102. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.04.001

Haque, M. A., & Chen, B. (2019). Research progresses on magnesium phosphate cement: A review. Construction and Building Materials, 211, 885-898. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.304

Herrmann, J.-M. (2005). Heterogeneous photocatalysis: State of the art and present applications In honor of Pr. R.L. Burwell Jr. (1912–2003), Former Head of Ipatieff Laboratories, Northwestern University, Evanston (Ill). Topics in Catalysis, 34(1), 49-65. https://doi.org/10.1007/s11244-005-3788-2

Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. Chemical Reviews, 95(1), 69-96. https://doi.org/10.1021/cr00033a004

Ibrahim, M. H., El-Naas, M. H., Benamor, A., Al-Sobhi, S. S., & Zhang, Z. (2019). Carbon Mineralization by Reaction with Steel-Making Waste: A Review. Processes, 7(2), 115. https://doi.org/10.3390/pr7020115

Jalvo, B., Faraldos, M., Bahamonde, A., & Rosal, R. (2017). Antimicrobial and antibiofilm efficacy of self-cleaning surfaces functionalized by TiO2 photocatalytic nanoparticles against Staphylococcus aureus and Pseudomonas putida. Journal of Hazardous Materials,

340, 160-170. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.07.005

Jiang, S., Zhou, D., Zhang, L., Ouyang, J., Yu, X., Cui, X., & Han, B. (2018). Comparison of compressive strength and electrical resistivity of cementitious composites with different nano- and micro-fillers. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18(1), 60-68. https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.05.010

Kabadi, C. (2020). Titanium Dioxide-Potential use in Permeable Pavement. International Journal of Engineering Research & Technology, 9(5). https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS050173

Kawahara, T., Konishi, Y., Tada, H., Tohge, N., Nishii, J., & Ito, S. (2002). A patterned TiO(2)(anatase)/TiO(2)(rutile) bilayer-type photocatalyst: Effect of the anatase/rutile junction on the photocatalytic activity. Angewandte Chemie (International Ed. in English), 41(15), 2811-2813. https://doi.org/10.1002/1521-3773(20020802)41:15<2811::AID-ANIE2811>3.0.CO;2-#

Kurihara, R., & Maruyama, I. (2016). INFLUENCES OF NANO-TiO2 PARTICLES ON ALTERATION OF MICROSTRUCTURE OF HARDENED CEMENT. Proceedings of the Japan Concrete Institute, 38, 219-224.

Li, Z., Ding, S., Yu, X., Han, B., & Ou, J. (2018). Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: A review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 111, 115-137. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.05.019

Li, Z., Han, B., Yu, X., Dong, S., Zhang, L., Dong, X., & Ou, J. (2017). Effect of nano-titanium dioxide on mechanical and electrical properties and microstructure of reactive powder concrete. Materials Research Express, 4(9), 095008. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa87db

Loh, K., Gaylarde, C. C., & Shirakawa, M. A. (2018). Photocatalytic activity of ZnO and TiO2 ‘nanoparticles’ for use in cement mixes. Construction and Building Materials, 167, 853-859. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.103

Macphee, D. E., & Folli, A. (2016). Photocatalytic concretes—The interface between photocatalysis and cement chemistry. Cement and Concrete Research, 85, 48-54.

https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.03.007

Nath, R. K., Zain, M. F. M., & Jamil, M. (2016). An environment-friendly solution for indoor air purification by using renewable photocatalysts in concrete: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 62, 1184-1194. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.018

Nath, R., .Zain, M., & Kadhum, A. (2012). Photocatalysis- a novel approach for solving various environmental and disinfection problems: A Brief Review. Journal of Applied Sciences Research, 8, 4147-4155.

Navarrete Angulo, S. M., & Peñafiel Carpio, F. J. (2019). Estudio de las características del fotocatalizador dióxido de titanio en concretos, según la norma UNI 11259. http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/20195

Pacheco-Torgal, F., Diamanti, M. V., Nazari, A., Goran-Granqvist, C., Pruna, A., & Amirkhanian, S. (2018). Nanotechnology in Eco-efficient Construction: Materials, Processes and Applications. Woodhead Publishing.

Palmisano, G., Yurdakal, S., Augugliaro, V., Loddo, V., & Palmisano, L. (2007). Photocatalytic Selective Oxidation of 4-Methoxybenzyl Alcohol to Aldehyde in Aqueous Suspension of Home-Prepared Titanium Dioxide Catalyst. Advanced Synthesis & Catalysis, 349(6), 964-970. https://doi.org/10.1002/adsc.200600435

Palmisano, L., Augugliaro, V., Bellardita, M., Di Paola, A., García López, E., Loddo, V., Marcì, G., Palmisano, G., & Yurdakal, S. (2011). Titania photocatalysts for selective oxidations in water. ChemSusChem, 4(10), 1431-1438. https://doi.org/10.1002/cssc.201100196

Reches, Y. (2018). Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. Construction and Building Materials, 175, 483-495. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.214

Rhee, I., Lee, J.-S., Kim, J. B., & Kim, J.-H. (2018). Nitrogen Oxides Mitigation Efficiency of Cementitious Materials Incorporated with TiO2. Materials, 11(6), 877. https://doi.org/10.3390/ma11060877

Salman, M. M., Eweed, K. M., & Hameed, A. M. (2016). Influence of partial replacement TiO2 nanoparticles on the compressive and flexural strength of ordinary cement mortar. Al-

Nahrain Journal for Engineering Sciences, 19(2), 265-270. https://nahje.com/index.php/main/article/view/20

Segura Montoya, D. J., & Camelo Manzanares, D. M. (2019). Evaluación de las propiedades foto catalíticas de prefabricados para obras de infraestructura vial en concreto adicionado con dióxido de titanio (TIO2) [Tesis]. http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/5759

Sikora, P., Augustyniak, A., Cendrowski, K., Nawrotek, P., & Mijowska, E. (2018). Antimicrobial Activity of Al2O3, CuO, Fe3O4, and ZnO Nanoparticles in Scope of Their Further Application in Cement-Based Building Materials. Nanomaterials, 8(4), 212. https://doi.org/10.3390/nano8040212

Teoh, W. Y., Scott, J. A., & Amal, R. (2012). Progress in Heterogeneous Photocatalysis: From Classical Radical Chemistry to Engineering Nanomaterials and Solar Reactors. The Journal of Physical Chemistry Letters, 3(5), 629-639. https://doi.org/10.1021/jz3000646

Trujillo, M., & Ossa, A. (2019, noviembre 18). Resistencia al daño inducido por humedad en pavimentos purificadores de aire. https://doi.org/10.3233/STAL190218

Tsai, S.-J., & Cheng, S. (1997). Effect of TiO2 crystalline structure in photocatalytic degradation of phenolic contaminants. Catalysis Today, 33(1), 227-237. https://doi.org/10.1016/S0920-5861(96)00152-6

Vásquez Espinoza, M. A. A. (2016). Influencia del fotocatalizador dióxido de titanio en la propiedad autolimpiable del concreto f'c=210 kg/cm2. Universidad Nacional de Cajamarca. http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1296

Wang, D., Zhang, W., Ruan, Y., Yu, X., & Han, B. (2018). Enhancements and mechanisms of nanoparticles on wear resistance and chloride penetration resistance of reactive powder concrete. Construction and Building Materials, 189, 487-497. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.041

Wang, D., Zheng, Q., Ouyang, J., Yu, X., & Han, B. (2018). Influences of curing period on mechanical properties of reactive powder concrete incorporating nanoparticles. Materials Research Express, 6(2), 025023. https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaed8b

Wrighton, M. S., Ellis, A. B., Wolczanski, P. T., Morse, D. L., Abrahamson, H. B., & Ginley, D. S. (1976). Strontium titanate photoelectrodes. Efficient photoassisted electrolysis of water at zero applied potential. Journal of the American Chemical Society, 98(10), 2774-2779. https://doi.org/10.1021/ja00426a017

Yang, L., Hakki, A., Wang, F., & Macphee, D. E. (2018). Photocatalyst efficiencies in concrete technology: The effect of photocatalyst placement. Applied Catalysis B: Environmental, 222, 200-208. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.10.013

Yang, L. Y., Jia, Z. J., Zhang, Y. M., & Dai, J. G. (2015). Effects of nano-TiO2 on strength, shrinkage and microstructure of alkali activated slag pastes. Cement and Concrete Composites, 57, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.009

Zhang, R., Cheng, X., Hou, P., & Ye, Z. (2015). Influences of nano-TiO2 on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage. Construction and Building Materials, 81, 35-41. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.003

Zhong, L., & Haghighat, F. (2015). Photocatalytic air cleaners and materials technologies – Abilities and limitations. Building and Environment, 91, 191-203. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.01.033